

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PALERMO

DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA

DOTTORATO DI RICERCA IN ARCHITETTURA, ARTI E PIANIFICAZIONE

CURRICULUM IN PROGETTAZIONE SOSTENIBILE DELL'ARCHITETTURA E DESIGN; APPROCCIO HUMAN CENTERED

SSD CEAR/08 A - ARCHITETTURA TECNICA

XXXVIII CICLO



**DA
RCH**
**DA
AP**

ARCHITETTURA e TECNICA dei GUSCI SOTTILI

Dottorando

Ing. Salvatore Di Maggio

Tutor

Prof.ssa Rossella Corrao

Coordinatore

Prof. Marco Rosario Nobile

Co-tutor

Prof. Giuseppe Giambanco

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PALERMO

DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA

DOTTORATO DI RICERCA IN ARCHITETTURA, ARTI E PIANIFICAZIONE

CURRICULUM IN PROGETTAZIONE SOSTENIBILE DELL'ARCHITETTURA E DESIGN: APPROCCIO HUMAN CENTERED

SSD CEAR08/A – ARCHITETTURA TECNICA

XXXVIII CICLO



**DA
RCH**

**DA
R
AP**

ARCHITETTURA e TECNICA dei GUSCI SOTTILI

Dottorando

Ing. Salvatore Di Maggio

Salvatore Di Maggio

Tutor

Prof.ssa Rossella Corrao

R Corrao

Coordinatore

Prof. Marco Rosario Nobile

Marco Rosario Nobile

Co-tutor

Prof. Giuseppe Giambanco

Giuseppe Giambanco

In copertina

Particolare di *bóveda tabicada* in fase di realizzazione

©2024, Salvatore Di Maggio

*alla memoria
di Calogero, Rosa, Salvatore e Anne Lohre
i miei nonni*

INDICE

INTRODUZIONE	1
PRIMA PARTE - ASPETTI GENERALI	9
I. SPECIFICITÀ DEI GUSCI SOTTILI	11
SINOSSI	13
I.1 DEFINIZIONI	14
I.2 CATALOGAZIONE	17
I.3 RAPPORTI DIMENSIONALI	19
I.4 BIO-ISPIRAZIONE PER IL PROGETTO DI GUSCI SOTTILI	22
I.5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	27
II. ORIGINE E SVILUPPO COSTRUTTIVO	29
SINOSSI	31
II.1 IPOTESI SULLE ORIGINI DI VOLTE E GUSCI SOTTILI	36

II.2 SVILUPPO SPAZIO-TEMPORALE DI VOLTE E	
GUSCI SOTTILI	40
II.3 VOLTE SOTTILI	44
II.3.1 MATERIALI E GEOMETRIE	47
II.3.2 CENTINE E CASSEFORME	53
II.3.3 ELEMENTI E STRATI ALL'ESTRADOSSO DELLE VOLTE	56
II.4 STRUTTURE A GUSCIO SOTTILE	61
II.4.1 GUSCI IN MATTONI SOTTILI	62
II.4.2 GUSCI IN CALCESTRUZZO ARMATO	77
II.4.3 GUSCI PREFABBRICATI	89
II.4.4 I GUSCI DEL XXI SECOLO	105
II.5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	115
SECONDA PARTE – APPROFONDIMENTI	125
III. SPECIFICITA' DELLE VOLTE REALINE	127
SINOSSI	129
III.1 SVILUPPO E DECLINO DELLA TECNICA	
COSTRUTTIVA DELLE VOLTE REALINE	
SICILIANE	130
III.1.1 I MATERIALI	134
III.1.2 LE CENTINE	140
III.2 LA MESSA IN OPERA	143
III.2.1 LA DISPOSIZIONE DEI MATTONI	143
III.2.2 SOLUZIONI DI RINFORZO ALL'ESTRADOSSO	148

III.2.2.1 Rinfianchi e riempimenti	151
III.2.2.2 Frenelli	152
III.2.2.3 Controvoltine	154
III.2.2.4 Nervature	155
III.2.2.5 Doppie controvoltine	157
III.3 ANALISI STRUTTURALE DI UNA VOLTA	
<i>REALINA</i>	158
III.3.1 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	158
III.3.2 RILIEVO E MODELLAZIONE DELLA VOLTA	162
III.3.3 ANALISI STRUTTURALE	165
III.3.4 IMPORTAZIONE DELLA GEOMETRIA	166
III.3.5 ATTRIBUZIONE DELLE PROPRIETA' MECCANICHE	167
III.3.6 ASSEGNAZIONE DEI <i>LAYER</i>	172
III.3.7 CARATTERIZZAZIONE DEGLI ELEMENTI <i>SHELL</i>	
E <i>SOLID</i>	173
III.3.8 GENERAZIONE DELLA <i>MESH</i>	175
III.3.9 RISULTATI DELL'ANALISI	176
III.3.9.1 Deformazione	177
III.3.9.2 Spostamenti	179
III.3.9.3 Tensioni principali sulla superficie	182
III.3.9.4 Tensione sulle superfici inferiore e superiore	185
III.4 OSSERVAZIONI SULLE VOLTE REALINE	189
III.5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	190

IV. GUSCI MODELLATI TRAMITE	
<i>HÄNGEFORM</i>	193
SINOSSI	195
IV.1 IL METODO DELL' <i>HÄNGEFORM</i>	196
IV.1.1 MODELLI FISICI DI ISLER	196
IV.1.2 L' <i>HÄNGEFORM</i>	201
IV.1.3 CARATTERISTICHE DEI GUSCI <i>HÄNGEFORM</i>	205
IV.2 IL PROCESSO DI <i>FORM FINDING</i>	207
IV.2.1 ANALISI STRUTTURALE	208
IV.2.2 STUDIO DEI MODELLI	209
IV.2.3 APPLICAZIONE DI ELEMENTI DI RINFORZO	211
IV.2.4 COSTRUZIONE	214
IV.2.5 MONITORAGGIO	216
IV.3 INDAGINE SUI GUSCI DI HEINZ ISLER	218
IV.3.1 INDIVIDUAZIONE DEI GUSCI RAPPRESENTATIVI	218
IV.3.2 SCHEMATIZZAZIONE DEI GUSCI	222
IV.4 ANALISI STRUTTURALE DI GUSCI	
<i>HÄNGEFORM</i>	223
IV.4.1 IMPORTAZIONE DELLA GEOMETRIA	224
IV.4.2 INDIVIDUAZIONE DEI MATERIALI	225
IV.4.3 DEFINIZIONE DELLO SPESSORE VARIABILE	227
IV.4.4 ASSEGNAZIONE DEI <i>LAYER</i>	228
IV.4.5 CARATTERIZZAZIONE DELL'ELEMENTO <i>SHELL</i>	232

IV.4.6 GENERAZIONE DELLA <i>MESH</i>	233
IV.4.7 RISULTATI DELL'ANALISI	234
IV.4.8 APPLICAZIONE DELLE BARRE DI RINFORZO	235
IV.5 SCHEDA DI APPROFONDIMENTO DEL GUSCIO	
AREA DI SERVIZIO AUTOSTRADALE, DEITINGEN	236
IV.5.1 QUADRO DI SINTESI	236
IV.5.2 PREMESSA	236
IV.5.3 DESCRIZIONE	237
IV.5.4 MODELLAZIONE STRUTTURALE E RISULTATI	254
IV.6 SCHEDA DI APPROFONDIMENTO DEL GUSCIO	
PISCINA DELL'HOTEL SPLENDE ROYAL, LUGANO	268
IV.6.1 QUADRO DI SINTESI	268
IV.6.2 PREMESSA	268
IV.6.3 MODELLAZIONE STRUTTURALE E RISULTATI	273
IV.7 SCHEDA DI APPROFONDIMENTO DEL GUSCIO	
MUSEO DELL'AVIAZIONE, DÜBENDORF	285
IV.7.1 QUADRO DI SINTESI	285
IV.7.2 PREMESSA	285
IV.7.3 DESCRIZIONE	288
IV.7.4 MODELLAZIONE STRUTTURALE E RISULTATI	301
IV.8 CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI	310
IV.9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	313

V. PARZIALIZZAZIONE DI GUSCI SOTTILI	317
SINOSSI	319
V.1 VANTAGGI E SVANTAGGI DEI GUSCI SOTTILI	
PREFABBRICATI	320
V.2 PARZIALIZZAZIONE DEI GUSCI ESISTENTI	322
V.2.1 SCELTA DELLA TIPOLOGIA DI GUSCI DA PARZIALIZZARE	322
V.2.2 CRITERI DI PARZIALIZZAZIONE	325
V.2.3 RISULTATI DELLA PARZIALIZZAZIONE	329
V.2.3.1 Guscio di Deitingen	329
V.2.3.2 Guscio di Dübendorf	335
V.2.3.3 Guscio di Lugano	340
V.3 GUSCI PARAMETRICI	345
V.3.1 GUSCIO-MODELLO PARAMETRICO	345
V.3.2 MODELLAZIONE DEI GUSCI PARAMETRICI DA ANALIZZARE	346
V.3.3 ANALISI STRUTTURALE DEI GUSCI PARAMETRICI	349
V.4 GUSCI PARAMETRICI PARZIALIZZATI	
PREFABBRICATI	353
V.4.1 PARZIALIZZAZIONE DEI GUSCI PARAMETRICI	354
V.4.2 ANALISI DEI GUSCI PARAMETRICI PARZIALIZZATI	356
CONCLUSIONI	363
BIBLIOGRAFIA	369

INTRODUZIONE

La tesi che qui viene presentata ha lo scopo di investigare i gusci sottili nei diversi aspetti che li qualificano, spaziando da quelli più storico-architettonici a quelli più prettamente tecnico-costruttivi, e approfondendone in modo particolare le caratteristiche strutturali e le logiche di funzionamento.

Con “gusci sottili” si intendono delle strutture bidimensionali nelle quali una delle tre dimensioni, lo spessore, risulta drasticamente ridotta rispetto alle altre due, che in tal modo risultano preponderanti. Tale peculiarità conferisce ai gusci un comportamento meccanico che li distingue da elementi massivi o tridimensionali, rendendoli capaci di resistere a sollecitazioni distribuite sfruttando principalmente la loro forma.

Il lavoro è articolato in due parti, all’interno delle quali vengono investigate le specificità delle strutture oggetto di studio, con un approccio che alterna l’analisi teorica alla verifica attraverso modelli e simulazioni.

La prima parte è incentrata sullo stato dell’arte riguardante i gusci sottili. In particolare, oltre alle diverse definizioni riscontrate nella letteratura di riferimento che permettono di caratterizzare un guscio - sia qualitativamente che attraverso il rapporto nume-

rico tra le parti che lo compongono -, viene posto un accento particolare sull'influenza che i gusci naturali hanno esercitato e continuano ad esercitare sui "gusci" costruiti dall'uomo (secondo il cosiddetto "*bio-inspired design*", o "progettazione bio-ispirata"). Un altro tema affrontato all'interno della prima parte riguarda l'origine dei gusci e l'evoluzione dei sistemi costruttivi a essi associati nel corso del tempo, partendo dalle antiche volte sottili in mattoni e gesso, fino ad arrivare ai più recenti gusci a forma "libera" in calcestruzzo armato.

La distinzione tra volte e gusci sottili non si limita solamente al diverso periodo storico in cui si sono sviluppate o ai diversi materiali utilizzati, ma riguarda anche altri fattori quali le geometrie adottate, i sistemi di centinatura, le tecniche di posa in opera e le possibilità dimensionali. Le diverse soluzioni tecnologiche e costruttive dei gusci sottili sono infatti strettamente legate alle forme ottenibili e alle dimensioni raggiungibili: i gusci realizzati nel corso del XX secolo, grazie a nuovi materiali e metodi di calcolo, hanno reso possibili superfici e luci inimmaginabili con le tradizionali tecniche costruttive. Di conseguenza, risultano differenti anche le tipologie di centine e casseforme utilizzate, i metodi di montaggio e le soluzioni che hanno portato, soprattutto nel dopoguerra, allo sviluppo dei primi sistemi di gusci prefabbricati.

L'avvento di nuove tecnologie, nuovi materiali e nuovi strumenti (software parametrici, programmi di calcolo ad alta precisione e tecniche di fabbricazione digitale quali la stampa 3D) ha aperto, dal XXI secolo, nuovi scenari per quanto riguarda la progettazione e realizzazione di gusci sottili. Questi strumenti hanno introdotto parametri progettuali legati alla razionalizzazione dei costi, alla sostenibilità e alla riduzione dell'impatto ambientale,

offrendo ai progettisti nuove opportunità per ottimizzare sia le forme sia i processi esecutivi.

La seconda parte è orientata all'approfondimento architettonico-strutturale di due delle diverse tipologie di gusci sottili analizzati. Tale scelta è legata a diverse considerazioni, riguardanti il periodo storico di sviluppo, i materiali impiegati, le modalità con cui i gusci sono stati progettati e realizzati e il contributo che ciascuna tipologia ha espresso nel campo dell'edilizia.

La prima tipologia studiata è quella delle *volte realine*, realizzate con mattoni sottili in laterizio messi in opera, con pasta di gesso, in due o tre strati sovrapposti. Queste volte rappresentano un significativo - sebbene dimenticato - patrimonio della tradizione costruttiva siciliana e costituiscono un esempio emblematico di come l'impiego sapiente di materiali modesti e tecniche tradizionali possa condurre alla realizzazione di elementi estremamente leggeri, resistenti e funzionali.

La seconda tipologia analizzata riguarda i gusci derivanti dal metodo di determinazione della forma denominato "*hängeform*". In questo caso, la geometria del guscio è ottenuta da una membrana sospesa, successivamente invertita in modo da generare una superficie che resiste quasi esclusivamente a compressione. Gusci di questo tipo, dovuti all'ingegnere svizzero Heinz Isler (1926-2009), rappresentano uno dei massimi esempi moderni di progettazione basata sul comportamento naturale dei materiali e sulla ricerca della forma resistente ideale.

La modellazione e analisi strutturale delle due tipologie esaminate ha permesso non solo di verificarne le capacità portanti, ma anche (in particolare nel caso dei gusci *hängeform*) di compiere un

significativo passo avanti nella comprensione delle modalità attraverso cui è possibile oggi progettare e realizzare gusci sottili mediante strumenti digitali.

In particolare, viene proposto un metodo, finalizzato alla definizione di un sistema costruttivo, derivante dalla parametrizzazione, parzializzazione e successiva prefabbricazione dei gusci ottenuti tramite il metodo *hängeform*. Una volta definiti i sistemi di connessione tra i vari componenti e assemblati gli elementi in cantiere, tale metodo potrebbe consentire di realizzare gusci con forme e dimensioni differenti, superando i vincoli imposti dalle geometrie tradizionali.

Il sistema costruttivo siffatto è stato elaborato per offrire numerosi vantaggi: una maggiore libertà formale, la possibilità di utilizzare quantità ridotte di materiali - grazie a casseforme riutilizzabili o, nel caso della stampa 3D, addirittura assenti - una diminuzione dei costi e dei tempi di produzione, nonché un minore impatto sull'ambiente, come diretta conseguenza dei vantaggi precedenti. Tali benefici potrebbero rendere il sistema competitivo e in linea con le nuove esigenze della progettazione contemporanea, sempre più attenta alla sostenibilità e all'efficienza costruttiva.

Il presente lavoro di ricerca si sviluppa secondo un percorso metodologico articolato, finalizzato a indagare le caratteristiche dei gusci sottili per giungere alla definizione di criteri utili alla loro progettazione e realizzazione.

La tesi si articola in tre fasi, qui di seguito descritte e sintetizzate in Tabella 1:

I fase - Analisi critica dello stato dell'arte (Capp. I e II)

Questa fase fornisce il quadro di riferimento concettuale e tecnico utile come caposaldo per le fasi successive. In particolare, vengono presentate e descritte le categorie, le diverse definizioni e i rapporti dimensionali che permettono di identificare i gusci sottili; le origini e lo sviluppo spazio-temporale dei sistemi a guscio; le geometrie, i materiali, le tecniche costruttive e i sistemi di centinatura.

II fase - Modellazione strutturale (Capp. III e IV)

Questa fase, di carattere applicativo e sperimentale, è incentrata sullo studio di due tipologie di gusci sottili, ritenute tra le più rappresentative: le *volte realine* siciliane e i gusci modellati tramite *hängeform* di Heinz Isler.

Per entrambe vengono effettuate ricostruzioni geometriche e modellazioni 3D, nonché simulazioni strutturali finalizzate alla valutazione del loro comportamento statico, della distribuzione degli sforzi, delle deformazioni.

III fase - Proposta di una metodologia per la definizione di gusci parametrici, parzializzati e prefabbricati (Cap. V)

Viene proposto un metodo per la progettazione e realizzazione di gusci sottili a partire dalla parzializzazione di gusci esistenti, l'analisi della loro risposta strutturale, la modellazione parametrica di un guscio di riferimento e la valutazione di un possibile sistema di prefabbricazione basato su parzializzazione controllata e assemblaggio a secco dei componenti.

	Obiettivo	Contenuti	Esiti
<i>I fase</i> Analisi dello stato dell' arte	Definizione del quadro di riferimento concettuale e tecnico	<ul style="list-style-type: none"> • Analisi della letteratura • Definizioni e classificazioni • Rapporti dimensionali • Evoluzione storica 	<ul style="list-style-type: none"> • Chiarimento concettuale • Criteri di lettura strutturale
<i>II fase</i> Modellazione strutturale	Verifica applicativa e comprensione strutturale	<ul style="list-style-type: none"> • Selezione di casi studio • Modellazione 3D • Simulazioni strutturali • Confronto tra soluzioni 	<ul style="list-style-type: none"> • Comprensione del comportamento statico • Validazione delle tipologie analizzate
<i>III fase</i> Proposta di metodologia	Definizione della metodologia per un sistema costruttivo innovativo	<ul style="list-style-type: none"> • Parzializzazione dei gusci • Modellazione parametrica • Verifica strutturale 	<ul style="list-style-type: none"> • Ipotesi di sistema costruttivo ottenuto da parametrizzazione, parzializzazione e prefabbricazione

Tabella 1. Quadro metodologico della ricerca: articolazione delle fasi, obiettivi, contenuti ed esiti.

PRIMA PARTE

ASPETTI GENERALI

I.
SPECIFICITA'
DEI GUSCI SOTTILI

SINOSSI

Nel capitolo vengono analizzate le caratteristiche dei gusci sottili.

Una prima osservazione che è utile rimarcare riguarda la distinzione tra volte sottili e gusci sottili, appartenenti entrambi alla macrocategoria dei gusci. In generale, le volte sottili differiscono dai gusci sottili per alcuni aspetti, ad esempio la forma, i rapporti dimensionali tra le parti, i materiali.

Le definizioni individuate in letteratura riguardanti i gusci, sebbene convergano tutte nell'accentuare, come caratteristica prevalente, la ridotta misura dello spessore rispetto alle altre dimensioni, offrono tuttavia degli spunti di riflessione interessanti in relazione al loro comportamento strutturale ed al rapporto con i gusci presenti in Natura.

Il richiamo alla Natura e agli elementi di cui essa si compone è un tema ricorrente, spesso intrinseco, nel processo di progettazione e costruzione dei gusci sottili. Lo stretto legame tra gusci creati dall'uomo e gusci naturali, comprensibile già dall'uso dello stesso sostantivo (quello di "guscio", appunto), viene reso ancora più manifesto dal tentativo da parte dei progettisti, del passato e in modo più evidente del presente, di emulare le forme

e le funzioni che proprio dall'ecosistema derivano. La crescente sensibilizzazione e presa di coscienza da parte dei professionisti del settore delle costruzioni sull'importanza di progettare e costruire nel rispetto dell'ambiente circostante costituisce il pretesto per un crescente approccio verso una progettazione bio-ispirata che coniughi forme, funzioni e materiali naturali.

La definizione di precisi rapporti tra le diverse dimensioni (dello spessore, della luce, della profondità), che va oltre dunque alla definizione data ai gusci sulla base della semplice osservazione empirica, permette di giungere ad una esatta distinzione tra gusci sottili e gusci non sottili, quindi spessi (non trattati in questo lavoro).

Sono numerose le geometrie e le forme con cui volte e gusci sottili sono stati realizzati nel corso del tempo. La scelta di una geometria in luogo di un'altra dipende da fattori quali l'ampiezza e la forma delle luci da coprire o la funzione che queste devono assolvere (ad esempio, la copertura di spazi estesi lungo una sola dimensione in pianta richiederà una soluzione diversa rispetto a quella richiesta per spazi sviluppati, invece, in larghezza e lunghezza).

1.1 DEFINIZIONI

Con il termine "gusci sottili" si identificano delle strutture spaziali il cui spessore è trascurabile se paragonato alle altre dimensioni e al raggio di curvatura principale (Billington, 1965). Da questa definizione, di carattere assai generale, si può capire come la caratteristica principale di ogni guscio sottile sia in primo luogo la bidimensionalità, intesa come la prevalenza delle due dimensioni planimetriche rispetto allo spessore che in tal modo risulta significativamente ridotto; detto altrimenti: «...the term

shell is applied to bodies bounded by two curved surfaces, where the distance between the surfaces is small in comparison with other body dimensions...»¹ (Ventsel & Krauthammer, 2001). Anche il raggio di curvatura principale², inteso come distanza dal centro di curvatura alla superficie media del guscio, deve risultare prevalente rispetto allo spessore.

Altre definizioni, di carattere qualitativo, sono utili a chiarire alcuni altri aspetti caratteristici delle strutture a guscio. Tra queste definizioni, quella che appare più completa è la seguente:

« ...A shell is a structure defined by a curved surface. It is thin in the direction perpendicular to the surface, but there is no absolute rule as to how thin it has to be. It might be curved in two directions, like a dome or a cooling tower, or it may be cylindrical and curve only in one direction. This definition would clearly include birds' eggs and concrete shells, and nobody would argue with that. It would also include ships, monocoque car bodies (*coque* is one of the French words for shell) and aircraft fuselages, drinks cans, glasses cases, all sorts of objects. But this definition would also include tension structures such as sails, balloons and car tyres. If one wanted to exclude tension structures, one might stipulate that shells have to work in both tension and compression, but how about masonry vaults that can only work in compression? Most people would describe masonry vaults as a type of shell structure... »³ (Adriaenssens et al., 2014)

¹ Trad.: «...il termine "guscio" si applica a corpi delimitati da due superfici curve, dove la distanza tra le superfici è piccola rispetto alle altre dimensioni del corpo...».

² Molti gusci, soprattutto quelli con forme "libere" (aggettivo che verrà spiegato successivamente), hanno più di un raggio di curvatura, per cui se ne considera quello principale, dunque prevalente rispetto agli altri.

³ Trad.: «...Un guscio è una struttura definita da una superficie curva. È sottile nella direzione perpendicolare alla superficie, ma non esiste una regola assoluta che ne stabilisca lo spessore minimo. Può essere curvo in due direzioni,

Alcune considerazioni fondamentali emergono dalla definizione prima citata. La prima riguarda l'assenza di una regola precisa su quanto debba essere sottile un guscio per essere definito tale: in tal senso, non esiste, o meglio non è univocamente definita, una formula che espliciti in termini dimensionali il rapporto tra lo spessore e le altre dimensioni.

La varietà di casi considerati come degli esempi di gusci - che spaziano dagli elementi derivanti dalla natura fino ai gusci realizzati dall'uomo -, a curvatura singola o doppia e capaci di reagire a sforzi sia di trazione che di compressione, dimostra come i gusci costituiscano una classe di strutture a sé stanti. Anche le volte in muratura (soggette prevalentemente a compressione), secondo la definizione prima citata, sono ascrivibili alla macrocategoria dei gusci.

Il comportamento strutturale dei gusci, identificati come strutture a comportamento anisotropo (sia dal punto di vista geometrico che dal punto di vista fisico) è comprensibile attraverso un'altra caratteristica loro propria, la curvatura: è questa, infatti, che consente alle strutture a guscio il loro comportamento a

come una cupola o una torre di raffreddamento, oppure può essere cilindrico e curvo in una sola direzione. Questa definizione includerebbe chiaramente le uova degli uccelli e i gusci in cemento, e nessuno lo contesterebbe. Includerebbe anche navi, carrozzerie delle automobili monoscocca (*coque* è una delle parole francesi che indicano guscio) e fusoliere di aerei, lattine per bevande, custodie per occhiali, ogni tipo di oggetto. Ma questa definizione includerebbe anche strutture tensionate come vele, palloni aerostatici e pneumatici per auto. Se si volesse escludere le strutture tensionate, si potrebbe stabilire che i gusci devono funzionare sia in tensione che in compressione, ma che dire delle volte in muratura che possono funzionare solo in compressione? La maggior parte delle persone descriverebbe le volte in muratura come un tipo di struttura a guscio...».

membrana⁴ e, da ciò, la loro resistenza ai carichi su di essi applicati (Adriaenssens et al., 2014). Tuttavia, una discriminante fondamentale è rappresentata dal materiale, o dai materiali, costituente il guscio, dal momento che la resistenza ai carichi applicati di un guscio in calcestruzzo o in muratura è del tutto diversa da quella manifestata da un guscio in materiali fibrosi o in materiali polimerici.

I.2 CATALOGAZIONE

La varietà di gusci costruiti sia in Italia così come in molti altri Paesi, europei e non, rende complessa una loro esaustiva catalogazione.

In generale, infatti, alla macrocategoria dei gusci appartengono i gusci sottili, i gusci spessi e i gusci reticolari (anche conosciuti come *gridshell*). Ognuna di queste categorie presenta delle peculiarità che la differenziano dalle altre:

- i gusci sottili, come prima chiarito, sono caratterizzati da uno spessore ridotto a fronte di dimensioni planimetriche spesso considerevoli;
- i gusci spessi (Figura I.1), al contrario, sebbene con forme e dimensioni tipiche dei gusci sottili, presentano uno spessore significativo;

⁴ Sono molte le ipotesi, avanzate nel corso degli anni, riguardanti il comportamento strutturale dei gusci sottili: alcuni studiosi (Adriaenssens et al., 2014) considerano il comportamento a membrana come quello che meglio definisce i gusci; altri (Vekariya & Makwana, 2021), invece, collocano il comportamento delle strutture a guscio a metà strada tra le strutture a membrana e le strutture a lastra.

- i gusci reticolari (Figura I.2), infine, sono caratterizzati da un reticolo di elementi di vario materiale (acciaio, legno, fibre naturali, etc.) che si sviluppa spazialmente secondo forme libere e grandi dimensioni. A questa categoria appartengono anche le *X-Shell*, particolari strutture assemblate a terra come una griglia di travi flessibili collegate tra loro con *rotational joints*; questi ultimi consentono alle travi di deformarsi, il che, insieme alla deformazione elastica delle travi stesse, permette alla struttura di assumere una superficie curva. (Panetta et al., 2019) (Figura I.3).



Figura I.1. Ayla Golf Clubhouse, Oppenheim Architecture, Aqaba (Giordania), 2018 (Di Maggio & Corrao, 2025).

Il guscio è in calcestruzzo armato e il suo andamento ricorda le dune sabbiose in cui la struttura ricettiva è immersa.

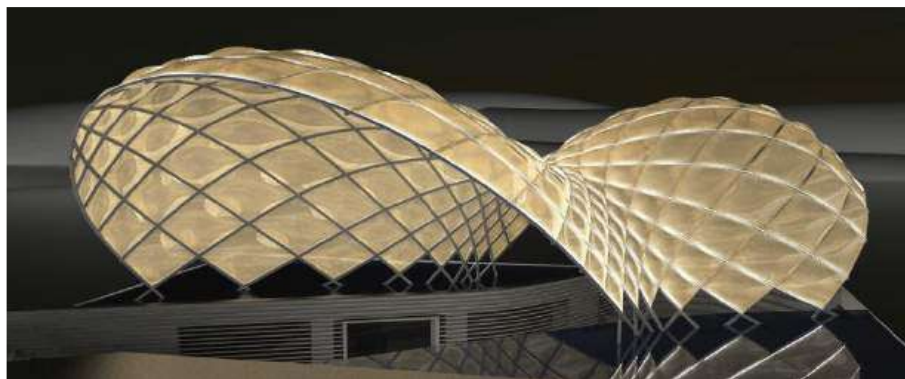


Figura I.2. Masseria Ospitale Restaurant Coverage (<https://www.archilovers.com/projects/87716/masseria-ospitale-restaurant-coverage.html>).

La *gridshell*, in questo caso, è in elementi in legno.

Figura I.3. Esempio di X-Shell (Panetta et al., 2019).

Trattandosi di prototipi in fase di sviluppo, non esistono ancora delle applicazioni per casi reali.



Alcuni criteri generali di classificazione dei gusci, che verranno spesso richiamati, possono essere:

- in base allo spessore, dunque se siano sottili o meno;
- in ragione della loro forma, distinguendo superfici di rivoluzione da superfici di traslazione o da forme libere, dunque svincolate dalle categorizzazioni geometriche “classiche” (volte a botte, a crociera, etc.);
- secondo la loro curvatura, singola o doppia;
- in base al materiale costituente, ad esempio in cemento armato o in muratura;
- considerando la loro possibilità di sviluppo geometrico, dal momento che è possibile che le superfici dei gusci siano sviluppabili o meno in forme piane senza tagliare o allungare la loro superficie centrale (Vekariya & Makwana, 2021).

I.3 RAPPORTI DIMENSIONALI

Quanto detto a proposito dei gusci si basa su considerazioni di tipo qualitativo; dunque, non sono stati sin qui esplicitati i rapporti che devono intercorrere tra le varie dimensioni del guscio per poterlo definire come sottile.

Limitatamente ai gusci costruiti in calcestruzzo armato e pre-compresso, è utile per la classificazione prendere in considerazione l'indice di snellezza:

$$SR = \frac{s}{d} \geq 500$$

indicando con:

SR l'indice di snellezza (*slenderness ratio*);

s la luce (*span*);

d la profondità (*depth*).

Questa formula è derivata dalla considerazione che un guscio sottile deve essere soggetto solamente al proprio peso, raggiungendo il cosiddetto stato di tensione membranale (*membrane tension state*): è il caso, ad esempio, dei gusci in cui le forze assiali e di taglio agiscono sull'intera superficie (Deplazes, 2018).

Un altro parametro utile alla caratterizzazione dei gusci sottili comprendente, però, anche una più vasta gamma di strutture a guscio progettate con forme e materiali differenti, oltre allo spessore è da riferirsi al raggio di curvatura (dei gusci). È proprio la curvatura, infatti, che governa principalmente il comportamento di un guscio soggetto ai carichi su di esso applicati⁵. Un guscio si può definire come sottile (*thin shell*) se:

⁵ La curvatura è uno dei parametri che distingue i gusci dalle piastre. Infatti, « ...owing to the curvature of the surface, shells are more complicated than flat plates because their bending cannot, in general, be separated from their stretching. On the other hand, a plate may be considered as a special limiting case of a shell that has no curvature; consequently, shells are sometimes referred to as curved plates... » (Ventsel & Krauthammer, 2001). Trad.: «...a causa della curvatura della superficie, i gusci sono più complessi delle piastre piate perché la loro flessione non può, in generale, essere separata dal loro allungamento. D'altra parte, una piastra può essere considerata come un caso limite speciale di un guscio che non presenta curvatura; di conseguenza, i gusci sono talvolta definiti piastre curve...».

$$\max\left(\frac{h}{R}\right) \leq \frac{1}{20}$$

indicando con:

h lo spessore (*thickness*);

R il raggio di curvatura della superficie media (*span*);

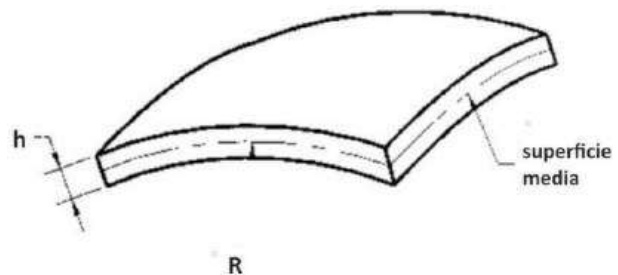
d la profondità (*depth*) (Figura I.4).

Se questa disuguaglianza non sussiste, si parla di gusci spessi (*thick shells*) (Ventsel & Krauthammer, 2001). Partendo da questa considerazione e volendo restringere il campo si ha che lo spessore dei gusci è compreso nell'intervallo:

$$\frac{1}{1000} \leq \frac{h}{R} \leq \frac{1}{20}$$

Oltre allo spessore e al raggio di curvatura, di cui si è detto sin qui, a delineare la differenza tra gusci sottili e gusci spessi concorrono altri parametri, come le condizioni al contorno, nonché la variazione dei carichi esterni applicati sulla superficie (Ventsel & Krauthammer, 2001).

Figura I.4. Spessore (h), raggio di curvatura (R) e superficie media di una porzione di guscio (Ventsel & Krauthammer). Rielaborazione dell'Autore.



Le disuguaglianze fin qui presentate, sebbene rispondano all'esigenza di fornire un criterio sulla base del quale definire sottile un

guscio, tuttavia lasciano delle questioni aperte: tra queste, la più rilevante riguarda il fatto che lo spessore dei gusci, che nelle formule prima presentate si considera costante, nella realtà - dunque nei gusci realizzati o progettati nel corso degli anni - risulta spesso variabile; similmente, il raggio di curvatura pressoché in nessun caso può considerarsi costante pertanto prendere in considerazione il raggio di curvatura principale può risultare riduttivo e portare a delle considerazioni non attendibili rispetto alla natura dei gusci.

Come già anticipato, nella presente tesi vengono classificati come gusci sottili anche alcuni tipi di volte sottili legati alla tradizione costruttiva: a questo riguardo, si sottolinea che volte siffatte (a causa di diverse ragioni legate ai materiali, così come alle dimensioni degli ambienti da coprire o ancora alla necessità di avere una maggiore sicurezza strutturale attraverso opere più robuste) potrebbero non rispettare le prescrizioni dimensionalmente limitative di cui fino ad ora si è detto citando le formule prima esposte.

I.4 BIO-ISPIRAZIONE PER IL PROGETTO DI GUSCI SOTTILI

Il profondo legame tra gli elementi architettonici oggetto di studio e l'ambiente circostante è evidente già dal fatto che con il termine "gusci" si indicano sia le forme naturali che le architetture. Tale corrispondenza è presente anche negli altri idiomi: oltre a guscio (in italiano), *shell* in inglese, *schale* in tedesco, *coque* in francese (Siegel, 1962) e ciò dimostrerebbe come l'ispirazione nella progettazione e costruzione dei gusci fatti dall'uomo sia da ricercare proprio nell'imitazione delle forme a guscio naturali.

Questi ultimi svolgono l'importante funzione di proteggere gli elementi del mondo animale - come lumache, tartarughe, cozze

e crostacei - e del mondo vegetale - ad esempio come noci, mandorle e semi di varia natura -, costituendo una parte essenziale degli organismi che ospitano e proteggono. Di conseguenza è facile immaginare che, quando si costruiscono “gusci artificiali” (progettati per racchiudere spazi e proteggere (Sommese et al., 2022)), i progettisti spesso traggono ispirazione da queste forme naturali (Figura I.5).

Figura I.5. Confronto tra l'Oceanogràfic di Felix Candela (<https://www.building-cue.it/catenaria-concept-strutturali-innovativi/9718/>) e la Tridacna gigante (https://www.mare2000.it/Invertebrati/tridacna_g.htm).

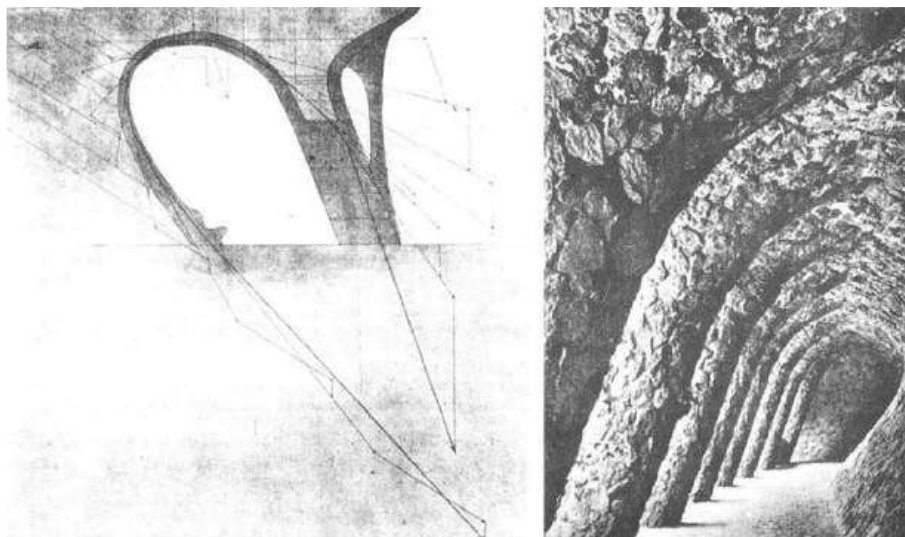


Uno degli aspetti caratterizzanti i gusci naturali è la loro rigidità: i materiali che compongono un guscio, come quello di un uovo, di una noce o di un crostaceo, sono duri e resistenti. A differenza di altri elementi naturali come la paglia, il cuoio o la pelle, che sono fibrosi o flessibili, i materiali dei gusci offrono una maggiore integrità strutturale (Siegel, 1962). Al contrario, le elevate prestazioni offerte dai gusci artificiali costruiti dall'uomo sono spesso dovute alla combinazione di diversi elementi/materiali e alle specifiche tecniche di messa in opera degli stessi più che ai singoli materiali in sé: è il caso, ad esempio, delle volte sottili in mattoni o dei gusci sottili in calcestruzzo armato.

Gli insegnamenti che l'uomo ha tratto e trae dalla Natura per la costruzione di opere caratterizzate da un ridotto impatto ambientale (almeno in termini di aspetto) sono raggruppati in quella che ha preso il nome di progettazione bio-ispirata (*bio-inspired design* (Sommese et al., 2022)). Questa si divide in tre diverse categorie: biomorfismo, biomimetica e bio-utilizzo. Il biomorfismo si riferisce all'imitazione delle forme derivanti dalla Natura; la biomimetica⁶ ha per scopo l'emulazione delle funzioni degli organismi viventi; il bio-utilizzo è, infine, incentrato sull'uso di materiali naturali, dunque non sottoposti ad intensi processi di lavorazione con dispendio energetico significativo. Alla progettazione bio-ispirata potrebbero farsi risalire anche le opere di Antoni Gaudì, la cui intera produzione è esplicitamente ispirata alle forme della Natura. Ai fini della presente trattazione si ritiene utile citare l'utilizzo della forma catenaria - ricavata attraverso un cavo vincolato alle estremità e lasciato blando in modo da assumere una configurazione naturalmente determinata - per la configurazione di alcune sue opere, come le coperture di Casa Milà o il muro di contenimento di Parc Guell a Barcellona, solo per citarne alcune (Figura I.6).

⁶ Termine introdotto nel 1969 da Otto H. Schmitt derivante da *bios*, vita, e *mimesis*, imitazione (Gizem Yetkin, 2021)

Figura I.6. Muro di contenimento del Parc Guell, calcolo grafico e opera realizzata (Huerta, 2003).



Rafael Guastavino Moreno⁷ (colui che alla fine del XIX secolo ha esportato la tecnica costruttiva delle volte sottili spagnole, chiamate *bóvedas tabicadas*, in territorio americano) afferma nei suoi scritti che la sua propria architettura è in armonia con gli insegnamenti della Natura; come si legge nell'Introduzione al suo *Essay on the theory and history of cohesive construction*:

« ...The thought entered my mind, while in this immense room, viewing this fall of water, that all this colossal space was covered by a single piece, forming a solid mass of walls, foundation and roof, and was constructed with no centres or scaffolding, and especially, without the necessity of carrying pieces of heavy stone, and heavy girders or heavy centres; all being made of particles set one over the other, as nature had laid them. From that time I became convinced that there was much to learn from the immense book called Nature, never enough studied,

⁷ Di Guastavino, e delle innovazioni da lui apportate nel campo dei gusci sottili, si parlerà estesamente nel prossimo capitolo (Capitolo II).

and that our ordinary system of construction was very poor, notwithstanding that we possessed the material for this kind of building that enabled us to imitate nature... »⁸ (Guastavino, 1893)

Dalla descrizione fatta emergono alcuni tratti distintivi di quelle che sono le cosiddette “costruzioni coesive” di Guastavino: un unico pezzo (un elemento monolitico) a copertura di un immenso spazio (si pensi che alcune cupole da lui progettate coprono luci fino a 40 m), costruito con poche centine o impalcature⁹ nonché senza l’utilizzo di elementi o componenti di grandi dimensioni (la costruzione con mattoni sottili e con l’ausilio di poche centine è uno dei cardini su cui si regge l’intera produzione architettonica di Guastavino).

In un altro passo dell’*Essay* si legge di D. Juan Torras, suo maestro, che aveva affermato che l’architetto del futuro costruirà imitando la natura, perché proprio la natura offre i metodi di costruzione più razionali, durevoli ed economici (Guastavino, 1893). Questi tre aggettivi (razionale, durevole ed economico), attribuiti al metodo di progettazione che si basa sull’imitazione della Natura, ben compendiano quelli che sono i principi alla base della

⁸ Trad.: «...Il pensiero mi venne in mente, mentre mi trovavo in questa immensa sala (il riferimento è ad una grotta presente nelle proprietà di Don Frederico Muntadas ad Alhama, in Aragona, ndA), osservando questa cascata d’acqua, che tutto questo spazio colossale era coperto da un unico pezzo, formando una solida massa di pareti, fondamenta e tetto, ed era stato costruito senza centine o impalcature e, soprattutto, senza la necessità di trasportare pezzi di pietra pesante, travi pesanti o centine pesanti; il tutto era costituito da particelle sovrapposte l’una sull’altra, come la natura le aveva disposte. Da quel momento mi convinsi che c’era molto da imparare dall’immenso libro chiamato Natura, mai studiato a sufficienza, e che il nostro sistema di costruzione ordinario era molto povero, nonostante possedessimo il materiale per questo tipo di edificio che ci permetteva di imitare la natura...»

⁹ Poche, in certi casi nulle, rispetto ad altri sistemi costruttivi.

progettazione moderna, mirata sempre più alla minimizzazione dell'impatto delle costruzioni sull'ambiente circostante.

La Natura, concordemente a quanto finora esposto, può considerarsi modello, misura e mentore (Benyus, 1997). Imitare la Natura non significa semplicemente copiarla, piuttosto, è intesa come un prendere ispirazione da alcune sue caratteristiche per arrivare, in modo ponderato, a delle soluzioni architettonicamente e tecnologicamente accettabili. Natura, quindi, come modello da imitare, fornendo ispirazione per il progetto di gusci, oltre che per il dimensionamento degli spazi. Natura, quindi, anche come misura.

I gusci, che fanno parte del più ampio insieme delle strutture spaziali, da sempre sono stati progettati e messi in opera seguendo (consciamente o meno) i dettami della Natura e ciò è confermato dal riscontro delle forme, funzioni e, talvolta, materiali propri dei gusci esistenti in natura.

I.5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., & Williams, C. (Eds.). (2014). *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge.

Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Morrow.

Billington, D. P. (1965). *THIN SHELL CONCRETE STRUCTURES*. McGraw-Hill Book Company.

Deplazes, A. (Ed.). (2018). *Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures. A Handbook* (4th ed.). Birkhauser Verlag AG.

Gizem Yetkin, E. (2021). Effects of Biomimicry on Architecture. *European Journal of Natural Sciences and Medicine*, 4(2), 102–114.

Guastavino, R. (1893). *Essay on the theory and history of cohesive construction, applied especially to the timber vault*. Ticknor and Company.

Huerta, S. (2003). El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí. *Revista Digital Del Cedex*, 130(121), 133–162.

Panetta, J., Konaković-Luković, M., Isvoranu, F., Bouleau, E., & Pauly, M. (2019). X-Shells: A new class of deployable beam structures. *ACM Transactions on Graphics*, 38(4). <https://doi.org/10.1145/3306346.3323040>

Siegel, C. (1962). *Structure and Form in Modern Architecture*. Reinhold Publishing Corporation.

Sommese, F., Badarnah, L., & Ausiello, G. (2022). A critical review of biomimetic building envelopes: towards a bio-adaptive model from nature to architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112850>

Vekariya, M. S., & Makwana, A. H. (2021). A Review on Thin-shell Structures: Advances and Trends. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 2(12), 1593–1608.

Ventsel, E., & Krauthammer, Theodor. (2001). *Thin plates and shells: theory, analysis, and applications*. Marcel Dekker.

II.
ORIGINE
E SVILUPPO COSTRUTTIVO

SINOSSI

Il capitolo è organizzato in modo da illustrare principalmente due tematiche, tra loro strettamente connesse: una utile a delineare il quadro storico-geografico di riferimento, in cui elementi e strutture a guscio hanno origine e si sviluppano ed una, di maggiore interesse ai fini dello sviluppo del presente lavoro, finalizzata a definire e mettere in evidenza le caratteristiche proprie delle tipologie di gusci elencate nel capitolo precedente (quali, ad esempio, forme e geometrie, materiali, sistemi di centinatura). Le prime testimonianze relative a volte sottili (elementi a guscio) si riferiscono a volte costruite all'interno di edifici strategici, alcuni dei quali ancora oggi esistenti nelle regioni spagnole della Catalogna e dell'Estremadura. L'epoca di riferimento rimanda al XIV-XV secolo; tuttavia, si ritiene ragionevole considerare che esse possano riferirsi anche ad epoche più remote, tanto che alcuni studiosi sono giunti a considerare come prototipi di volte sottili degli esemplari risalenti all'epoca egizia.

Tra le figure che hanno contribuito alla conoscenza e sviluppo di volte e gusci sottili, quella di Rafael Guastavino Moreno (1842-1908) può essere con certezza considerata la più influente; infatti, a lui si deve il primo studio di volte sottili dal punto di vista

strutturale e l'aggettivazione di questi come strutture "coesive" (strutture, o elementi strutturali, che una volta messi in opera non possono essere più scisse nei materiali costituenti, comportandosi come delle strutture monolitiche). Suo è inoltre il merito di avere sviluppato la tecnica delle *bóvedas tabicadas* - le volte sottili tipiche della tradizione costruttiva spagnola - portandola alle estreme conseguenze, applicandola per luci di dimensioni molto maggiori (fino a 40 m) rispetto a quelle fino ad allora coperte.

Gli studi di Guastavino hanno condotto alla definizione dei primi esempi di gusci sottili veri e propri, da lui realizzati negli Stati Uniti d'America dove era emigrato dalla natia Valencia alla fine dell'800.

Tra le tante differenze esistenti tra volte e gusci propriamente detti, una riguarda la forma: infatti, mentre le forme date alle volte appartenenti alla tradizione costruttiva iberica (o, più in generale, mediterranea) sono relativamente semplici, a curvatura singola o doppia, e derivate dalle geometrie degli archi (dunque, ad esempio, a tutto sesto o a sesto ribassato), le forme attribuite ai gusci realizzati dal XIX secolo in poi risultano più audaci e spinte verso forme più complesse - come quelle derivate dai paraboloidi iperbolici - e libere - delle quali si hanno esempi anche nei prototipi più recentemente realizzati in diversi centri di ricerca internazionali -.

Contestuale alla scelta della forma è la scelta del materiale, o dei materiali, con cui le strutture a guscio sono realizzate. La caratteristica principale di questi materiali deve essere correlata ad un appropriato valore di resistenza a compressione: per questa ragione, la scelta del laterizio, nella forma di mattoni di varie dimensioni e spessori, è risultata spesso (soprattutto in epoche più remote) la più idonea. Mattoni siffatti vengono messi in opera

con pasta di gesso (come nel caso delle *volte realine* siciliane, approfondite nel Capitolo III) o di cemento Portland (soprattutto in area spagnola).

Altro materiale utilizzato per la realizzazione dei moderni gusci sottili è il calcestruzzo armato - utilizzato nel secolo scorso da progettisti attivi in diverse parti del globo come Felix Candela in Messico, Eduardo Torroja in Spagna o Heinz Isler in Svizzera - che, quando abbinato ai mattoni in laterizio)come in molte realizzazioni presenti in America Latina) prende il nome di *cerámica armada* o *ladrillo armado*.

Una particolarità che caratterizza le *bóvedas tabicadas* spagnole e le *volte realine* siciliane è costituita dal fatto che, per la loro messa in opera, non è necessario ricorrere a sistemi di centinatura e/o casseforme a supporto, se non limitatamente. Questa caratteristica è derivata, oltre che alla forma delle volte che garantisce loro resistenza, anche alla malta utilizzata, che facendo presa molto rapidamente consente una maggiore velocità di esecuzione ed una più rapida entrata in esercizio delle volte.

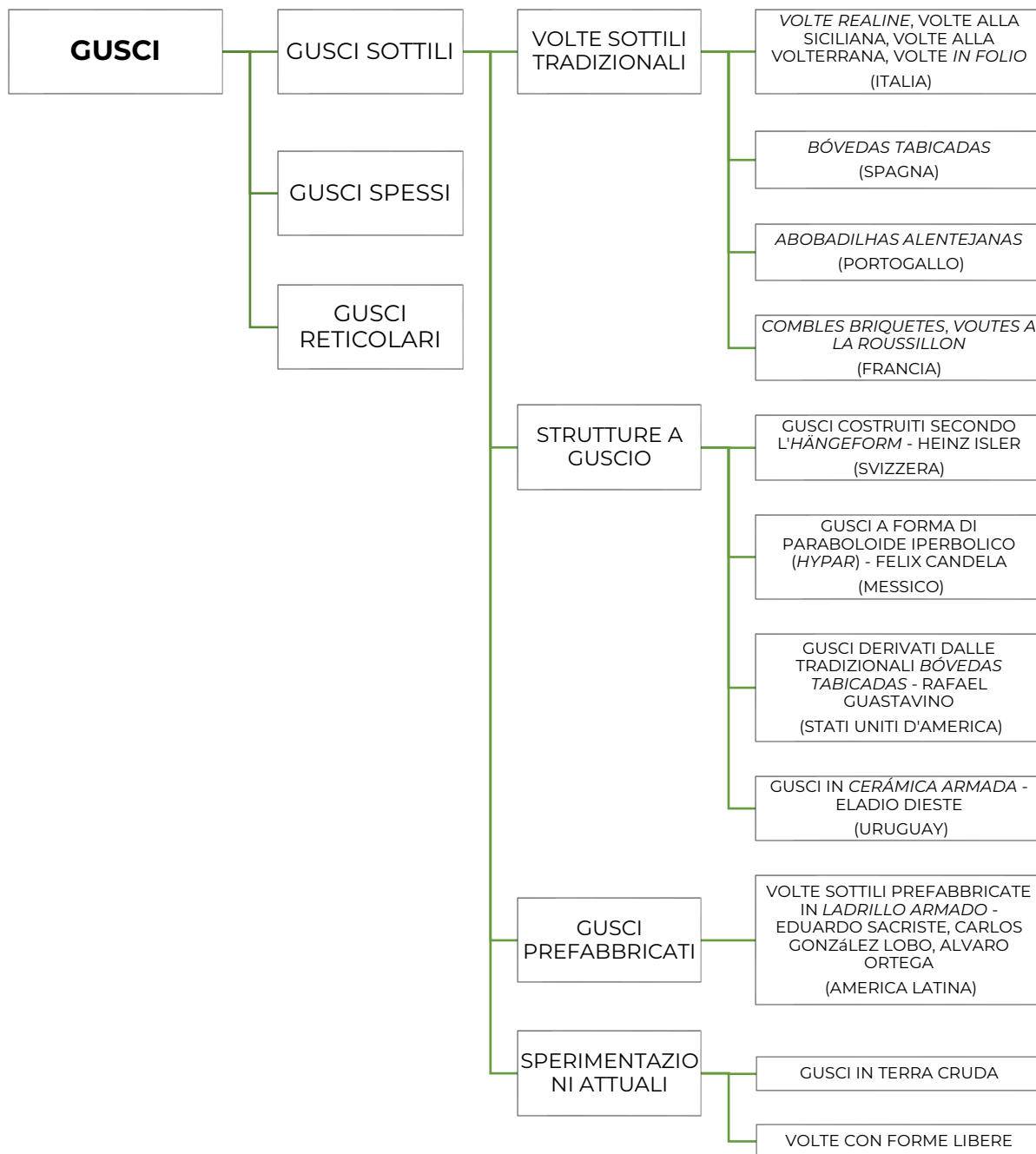
Diversamente, per i gusci in calcestruzzo armato (strutture a guscio) è indispensabile la presenza di sistemi di centinatura che spesso, per le grandi dimensioni e le articolate forme, richiedono ingenti quantità di materiali e di tempo per essere approntati. Sono esenti da questo inconveniente i già menzionati gusci in *cerámica armada*, dal momento che i mattoni in laterizio, oltre a permettere il risparmio di materiale più costoso - quale era nello specifico contesto latino-americano il calcestruzzo armato nella metà del secolo scorso -, fungono da cassaforma per il calcestruzzo stesso.

Come accennato qui, l'assemblaggio delle volte e dei gusci avveniva generalmente attraverso l'assemblaggio ad umido. L'inversione di questa tendenza nel XX secolo, che ha apportato importanti benefici in termini di risparmio di tempo e denaro, è avvenuta con l'introduzione di sistemi di gusci prefabbricati montati a secco. La prefabbricazione degli elementi costituenti i gusci o le volte sottili, nella seconda metà del Novecento, è stata introdotta - oltre che in alcuni Paesi europei, come l'Italia - anche in alcuni Stati dell'America Latina. La necessità, derivata da situazioni politiche ed economiche difficili, di costruire prestando attenzione ai costi e ai tempi di realizzazione ha costituito l'impulso per sperimentare diverse soluzioni di grande efficacia, adottate sia per edifici ad uso delle popolazioni locali (come quelli progettati da Eduardo Sacriste (1905-1999) in Argentina o Carlos González Lobo (1939-2021) in Messico) che per edifici strategici (come la ricostruzione dell'Arsenale dell'Armata Argentina ad opera di Mario Kalemkerian).

Dopo una fase di stasi dovuta probabilmente al consolidarsi delle tecniche costruttive tradizionalmente impiegate ed al diffondersi di altri sistemi costruttivi più efficienti, un nuovo momento propizio per lo sviluppo di gusci sottili è in atto dall'inizio del XXI secolo, attraverso la progettazione e costruzione di opere dalle forme sempre più libere e con dimensioni sempre maggiori.

Le tipologie, o meglio le sottocategorie, di gusci sottili derivanti dal lungo processo di sviluppo spazio-temporale sono compendiate nella figura seguente (Figura II.1) in cui, per completezza, si riportano anche le altre due categorie di gusci (spessi e reticolari) accennate nel Capitolo I.

*Nella pagina seguente
Figura II.1. Categorie e
sottocategorie di gusci.*



II.1 IPOTESI SULLE ORIGINI DI VOLTE E GUSCI SOTTILI

Come è consuetudine per la maggior parte delle tecniche costruttive appartenenti all'architettura storica, anche nel caso delle volte e dei gusci sottili non è possibile risalire con certezza ad un periodo e ad un luogo in cui questi hanno avuto la loro origine per poi diffondersi altrove¹.

Alcuni studiosi, fra cui Antoine Choisy, considerano come prototipo della tecnica costruttiva impiegata per la loro realizzazione, anche se in una fase ancora iniziale, il sistema di casseratura con mattoni *bipedales* (due piedi, circa cioè 50 cm) delle volte ad *opus coementicium* di epoca romana (Choisy, 1873) (Figura II.2).

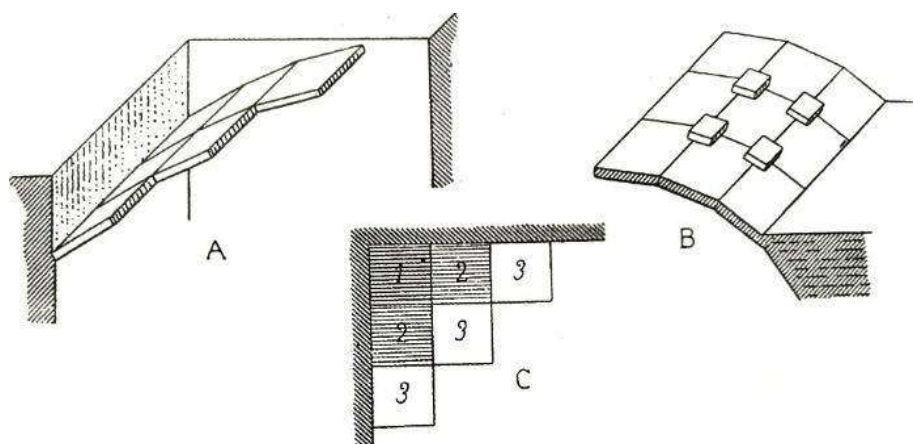


Figura II.2. Volta realizzata con mattoni *bipedales* e ipotesi di disposizione dei mattoni (Girón & Huerta, 2009).

Altri invece, come Guastavino - che concentra i suoi sforzi sulla ricerca dei materiali che meglio si potevano adattare al sistema

¹ L'origine dei gusci può pensarsi coincidente con l'origine delle volte sottili tradizionali. Dunque, ragionando della genesi delle volte sottili si sta implicitamente facendo riferimento alla genesi dei gusci nella loro accezione più generale.

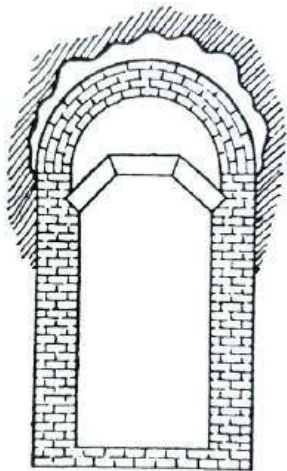


Figura II.3. "Arco a tam-burello" rinvenuto a Giza (Gulli & Mochi, 1995).

costruttivo, oltre che sul sistema costruttivo stesso - ne rintracciano le radici nel cosiddetto "arco a tamburello" (Figura II.3), archetipo dei più moderni sistemi voltati, risalente all'Antico Egitto (Guastavino, 1893; Gulli, 2006). Un ragionamento più completo è quello condotto da Manuel Fortea Luna (Fortea Luna, 2008a), secondo il quale l'origine di una tecnica di costruzione in laterizio e senza centine risalirebbe ai popoli mesopotamici, la cui conoscenza del gesso avrebbe favorito la realizzazione di volte preferibili a quelle *de rosca*², sia per un'ottimizzazione in termini di manodopera (risparmiando sui tempi) che di materiali (economizzando le risorse disponibili). Ancora, riguardo le *bóvedas tabicadas*, le volte sottili tipiche della tradizione costruttiva iberica, Fortea Luna aggiunge:

«...Su origen debe estar donde exista cultura y conocimiento de las tres, es decir de construcción de bóvedas sin cimbra, de utilización profusa del yeso y de fabricación de ladrillo que no es más que cerámica cocida. El punto de origen para las construcciones abovedadas sin cimbra es Mesopotamia, ni siquiera Bizancio. La cultura que mas dominio ha demostrado sobre el yeso ha sido la árabe o islámica. La cerámica es una tecnología común y muy extendida. El punto donde confluyeron las dos primeras en un momento remoto de la historia es la península ibérica sobre todo en el levante de la España musulmana...»³ (Fortea Luna, 2008a)

² Si definiscono come "*bóvedas de rosca*" le volte in cui i mattoni sono disposti ortogonalmente alle loro direttrici.

³ Trad.: «...La sua origine deve risalire a un luogo in cui siano esistiti la cultura e la conoscenza di tre (fattori, n.d.A.): la costruzione di volte senza centine, l'uso abbondante del gesso e la fabbricazione di mattoni, che non sono altro che ceramica cotta. Il punto di origine delle costruzioni a volta senza centine è la Mesopotamia, e non Bisanzio. La cultura che ha dimostrato maggiore pa-

Tralasciando le altre ipotesi avanzate nel tempo sull'origine dei gusci, dalla letteratura è possibile giungere alla identificazione di quelli che vengono considerati come i più remoti esempi di volte sottili riscontrati in diverse località dell'Europa mediterranea.

La tipologia di volte sottili più antica, da cui le altre deriverebbero, è quella delle *bóvedas tabicadas* spagnole⁴. Il periodo di riferimento è quello tra la fine del XIV e l'inizio del XV secolo. Secondo George Collins⁵, la prima testimonianza è contenuta in un cartiglio del re aragonese Martino I l'Umano, risalente proprio al principio del XV secolo e riguardante la costruzione della Cappella Reale all'interno della Cattedrale di Barcellona (Collins, 2001). Una datazione più precisa è invece data da Philippe Araguas, il quale rintraccia il primo riferimento alle volte *tabicade* in un documento datato 20 giugno 1382 e inviato dal re Pietro IV d'Aragona, detto il Cerimonioso. In questo documento (una sorta di missiva indirizzata ad un certo Merino) si parla della scoperta di una nuova tecnica che permette «...una manera de trabajar con el yeso y el ladrillo más provechosa, más ligera y de poco peso...»⁶ (Fortea Luna, 2008b). Dalla tesi portata avanti da Araguas, antecedentemente all'anno indicato nel documento non esistono altre opere con volte *tabicade* e l'unico dubbio riguarda i resti della piccola cappella di Aznalcollar a Siviglia, in

dronanza del gesso è stata quella araba o islamica. La ceramica è una tecnologia comune e molto diffusa. Il punto in cui le prime due sono confluite in un momento remoto della storia è la penisola iberica, soprattutto nella parte orientale della Spagna musulmana...».

⁴ Di questa tipologia, così come delle altre, si parlerà estesamente nel prosieguo di questo stesso capitolo.

⁵ George R. Collins è lo studioso americano che è riuscito a salvare dalla distruzione e dall'oblio buona parte del prezioso archivio dei Guastavino.

⁶ Trad.: «...un modo più vantaggioso, più leggero e meno pesante di lavorare con il gesso e i mattoni...».

Andalusia, databile in ogni caso a poco prima del 1400 (Araguas, 1998). Le citazioni qui esposte dimostrano come l'arco temporale in cui per la prima volta si fa riferimento alle *bóvedas tabicadas* può essere circoscritto ad un periodo compreso tra gli ultimi decenni del XIV e i primi decenni del XV secolo, mentre il luogo è il regno di Aragona⁷.

Allo stesso periodo apparterebbe il primo caso di volte sottili riscontrato in Sicilia. Si tratta delle volte presenti nella torre-palazzo di Pozzallo (Figura II.4). La torre, agli inizi del XV secolo da Bernat Cabrera, conte di Modica, consta di «...volte a crociera fortemente ribassate con costoloni in pietra, chiavi araldiche e vele realizzate con fogli di mattoni disposti di piatto, cioè volte *tabicadas*...» (Nobile, 2020). L'artefice della costruzione di queste volte sarebbe Guillem Abiell, architetto e maestro catalano giunto in Sicilia nel 1419 e quivi spirato nel 1420 (Bares & Nobile, 2011). Coeve a quelle della torre di Pozzallo sono le volte a crociera costolonate del *donjon* (castello) di Butera, mentre risale ad alcuni decenni dopo (molto probabilmente agli anni Ottanta del Quattrocento) il chiostro di Santa Maria del Gesù a Modica e le volte *tabicade* in esso contenute. Per questi tre casi di volte sottili quattrocentesche riscontrate in territorio siciliano, Maria Mercedes Bares e Marco Rosario Nobile parlano di architettura "coloniale" (Bares & Nobile, 2011). La riprova della provenienza ispanica di questa tecnica sarebbero, infatti, le committenze provenienti - in tutti e tre i casi - dalla Spagna e l'assenza di fornaci o altri luoghi di produzione dei mattoni in laterizio, che dunque

⁷ Il riferimento ai re Pietro IV il Cerimonioso, sovrano dei regni di Aragona, Valencia, Sardegna e Corsica, e Martino I l'Umano, suo nipote, il cui regno si estese fino alla Sicilia, è fondamentale per avvalorare le ipotesi presentate.

sarebbero stati importati da lontano. Oltre a ciò, i due autori sottolineano la rapidità con cui le maestranze sono riuscite a trasmettere ed esportare una tecnica appresa soltanto una generazione prima.



Figura II.4. Una delle volte sottili della torre-palazzo di Pozzallo (Nobile, 2020).

I più antichi esempi di volte sottili individuati in Sicilia, e le informazioni che si hanno a disposizione per ognuno di essi, confermano la teoria secondo la quale è la Spagna il luogo in cui questa tecnica è nata e si è sviluppata e, in seguito, è stata esportata altrove nel vecchio continente.

II.2 SVILUPPO SPAZIO-TEMPORALE DI VOLTE E GUSCI SOTTILI

Se, come si è visto, le informazioni riguardo l'origine della tecnica costruttiva dei gusci (volte) sottili sono carenti e le ipotesi avanzate sono basate su ragionamenti derivanti dai pochi esemplari ancora rinvenibili, diverso è il caso della loro diffusione e

caratterizzazione nel corso del tempo e nelle diverse aree geografiche.

Non è possibile tracciare uno sviluppo lineare della tecnica di costruzione delle volte, e in seguito dei gusci, sottili e ciò è conseguenza della diversa evoluzione che essi hanno subito da un Paese all'altro nel corso del tempo. Questa complessità è testimoniata anche dalle diverse denominazioni che la tecnica, ovvero le tecniche hanno assunto nei diversi contesti in cui hanno attecchito e di cui se ne riportano alcuni esempi (in parentesi si indicano gli Stati in cui ognuna di esse si è diffusa):

Volte realine (IT)	Bóvedas de rajola doblada (ES)
Volte sottili (IT)	Voltes de maó de pla (ES)
Volte in folio (IT)	Bóvedas a panderete (ES)
Volte piatte (IT)	Bóvedas de Guastavino (USA)
Volte alla volterrana (IT)	Bóvedas ligeras (ES)
Volte catalane (IT)	Voltes de barandat (ES)
Dammusi realini (IT)	Combles briquetés (FR)
Volte cementizie (IT)	Voutes sarrasins (FR)
Volte alla siciliana (IT)	Voutes à la Roussillon (FR)
Abobadilhas alentejanas (PT)	Thin brick vaults
Bóvedas tabicadas (ES)	Thin masonry vaults
Bóvedas de rosca (ES)	Tile vaults
Bóvedas extremeñas (ES)	Timbrel vaults
Bóvedas sin cimbra (ES)	

Per meglio comprendere questa complessità, almeno sul piano terminologico, si richiama quanto elaborato da Wesam Al Asali (Figura II.5).

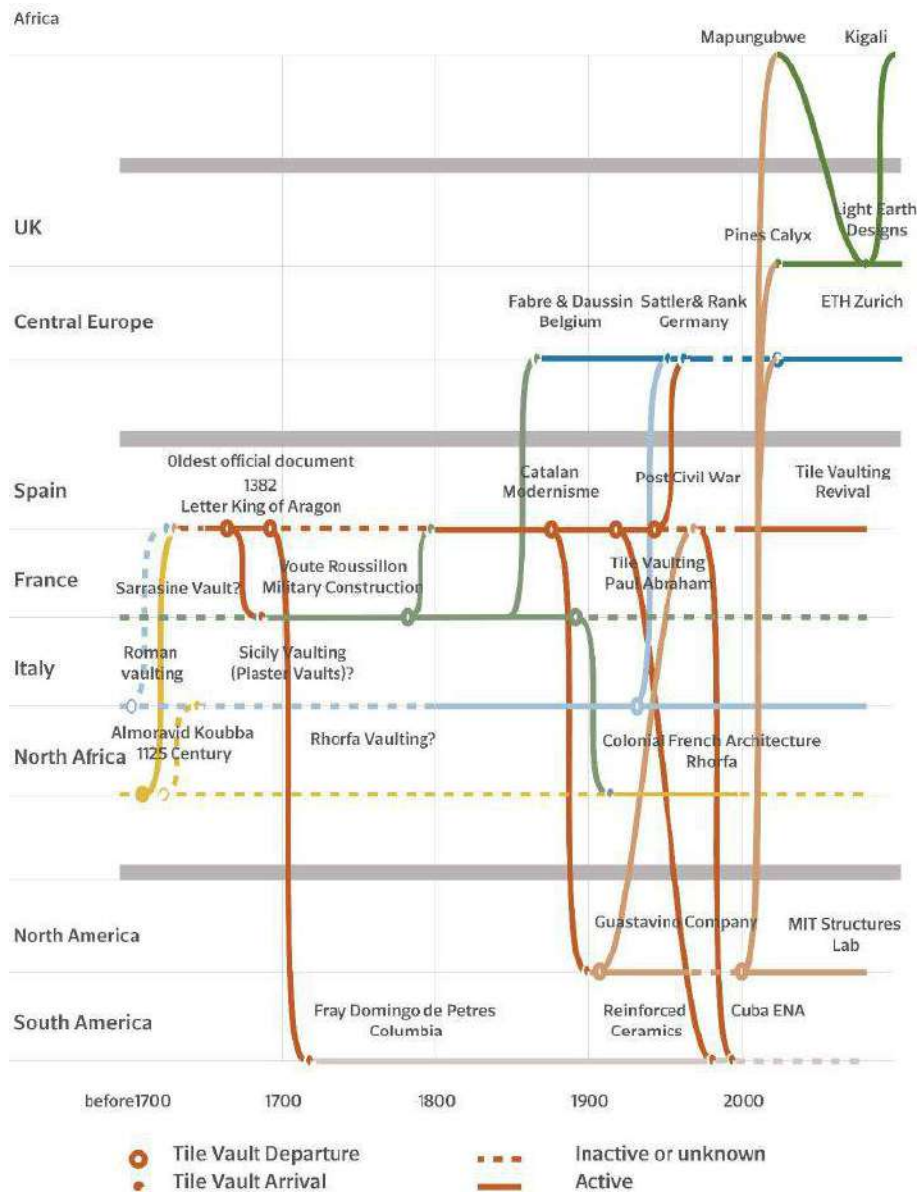


Figura II.5. Grafico spazio-temporale dello sviluppo e diffusione delle diverse tecniche di realizzazione dei gusci sottili (Al Asali, 2021).

Si può qui vedere, ad esempio, come la tecnica delle volte *tabicade* spagnole - presumibilmente derivata dalle volte sottili di tradizione romana e da quelle nordafricane - si sia diffusa in Sud

America grazie all'opera del frate domenicano Domingo de Petrés, mentre in Nord America attraverso l'attività della Guastavino Company (Al Asali, 2021). I gusci realizzati da quest'ultima hanno a loro volta influenzato le volte costruite in Spagna nel periodo successivo alla Guerra Civile, durante la fase autarchica, nonché le sperimentazioni contemporanee condotte presso l'ETH di Zurigo, i gusci realizzati nel Regno Unito negli anni Dieci del XXI secolo - primi esempi di tale tipologia nel contesto britannico - e il Mapungubwe Interpretation Centre, progettato da Peter Rich e realizzato in Sudafrica nel 2009, dove le risorse locali disponibili sono state ottimizzate al massimo.

Figura II.6. Mappa della diffusione e delle sperimentazioni sui gusci sottili (López López & Domènech Rodríguez, 2012). Rielaborazione dell'Autore.

Dall'immagine che segue (Figura II.6) si apprezza ancora meglio come le volte e i gusci sottili, dal continente europeo, dove hanno avuto, con molta probabilità, origine e si sono sviluppati fino all'Ottocento, si siano in seguito diffusi negli altri continenti.



Ad esempio, si nota come nelle Americhe tale diffusione sia avvenuta ad opera dei citati Domingo de Petrés e Guastavino e, nel secolo scorso, soprattutto in America del Sud, grazie a progettisti come Eladio Dieste, Rogelio Salmona, Antoni Bonet Castellana o Carlos Gonzalez Lobo; mentre in Africa, in tempi più recenti, oltre che per il già menzionato Peter Rich, emerge preponderante il contributo di Fabrizio Carola. Le ricerche attuali, che investigano diverse soluzioni costruttive legate alla tradizione così come all'uso di tecniche e tecnologie sempre più avanzate, interessano soprattutto il Block Research Group dell'ETH a Zurigo e il Form Finding Lab della Princeton University.

II.3 VOLTE SOTTILI

Storicamente, la tecnica di costruzione delle volte si è diversificata in tre categorie, in ragione delle differenti aree geografiche in cui ognuna di queste si è sviluppata: quella europea, quella mediorientale e quella mediterranea (Anderson & Dieste, 2004; Ochsendorf, 2014) (Figura II.7).

La categoria europea comprende le volte, con geometria prevalentemente a tutto sesto e ogivale, costruite su strutture temporanee quali centine o casseforme in legno. I giunti tra i mattoni seguono la direzione radiale e lo spessore, pari allo spessore dei mattoni, non è di dimensioni trascurabili. Per contrastare le spinte su di esse agenti, tra le tecniche più comuni si può riscontrare la realizzazione di contrafforti laterali oppure il posizionamento di catene metalliche sulla linea di imposta o alle reni.

Alla seconda categoria di volte, particolarmente sviluppata, come indica il nome, nell'area mediorientale, appartengono quelle costruite senza la necessità di casseforme. Sono note anche

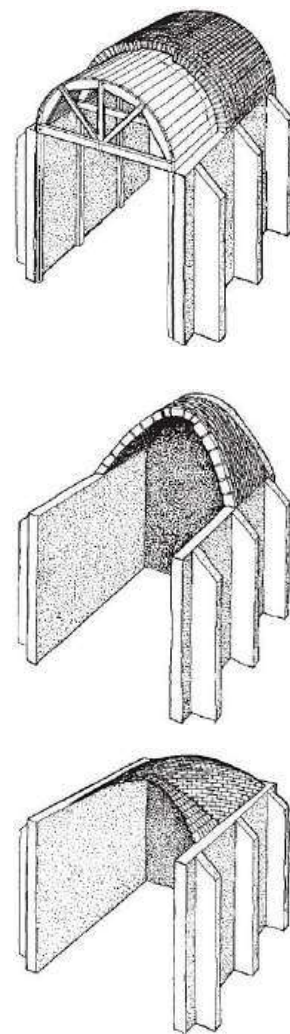


Figura II.7. Esempi di volta europea, di volta mediorientale e di volta mediterranea (Ochsendorf, 2014).

come “volte nubiane”⁸ o “*pitched vaults*” (Figura II.8). La tecnica, rimasta praticamente invariata nel tempo, è impiegata per la costruzione di volte a botte e, più raramente, per cupole che coprono ambienti di modeste dimensioni. In questo caso, i mattoni nelle volte a botte sono disposti seguendo un piano obliquo, e ciò comporta che le prime file risultano posate su una parete verticale che funge da supporto. Si basa sull'assemblaggio dei mattoni a partire dalle pareti esterne, procedendo simultaneamente da entrambi i lati per formare un arco parabolico (è proprio questa forma che assicura la resistenza alla volta). La geometria consente di posizionare piccoli contrafforti laterali, poiché anche la spinta esercitata sulle pareti esterne è ridotta rispetto alle volte con geometria a sesto pieno. Una volta formato il primo arco parabolico, la costruzione procede con la sovrapposizione di archi in sequenza (Figura II.9). La malta utilizzata è argillosa o bituminosa e i mattoni sono realizzati in argilla ed essiccati al sole.

Figura II.8. Esempi di volte nubiane rinvenute in un villaggio nei pressi di Abu Simbel (Di Maggio et al., 2024).



⁸ Questo nome deriva dalla regione dell'Egitto meridionale dove sono ancora oggi utilizzate.

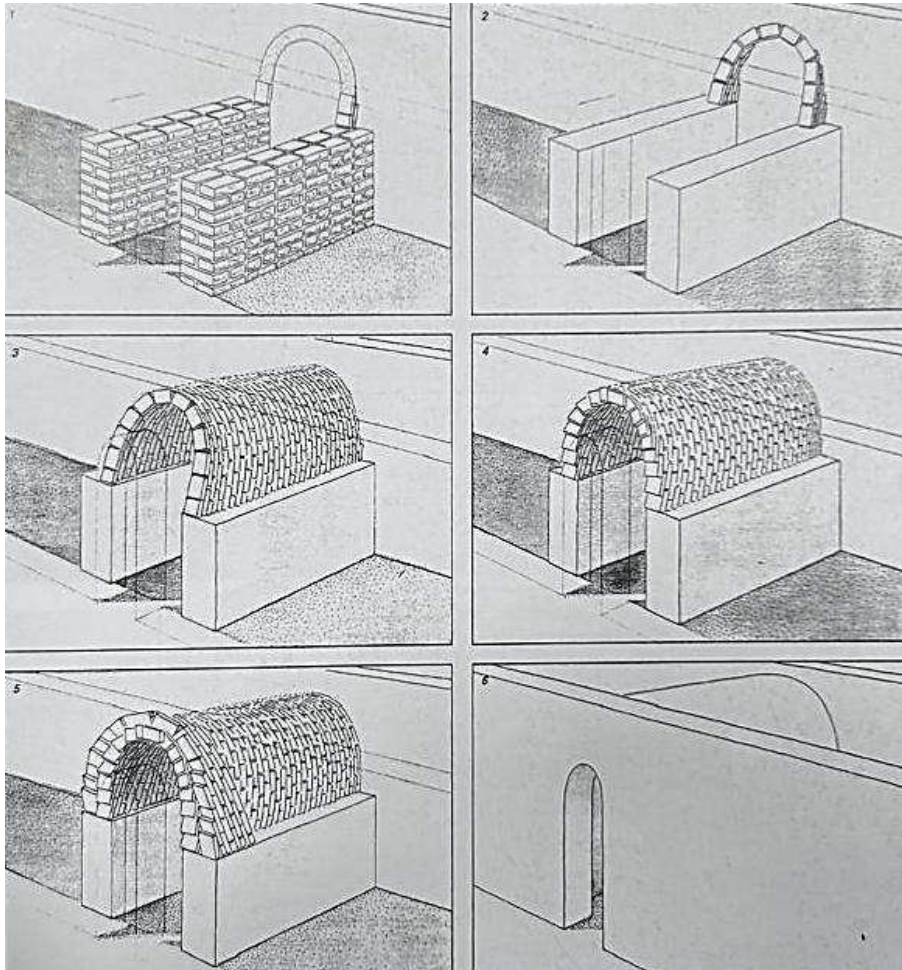


Figura 9. Fasi costruttive di una volta nubiana (Gulli & Mochi, 1995).

La terza categoria, quella delle volte mediterranee, è quella in cui vengono inquadrare le diverse tipologie di volte sottili.

Le volte sottili, in generale, siano esse *bóvedas tabicadas* (volte ammattonate, in spagnolo), *combles briquettes* (tetti ammattonati, in francese), *volte realine* (una tipologia che si colloca tra le volte finte, in canne e gesso, e le volte reali, con funzione portante, in mattoni o conci di calcarenite), o *volte in folio*, si distinguono dalle altre categorie di volte per alcune caratteristiche loro proprie: esse sono infatti realizzate attraverso la sovrapposizione di più

strati, tra loro sfalsati, di mattoni in laterizio sottili, il che conferisce alla volta un ridotto spessore e di conseguenza un a maggiore leggerezza. Oltre a ciò, è possibile la loro messa in opera secondo diverse geometrie e con sesti ribassati, dunque con frecce di molto inferiori rispetto a quelle previste nel caso delle volte europee o nubiane. Analogamente a queste ultime, anche nel caso di volte sottili i sistemi di centinatura sono, spesso, superflui.

Per un più approfondito studio delle peculiarità proprie delle volte mediterranee, ci si è riferiti alla tipologia delle *bóvedas tabicadas* spagnole; tale scelta deriva da alcune considerazioni:

- esiste una più vasta documentazione disponibile, rispetto a tutte le altre tipologie di volte;
- risultano le più diffuse;
- da esse deriverebbero tutti gli altri tipi di volte sottili, sia europei che extracontinentali;
- la loro conoscenza ed uso sono attestati molti secoli prima delle altre;
- risultano tutt'oggi largamente utilizzate.

II.3.1 MATERIALI E GEOMETRIE

Come già brevemente accennato, le volte sottili legate alla tradizione costruttiva mediterranea sono realizzate essenzialmente con mattoni sottili in laterizio di dimensioni diverse in base al differente luogo in cui sono stati prodotti i mattoni. La tabella seguente (Tabella II.1) riporta i dati relativi ai vari tipi di mattoni sottili in relazione alla denominazione che assumono, ai luoghi di produzione, alle dimensioni e alle diverse tipologie di volte con essi realizzate.

Nome	Luogo di produzione	Dimensioni [cm]	Spessore [cm]	Tipologia di volta
<i>Rasillas</i>	Spagna	15x30	1,5-2,5	<i>Bóveda tabicada</i>
<i>Tijolos burros o tijoleiras</i>	Portogallo	15x30	3,5-7	<i>Abobadilha alentejana</i>
<i>Briques</i>	Francia	13,5x27 11x22	2,7 5,5	<i>Comble briquete</i>
<i>Pantofali o parmarizzi</i>	Italia	12x25	0,8-1	<i>Volta realina</i>

Tabella II.1. Tipi di mattoni utilizzati per le differenti tipologie di volte sottili.

Come si può subito notare, alle diverse tipologie di mattoni corrispondono dimensioni molto differenti; in particolare, lo spessore è tra le tre dimensioni quello più variabile che influisce, di conseguenza, direttamente sullo spessore totale della volta. Anche le dimensioni in pianta delle volte sono influenzate dallo spessore delle stesse (come sarà meglio chiarito in seguito, infatti, l'aggiunta di ulteriori strati di mattoni permette di ottenere volte più spesse e capaci di coprire luci maggiori).

In tutte le tipologie, la malta utilizzata per l'unione dei mattoni è stata, storicamente, la pasta di gesso (gesso miscelato con acqua). La caratteristica del gesso che probabilmente ha condizionato la scelta da parte delle maestranze in luogo di altri leganti è da rintracciarsi nella sua rapidità di presa che, una volta posta in opera la malta, permetteva di ridurre i tempi di realizzazione. Inoltre, è proprio l'aderenza gesso-laterizio che rende le volte sottili delle strutture dal comportamento coesivo.

La diffusione del cemento come legante ha influenzato anche le modalità costruttive delle volte sottili; infatti, nel caso delle volte catalane - delle quali si è iniziato a fare largo uso negli anni Quaranta del secolo scorso, a seguito delle due guerre mondiali e

della guerra civile spagnola (1936-1939) (Huerta, 2019) -, la malta di cemento è stata preferita a quella di gesso, e ciò soprattutto per evitare il problema dell'igroscopicità, tipica del gesso, che limitava di molto la possibilità di realizzare *bóvedas* anche in ambienti esposti all'aperto e all'umidità. Allo stesso modo, e probabilmente per le stesse motivazioni, anche per le *abobadilhas* portoghesi si è preferito, nel secolo scorso, l'uso della malta di cemento⁹, mentre per le altre tipologie non si sono riscontrati dettagli in letteratura.

Per quanto riguarda le geometrie più diffusamente impiegate per la realizzazione delle volte mediterranee, si sono riscontrate le tipologie a botte e a padiglione, mentre il sesto risulta sovente ribassato, in ragione delle caratteristiche proprie della tecnica costruttiva sin qui descritta e del comportamento strutturale che ne deriva, per cui il rapporto monta/luce era di molto inferiore rispetto a quello delle volte a tutto sesto.

Nel caso delle *bóvedas tabicadas* e delle *volte realine*, si sottolinea che le stesse venivano utilizzate anche per la realizzazione di scale, le cosiddette *escaleras tabicadas* o *scale realine* (Figura II.10).

⁹ Per le volte portoghesi era utilizzata anche una miscela di calce e gesso in rapporto 3/2; ciò per rispondere all'esigenza di un legante che impiegasse meno di 20 secondi per fare presa (Rei et al., 2021).



Figura II.10. Esempi di *escalera tabicada* (modernismobarcelona.com) e *scala realina* (foto dell'Autore).

Mentre in Sicilia e nella regione francese del Languedoc-Roussillon le volte erano costruite soprattutto su vani di case umili e dunque di piccole dimensioni - con luci non superiori spesso ai 6-7 m -, in Spagna, il largo uso e i miglioramenti apportati alla tecnica costruttiva hanno permesso, nel tempo, di coprire spazi di dimensioni molto più ragguardevoli, come è nel caso, ad esempio, della Chiesa di San Francesco il Grande a Madrid, dove il grande spazio centrale è sovrastato da una cupola di 33 m di diametro (Figura II.11).

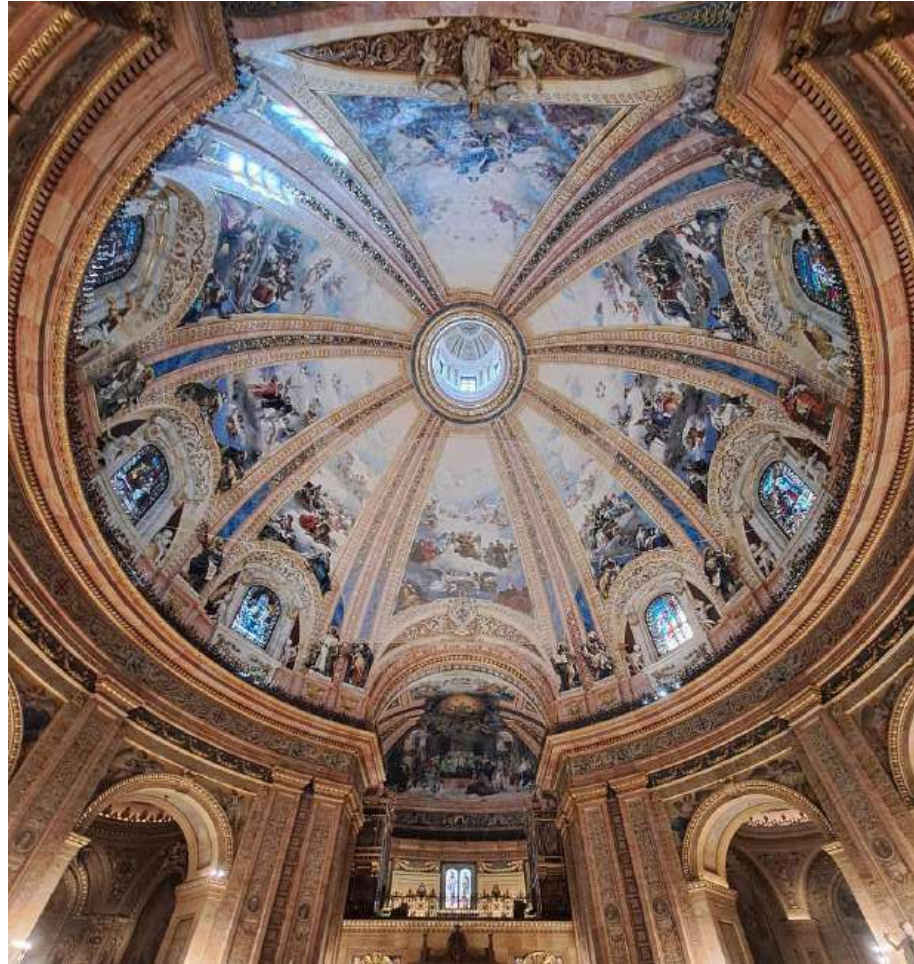


Figura II.11. Cupola della chiesa di San Francesco il Grande a Madrid (foto dell'Autore).

Come già accennato, le dimensioni delle volte dipendono intrinsecamente dal numero di strati sovrapposti di mattoni sottili e gesso con cui questi sono messi in opera; infatti, un numero maggiore di strati sovrapposti permette di realizzare volte con luci sempre più ampie. Tuttavia, per le diverse tecniche qui in esame esistono dei valori ben precisi che riguardano il numero di strati da sovrapporre che influisce, come detto, sulle dimensioni delle volte con essi realizzate. Nella tabella seguente (Tabella II.2) sono

riportati in relazione al numero di strati, lo spessore della volta e la luce massima ottenibile.

Tipologia di volta	Numero di strati	Spessore volta [cm]	Luce massima [m]
<i>Bóveda tabicada</i>	3-4	>10	30-35
<i>Abobadilha alentejana</i>	1	3	<3
	2	7	>3
<i>Comble briquete</i>	1-2	2,7-6,4	6-7
	2-5		
Volta realina	2	8-10	6-7
	3		

Tabella II.2. Numero di strati, spessore e luce massima delle diverse tipologie di volte sottili.

Dalla tabella, oltre alle informazioni di cui si è detto, emergono alcuni particolari interessanti per ogni tipologia.

Per le *bóvedas* spagnole, si nota come un maggiore numero di strati, benché permetta di raggiungere luci maggiori, tuttavia comporta (com'è ovvio) uno spessore maggiore e, di conseguenza, un peso maggiore della volta. Le *abobadilhas* portoghesi sono forse il caso più curioso in quanto esse sono state spesso realizzate in un solo strato di mattoni e raramente in due; ciò ha contribuito ad una minore resistenza strutturale, tanto che oggi gli esempi di volte ancora esistenti sono molto rari. Per quanto riguarda le *combles briquetés* francesi, i dati riportati sono tra loro discordanti poiché le fonti documentarie da cui le informazioni si traggono (Chassinat, 1865; d'Espie, 1754) - e in assenza di volte ancora esistenti - restituiscono dati differenti. Per quanto riguarda, infine, le volte *realine* siciliane si dirà più approfonditamente nel capitolo successivo (Capitolo III).

II.3.2 CENTINE E CASSEFORME

A differenza di altri sistemi costruttivi, in cui la realizzazione di opere provvisorie di sostegno è imprescindibile per la messa in opera, nel caso delle volte sottili, secondo quanto riportato nelle fonti letterarie di riferimento, la richiesta di centine e/o casseforme che le sostengano temporaneamente è minima o del tutto nulla.

Nel caso delle *bóvedas tabicadas*, l'uso di mattoni leggeri e di un legante (sia esso gesso o cemento Portland) in grado di fare presa velocemente ha permesso di costruire elementi voltati senza l'ausilio di centine e casseforme continue e ingombranti. Infatti, spesso gli unici elementi di aiuto alla realizzazione delle volte *tabicade* sono serviti solamente come guida per una più precisa posa dei diversi strati di mattoni, in particolare di quello più intradossale sopra il quale venivano adagiati i successivi. Questi elementi di aiuto alla costruzione sono, in genere, delle dime in legno, fisse (Figura II.12) - quando tra di esse sono ancorate delle corde o lenze - e mobili (Figura II.13) - quando, scorrendo su due binari, permettono di realizzare l'intera volta -. Nel caso di volte a padiglione (Figura II.14), due dime poste in corrispondenza delle diagonali del vano e tra loro intersecantesi, sono sorrette da un palo centrale (Moya Blanco, 1947).

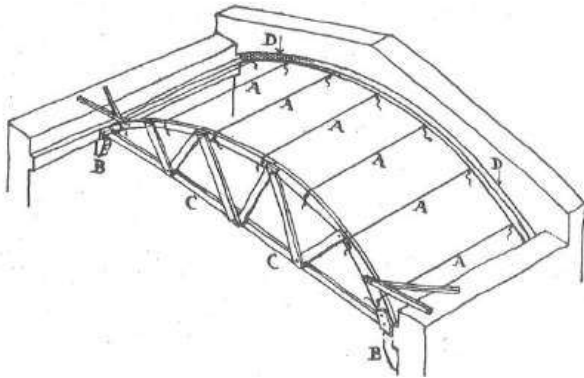


Figura II.12. Dime per volta a botte collegate tramite corde (Moya Blanco, 1947).

Si riporta la descrizione di ogni elemento tradotta dall'immagine originale:

AAA: Corde tese parallele all'asse del cilindro.

BB: Mensole per l'appoggio della dime.

CC: Dima leggera su cui è fissata un'estremità di ciascuna corda.

DD: Incavo nel muro di testa, sul cui bordo inferiore è fissata l'altra estremità di ciascuna corda.

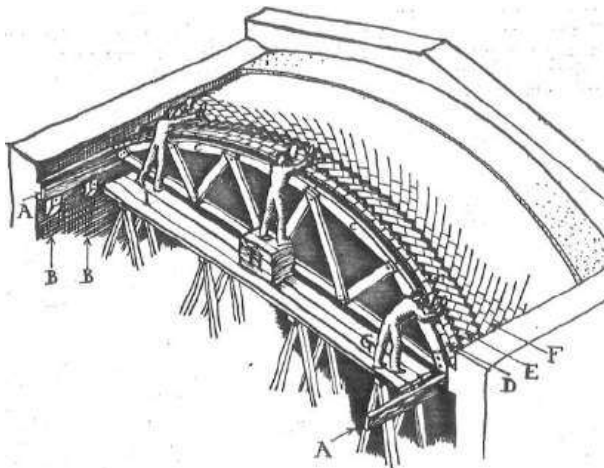


Figura II.13. Dima per volta a botte scorrevole lungo due binari (Moya Blanco, 1947).

Si riporta la descrizione di ogni elemento tradotta dall'immagine originale:

AA: Assi che fungono da binari.

BB: Mensole per l'appoggio dei binari.

CC: Dima leggera.

D: 1° strato, di mattoni (con gesso).

E: 2° *idem, id.* (con cemento).

F: 3° *idem, id.* (con cemento).

G: Operaio della squadra che mette in opera il 1° strato.

H: *Idem, id. id.* il 2° strato.

I: *Idem, id. id.* il 3° strato.

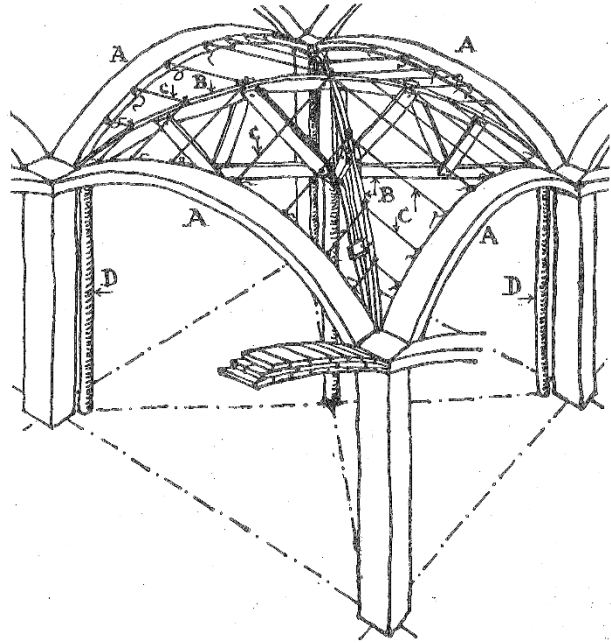


Figura II.14. Dime per volta a padiglione intersecantesi e sorrette da un palo centrale (Moya Blanco, 1947).

Si riporta la descrizione di ogni elemento tradotta dall'immagine originale:

AA: Archi di testa.

BB: Dime diagonali.

CC: Corde tese tra gli archi e le dime.

DD: Appoggio della dima.

Come si vedrà in seguito, queste soluzioni sono simili a quelle adoperate per la realizzazione delle *volte realine* siciliane. Casseforme molto leggere erano utilizzate anche per le volte portoghesi (Rei et al., 2021): queste permettevano di utilizzare dei leganti che non necessariamente facevano presa rapidamente, come la calce o una miscela di cemento e sabbia, per cui le centine venivano rimosse dopo circa 24 ore (Rei et al., 2014).

Per le volte francesi, a differenza di quanto asserito da D'Espie, cioè che non vi fosse bisogno di centine per la loro realizzazione (d'Espie, 1754), secondo Chassinat erano invece utilizzate delle dime fatte di pezzi di tavole di legno chiodate e conformate secondo la specifica geometria delle volte (Chassinat, 1865) (Figura II.15).

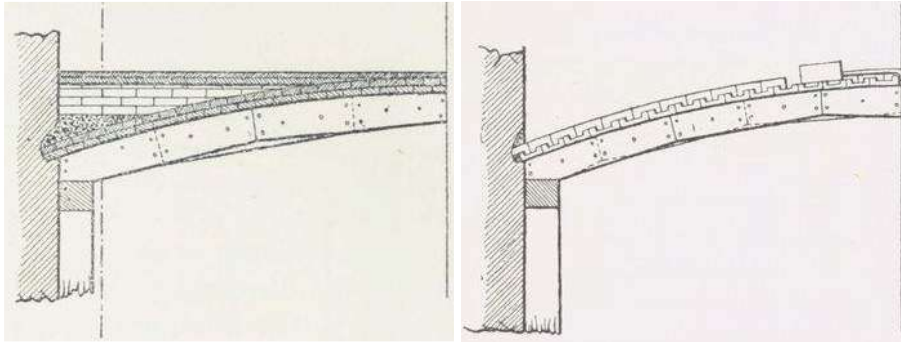


Figura II.15. Centina per volte alla Roussillon (Chassinat, 1865).

II.3.3 ELEMENTI E STRATI ALL'ESTRADOSSO DELLE VOLTE

La zona estradossale delle volte sottili, ovvero quella destinata a rimanere celata alla vista perché chiusa dal solaio o dalla copertura superiore, è in realtà quella da cui dipende il corretto funzionamento dell'intero orizzontamento voltato.

L'ultimo strato di mattoni costituenti la volta, infatti, non appena messo in opera veniva sovente ricoperto da malta - di gesso (Figura II.16) o di cemento -; questo strato, chiamato *caldeamento* (in portoghese (Rei et al., 2021)), assolveva a diverse funzioni utili al comportamento strutturale della volta nel suo complesso: rendendo uniforme l'estradosso della volta, infatti, veniva contemporaneamente migliorato il collegamento e l'aderenza tra mattoni e legante contribuendo ad aumentare, quindi, la capacità resistente della volta.

Figura II.16. Estradosso di due volte realine a padiglione a pianta quadrata da cui si evince lo strato di malta di gesso (foto dell'Autore).



Oltre ai rinfianchi pesanti (fino alle reni) e leggeri (dalle reni alla sommità, in realtà presenti soltanto in alcuni casi), un elemento ricorrente all'estradosso delle volte è costituito da muretti posti tra la volta stessa e i muri d'ambito. Questi assumono diverse denominazioni in ragione della diversa tipologia di volta: frenelli per le *volte realine*, *muretes de tijolo* per le volte portoghesi e *costillas* (o *tabiques sencillos*) per le volte catalane. La loro presenza è già attestata nel trattato di Fray Lorenzo de San Nicolás - il primo a codificare la tecnica costruttiva delle *bóvedas tabicadas* già nel Seicento - (de San Nicolás, 1639) giustificandone l'impiego come utile a migliorare la risposta strutturale delle volte. Il ruolo ricoperto da questi muretti è, infatti, quello di incanalare i carichi e trasmetterli ai muri d'ambito, diminuendo dunque l'entità delle sollecitazioni cui è soggetta la volta sottile.

Riguardo la conformazione dei muretti non vi è analogia tra le differenti tecniche di volte mediterranee, dal momento che, mentre il loro spessore è in tutti i casi compreso tra i 10 e i 20 cm, cioè corrispondente alla dimensione dei conci o dei mattoni che le costituiscono, ciò che varia è soprattutto la loro altezza. In tal senso, se nel caso dei frenelli (Figura II.17, a sinistra) si ha un'altezza che non supera le poche decine di cm o comunque equivalente ad $1/3$ della monta della volta, se si considerano le *abobadilhas alentejanas* (Figura II.17, a destra) questo valore arriva a $2/3$, compatibilmente con quanto asserito da Fray Lorenzo (Rei & Sousa Gago, 2016).

Figura II.17. Frenello in una volta realina (immagine dell'Autore) e muretes in una abobadilha portoghese (Rei et al., 2021).



Più eterogenei risultano i casi di *volte ammattonate* francesi e di volte spagnole. Nel primo caso, il principale teorico della tecnica, il conte D'Espie - autoproclamatosi pioniere e artefice di questa tipologia di volte - teorizza e mette in opera dei muri localizzati all'estradosso della volta che, superandola in altezza, servono per l'alloggiamento delle travi di copertura (d'Espie, 1754) (Figura II.18).

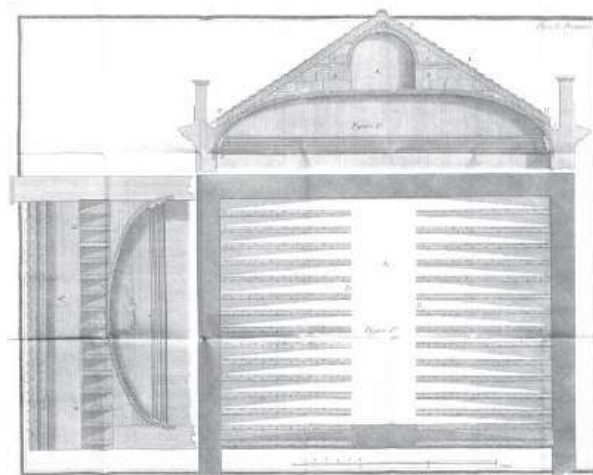


Figura II.18. Comble briquete secondo il conte D'Espie (d'Espie, 1754).

Una simile soluzione è quella adottata nel caso delle *bóvedas* spagnole (Moya Blanco, 1947), per le quali va tuttavia citata un'altra soluzione, simile in questo caso a quella dei frenelli, dunque con *costillas* di altezza contenuta entro le reni della volta (Figura II.19).

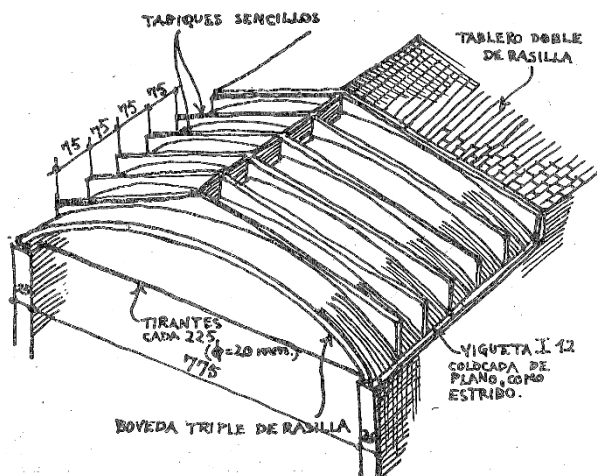


Figura II.19. Bóveda tabicada con *costillas* (qui riportate come *tabiques sencillos*) all'estradosso (Moya Blanco, 1947).

Altri elementi che possono ritrovarsi collocati all'estradosso delle volte sottili sono le controvoltine.

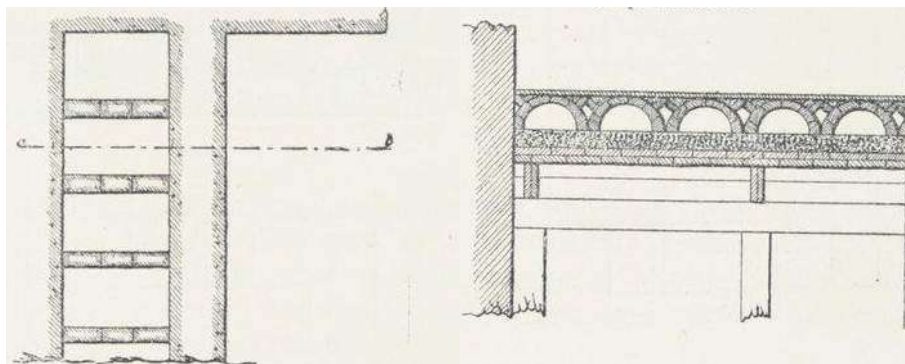
Si tratta di volte realizzate con la stessa tecnica della volta principale. Tali elementi, tralasciando le volte portoghesi e le volte spagnole, sono riscontrabili nelle altre tipologie di volte sottili anche se con inevitabili differenze: nel caso di volte realine, infatti, le controvoltine sono posizionate parallelamente ai muri d'ambito - sia per volte a botte che a botte con teste di padiglione - (Figura II.20); diversamente, nelle *combles briquetés*, tali elementi sono inseriti ortogonalmente alle murature d'ambito (Chassinat, 1865) (Figura II.21).

Come già accennato, la loro funzione strutturale è principalmente quella di distribuire i carichi gravanti sulla volta e convogliarli ai muri d'ambito, formando al contempo, quanto più possibile un piano per la posa del solaio o della copertura soprastante la volta.



Figura II.20. Controvoltina all'estradosso di una volta realina (foto dell'Autore).

Figura II.21. *Contre-voûtain* di *comble briquete*, in pianta e in sezione (Chassinat, 1865).



II.4 STRUTTURE A GUSCIO SOTTILE

La tecnica costruttiva delle volte sottili, rimasta pressoché inalterata nel corso dei secoli e ad oggi (escludendo le *bóvedas tabicadas* del cui uso attuale si dirà appresso) relegata alle architetture storiche, è stata progressivamente affiancata ed integrata dalle strutture a guscio sottile di moderna concezione. Lo sviluppo di queste strutture, iniziato a partire dalla fine del XIX secolo, è avvenuto in coincidenza della diffusione di nuovi metodi e procedure costruttive legati al diffondersi del cemento - e del calcestruzzo armato - come materiale da costruzione.

Le possibilità offerte dal calcestruzzo armato (adoperato da solo o in combinazione con altri elementi come, ad esempio, i mattoni in laterizio) nonché i metodi di calcolo scientifici come la statica grafica o l'applicazione del principio della catenaria, hanno consentito lo sviluppo di diverse tecniche e diversi metodi di progettazione e realizzazione di "strutture a guscio sottile". Si noti che non si tratta più di elementi tecnici in quanto tali, intesi come parti del sistema tecnologico degli edifici - coincidenti con le partizioni interne orizzontali degli stessi, quali erano le volte -, ma di "strutture a guscio" coincidenti, appunto, con l'intero sistema

strutturale dell'edificio che spesso ne caratterizza l'aspetto architettonico.

Di seguito vengono analizzate quelle che si ritengono essere le produzioni architettoniche più rilevanti, con riferimento anche ai progettisti, per ciò che riguarda l'innovazione nei metodi di progettazione e nelle modalità di messa in opera di gusci sottili attraverso i materiali principalmente utilizzati: mattoni sottili derivati dalla tradizione; calcestruzzo armato e la combinazione dei due materiali. L'accento viene posto anche sulle procedure di prefabbricazione per la realizzazione dei gusci.

11.4.1 GUSCI IN MATTONI SOTTILI

L'uso di mattoni sottili per la costruzione di strutture a guscio è limitato essenzialmente alla tecnica vernacolare delle volte sottili nelle molteplici sfaccettature in cui queste nel corso del tempo si sono sviluppate. Questa asserzione va completata considerando la fase di sviluppo che la tecnica delle *bóvedas tabicadas* ha attraversato a partire dalla fine dell'Ottocento attraverso l'integrazione con nuovi materiali e tecniche.

Intrinsecamente legata a questo sviluppo è la figura di Rafael Guastavino Moreno (1842-1908), architetto e *mastro de obras* valenciano emigrato nel 1881 negli Stati Uniti d'America dove, con la Guastavino Fireproof Construction Company, ha ottenuto un grande successo come costruttore di volte in mattoni.

Come suggerito già nel nome della compagnia da lui fondata, Guastavino ha saputo porre grande enfasi su una delle caratteristiche intrinseche delle *bóvedas tabicadas* delle quali in Spagna

aveva sin da giovane avuto modo di apprenderne la tecnica¹⁰: la loro resistenza al fuoco. Questo è un aspetto da non sottovalutare, specie per quel periodo¹¹, tanto che Guastavino ne comprovò l'efficacia anche attraverso delle prove sperimentali. Quella che è stata chiamata *arte de la rasilla estructural* (letteralmente, "arte del mattone strutturale") (Ochsendorf, 2014), e che l'architetto valenciano aveva potuto iniziare a sperimentare già in Spagna, consiste essenzialmente nella realizzazione di volte e cupole seguendo la tecnica costruttiva delle volte sottili catalane, ma con due importanti novità: l'uso del cemento come legante in luogo del gesso e di rinforzi metallici. Il cemento Portland, in quegli anni ancora in fase di perfezionamento, era in grado di offrire prestazioni migliori rispetto al tradizionale gesso:

«...La resistenza e la rapidità di presa di questo nuovo materiale trasformarono la volta laminare, consentendo di adattarla a costruzioni più grandi e dalla pianta più articolata. La costruzione diventava inoltre più spedita, poiché le volte appena eseguite avevano, grazie al cemento, una resistenza intrinseca così elevata che poco dopo la posa potevano essere usate come piattaforme di lavoro per i muratori che vi lavoravano sopra...» (Lane, 2005)

L'integrazione di elementi metallici di rinforzo come parte integrante del sistema costruttivo è ciò che soprattutto ha consentito di creare degli orizzontamenti voltati, volte e cupole, di luce o

¹⁰ Alcune delle sue opere spagnole più importanti, in cui ebbe modo di perfezionarsi, sono l'Impianto a vapore F.lli Batlló a Barcellona, il teatro Centre Vilasanés a Vilasar del Dalt e la fabbrica di cemento Asland a Clot del Moro.

¹¹ Si pensi che il grande incendio che aveva colpito la città di Chicago era avvenuto soltanto pochi anni prima del suo arrivo negli Stati Uniti, nel 1871.

diametro di molto superiori a quelle realizzabili con la tradizionale tecnica *tabicada*, arrivando anche ad un diametro di 30 m, come nel caso della cupola per la Cattedrale di St. John the Divine (Figura II.22).

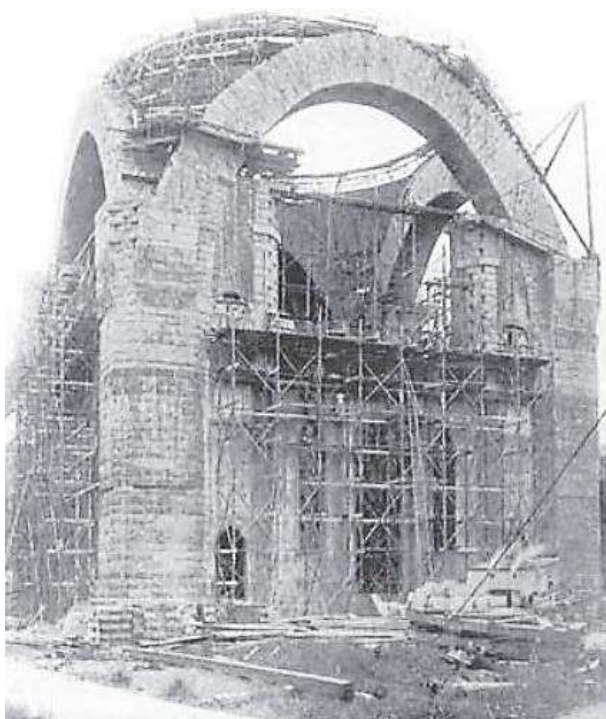


Figura II.22. Fase di costruzione della Cattedrale di St. John the Divine a New York (Ramazzotti, 2001).

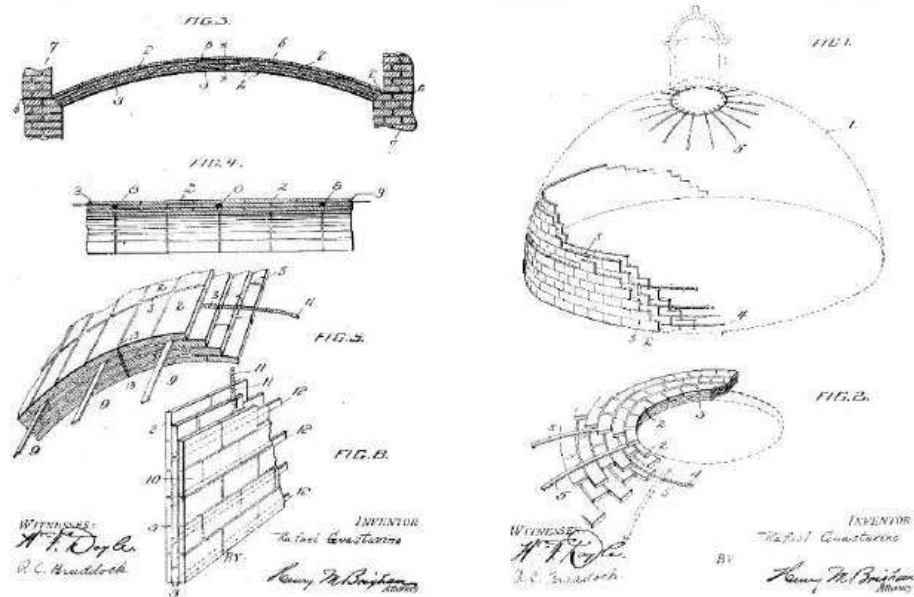
La combinazione tra laterizio e acciaio è ciò che Guastavino ha chiamato costruzione “organica”:

«...[This style of construction], which we shall call organic, (...) is a combination of the permanent and perishable materials; the combined construction of materials proper for pressure with materials proper for tension. In a word, the combination of masonry and iron, or iron and masonry, according to the relative proportion between both elements,

is the latest typical style of construction invented by man...»¹²
(Huerta, 2019)

La tecnica che Guastavino ha impiegato e ha contribuito a sviluppare è stata oggetto di diversi brevetti dai quali è possibile carpire le caratteristiche della tecnica stessa. I brevetti depositati riguardano, oltre alle diverse innovazioni relative alle volte *tabicade* (Figura II.23), anche partizioni verticali, scale, solai a prova di incendio nonché diversi tipi di laterizi, utili per garantire maggiore durabilità e minore uso di gesso (i cosiddetti *piezas con reborde*) (Ochsendorf, 2005), nonché per migliorare l'acustica degli ambienti da voltare o, ancora, per usi sanitari (Lane, 2005).

Figura II.23. Brevetto di Guastavino del 1910 riguardante l'applicazione di barre di acciaio alle murature (<https://patents.google.com/patent/US947177A/en?assignee=rafael+guastavino&coq=rafael+guastavino>).



¹² Trad.: «... [Questo stile di costruzione], che chiameremo organico, (...) è una combinazione di materiali permanenti e deperibili; la costruzione combinata di materiali adatti alla compressione con materiali adatti alla tensione. In una parola, la combinazione di muratura e ferro, o ferro e muratura, secondo la proporzione relativa tra i due elementi, è l'ultimo stile tipico di costruzione inventato dall'uomo...».

Il più noto degli scritti di Guastavino, quello che delinea la sua produzione architettonica, è l'*Essay on the theory and history of cohesive construction, applied especially to the timbrel vault*¹³: in esso viene per la prima volta introdotto il concetto di “costruzione coesiva”, che si basa «...sulle proprietà di coesione e assimilazione di alcuni materiali, i quali, tramite una trasformazione più o meno lunga, finiscono per assomigliare ai conglomerati naturali...» (Gulli, 2006), dunque i componenti non possono essere separati senza distruggere l'intera massa, come è invece nel caso delle “costruzioni a gravità”, altro concetto da lui introdotto, basate sull'equilibrio di due solidi posti a contatto - con le forze congiunte e opposte l'una all'altra - senza prendere in considerazione «...il potere di coesione di un qualunque materiale posto tra i solidi...» (Gulli, 2006).

Per comprendere empiricamente il concetto di costruzione coesiva si consideri la Figura II.24: essa mostra il foro causato da un blocco di 2 tonnellate precipitato da 12 m sopra una delle volte - realizzate da Guastavino - della Biblioteca Pubblica di Boston nel 1892; se si fosse trattato di una ordinaria volta in pietra probabilmente essa sarebbe crollata rovinosamente, mentre in questo caso è bastato riparare il lieve danno per rendere la volta nuovamente utilizzabile¹⁴ (Collins, 1968).

¹³ *Timbrel vault* (letteralmente, “volta a tamburello” (Gulli, 2006)) è il termine con cui, come già detto, vengono indicate in America le volte sottili. Probabilmente il riferimento è al suono da esse prodotto - che ne rende intuibile il ridotto spessore - quando colpite con un martelletto (Lane, 2005).

¹⁴ Un simile episodio, che dimostra l'efficacia delle strutture coesive, è raccontato dal conte d'Espie nel suo *Traité*: in questo caso, egli riferisce di come il danno causato da una palla di cannone sia limitato soltanto al foro da questa prodotto nel colpire la volta alla Roussillon, lasciando intatto il resto dell'elemento voltato (d'Espie, 1754).

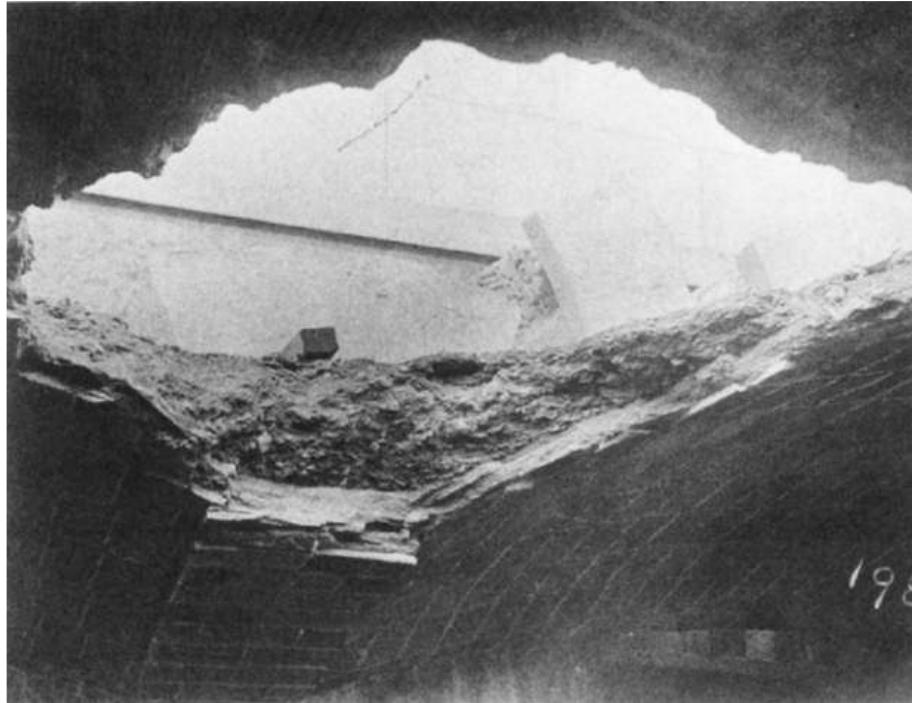
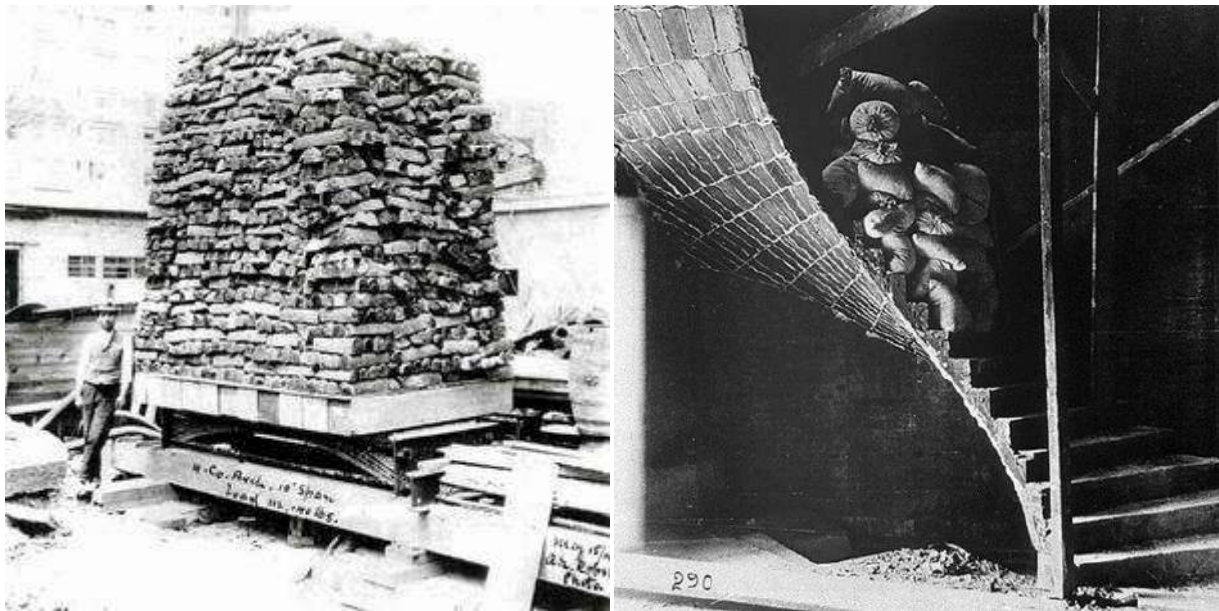


Figura II.24. Foro nella volta a tamburello della Biblioteca Pubblica di Boston (Collins, 1968).

Nell'*Essay* di Guastavino sono anche compendiate alcune delle prove di laboratorio da lui effettuate per dimostrare l'efficacia delle volte coesive (Figura II.25), mentre la verifica del comportamento delle volte e delle cupole veniva da lui effettuata attraverso la statica grafica: questo è un altro elemento di grande novità rispetto al passato, dal momento che l'uso del teorema della sicurezza o dei metodi dell'equilibrio (ad opera di Guastavino Jr.) non era stato prima di allora una prassi per la verifica delle strutture a guscio (Ochsendorf, 2005).



La lezione di Guastavino ha aperto la strada ad una nuova era delle volte, e di conseguenza dei gusci sottili, realizzati avendo come riferimento le tradizionali *bóvedas tabicadas* spagnole. In Spagna la riproposizione della tecnica *tabicada*, favorita nel secondo dopoguerra dal periodo autarchico, passa da figure chiave quali Antoni Gaudí Cornet (1852-1926), Lluís Domènech i Montaner (1850-1923), Luis Moya (1904-1990) o Ignacio Bosch Reitg (1910-1985). Progettato da Moya è il Museo de América a Madrid (Figura II.26), realizzato con gusci sottili in laterizio e malta cementizia e sottesi da costoloni incrociati inseriti per sopportare carichi maggiori (Moya Blanco, 1947) (Figura II.27).

Figura II.25. Esempi di prove di carico per una volta (a sinistra) (Ochsendorf, 2005) e una scala (a destra) (<https://www.archweb.com/es/Tiempos-catalanes/>) realizzate con il sistema di Guastavino.

Figura II.26. Uno dei gusci costolonati del Museo de América (foto dell'Autore).

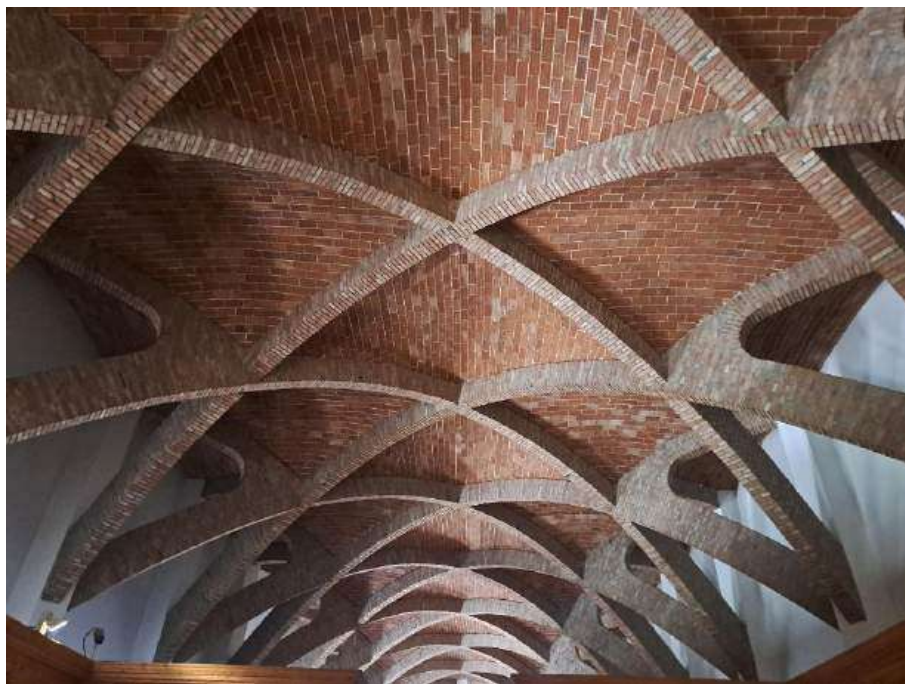
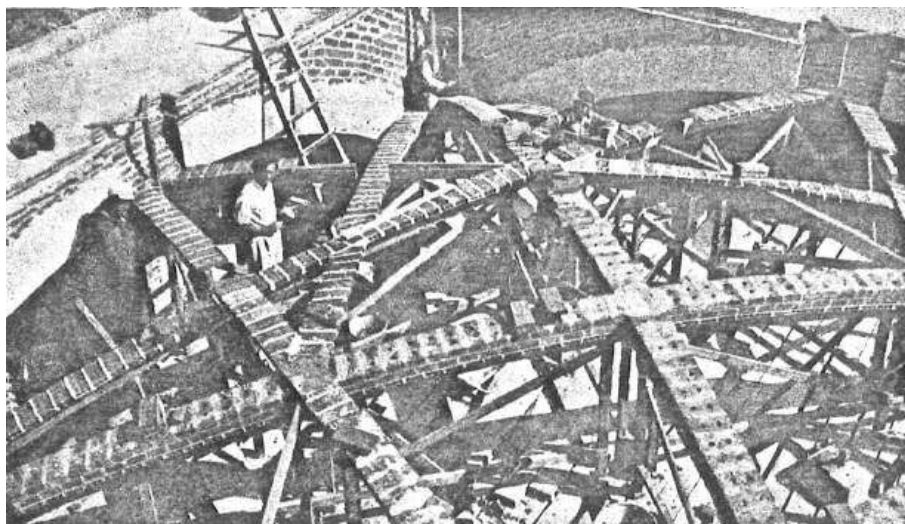


Figura II.27. Fase di costruzione dei costoloni di uno dei gusci del Museo de América (Moya Blanco, 1947).



In America Latina, dove già la tecnica *tabicada* era stata recepita in passato grazie all'opera di Fray Domingo de Petrés, ha operato nel secolo scorso un altro protagonista dell'avanzamento

nell'uso dei mattoni sottili per la realizzazione di gusci, l'uruguayano Eladio Dieste (1917-2000).

Dieste è considerato la seconda figura¹⁵ ad avere rivoluzionato il campo della costruzione dei gusci sottili in muratura: a lui si deve infatti, grazie al ricorso alle teorie sul calcolo delle strutture in calcestruzzo armato, la progettazione e costruzione di gusci in muratura dalle forme audaci e innovative, capaci di coprire luci fino ad oltre 50 m, dimensioni fino ad allora inaudite (Anderson & Dieste, 2004).

L'uso di materiali reperibili localmente (il laterizio e il legno) e la necessità di limitare allo stretto necessario i materiali di importazione (il cemento Portland) è la contingenza che ha permesso a Dieste di giungere alla sperimentazione e definizione di una tecnica costruttiva per i gusci sottili inedita, quella della cosiddetta *cerámica armada*.

«...Se trata de cáscaras formadas por una sola capa de ladrillo colocado de plano y con las juntas continuas en las dos direcciones, de modo que tanto en la directriz catenaria de la bóveda como a lo largo de su generatriz rectilínea puede alojarse una pequeña armadura metálica que permite al conjunto trabajar como una membrana elástica. Una vez se termina de construir la parte cerámica de las bóvedas se le añade una capa superior compuesta por un enlucido de arena y portland en la que se embebe una fina malla electrosoldada para control de las fisuras de retracción...»¹⁶ (Martí Arís, 2001)

¹⁵ La prima è, invece, Guastavino che, applicando la statica grafica alle tradizionali *bóvedas*, ha realizzato le prime strutture in muratura progettate con criteri scientifici (Anderson & Dieste, 2004).

¹⁶ Trad.: «...Si tratta di gusci formati da un unico strato di mattoni posati in piano e con giunti continui in entrambe le direzioni, in modo che sia sulla linea guida catenaria della volta che lungo la sua generatrice rettilinea possa essere alloggiata una piccola armatura metallica che permette all'insieme di

Lo strato di mattoni all'intradosso, rimasto a faccia vista dopo il disarmo, serviva da cassaforma per il calcestruzzo armato gettato nella successiva fase. La scelta dei mattoni - un prodotto di alta qualità in Paesi come Uruguay, Argentina e Brasile - è legata alla sua elevata resistenza meccanica alla compressione¹⁷; come afferma lo stesso Dieste, a parità di resistenza, il laterizio ha un modulo di elasticità minore del calcestruzzo e ciò è un vantaggio perché conferisce alla struttura una maggiore adattabilità alle deformazioni (Marín & Barluenga, 2014).

Oltre a ciò, «...bricks are lighter, therefore need less reinforcement and lighter formwork structures; in a brick vault the majority of the material is already hardened and formwork can be struck sooner than concrete structures. As soon as 24 hours later in some situations; brickwork uses less cement than concrete; the hygrothermal characteristics of brick can help to moderate internal building humidity; brickwork tends to weather more comfortably than concrete...»¹⁸ (Pedreschi & Theodosopoulos, 2010).

funzionare come una membrana elastica. Una volta terminata la costruzione della parte ceramica delle volte, viene aggiunto uno strato superiore composto da una malta di sabbia e portland in cui viene immersa una sottile rete elettrosaldata per il controllo delle fessurazioni da ritiro...».

¹⁷ Dieste parla addirittura di laterizi, a prezzi accessibili, che raggiungono i 1500 kg/cm² di resistenza (Marín & Barluenga, 2014).

¹⁸ Trad.: «... i mattoni sono più leggeri, quindi richiedono meno rinforzi e strutture di cassaforma più leggere; in una volta in mattoni la maggior parte del materiale è già indurito e la cassaforma può essere rimossa prima rispetto alle strutture in calcestruzzo. In alcuni casi già dopo 24 ore; la muratura in mattoni utilizza meno cemento rispetto al calcestruzzo; le caratteristiche igrotermiche del mattone possono aiutare a moderare l'umidità interna dell'edificio; la muratura in mattoni tende a resistere meglio agli agenti atmosferici rispetto al calcestruzzo...»

Altri vantaggi dell'utilizzo dei mattoni includono una migliore resistenza all'invecchiamento, contribuendo a migliorare le qualità acustiche e ambientali (Anderson & Dieste, 2004).

Questo sistema costruttivo, che consente di ottenere strutture il cui spessore massimo - nei casi realizzati - è di 12 cm (Marín & Barluenga, 2014), è stato applicato alla costruzione di diversi gusci e volte appartenenti a due diverse categorie, basate sul principio della catenaria: le *bóvedas gausas* e le *cascaras autoportantes*. Nella prima categoria (letteralmente "volte gaussiane", dal matematico Karl Gauss, che descrisse la geometria delle superfici curve) rientrano quelle strutture voltate in cui la doppia curvatura delle geometrie utilizzate consente una resistenza strutturale ai carichi che sarebbe altrimenti impossibile con superfici orizzontali (Garcia Lammers, 2021). Queste volte sono state realizzate variando la larghezza dell'alzata del guscio da un valore massimo, in corrispondenza della chiave, a zero, in corrispondenza delle pareti d'ambito. La forma geometrica è stata ottenuta spostando una catenaria con campata fissa e alzata variabile contenuta in un piano verticale mobile che si muoveva rimanendo parallelo a un altro piano verticale fisso. (Marín & Barluenga, 2014). Nelle *bóvedas gausas*, il rapporto tipico tra campata e altezza (*span-to-rise ratio*) è pari a 10. Dal punto di vista strutturale, la geometria ondulata è progettata per resistere alla deformazione, garantendo al contempo la massima efficienza nell'uso dei materiali. Inoltre, la compressione assiale della muratura dovuta al proprio peso è assicurata dalla geometria catenaria delle volte. (Pedreschi & Theodossopoulos, 2007).

Esempi di gusci di questo tipo si trovano nella Chiesa di Cristo Operaio ad Atlántida (1958-1960) (Figura II.28), nella Fabbrica TEM a Montevideo (1960-1962), nello Stabilimento di Confezionamento Frutta Cítricos Caputto a Salto (1971-87) e nel silo orizzontale Cadyl a Young (1976-1978) (Figura II.29).



Figura II.28. Chiesa di Cristo Operaio ad Atlántida (Anderson & Dieste, 2004).

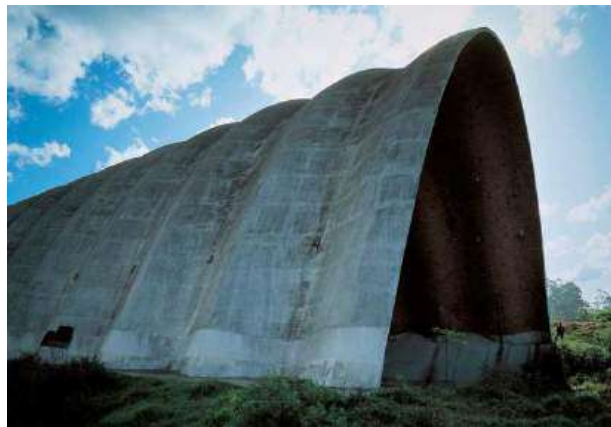


Figura II.29. Silo orizzontale Cadyl a Young (Anderson & Dieste, 2004).

La seconda categoria, costituita da gusci autoportanti, comprende gusci cilindrici a botte che, data la loro forma, resistono sia a flessione che a compressione.

Per contrastare le sollecitazioni di trazione dovute alla flessione, Dieste ha sviluppato un efficace metodo di precompressione: questo consisteva nel posizionare cavi d'acciaio a forma di anello sulla parte superiore dei gusci, ancorandoli a ciascuna estremità degli stessi. La precompressione veniva ottenuta stringendo i cavi insieme nel punto centrale degli anelli e modellandoli a forma di "8". Una volta raggiunta l'estensione richiesta, i cavi venivano fissati in posizione con morsetti metallici (Figura II.30). Infine, veniva gettato un massetto di calcestruzzo per coprire i cavi. (Pedreschi, 2006).

Il complesso industriale Lanas Trinidad Wool a Trinidad (1965-1989) e il terminal degli autobus municipali a Salto (1973-1974) (Figura II.31) sono stati costruiti utilizzando questo metodo, che ha permesso di realizzare sbalzi fino a 15 m.

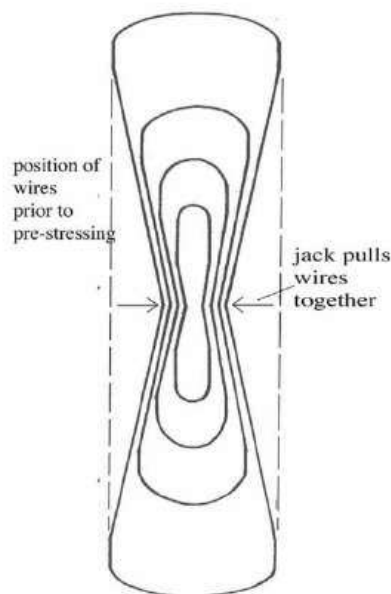


Figura II.30. Cavi di acciaio ancorati all'estradosso del guscio e pre-compressi e disegno esplicativo (Pedreschi, 2006). Rielaborazione dell'Autore

Figura II.31. Terminal degli autobus a Salto (Anderson & Dieste, 2004).



Per la realizzazione di questi sistemi, in particolare delle *bóvedas gausas*, Dieste ha utilizzato i cosiddetti *encofrados* (letteralmente, casseforme/ponteggi), che offrivano un doppio vantaggio: da un lato, infatti, poiché potevano essere riutilizzati più volte, era possibile ottenere un notevole risparmio in termini di materiali; dall'altro lato, altrettanto importante era il risparmio di tempo sia nella costruzione delle nervature stesse che dei gusci (essendo possibile smontare le casseforme 24 ore dopo il completamento della volta (Pedreschi & Theodossopoulos, 2007)).

Ogni *encofrado* era costituito da un telaio rigido in tubi d'acciaio sopra il quale una cassaforma in legno aveva il compito di definire la forma della volta. Lo scorrimento verticale delle due travi sul telaio consentiva di spostarle rapidamente dopo la costruzione di ogni volta e di posizionarle per l'installazione della volta adiacente (Garcia Lammers, 2021) (Figura II.32).

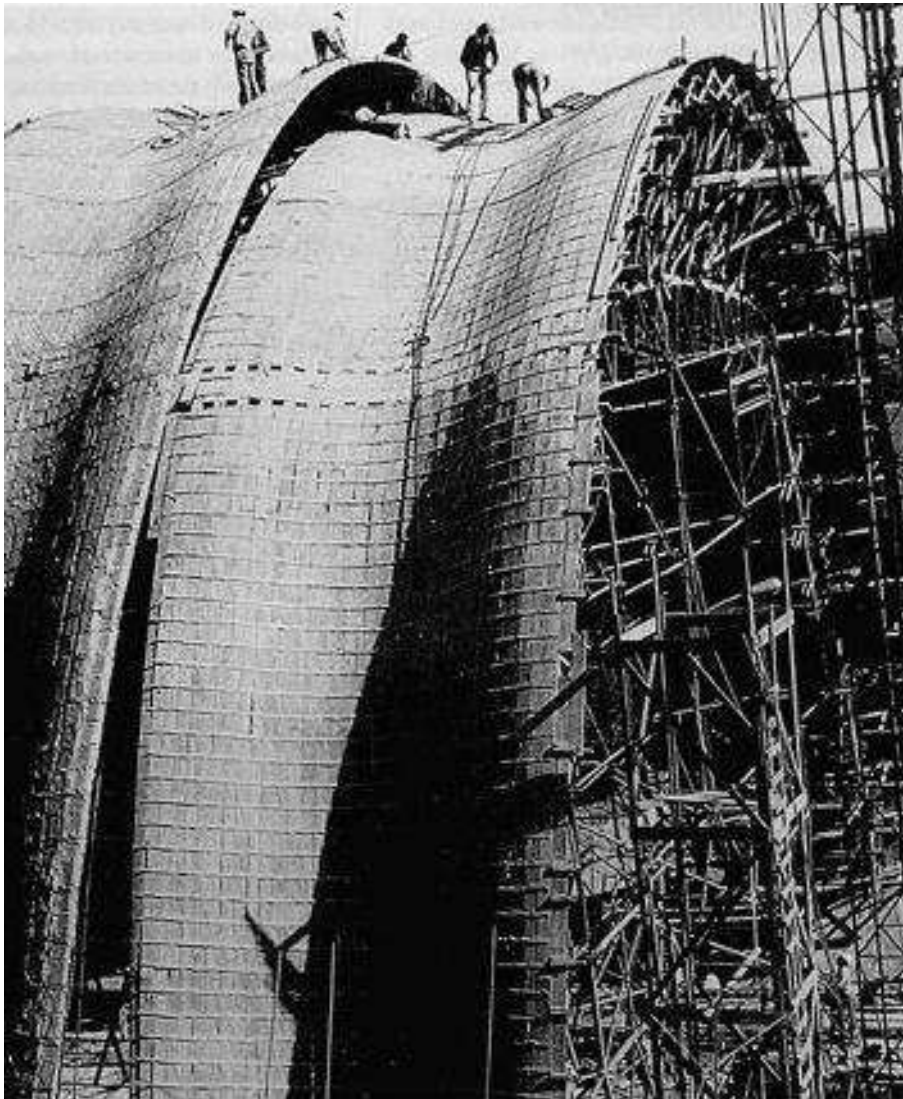


Figura II.32. Encofrado per volta gaussiana (<https://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/saman/nggal-lery/slideshow>).

In tutta la produzione di Eladio Dieste, la capacità portante delle strutture a guscio dipende essenzialmente dalla loro forma e non è determinata empiricamente, ma attraverso l'uso di metodi di calcolo solitamente adottati per le coperture in cemento armato. (Anderson & Dieste, 2004).

Sebbene molti aspetti della *cerámica armada* di Dieste abbiano dei punti in comune con le *bóvedas* della tradizione, è lo stesso ingegnere uruguayano a chiarire il rapporto sussistente tra queste due tecniche, insistendo sul fatto che le sue *cascaras autoportantes* e *bóvedas gausas* siano piuttosto derivabili dalle strutture in calcestruzzo armato¹⁹.

II.4.2 GUSCI IN CALCESTRUZZO ARMATO

L'introduzione del calcestruzzo armato, sul finire dell'Ottocento, ha rivoluzionato in poco tempo le pratiche costruttive fino a quel momento esistenti e, nell'ambito dei gusci sottili ha consentito sperimentazioni che nel corso del Novecento si sono concretizzate in gusci dalle forme più varie e dalle dimensioni fino ad allora mai osate²⁰ (Figura II.33).

¹⁹ Affermava infatti Dieste: «...la génesis no ha venido por ahí [de las bóvedas catalanas] sino que la génesis ha venido por las estructuras de hormigón armado, de desencofrado rápido; eso ha sido la madre de las estructuras. Que el resultado final pueda coincidir con algunas cáscaras catalanas no quiere decir que esté inspirado, lo que hacemos, en la bóveda a la catalana, no tiene nada que ver...» (Marín & Barluenga, 2014). Trad.: «... la genesi non è venuta da lì [dalle volte catalane], ma dalle strutture in cemento armato, dal disarmo rapido; questa è stata la matrice delle strutture. Il fatto che il risultato finale possa coincidere con le coperture catalane non significa che sia ispirato, ciò che facciamo, alla volta alla catalana, non ha nulla a che vedere...».

²⁰ Esempio ne sono i gusci progettati e realizzati da Heinz Isler, alla cui metodologia di determinazione delle forme è dedicato il Capitolo IV.

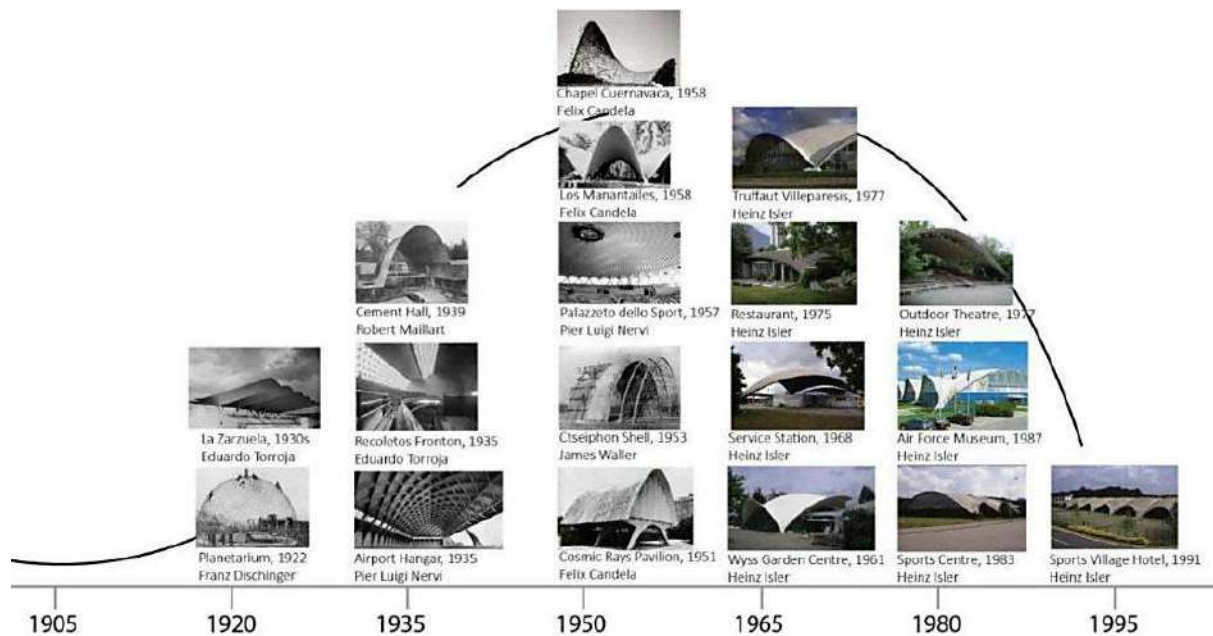


Figura II.33. Linea temporale dell'evoluzione delle strutture a guscio in calcestruzzo armato realizzate nel corso del XX secolo (Walia et al., 2021).

Uno dei primi esempi di guscio sottile in calcestruzzo armato può essere riferito alla Cement Hall dell'ingegnere svizzero Robert Maillart (1872-1940), realizzata in occasione dell'Esposizione Nazionale Svizzera del 1939 e in seguito demolita (Figura II.34). L'esperienza acquisita da Maillart nel corso degli anni con la costruzione di ponti in calcestruzzo armato²¹ venne trasposta nella costruzione di questo guscio parabolico connesso a quattro colonne centrali rastremantisi dalle nervature ad arco parabolico fino ai supporti a cerniera posizionati a terra. Una caratteristica di quest'opera, che sarà tipica delle strutture a guscio propriamente dette del Novecento, era la mancanza di soluzioni di continuità tra copertura e pareti perimetrali verticali dando vita al

²¹ Il ponte Slauffader nel 1899, il ponte Zuoz nel 1901, il ponte Tavanasa nel 1905, il ponte Salginatobel nel 1930, il ponte Schwandbach nel 1933.

vero e proprio concetto di “involucro”, caratterizzato da continuità formale e materica tra partizioni esterne orizzontali e verticali.



Figura II.34. Cement Hall durante l'Esposizione e dopo la demolizione (Billington, 1985, 2003).

Nella Cement Hall si rese già manifesto uno dei limiti legati all'impiego del calcestruzzo armato: la necessità di ingenti quantità di legname, o di materiali equivalenti, per la realizzazione delle centine e dei casseri da impiegare per il getto.

Vennero adoperati, in tal senso, sistemi di centinatura pesanti, ottenendo la forma parabolica finale attraverso uno strato di tavole sopra le quali furono posizionati, oltre alla rete di armatura, anche le barre diagonali inserite per contrastare le azioni agenti sugli sbalzi.

Un ponteggio in legno era posizionato ai due lati del guscio e leggermente inclinato in modo da adattarsi alla sua forma. I montanti erano costituiti da due assi accoppiate all'interno delle quali si trovavano le mensole utili per le passerelle dove si muovevano gli operai. Elementi di controventamento erano posti per irrigidire la struttura. Tutta la cassaforma era puntellata all'intradosso con un doppio sistema di montanti e traversi in travetti di legno anch'essi controventati e intervallati da un solaio utile al lavoro delle maestranze (Figura II.35).

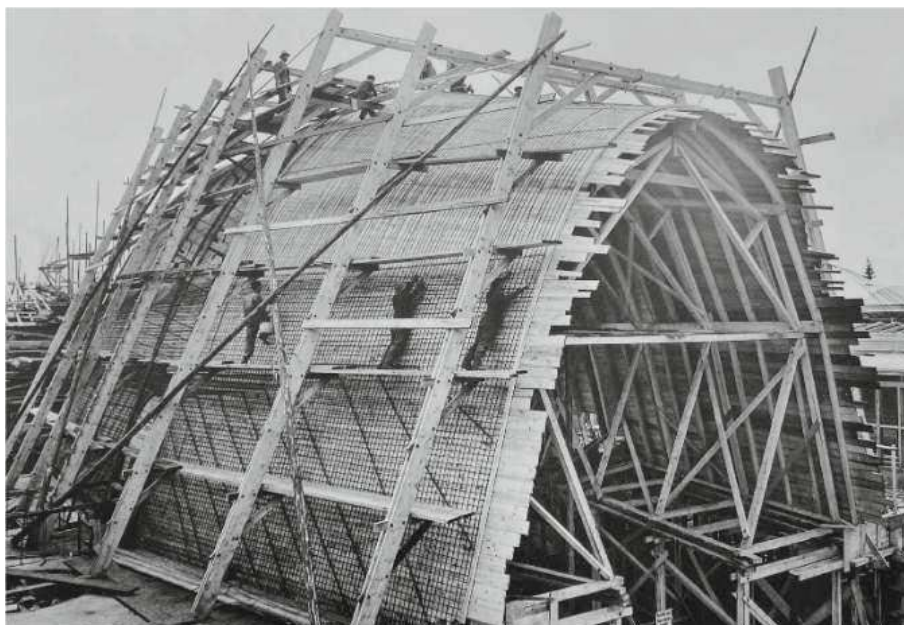


Figura II.35. Sistema di centinatura utilizzato per la Cement Hall (Billington, 2003).

Il rapido sviluppo del calcestruzzo armato che ha portato alla sua applicazione anche per la costruzione di gusci sottili si era reso palese già pochi anni prima dell'esperienza della Cement Hall con la progettazione e realizzazione - tra il 1935 e il 1941 - della struttura di copertura dell'Ippodromo della Zarzuela a Madrid (Figura II.36). Il guscio a doppia curvatura, realizzato su progetto dell'ingegnere spagnolo Eduardo Torroja (1899-1961), richiese una ingente quantità di legname per la realizzazione di centine di supporto e casseforme (Figura II.37), proprio come avvenuto nel caso della Cement Hall.



Figura II.36. Copertura a guscio degli spalti dell'Ippodromo della Zarzuela a Madrid (foto dell'Autore).

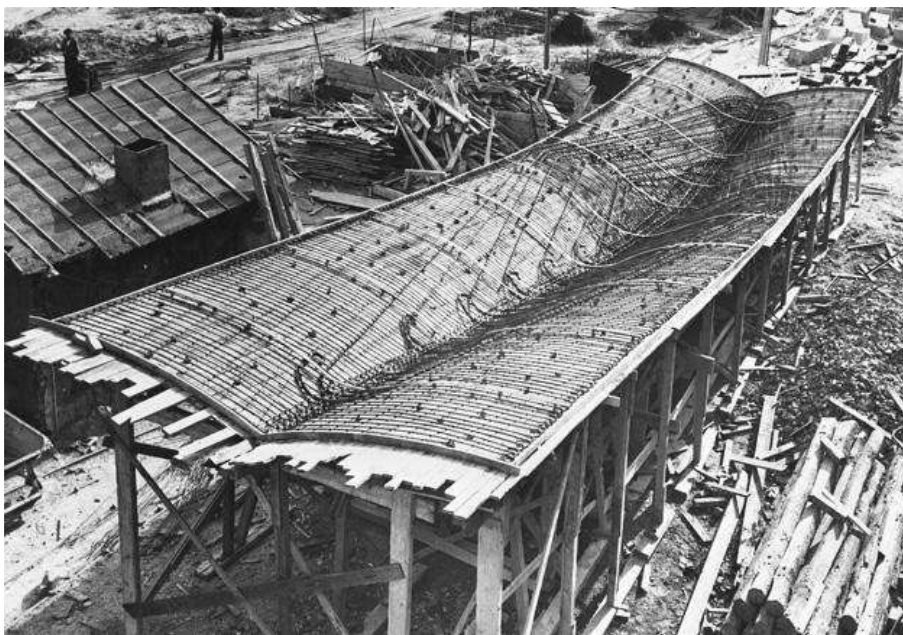


Figura II.37. Fase di costruzione del modello a scala reale dell'elemento modulare della copertura (Cassinello, 2020).

La copertura delle tribune dell'Ippodromo della Zarzuela è costituita da una serie di elementi sottili bidimensionali in calcestruzzo armato aggettanti per quasi 13 m²² e bilanciate da altrettanti elementi sottili bidimensionali di 7 m di lunghezza nella parte opposta rispetto all'area delle gare. Il modulo base che si ripete è quello dei due iperboloidi sostenuti ad un pilastro centrale. Ciò che complessivamente appare è una copertura ondulata in cui i raggi di curvatura di ogni porzione di guscio nel piano dei pilastri sono maggiori dei raggi di curvatura alle estremità dei bordi della copertura. Entrambe le estremità di ognuno dei moduli sono connesse ai pilastri tramite dei tiranti (Figura II.38). Non sono presenti altre nervature o rinforzi e la stabilità dell'elemento nel suo insieme è garantita dalla sua forma. Lo

²² La struttura nel suo complesso si costituisce di tre tribune, le tribune Nord e Sud di lunghezza 60 m e la tribuna centrale di lunghezza 30 m.

spessore è variabile fino ad arrivare a circa 5 cm all'estremità dello sbalzo maggiore (Billington, 2003).

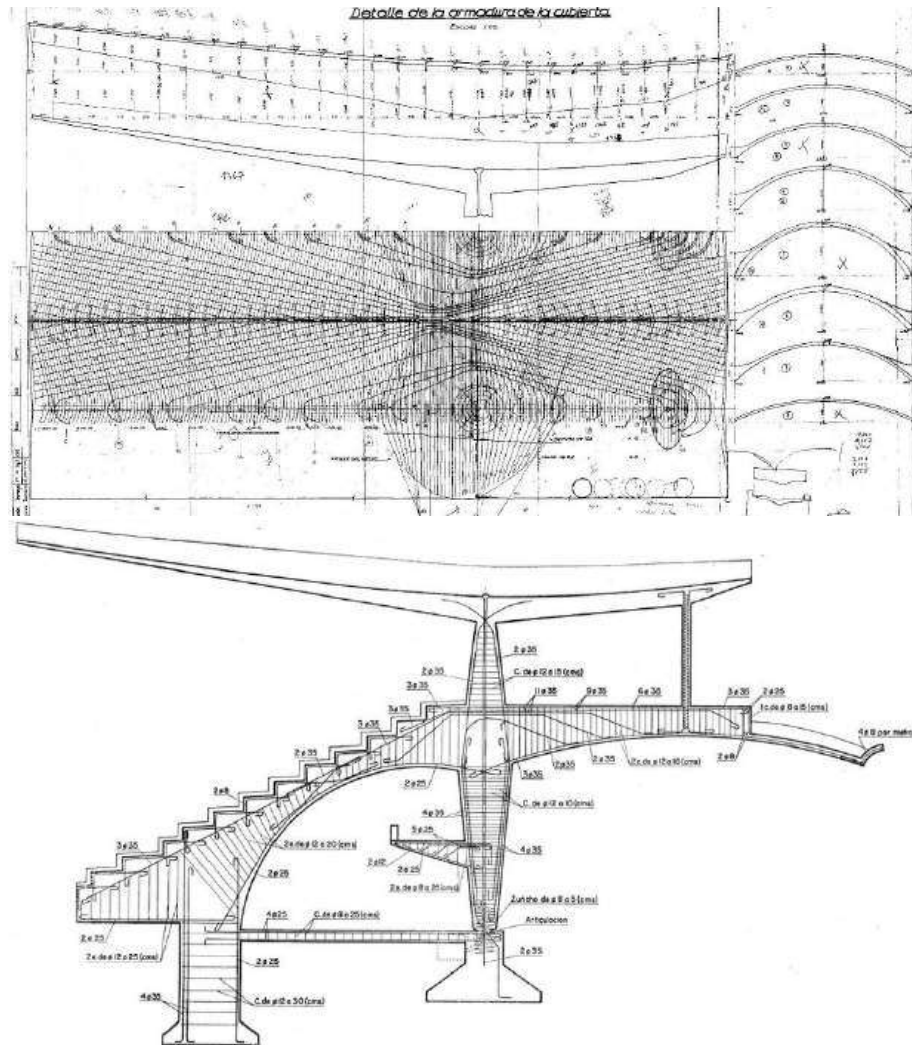


Figura II.38. Geometria e disposizione delle armature nell'elemento modulare della copertura dell'Ippodromo della Zarzuela progettato da Torroja (<https://www.espazium.ch/it/attualita/cosa-ci-attrae-delle-opere-di-eduardo-torroja>).

I gusci sottili in calcestruzzo armato progettati in Messico dall'architetto spagnolo Felix Candela (1910-1997), quivi emigrato in seguito alla guerra civile spagnola, seguono la forma del paraboloide iperbolico, *hypar* (Figura II.39):

«...this shape is best understood as a saddle in which there are a set of arches in one direction and a set of cables, or inverted, in the other. The shape also has the property of being defined by straight lines. The boundaries, or edges, of the hyperbolic paraboloid [...] can be straight or curved. The edges in the second case are developed by planes “cutting through” the hyper surface...»²³ (Lee & Moreyra Garlock, 2009)

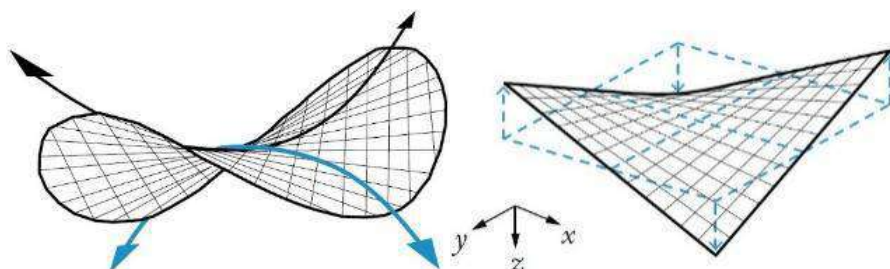


Figura II.39. Paraboloide iperbolico con bordi rettilinei e bordi curvi (Adriaenssens et al., 2014).

Ciò gli ha permesso di giungere alla definizione di strutture caratterizzate da forme complesse e dimensioni planimetriche notevoli, a fronte di una apparente leggerezza conferita dal ridotto spessore. Tra i vantaggi offerti dalle forme disegnate da Candela vi sono: la maggiore rigidità, l'eleganza estetica, la facilità di costruzione rispetto ad altri gusci dalle modalità di messa in opera più complicate (Adriaenssens et al., 2014).

La Cappella Lomas de Palmira a Cuernavaca (1958-1960) (Figura II.40) incarna le caratteristiche tipiche dei gusci di Candela, prima elencate, ed è costruita come un unico *hyper* equilatero, con 30 m di luce e 24 m di altezza massima (Tomás & Martí, 2010).

²³ Trad.: «... questa forma può essere meglio compresa come una sella in cui vi sono una serie di archi e una serie di cavi in una direzione o nell'altra. La forma ha anche la proprietà di essere definita da linee rette. I margini, o bordi, del paraboloide iperbolico [...] possono essere diritti o curvi. Nel secondo caso, i bordi sono sviluppati da piani che “tagliano” la superficie hyper...».

Figura II.40. Cappella Lomas de Palmira a Cuernavaca progettata da Felix Candela (<https://www.architectuul.com/architecture/chapel-lomas-de-cuernavaca>).



Per le dimensioni e per la forma complessa, il sistema di centinatura realizzato risulta più complicato rispetto ai casi citati in precedenza. Qui, infatti, un sistema di travi in legno posto all'intradosso sorreggeva delle altre travi poste seguendo idealmente i fasci di rette radiali del paraboloide iperbolico (Figura II.41). La particolare conformazione del paraboloide ha consentito di avvalersi di tavole di legno dritte, dunque non sagomate secondo particolari forme, con il vantaggio che queste potevano essere riutilizzate e poste in opera più rapidamente, aspetto da non sottovalutare.

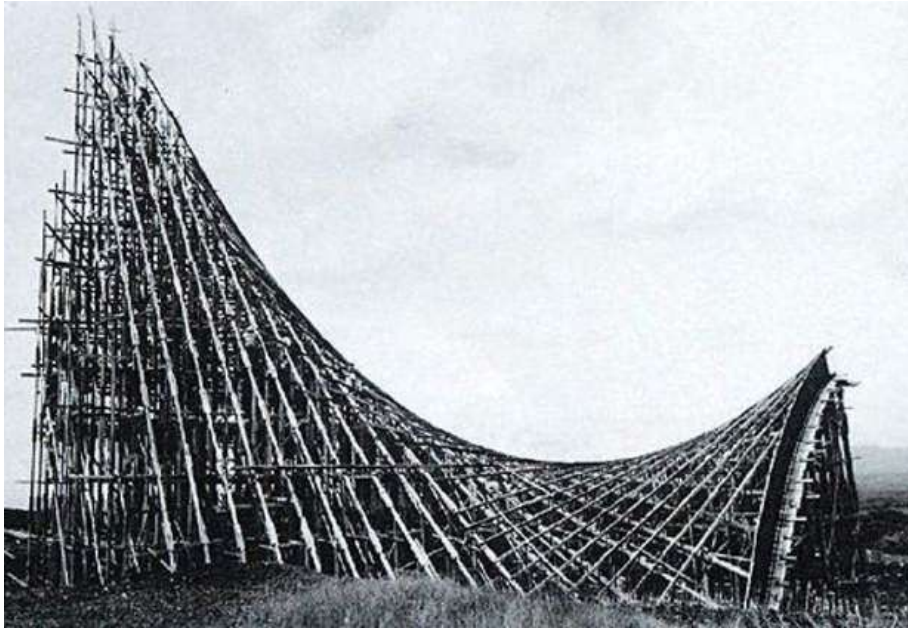


Figura II.41. Fasi costruttive della Cappella di Cuernavaca, in cui si può vedere l'impalcatura utilizzata e la forma finale del guscio (<https://www.architectuul.com/architecture/chapel-lomas-de-cuernavaca>).

Felix Candela ha anche progettato, nel 1997, L'Oceanogràfic di Valencia, in Spagna la forma ricorda una conchiglia gigante. Il

guscio dell'Oceanogràfic è composto da otto *lobes* (lobi) radiali e ricorda il guscio del Los Manantiales restaurant (1958) (Figura II.42), a Xochimilco in Messico, progettato dallo stesso Candela e con uno spessore di 4 cm (Beckh et al., 2020).

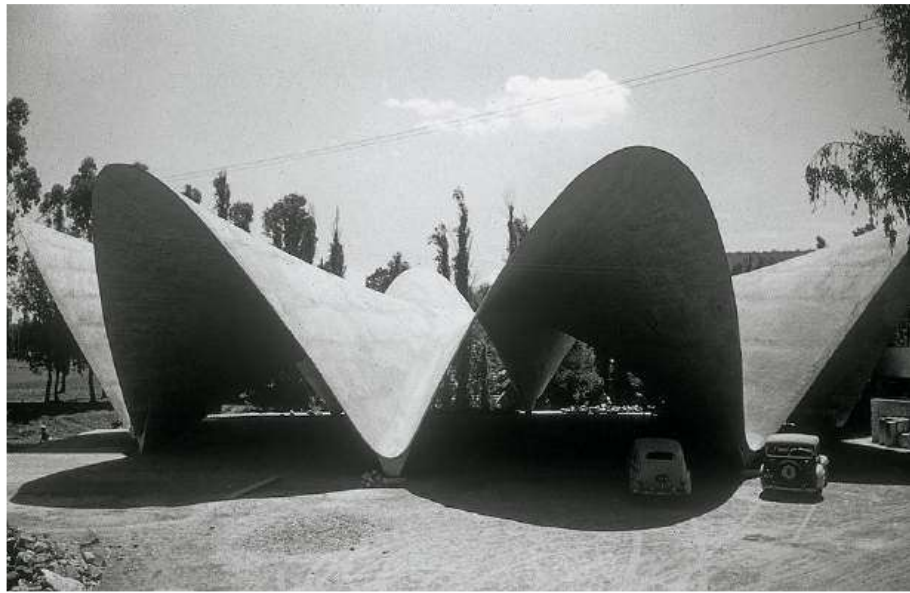


Figura II.42. Los Manantiales restaurant a Xochimilco, Città del Messico, progettato da Felix Candela (Beckh et al., 2020).

Il bordo libero di ogni lobo del guscio de L'Oceanogràfic (Figura II.43) raggiunge una altezza di 12,27 m ed uno spessore di 6 cm, che aumenta gradualmente fino a un valore massimo di circa 22 cm all'intersezione delle nervature (Tomás & Martí, 2010).

Anche qui l'ingente impalcatura, con centine e casseforme, necessaria per la sua costruzione è compensata dalla possibilità di riutilizzare i materiali per essa adoperati (Figura II.44).



Figura II.43. L'Oceanogràfic a València (Tomás & Martí, 2010).



Figura II.44. Impalcatura utilizzata per la realizzazione del guscio de L'Oceanogràfic (Tomás & Martí, 2010).

II.4.3 GUSCI PREFABBRICATI

Seguendo la portata innovativa delle realizzazioni di Eladio Dieste in Uruguay, si ritiene necessario analizzare brevemente anche i gusci prefabbricati realizzati in America Latina, dove le particolari condizioni socioeconomiche e politiche, nel corso del Novecento, hanno fatto da stimolo allo sviluppo di interessanti soluzioni costruttive per mano di alcuni personaggi di spicco dell'architettura.

In Argentina a dare impulso all'industrializzazione e, soprattutto, alla prefabbricazione di sistemi voltati a guscio sottile fu Eduardo Sacriste (1905-1999). La capacità di Sacriste di sapere unire aspetti legati alla tradizione costruttiva locale (le volte *tabicade* erano comuni nella provincia di Córdoba) con le innovazioni riscontrate in alcuni esempi di architetture moderne²⁴ è stata utile per arrivare alla definizione di nuove tecniche di messa in opera (García et al., 2012).

La sua produzione è incentrata, soprattutto, sulla progettazione e costruzione di edifici di modeste dimensioni: si tratta, infatti, di case ad un solo piano organizzate secondo diverse campate adiacenti, con pesanti muri in muratura sui quali erano disposte le travi a sostegno delle volte (Figura II.45).

²⁴Casas del Garraf di Sert e Torres Clavé (1935), Casa Berlingieri di Bonet e Dieste (1947), case Jaoul e Sarabhai di Le Corbusier (1954-1956 e 1951-1955).

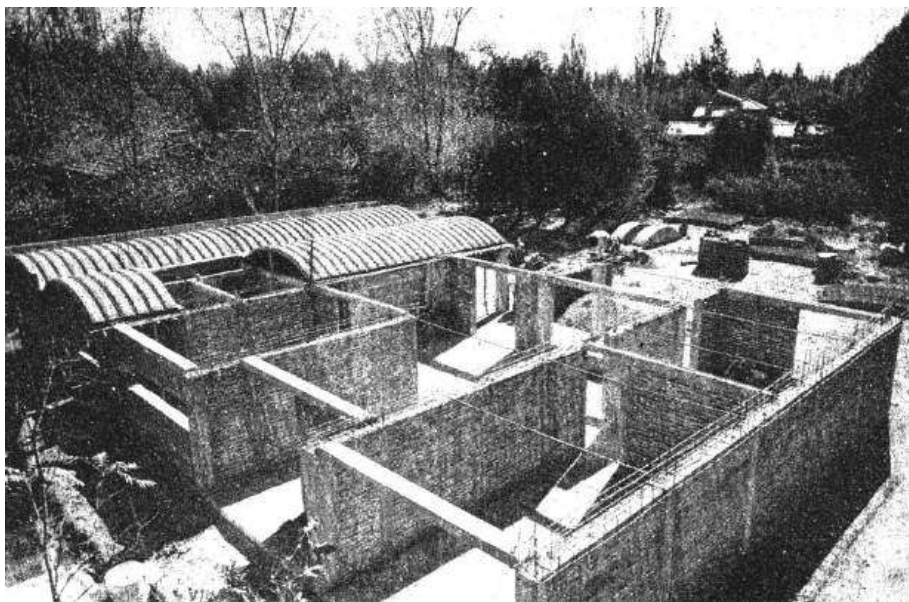


Figura II.45. Travi di sostegno delle volte di Casa Carrieri (Sacriste et al., 1977).

I mattoni per le volte, prodotti in fabbrica, sono stati posati con malta cementizia per formare due o più strati sovrapposti o, in alternativa, un unico strato su cui è stato sovrapposto uno strato funzionale di calcestruzzo, con uno spessore variabile da 5 a 7 cm. Nel caso della Casa B dei Clérico Hermanos, costruita nel 1948 nella provincia di Salta, le volte vennero realizzate con un primo strato di mattoni sottili di 20x20 cm (chiamati *tijuelas*), mentre i due strati successivi, sfalsati, con mattoni ordinari, dunque non sottili. Per l'assemblaggio dei mattoni venne utilizzata malta cementizia. I fianchi delle volte vennero riempiti con calcestruzzo²⁵, sopra il quale venne disposto uno strato impermeabilizzante (Figura II.46). Infine, uno strato di terra venne posizionato all'estradosso.

²⁵ Calcestruzzo ordinario fino alle reni della volta e, al di sopra di questo, calcestruzzo alleggerito con polvere di lolla di riso.

I lati di ogni serie di volte terminavano con una soletta piana larga un metro, che fungeva da contrafforte, contrastando così le spinte delle volte poste alle estremità (Sacriste et al., 1977).

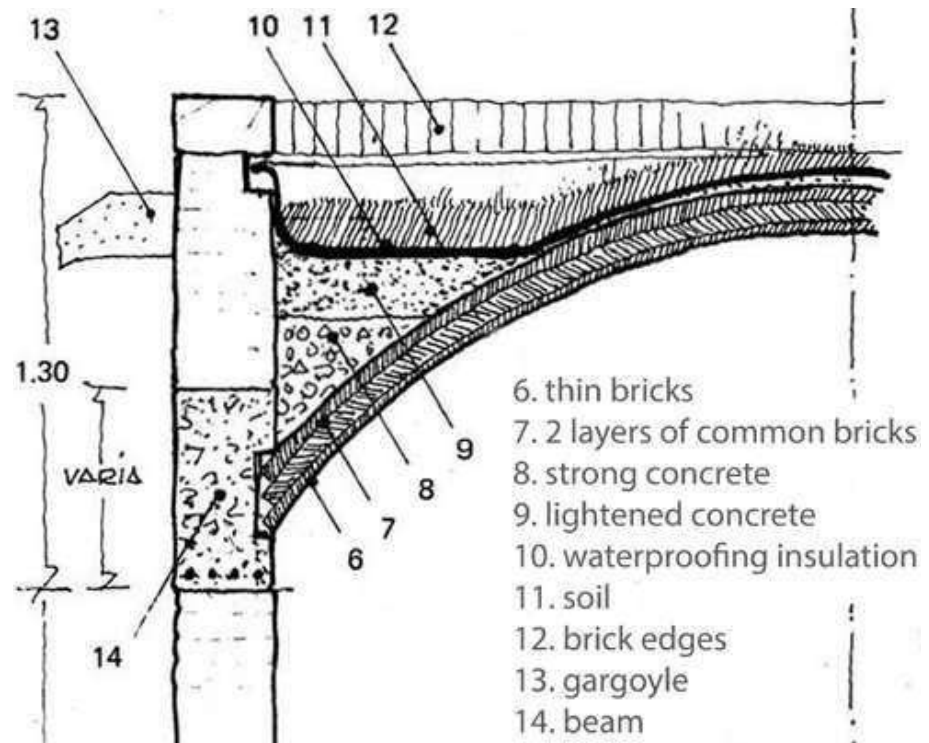


Figura II.46. Sezione strutturale delle volte di Casa B dei Clérico Hermanos (Sacriste et al., 1977).

Altra soluzione di copertura voltata sperimentata da Sacriste è quella in cui un singolo strato di mattoni ordinari (non sottili) è stato posato sopra una cassaforma metallica leggera con la sovrapposizione di uno strato funzionale di calcestruzzo di 3 cm. In aderenza a questo, è stato posato uno strato di circa 10 cm di calcestruzzo alleggerito. L'estradosso è stato completato utilizzando mattoni e fogli bituminosi per il drenaggio dell'acqua piovana (Figura II.47).

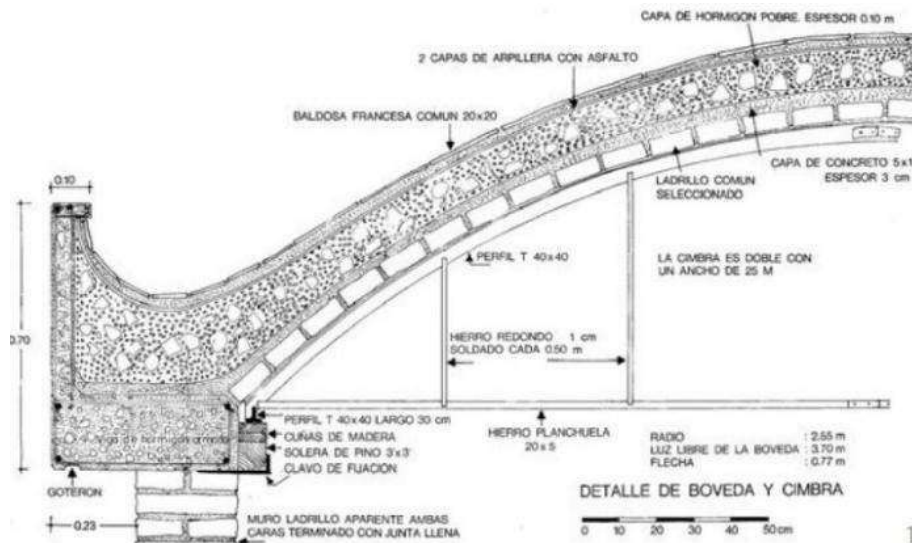


Figura II.47. Soluzione per copertura voltata (García et al., 2012).

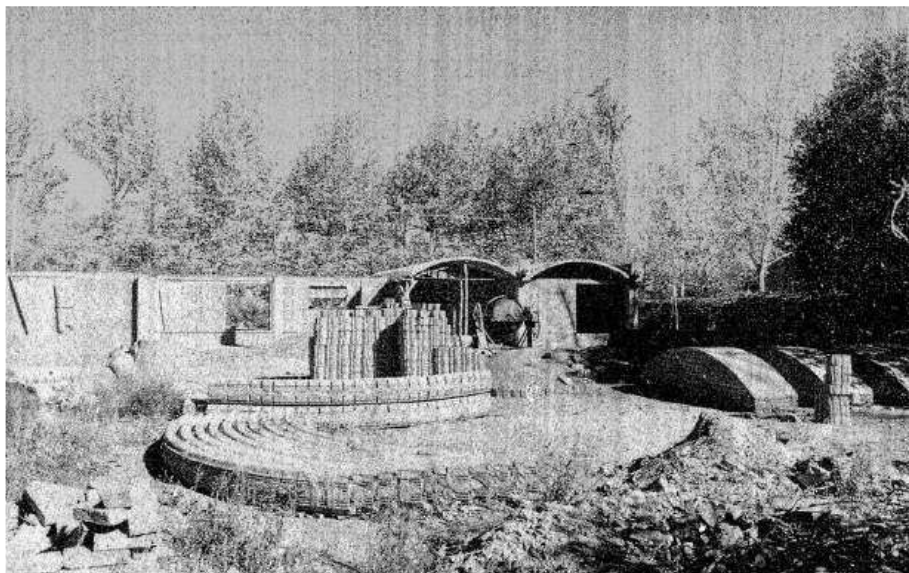
A seguito del crescente interesse per la prefabbricazione tra gli anni '60 e '70, Sacriste testò anche varie soluzioni prefabbricate di volte sottili. Un esempio di applicazione in questo senso è la Casa Carrieri (del 1961): qui gli spazi sono suddivisi in base ai moduli prefabbricati delle volte (chiamate *costillas*), aventi dimensioni di 3 m per 50 cm e un peso di circa 200 kg. Questi elementi modulari, una volta posizionati e uniti secondo il loro lato maggiore, formavano le volte delle diverse stanze dell'abitazione.

La prefabbricazione a piè d'opera è stata realizzata con casseforme in legno (come è il caso delle volte di Casa Robert, Figura II.48) o in muratura (come per le volte di Casa Carrieri, Figura II.49) completate con malta su cui sono stati posizionati i mattoni. L'uso di un'impalcatura leggera - utile anche per consentire il trasporto - era previsto per il collegamento alle altre *costillas* o alle pareti d'ambito, senza quindi la necessità di nervature di sostegno al momento dell'installazione.

Figura II.48. Cassaforma in legno utilizzata per le volte di Casa Robert (Sacriste et al., 2012).



Figura II.49. Casseforme in muratura, a destra, per le volte di casa Carriero (García et al., 2012).



Analogamente a quanto stava facendo Sacriste in Argentina, in Messico l'architetto Carlos González Lobo (1939-2021) si è dedicato alla sperimentazione e alla costruzione di edifici destinati in particolare alle classi più povere (González Ortiz, 2004).

Il concetto di partenza di Gonzalez Lobo era il *gran galpón* (letteralmente, grande capannone), un ampio spazio aperto trasformabile coperto da un sottile tetto a volta che consentiva una maggiore volumetria. González Lobo sperimentò il cosiddetto “sistema CGL-2”, prendendo come riferimento la *cerámica armada* di Dieste, che modificò in base alle mutevoli esigenze denominandolo *ladrillo armado*. Evoluzione del precedente “sistema CGL-1”, il CGL-2 consisteva in elementi modulari a volta realizzati con mattoni di argilla tenuti insieme da un’armatura in acciaio e calcestruzzo. Gli elementi modulari da costruire, chiamati anche *costillas*, erano conformati come porzioni più piccole di volte a botte, rendendoli più facili da trasportare e posizionare. Ogni *costilla* era realizzata sopra uno stampo curvo precedentemente costruito in loco (Figura II.50), riempito con pietre e detriti e ricoperto da uno strato di calcestruzzo magro.



Figura II.50. Carlos González Lobo nell’atto di sollevare una *costilla* dallo stampo (González Ortiz., 2001).

Ogni unità prevedeva la combinazione di una serie di mattoni disposti sul piano, in doppia fila e singolo strato. Nei giunti tra i mattoni, di circa 10 cm, venivano inserite barre di acciaio $\phi 6$ e cavi a formare l'armatura per il successivo getto in calcestruzzo (cemento e sabbia in rapporto 1:4).

Per la realizzazione della volta venivano assemblate le varie *costillas*. Le travi perimetrali in cemento armato erano posizionate sulle pareti d'ambito, mentre nella chiave era installata l'armatura per una trave a sezione triangolare (*cadena triangular*). Una volta gettato il calcestruzzo, questa trave avrebbe dovuto rinforzare e unire i vari moduli (Figura II.51). La volta era completata da uno strato di calcestruzzo con rete di rinforzo in acciaio (González Ortiz, 2001).

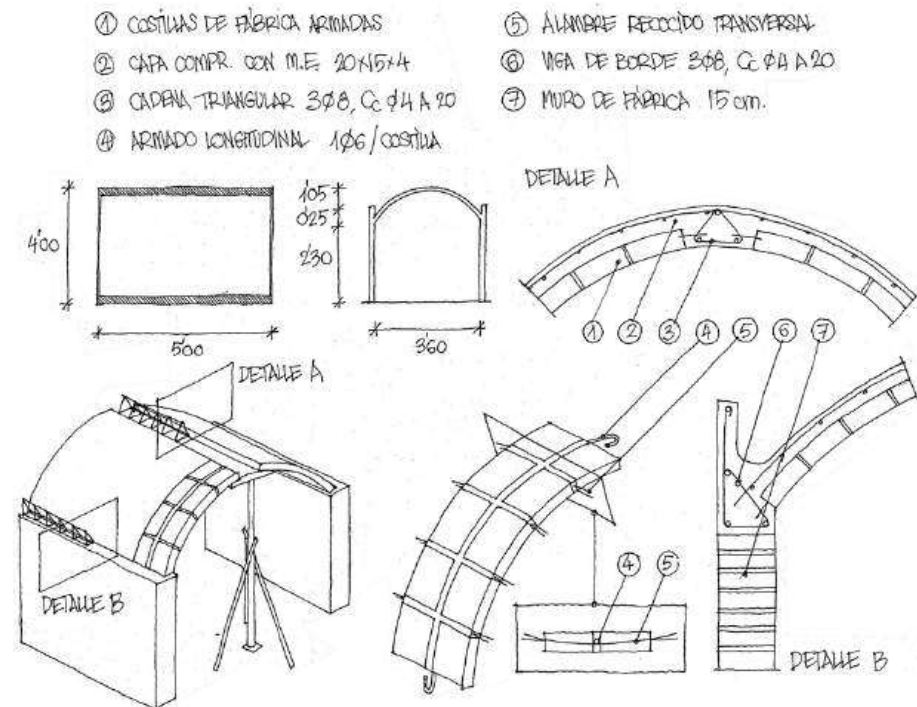


Figura II.51. Rappresen-
tazione schematica delle
volte in ladrillo armado
(García et al., 2012).

Esempi di impiego di gusci sottili prefabbricati in muratura armata, realizzati per la copertura di edifici di grandi dimensioni, sono quelli dell'architetto uruguayano Mario Kalemkerian. Il suo contributo, esplicitatosi per riorganizzare l'Arsenale dell'esercito nazionale argentino in Uruguay, ha compreso la progettazione sia per una modernizzazione delle strutture esistenti che per la realizzazione di nuove strutture ad uso del personale civile (Kalemkerian & Taroco, 1976). I lavori previsti includevano l'installazione di una serie di elementi prefabbricati, dai nuovi tetti per gli edifici esistenti, alle pavimentazioni, e fino alle volte. Queste ultime sono volte prefabbricate autoportanti in mattoni con luce di 13 m, altezza di 1 m e peso circa 6 t, mentre il loro spessore, corrisponde allo spessore dei mattoni con cui sono state realizzate ed è pari a 5 cm (García Muñoz & de los Ángeles Beltrán Fernández, 2014).

Le volte sono state realizzate *in loco*, nelle immediate vicinanze del cantiere (Figura II.52).

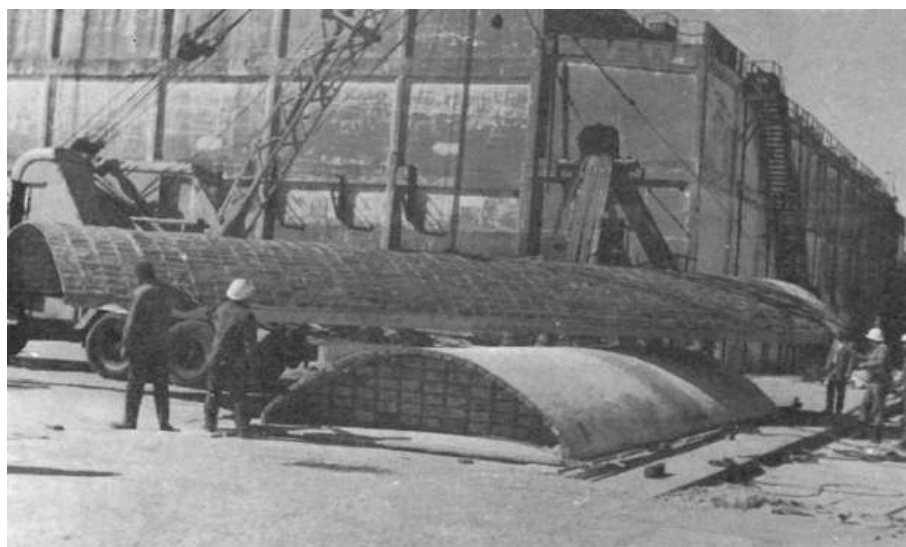


Figura II.52. Fase di trasporto di due delle volte dell'arsenale (Kalemkerian & Taroco, 1976).

Per semplificare il lavoro di prefabbricazione di questi elementi è stato realizzato uno stampo in materiale ceramico (la cosiddetta *boveda-molde*, Figura II.53), ottenendo così una forma adeguata utilizzando sabbia e cemento Portland, evitando punti spigolosi per facilitare il distacco durante la rimozione della cassaforma. Questo stesso stampo utilizzato per la realizzazione delle volte è stato utile anche per formare i frontoni anteriori delle volte stesse. Le facce interne dei frontoni sono state separate di 5 cm dalla cassaforma, coprendole in modo che, durante la procedura di sollevamento, la cassaforma interna si staccasse senza difficoltà.

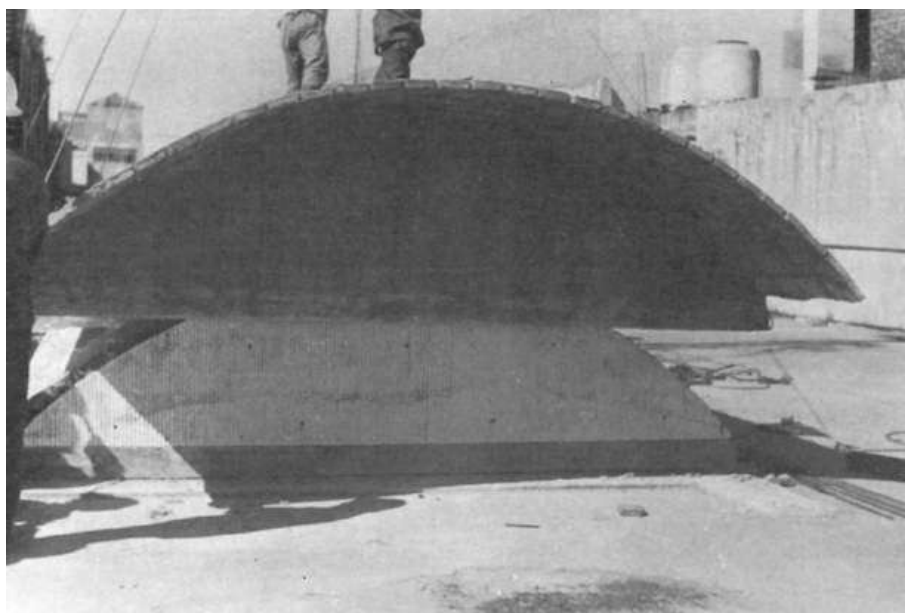


Figura II.53. *Boveda-molde* per la realizzazione delle volte (Kalemkerian & Taroco, 1976).

Una volta collocate tutte le volte nella loro posizione definitiva (Figura II.54), sono stati piegati i ferri di ancoraggio dei pilastri e i ferri delle travi di bordo per dare continuità ai pannelli adiacenti. Analogamente è stata posizionata una rete elettrosaldada

in seguito ricoperta con uno strato di malta di cemento, sabbia e ghiaia, curandone la successiva stagionatura (Figura II.55). Infine, gli elementi voltati sono stati rifiniti con un sottile strato di malta cementizia bianca.

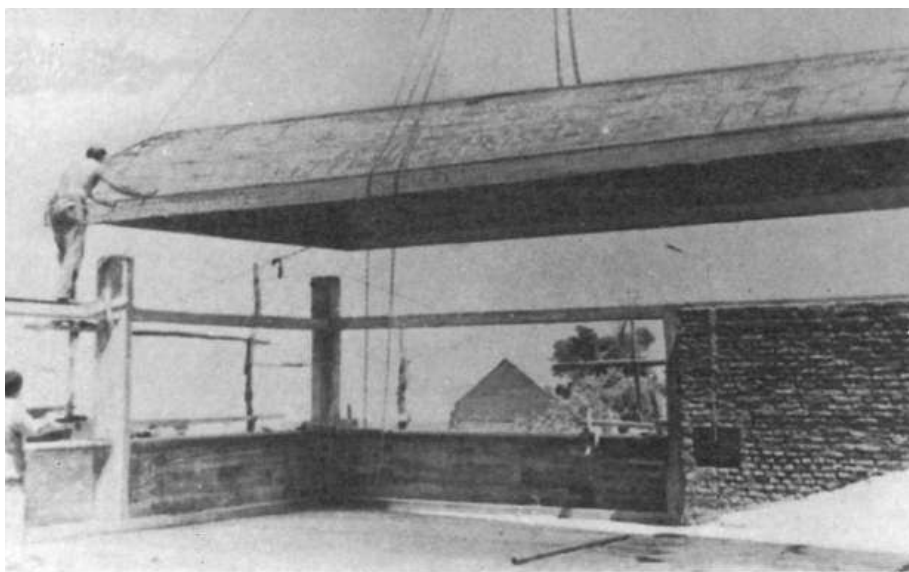


Figura II.54. Fasi di posa delle volte (Kalemkerian & Taroco, 1976).

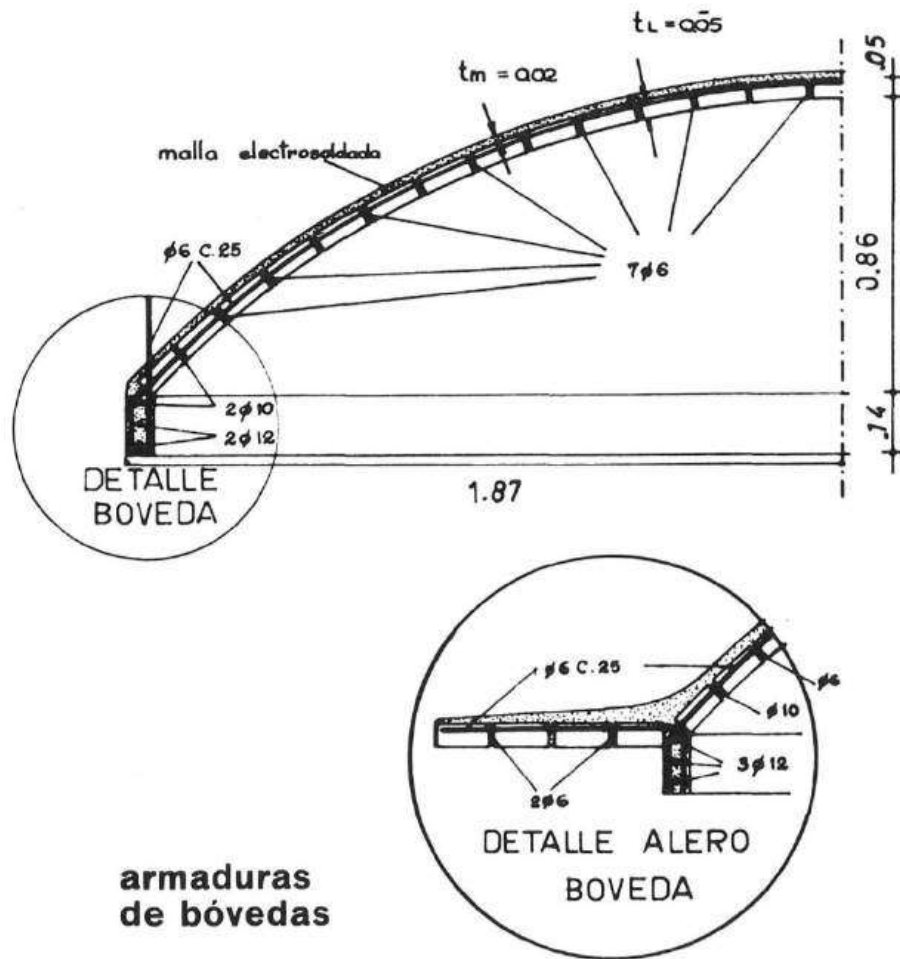


Figura II.55. Sezione costruttiva della volta (Kalemkerian & Taroco, 1976).

armaduras de bóvedas

Sempre all'interno dell'arsenale, oltre agli edifici principali di cui si è già detto, un altro edificio era destinato a ospitare l'Officina de Relaciones Laborales. Il tetto di questo edificio venne realizzato con una cupola (dotata di un lucernario) costituita da elementi in laterizio con un diametro di 8 m e una monta di 40 cm, gravante per circa 200 kg/m sulla struttura sottostante. La cassaforma con cui questa cupola è stata realizzata era la copertura di un serbatoio idrico esistente vicino l'edificio (Figura II.56).

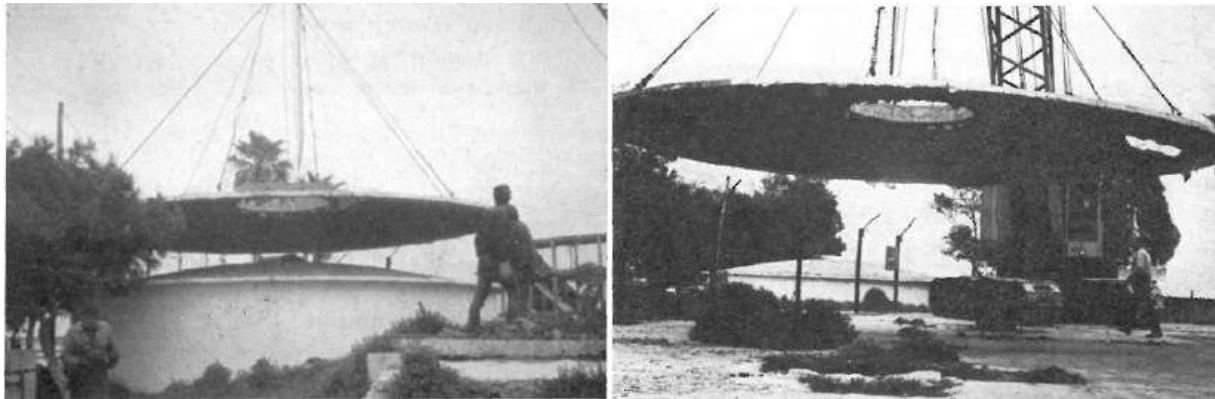


Figura II.56. Cupola dell'arsenale (Kalemkerian & Taroco, 1976).

I mattoni utilizzati per la costruzione della cupola sono stati posizionati seguendo il senso della costruzione. Ogni due filari è stato inserito un tondino $\phi 6$ come staffa. Una trave in cemento armato, di altezza 5,5 cm - coincidente con lo spessore dei mattoni -, ha permesso di risolvere il problema della spinta della cupola. Al di sopra della cupola è stato posato uno strato isolante in lastre di polistirene espanso, protetto con piastrelle dello spessore di 3 cm (le cosiddette *tejuelas de campo*) (Kalemkerian & Taroco, 1976) (Figura II.57).

impermeabilità, resistenza nel tempo. A questi si aggiunge la possibilità di impiegare i gusci così ottenuti già 24 ore dopo averli realizzati (Galindo-Díaz et al., 2022); inoltre, non è necessaria manodopera specializzata.

A partire dagli anni '50, dopo aver ottenuto la concessione per la società Vacuum Concrete de Columbia, Ortega ha utilizzato il sistema per edifici residenziali e industriali.

La costruzione di 102 unità residenziali nel *barrio* (quartiere) Quiroga a Bogotá dal 1951 al 1953 ha consentito l'applicazione su larga scala del sistema, che è stato utilizzato anche per realizzare le pareti perimetrali e i gusci di copertura. Le dimensioni dei gusci erano di 5,08x5,18 m, con uno spessore di circa 4 cm. Ogni guscio era rinforzato internamente con rete metallica. La costruzione iniziava con la conformazione del primo guscio su una cassaforma in legno, assicurandosi in tal modo che lo spessore fosse mantenuto costante. Successivamente, sopra questo guscio, venivano modellati anche gli altri, utilizzando strati di carta per separarli l'uno dall'altro. In questo modo, ogni guscio costituiva lo stampo per quello successivo, e ciò consentiva di realizzare fino a otto gusci al giorno. I gusci, così come i pannelli che costituivano le pareti, venivano spostati con il cosiddetto "Vacuum Lifter method", che consisteva in ventose fissate a travi agganciate a una gru (Figura II.58).

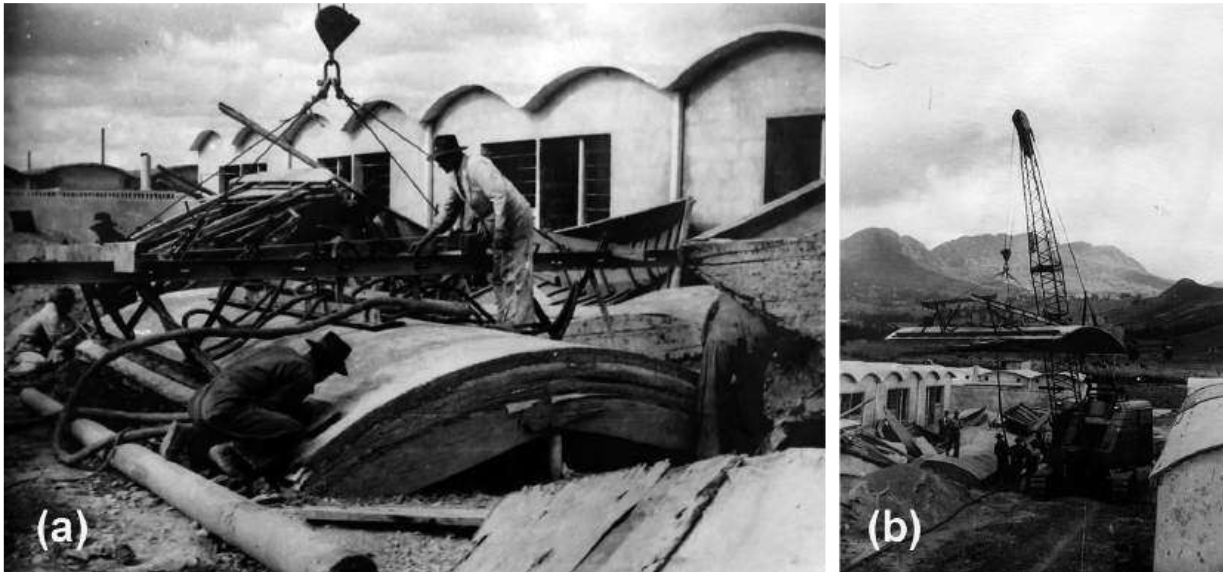


Figura II.58. a) Gusci poggiati uno sopra l'altro e separati da fogli di carta e b) Vacuum Lifter Method (Galindo-Díaz et al., 2022).

Al di là della facilità di realizzazione degli elementi modulari a guscio, la posa in opera non era esente da problemi: infatti, i punti di connessione tra i diversi elementi non erano perfettamente coincidenti, per cui erano necessari dei correttivi per risolverli. Nonostante ciò, la buona organizzazione e la presenza di una gru permettevano di installare nella loro posizione finale 20 pannelli al giorno (Galindo-Díaz et al., 2022) (Figura II.59).

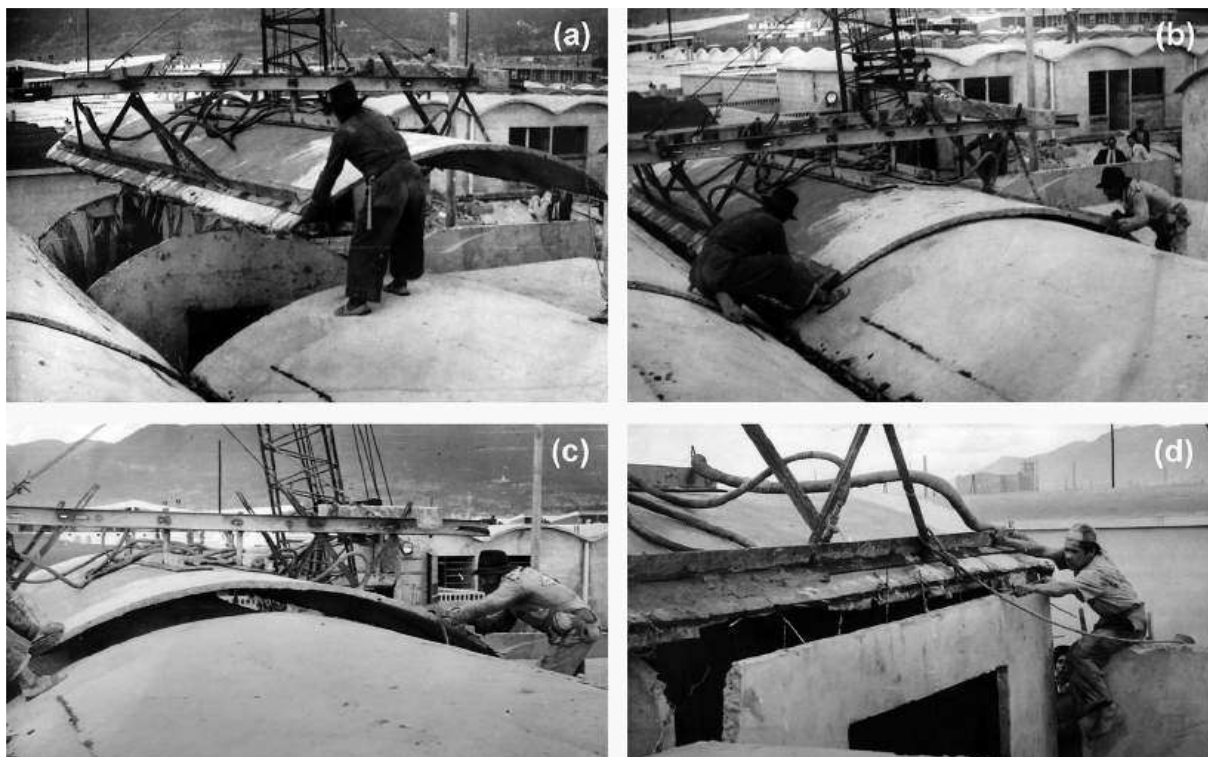


Figura II.59. a-d) Fasi di posa in opera degli elementi modulari (Galindo-Díaz et al., 2022).

Dopo la realizzazione sono emersi diversi problemi, dovuti sempre all'imprecisione nella formazione dei diversi componenti prefabbricati in cantiere: tra questi, la presenza di umidità nei canali formati tra i gusci in cui si convogliava l'acqua piovana, nonché le crepe apparse a causa delle sollecitazioni sui bordi degli elementi prefabbricati.

La soluzione sperimentata da Ortega venne migliorata in successive commesse relative alla costruzione di alcuni edifici industriali a Bogotá (la fabbrica Clark's Chewing Gum e un magazzino di proprietà del Banco de Bogotá). Tuttavia, un crescente disinteresse generale per la prefabbricazione e, allo stesso tempo, la disponibilità di acciaio più economico portarono rapidamente la Vacuum Concrete de Columbia a cessare l'attività.

11.4.4 | GUSCI DEL XXI SECOLO

La produzione di gusci sottili, siano essi realizzati in opera o prefabbricati, si è protratta con fortuna alterna fino all'inizio del XXI secolo (López López et al., 2016). È dal nuovo millennio, infatti, che la costruzione di simili opere, di piccole o grandi dimensioni, sta vivendo un periodo di rinnovato interesse. Ciò è principalmente dovuto al rapido sviluppo di nuove tecnologie per la costruzione (come è, ad esempio, la stampa 3D²⁶) e alla disponibilità di programmi di calcolo automatizzati ed avanzati.

Un ulteriore ambito di ricerca riguarda l'impiego di materiali alternativi al calcestruzzo, in particolare materiali *bio-based*. Le sperimentazioni su sistemi temporanei e reversibili basati sulla deposizione robotica di materiali naturali, come il fango o miscele bio-composite, mostrano come tali materiali possano essere utilizzati per la realizzazione di gusci sottili leggeri e a ridotta impronta ecologica (Naldoni et al., n.d.). Tuttavia, il loro impiego in applicazioni strutturali permanenti è ancora motivo di forti perplessità in termini di durabilità, controllo delle prestazioni meccaniche e compatibilità con i requisiti normativi.

In campo accademico, sperimentazioni e creazioni di prototipi di gusci sono eseguite in particolare dalla Princeton University, più

²⁶ La letteratura recente sulla stampa 3D, per la realizzazione di casseforme e strutture in calcestruzzo, evidenzia come il suo impiego renda possibile una libertà geometrica difficilmente raggiungibile con metodi tradizionali, permettendo la realizzazione di superfici a doppia curvatura ottimizzate dal punto di vista strutturale (Jipa & Dillenburger, 2022). Tuttavia, tali vantaggi sono accompagnati da una serie di criticità legate alla precisione geometrica, alla durabilità dei materiali di supporto e alla compatibilità tra il processo additivo e le prestazioni strutturali richieste, soprattutto nel caso specifico dei gusci sottili, in cui piccole variazioni di spessore o continuità possono incidere significativamente sul comportamento globale.

precisamente dal Form Finding Lab così come dal Block Research Group (BRG) dell'ETH di Zurigo, sotto la guida del prof. Philippe Block. In entrambi i casi, la ricerca si basa sulla definizione di metodi di determinazione della forma dei gusci che permettano a questi di essere sollecitati soltanto con azioni di compressione, potendo cioè evitare la predisposizione di sistemi di rinforzo.

Va in questa direzione la Thrust Network Analysis (TNA), sviluppata dal prof. Block, «...a new methodology for generating compression-only vaulted surfaces and networks...» (Block & Ochsendorf, 2007), e costantemente implementata in modo da aumentare la precisione delle analisi. Vari parametri sono presi in considerazione per una analisi TNA, tra cui la forma (che viene prestabilita prima dell'avvio del processo), le dimensioni e i materiali che saranno utilizzati per la messa in opera del prototipo. Questa tecnica, ed altre che vanno nella stessa direzione²⁷, permette di ottenere, già in fase di progettazione, delle simulazioni di volte e gusci sottili in cui il grado di incertezza del loro comportamento una volta realizzati è ridotto al minimo, consentendo contemporaneamente un risparmio in termini di tempo e di materiali ed una maggiore sicurezza statica della struttura quando sottoposta ad azioni sismiche o a carichi accidentali. L'innovazione di uno dei prototipi messi a punto dal BRG (Figura II.60) consiste, oltre che nell'applicazione della TNA, anche nella cassaforma, realizzata in cartone (Figura II.61): essa è costituita, infatti, da scatole di cartone opportunamente sagomate all'estremità superiore con una fresa a controllo numerico e disposte una accanto all'altra per formare la geometria della volta

²⁷ Force Density Method, Dinamic Relaxation, Particle-spring System, solo per citarne alcuni.

(Davis et al., 2012). L'uso della TNA per la determinazione della forma e per la sua ottimizzazione ha restituito un guscio che, quando sottoposto a prova di carico, è stato capace di resistere - senza alcuna conseguenza evidente - ad un carico, concentrato su una porzione di 50x50 cm, pari a 3 t²⁸ (Davis et al., 2012) (Figura II.62).

Figura II.60. Prototipo di guscio la cui forma è stata ottimizzata con la TNA
(<https://brg.ethz.ch/research/prototypes/735>).



Figura II.61. Cassaforma in pallet e scatole di cartone utilizzata per il guscio (Davis et al., 2012).



²⁸ A riprova di ciò, anche i sensori di movimento applicati sul guscio non hanno evidenziato spostamenti o movimenti nel guscio o nei suoi appoggi a terra (Davis et al., 2012).



Figura II.62. Prova di carico del prototipo realizzato dal BRG a Zurigo (<https://ma-scsd.arch.ethz.ch/curriculum.html>).

Un esempio di realizzazione di gusci sottili che coniuga la tecnica tradizionale con nuove tecnologie può essere considerato il Mapungubwe National Park Interpretive Centre in Sudafrica (realizzato nel 2009), dove sono state utilizzate 200.000 piastrelle in terra-cemento pressate e prodotte da manodopera locale (Figura II.63). I vincoli di risorse economiche e di tempo e la ridotta possibilità di utilizzare l'acciaio hanno portato alla progettazione di

volte sottili realizzate senza rinforzi e che richiedono una cassaforma minima per la costruzione (Ramage et al., 2009) (Figura II.64). Applicazioni simili sono in corso anche in Etiopia (Block et al., 2010) (Figura II.65).



Figura II.63. Una delle sale interne del Mapungabwe Interpretive Centre (DeWolf et al., 2016).

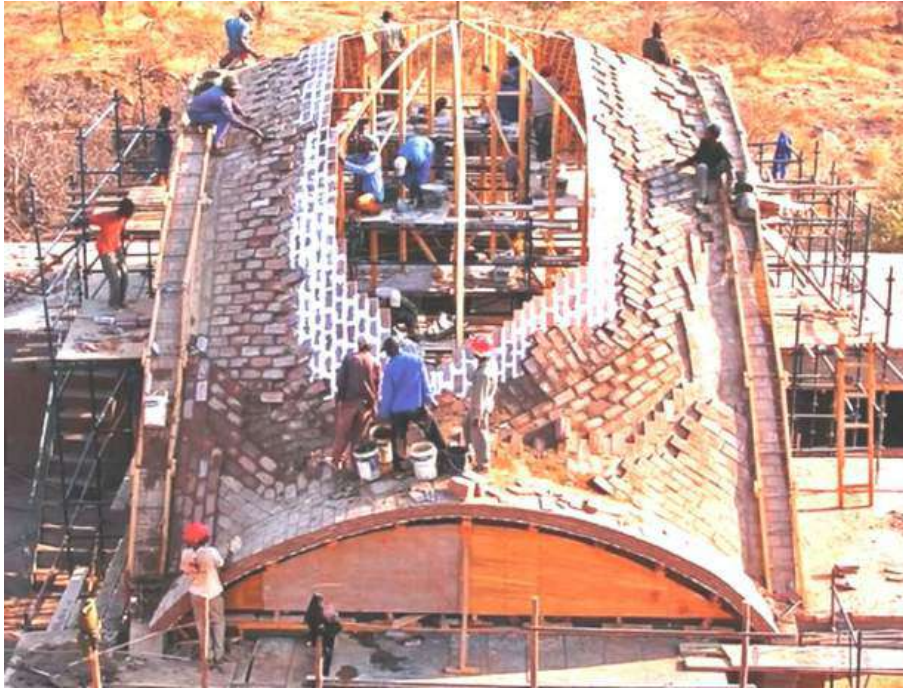


Figura II.64. Fase di realizzazione del Centro (Di Maggio & Corrao, 2025). Si notano, in particolare, le centine utilizzate e la sovrapposizione degli strati di mattoni.



Figura II.65. Costruzione di una volta sottile in Etiopia (Block et al., 2010).

Prendendo a riferimento la tecnica costruttiva delle *bóvedas* spagnole, la volta è stata realizzata con mattoni sottili, in questo caso quadrati, in più strati e con le *costillas* sovrapposte.

Il rapido progresso tecnologico, la necessità di trovare alternative più efficienti e meno costose nel settore delle costruzioni e la crescente esigenza di materiali e tecniche rispettosi dell'ambiente stanno orientando la ricerca verso sistemi di centine alternativi.

L'uso della robotica nel campo delle volte sottili è stato sperimentato nella costruzione di un prototipo di volta realizzato con mattoni di vetro uniti con stucco epossidico a presa rapida. La struttura è stata costruita interamente senza intervento umano e senza l'uso di casseforme. I bracci robotici avevano lo scopo di installare i mattoni nella posizione esatta in cui erano stati progettati²⁹ e di sostenere la volta durante la costruzione (Paris et al., 2021) (Figura II.66).



Figura II.66. Realizzazione del guscio in mattoni di vetro attraverso i bracci robotici (Paris et al., 2021).

Partendo da una base già predisposta per l'inserimento dei mattoni, il guscio è stato realizzato in diverse fasi, succedentisi nella

²⁹ Per garantire una maggiore rigidezza alla struttura, soprattutto in fase di costruzione, i mattoni sono stati disposti a spina-pesce, seguendo in tal modo quanto già fatto in tempi remoti (come, ad esempio, per la cupola di Santa Maria del Fiore a Firenze).

giustapposizione di diversi archi. In questo senso, la messa in opera del primo arco - quello centrale ai cui lati sarebbero stati aggiunti i successivi - è stata la più complicata: dopo vari tentativi, infatti, i ricercatori hanno deciso di procedere realizzando l'arco a catenaria partendo da una delle due imposte e facendo reggere l'arco in costruzione ad uno dei due bracci robotici, mentre l'altro procedeva all'inserimento degli altri mattoni. Dopo avere terminato l'arco catenario centrale, la realizzazione degli archi successivi, e dunque la posa dei mattoni, è potuta procedere con meno difficoltà (Figura II.67).

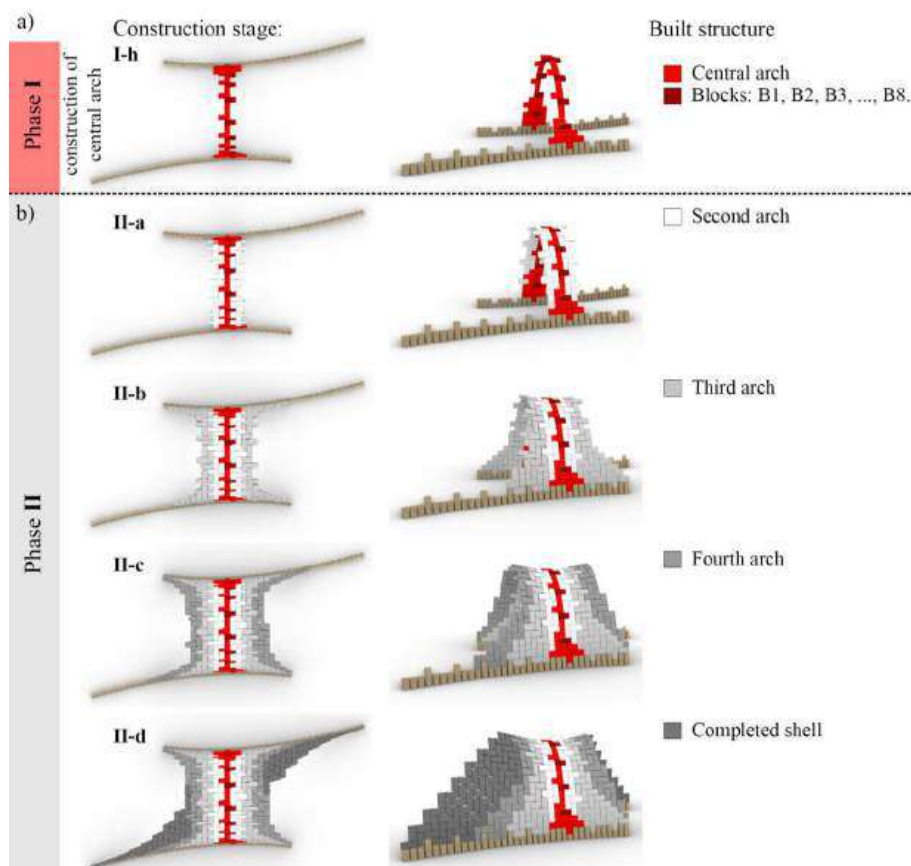


Figura II.67. Fasi costruttive del guscio di vetro (Paris et al., 2021).

La *start-up* Adapa dell'Università di Aalborg ha sviluppato, invece, un sistema di nervature innovativo attraverso l'impiego di uno stampo adattivo (Figura II.68). Si tratta di una nervatura dinamica costituita da una serie di pistoni posti a distanza ravvicinata, sulla cui sommità è posizionata una membrana composta in silicio ferromagnetico dello spessore di 18 mm che funge da superficie dello stampo. Attraverso i pistoni, che si muovono indipendentemente l'uno dall'altro conformando la membrana secondo diverse forme, è possibile creare gusci in cemento armato con forme più libere rispetto ad altri stampi o casseforme tradizionali; uno svantaggio, tuttavia, è che le dimensioni dei gusci che possono essere realizzati, attualmente, sono limitate.

Figura II.68. *adapa adaptive mould* con il sistema di pistoni a cui è sovrapposta la membrana composta che darà la forma al guscio (<https://www.adapa-moulds.com>).



La realizzazione di uno strato in mattoni come cassaforma per il successivo rinforzo e getto di calcestruzzo (Figura II.69) è uno dei sistemi di nervatura analizzati dai ricercatori del BRG con l'obiettivo di testare la resistenza dell'intera struttura sia sotto il proprio

peso che dopo l'applicazione di carichi esterni. Per studiare strutturalmente questo sistema costruttivo, il Block Research Group ha utilizzato la TNA ma applicando dei fattori correttivi per la presenza dell'elemento volta in muratura.

Il vantaggio di questa combinazione (volta in muratura e strato superiore in calcestruzzo) risiede nella riduzione dei tempi e della manodopera e, di conseguenza, dei costi. Al contrario, un punto negativo è dovuto alla mancanza di un metodo di calcolo strutturale che non consente di analizzare accuratamente i gusci, e in tal senso i fattori correttivi applicati dal BRG hanno una percentuale di errore non trascurabile (López López et al., 2019).



Figura II.69. Volta sottile come cassaforma integrata per gusci in calcestruzzo (www.block.arch.ethz.ch/brg).

Attualmente sono in fase di sviluppo, sempre presso il BRG, sistemi di nervature per gusci in calcestruzzo, tra cui la *cable-net and fabric formwork* (Figura II.70), che consiste in una rete di cavi in acciaio e plastica modellati secondo la geometria finale e su cui viene applicato un telo in tessuto che forma la cassaforma per

il guscio (Veenendaal & Block, 2014). Tra i vantaggi di una simile soluzione vi sono il ridotto spreco di casseforme, dovuto alla possibilità di riutilizzare i cavi, e la possibilità di realizzare dei gusci, il cui spessore non supera i 2 cm, di diverse forme e dimensioni.

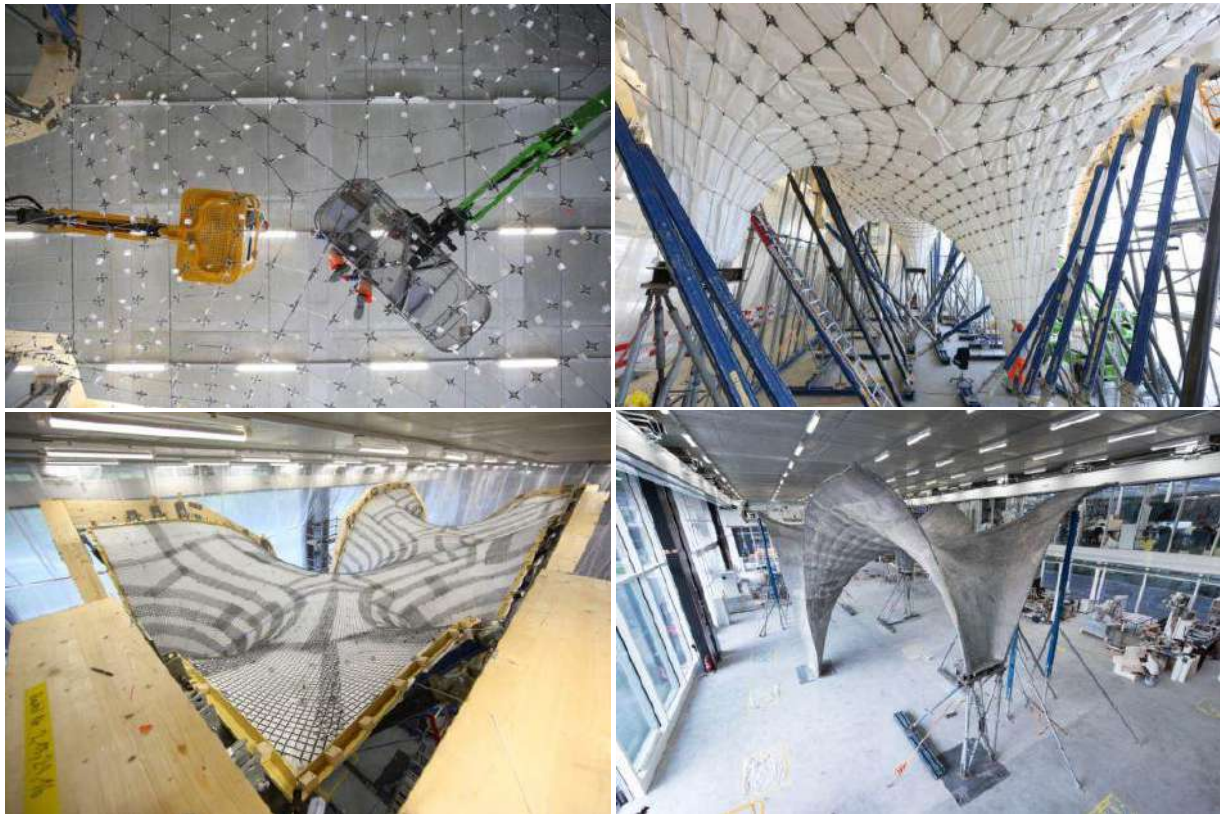


Figura II.70. Fasi di messa in opera del *cable-net* and *fabric formwork* e guscio finale (<https://www.archpaper.com/2018/03/ultra-thin-concrete-roof-cap-net-positive-energy-rooftop-apartment/>).

II.5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., & Williams, C. (Eds.). (2014). *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge.
- Al Asali, M. W. (2021). *Craft-inclusive Construction - Design Strategies for Thin-tile Vaulting*. University of Cambridge.

Anderson, S., & Dieste, E. (2004). *Eladio Dieste: innovation in structural art*. Princeton Architectural Press.

Araguas, P. (1998). L'acte de naissance de la Boveda Tabicada ou le certificat de naturalisation de la «voûte catalane». *Bulletin Monumental*, 156(2), 129–136.

<https://doi.org/10.3406/bulmo.1998.1754000>

Bares, M. M., & Nobile, M. R. (2011). Volte tabicadas nelle grandi isole del Mediterraneo: Sicilia e Sardegna (XV-XVIII secolo). In A. Zaragoza, R. Soler, & R. Marin (Eds.), *Simposio Internacional sobre bóvedas tabicadas*. (pp. 119–131). Universitat Politècnica de Valencia.

Beckh, M., Del Cueto Ruiz-Funes, J. I., Ludwig, M., Schätzke, A., & Schützeichel, R. (Eds.). (2020). *Candela Isler Müther. Positions on Shell Construction*. Birkhäuser.

Billington, D. P. (1985). *The TOWER and the BRIDGE - The New Art of Structural Engineering*. Princeton University Press.

Billington, D. P. (2003). *The art of structural design. A Swiss legacy*. Princeton University.

Block, P., De Jong, M., Davis, L., & Ochsendorf, J. (2010). Tile vaulted systems for low-cost construction in Africa. *ATDF JOURNAL*, 7(1/2), 4–13.

Block, P., & Ochsendorf, J. (2007). THRUST NETWORK ANALYSIS: A NEW METHODOLOGY FOR THREE-DIMENSIONAL EQUILIBRIUM. *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES*, 48(3).

Cassinello, P. (2020). Historical design of cantilever shells of modernist architecture. *Architecture and Engineering*, 5(3), 3–13. <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2020-5-3-03-13>

Chassinat, J.-A. (1865). *Cours de constructions: première partie: notions pratiques sur les éléments, la forme, les dimensions et la construction des maçonneries*. École d'application de l'artillerie & du génie.

Choisy, A. (1873). *L'Art de bâtir chez les Romains* (Ducher et C. éditeurs, Ed.).

Collins, G. R. (1968). The Transfer of Thin Masonry Vaulting from Spain to America. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 27(3), 176–201. <https://www.jstor.org/stable/988501>

Collins, G. R. (2001). El paso de las cáscaras delgadas de fábrica desde España a América. In S. Huerta Fernández (Ed.), *Las bóvedas de Guastavino en América: libro publicado con ocasión de la exposición: Guastavino Co. (1885-1962), la reinención de la bóveda* (pp. 19–46).

Davis, L., Rippmann, M., Pawlofsky, T., & Block, P. (2012). Innovative funicular tile vaulting: A prototype vault in Switzerland. *The Structural Engineer*, 46–56. www.thestructuralengineer.org

de San Nicolás, F. L. (1639). *Arte y Uso de Arquitectura*.

De Wolf, C., Ramage, M., & Ochsendorf, J. (2016). Low carbon vaulted masonry structures. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 57(4), 275–284. <https://doi.org/10.20898/j.iass.2016.190.854>

d’Espie, F. F. (1754). *Manière de rendre toutes sortes d’édifices incom bustibles; ou Traité sur la Construction des Voutes, faites avec des*

briques et du plâtre. Chez la veuve Duchesne.
<http://cnum.cnam.fr/redir?12LE1.3>

Di Maggio, S., & Corrao, R. (2025). Back to the Nature. Bio-inspired Design for Creation and Construction of Shell Structures. In R. Albatici, M. Dalprà, M. P. Gatti, G. Maracchini, & S. Torressin (Eds.), *Colloqui.AT.e 2025. Envisioning the Futures-Designing and Building for People and the Environment* (pp. 360–377). Springer.

Di Maggio, S., Di Maggio, C., Corrao, R., & Vinci, C. (2024). Formworks in Thin Shell Construction: Past and Present. In R. Corrao, T. Campisi, S. Colajanni, M. Saeli, & C. Vinci (Eds.), *Proceedings of the 11th International Conference of Ar.Tec. (Scientific Society of Architectural Engineering) Colloqui.AT.e 2024* (pp. 249–266). Springer.

Forte Luna, M. (2008a). *Origen de la bóveda tabicada*. Centro de Oficios de Zafra.

Forte Luna, M. (2008b). *Origen de la bóveda tabicada*. Centro de Oficios de Zafra.

Galindo-Díaz, J., Escorcía Oyola, O., & Hernández Quiroga, J. (2022). Vacuum concrete in the construction of houses and industrial buildings in Colombia: the legacy of architect Álvaro Ortega (1950-1955). *CONSTRUCTION HISTORY. International Journal of the Construction History Society*, 37(2), 67–86.

García, J., González, M., & Losada, J. C. (2012). Arquitectura y construcción tabicada en torno a Eduardo Sacriste. *Informes de La Construcción*, 64(525), 35–50. <https://doi.org/10.3989/ic.09.065>

García, J., Medina, J. M., & Rodríguez, J. A. (2018). Modularidad y prefabricación abovedada. La experiencia bogotana y su influencia en Latinoamérica. *1er Coloquio Colombiano de Historia de La Construcción*.

Garcia Lammers, F. (2021). A Church, a Silo, and a Warehouse: Eladio Dieste's Gaussian Vaults and the Workers of the Encofrados. *RAIC-CCUSA ACADEMIC SUMMIT ON ARCHITECTURE*.

García Muñoz, J., & de los Ángeles Beltrán Fernández, M. (2014). La prefabricación de bóvedas de ladrillo. Una utopía latinoamericana. *Rita*, 2, 92–99.

Girón, J., & Huerta, S. (Eds.). (2009). *Auguste Choisy. L'architecture et l'art de bâtir*. Instituto Juan de Herrera.

González Ortiz, H. (2001). *Carlos González Lobo. Caminos hacia lo alternativo dentro del ámbito conceptual, proyectual y contextual de la arquitectura*. UPC.

González Ortiz, H. (2004). Arquitectura en precario. La propuesta de Carlos González Lobo. *Ciencia Ergo Sum*, 11(1), 117–124.

Guastavino, R. (1893). *Essay on the theory and history of cohesive construction, applied especially to the timber vault*. Ticknor and Company.

Gulli, R. (2006). *La costruzione Coesiva. L'opera dei Guastavino nell'America di fine Ottocento*. Marsilio Editori.

Gulli, R., & Mochi, G. (1995). *Bòvedas tabicadas. Architettura e costruzione*. CDP EDITRICE s.r.l.

Huerta, S. (2019). Guastavino Tile Vaults - The Long Migration of a Building Technique. In Heiderose Kilper (Ed.), *Migration und Baukultur: Transformation des Bauens durch individuelle und kollektive Einwanderung* (pp. 183–202). Birkhäuser.

Jipa, A., & Dillenburger, B. (2022). 3D Printed Formwork for Concrete: State-of-the-Art, Opportunities, Challenges, and Applications. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 9(2), 84–107. <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0024>

Kalemkerian, M., & Taroco, E. (1976). nuevas instalaciones para el arsenal de la Armada Nacional - República Argentina. *Informes de La Construcción*, 29(284), 89–95. <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>

Lane, D. (2005). Rafael Guastavino e la razionalizzazione costruttiva del laterizio. *Costruire in Laterizio*, 107, 48–54.

Lee, J., & Moreyra Garlock, M. E. (2009). Eladio Dieste and Félix Candela: a comparative analysis. In A. Domingo & C. Lazaro (Eds.), *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium* (pp. 1562–1573). Universidad Politecnica de Valencia.

López López, D., & Domènech Rodríguez, M. (2012). Structural Analysis of Tile Vaulting: Method and Variables. *Construction History Society of America Biennial Meeting*, 1–18.

López López, D., Van Mele, T., & Block, P. (2016). Tile vaulting in the 21st century - La bóveda tabicada en el siglo XXI. *Informes de La Construcción*, 68(544), 33–41.

<https://doi.org/10.3989/ic.15.169.m15>

López López, D., Van Mele, T., & Block, P. (2019). The combination of tile vaults with reinforcement and concrete. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(6), 782–798.

<https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1476606>

Marín, A. M., & Barluenga, G. (2014). Eladio Dieste y la cerámica armada: La forma de lo resistente. *Arquitecturas Del Sur*, XXXII (45), 90–103.

Martí Arís, C. (2001). Las bóvedas autoportantes. *DPA: Documents de Projectes d'Arquitectura*, 15, 26–31.

Moya Blanco, L. (1947). *BOVEDAS TABICADAS*. MINISTERIO DE LA GOBERNACION DIRECCION GENERAL DE ARQUITECTURA SERVICIO DE PUBLICACIONES.

Naldoni, L., Casarotto A, A., & Erioli, A. (n.d.). *Temporary shell systems based on robotic mud deposition*.

Nobile, M. R. (2020). NUOVI MAESTRI E NUOVI CANTIERI: L'ARCHITETTURA IN SICILIA NEL XV SECOLO. In G. D'Agostino, S. Fodale, M. Miglio, A. M. Oliva, D. Passerini, & F. Senatore (Eds.), *LA CORONA D'ARAGONA E L'ITALIA - Atti del XX Congresso di Storia della Corona d'Aragona* (pp. 1433–1444). Nella sede dell'Istituto Palazzo Borromini.

Ochsendorf, J. (2014). *Las bóvedas de Guastavino. El arte de la rasilla estructural*. papersdoc y Ajuntament de Barcelona.

Ochsendorf, J. A. (2005). Los Guastavino y la bóveda tabicada en Norteamérica. *Informes de La Construcción*, 57(496), 57–66.

Paris, V., Lepore, N., Bruun, E. P. G., Ruscica, G., Piccioni, M. D., Beghini, A., Parascho, S., & Adriaenssens, S. (2021). Robotic construction of a self-balancing glass masonry vault: DEM study of stability during the construction stages. In A. Behnejad, G. Parke, & O. Samavati (Eds.), *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7th International Conference on Spatial Structures* (Vol. 2020, Issue 3, pp. 314–325).

Pedreschi, R. (2006). The Structural Behaviour and Design of Free-Standing Barrel Vaults of Eladio Dieste. *Proceedings 2nd International Congress on Construction History*, 2451–2467.

Pedreschi, R., & Theodossopoulos, D. (2007). The double-curvature masonry vaults of Eladio Dieste. *Structures and Buildings*, 160(1), 3–11. <https://doi.org/10.1680/stbu.2007.160.1.3>

Pedreschi, R., & Theodossopoulos, D. (2010). Eladio Dieste; ‘resistance through form.’ In P. J. S. Cruz (Ed.), *Structures and architecture: proceeding of the First International Conference on Structures and Architecture* (pp. 779–787). CRC Press/Balkema.

Ramage, M., Ochsendorf, J., & Rich, P. (2009). Sustainable shells: New African vaults built with soil-cement tiles. In A. Domingo & C. Lazaro (Eds.), *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium* (pp. 1512–1520). <https://www.researchgate.net/publication/50838881>

Ramazzotti, L. (2001). La cúpula para San Juan del Divino de Nueva York de Rafael Guastavino. In S. Huerta Fernández (Ed.), *Las bóvedas de Guastavino en América : libro publicado con ocasión de la exposición: Guastavino Co. (1885-1962), la reinvencción de la bóveda* (pp. 187–200).

Rei, J., & Sousa Gago, A. (2016). Abobadilha Alentejana “Características e Processos Construtivos.” *2o Congresso Internacional de História Da Construção Luso-Brasileira*, 91–105.

Rei, J., Sousa Gago, A., & Fortea Luna, M. (2021). Portuguese timber vaults -description and constructive tests. In Mascarenhas-Mateus & Paula Pires (Eds.), *History of Construction Cultures* (pp. 402–410). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003173434-156>

Rei, J., Sousa Gago, A., & Santos, J. (2014). ABOBADILHA ALENTEJANA, UMA TÉCNICA DE CONSTRUÇÃO IMEMORIAL. In LNEC (Ed.), *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*.

Sacriste, E., Kechichian, P., & Mackintosh, G. (1977). *Viviendas con bóvedas*.

Tomás, A., & Martí, P. (2010). OPTIMALITY OF CANDELA’S CONCRETE SHELLS: A STUDY OF HIS POSTHUMOUS DESIGN. *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES*, 51(1), 67–78.

Veenendaal, D., & Block, P. (2014). Design process for prototype concrete shells using a hybrid cable-net and fabric formwork. *Engineering Structures*, 75, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.036>

Walia, K., Oval, R., & Baverel, O. (2021). F.A.B. Shell (Fabric – Arch – Base Shell): Concrete shell building using fabric membranes and telescopic arches as formwork. In S. A. Behnejad, G. A. R. Parke, & O. A. Samavati (Eds.), *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7th International Conference on Spatial Structures. Inspiring the Next Generation*.

SECONDA PARTE

APPROFONDIMENTI

III.
SPECIFICITA'
DELLE VOLTE REALINE

SINOSSI

Nella tradizione costruttiva siciliana, con l'uso di pochi e semplici materiali e con il lavoro di maestranze anche non specializzate, era possibile costruire degli elementi voltati che, a fronte dei grandi spazi da chiudere superiormente, avevano spessori minimi. Si tratta di volte sottili, le cosiddette *volte realine*, costituite principalmente di mattoni in laterizio, di spessore massimo di 1 cm, messi in opera con pasta di gesso. Dalla sovrapposizione di due o tre strati di mattoni - in relazione alla funzione che la volta deve svolgere, portante o non portante - alternati ad altrettanti strati di pasta di gesso si ottiene una volta il cui spessore sovente non supera i 10 cm, indipendentemente dalla geometria e dalla forma scelta (che sia una volta a botte, così come una volta a padiglione o, ancora, una volta rampante).

Con la stessa tecnica spesso si realizzavano anche altre tipologie di elementi tecnici, come le partizioni interne verticali (i cosiddetti "tramezzi realini"), di cui evidenze permangono in alcuni edifici storici siciliani.

I tratti distintivi delle *volte realine*, a cui prima si è fatto cenno e che verranno messi in evidenza nel presente capitolo, rendono

questi elementi, sotto molti aspetti, analoghi o quantomeno simili alle *volte in folio* utilizzate in molte zone della penisola italiana o alle *bóvedas tabicadas* spagnole: in tal senso, un parallelismo tra la tecnica delle *volte realine* e le tecniche costruttive delle volte ora menzionate si renderà spesso necessario per sopperire alla mancanza di una codifica scritta della tecnica siciliana nonché delle soluzioni adottate per metterla in opera.

Lo studio, la modellazione e la conseguente analisi strutturale delle *volte realine* attraverso programmi di calcolo avanzati hanno avuto come scopo, in particolare, quello di verificare, oltre all'efficacia nell'applicazione degli elementi di completamento all'estradosso (controvoltine, frenelli, nervature e rinfianchi) regolarmente presenti, il loro comportamento statico sotto determinate condizioni e azioni di carico. I risultati ottenuti potrebbero costituire un punto di partenza nella prospettiva della realizzazione di gusci di grandi dimensioni attraverso l'impiego di piccoli elementi, in considerazione dei vantaggi che questa soluzione comporterebbe: tra questi, il comportamento coesivo del guscio, una maggiore rapidità di messa in opera e, conseguentemente, l'economia dell'intero processo costruttivo.

III. 1 SVILUPPO E DECLINO DELLA TECNICA COSTRUTTIVA DELLE VOLTE REALINE SICILIANE

Sull'origine delle *volte realine*, o meglio della tecnica attraverso la quale tali elementi sono stati realizzati, le informazioni presenti in letteratura sono carenti, ma quelle poche esistenti convergono tutte su una loro derivazione iberica: oltre all'ipotesi, avanzata da Nobile (Bares & Nobile, 2011; Nobile, 2020), su una importazione della tecnica ad opera dell'architetto spagnolo Guillem

Abiell nel XV secolo e di cui si ha riscontro nella torre di Pozzallo¹, un'altra testimonianza arriva dal notaio Giuseppe Maria Di Bartolomeo (Di Bartolomeo, 2007). Costui identifica in Partinico², città nei pressi di Palermo, il luogo in cui la tecnica sarebbe stata recepita e fatta propria dalle maestranze locali sulla scorta degli insegnamenti di un certo mastro spagnolo. Scrive Di Bartolomeo:

«...Mastro Niccolò Maria Patti, insigne fabbricatore, apprese da maestro Brù, spagnuolo e qui abitatore, l'arte di costruire i dammusi, ovvero volte di camere di mattoni e gesso, in cui uguagliò il maestro e introdusse tanto in questa (nella città di Partinico, ndA) che nella capitale, in cui fermò domicilio e i primi che pose in assetto furono nella casina del dr. don Stefano Ajroldi, allor presidente del Tribunale della regia Gran Corte, e con ciò acquistossi della fama e s'introdussero in detta capitale...» (Di Bartolomeo, 2007)

Il manoscritto di Di Bartolomeo risale ai primi anni del XIX secolo, per cui si può affermare senza il rischio di equivoci che almeno dal XVIII secolo le *volte realine* erano presenti in Sicilia. Questa asserzione è confermata dal fatto che il citato Stefano Ajroldi è stato presidente del Tribunale della Gran Corte civile e

¹ Di questa ipotesi si è già scritto nel capitolo precedente (Capitolo II).

² Sulle volte presenti in territorio partinicese è stata condotta dall'Autore, tra il 2019 e il 2020, una intensa campagna di rilievo che ha portato all'identificazione e catalogazione di oltre 150 volte realine. I risultati di questa campagna - la collocazione, le immagini fotografiche, il rilievo geometrico e le testimonianze di chi da giovane ha avuto modo di costruirle - sono confluiti nell'elaborato finale di laurea da cui molte informazioni del presente capitolo sono state tratte ed integrate (Di Maggio et al., 2020).

criminale nel 1772³, oltrech  da un ulteriore affermazione di Di Bartolomeo, in cui si fa riferimento proprio al '700:

«... Vero si   che per quest'arte di costrurre detti finti dammusi di mattoni la port  nel passato secolo in questa nostra citt  il celebre mastro Francesco Br , spagnuolo, ma i di lui scolari, nostri concittadini, l'ap-presero s  finalmente che non ci   ardire l'assicurare che superarono e tuttora superano il lor maestro ed inventore...» (Di Bartolomeo, 2007)

Tralasciando l'enfasi con cui il notaio partinicese attribuisce la diffusione della tecnica per la costruzione delle *volte realine* proprio a partire dalla sua citt  natia, altri documenti dimostrano come l'uso di questa soluzione per la costruzione di volte, in architetture civili o religiose, fosse gi  diffuso in Sicilia ben prima dei fatti da lui narrati.   il caso, ad esempio, della chiesa del Monastero di Santa Caterina a Calatafimi, nella quale per la realizzazione del "Cappellone", della Nave e del coro era prevista, su progetto di Giovanni Biagio Amico (1684-1754), la realizzazione di "dammusi"⁴ «...di mattoni e gesso all'uso di Hispagna...» (Mazzamuto, 2003): questo documento, derivante da un atto notarile⁵ riporta la data del 21 giugno del 1732.

A questo stesso periodo e, pi  precisamente, in seguito ai terremoti del 1726 e del 1751 che hanno interessato la citt  di Palermo, Vinci fa risalire la diffusione della tecnica nel capoluogo siciliano

³ Si trae questa informazione da [https://www.treccani.it/enciclopedia/stefano-airoldi_\(Dizionario-Biografico\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/stefano-airoldi_(Dizionario-Biografico)/).

⁴ "Dammuso"   il termine siciliano, oggi obsoleto, con cui vengono chiamate le volte.

⁵ Segnatura Archivio di Stato di Trapani, *Notai defunti*, Giovanni Stabile, vol. 12093, min., cc. 385 r.-387 v..

sia per nuove realizzazioni che per interventi di ristrutturazione o riconfigurazione (Vinci, 2009).

L'improvvisa propensione verso questa soluzione costruttiva scaturirebbe dalle caratteristiche intrinseche, in particolare la leggerezza e la monoliticità, che rendono volte di questo tipo adeguate a resistere alle azioni sismiche.

Un altro terremoto, quello del 5 marzo del 1823, sarebbe invece la causa dell'abbandono, per alcuni decenni, di questa tipologia di volte: l'ingegnere Carlo Ferdinando Dolce, nel suo scritto a proposito di questo cataclisma (Dolce, 1823), descrive la rovinosa caduta della volta della Chiesa di San Nicolò Tolentino, costruita secondo la tecnica delle *volte realine* e, criticando il non corretto uso che si era fatto proprio di quella tecnica, indica come il primo ad averla appresa dagli spagnoli e ad averla diffusa in territorio siciliano sia stato il già menzionato Niccolò Patti da Partinico durante la metà del Settecento.

La costruzione di *volte realine* è proseguita in territorio siciliano, con fortuna alterna, protraendosi fino agli anni '50-'60 del XX secolo cui è seguito un progressivo, irreversibile, abbandono dovuto principalmente al diffondersi di tecniche costruttive legate all'uso del calcestruzzo armato, più vantaggiose in termini economici e di tempo richiesto per l'intero processo di messa in opera.

Ad oggi, nella città di Palermo, così come in molte altre città siciliane e, in particolare, nei loro centri storici, permangono molti esempi di *volte realine*, spesso recuperate con interventi di dubbia qualità, private dello strato di sacrificio all'intradosso così da consentire di apprezzarne la disposizione del primo strato di mattoni.

Sebbene si tratti di una tecnica costruttiva nei fatti relegata, da quanto sin qui detto, alla tradizione costruttiva locale, si ritiene utile analizzare sotto diversi punti di vista (dei materiali, delle forme così come delle centine utilizzate) le *volte realine* esistenti in modo da comprenderne, oltre al processo che ha portato alla loro messa in opera, anche il comportamento dal punto di vista strutturale, nella prospettiva di un loro recupero, laddove ancora necessario, e/o in vista di una parziale rivisitazione.

III.1.1 I MATERIALI

Uno degli aspetti caratterizzanti le *volte realine* è il fatto che per la loro messa in opera occorrono soltanto due materiali: il gesso, miscelato con acqua in modo da ottenere una pasta di gesso, e il laterizio, nella forma di mattoni sottili.

Il gesso⁶, una volta che attraverso l'acqua viene mutato in pasta, fa sì che questa aumenti il proprio volume una volta applicata e rappresa⁷. Tale aumento è di circa l'1% che, sebbene possa sembrare un valore trascurabile, tuttavia in fase di posa in opera non

⁶ Dalle testimonianze dirette raccolte nel palermitano, si sa che il gesso veniva estratto dalle cave attraverso una serie di piccole esplosioni precedute da mini trivellazioni fatte con pali in ferro a punta piatta. La roccia gessosa si rompeva in grossi blocchi: questi dalla cava venivano trasportati alla vicina *carcara* (la fornace) dove, disposti con maestria a semicerchio (seguendo dunque il perimetro della fornace), venivano fatti ardere per 6-8 ore finché il gesso, dal colore originario, non assumeva un colore biancastro. I blocchi rocciosi appena cotti venivano fatti raffreddare all'aperto per circa due giorni e successivamente, attraverso un'operazione chiamata *mazziatura* si procedeva a ridurli in polvere.

⁷ L'espansione avviene con gessi tipo quello di Parigi o di alcune zone della Sicilia, ma non ad esempio con il gesso utilizzato da d'Espie per le volte ammattonate (le *combles briquettes*) del Languedoc-Roussillon (Fatta et al., 2016b).

deve essere sottovalutato, dal momento che potrebbe portare anche al collasso della volta. Per ovviare a questo inconveniente, già Blondel (Blondel, 1771) nel XVIII secolo consigliava di alloggiare le volte messe in opera con pasta di gesso facendo in modo che l'incavo ricavato per i piani di imposta fosse più largo della misura strettamente necessaria, così da consentire alla volta di potersi espandere senza ostacoli.

La scelta del gesso come legante da utilizzare per le *volte realine* in luogo di altri (come la calce⁸) era dettata da diversi fattori quali la rapida presa e indurimento⁹, che consentiva di velocizzare notevolmente i tempi di messa in opera, e la facile reperibilità soprattutto in alcune aree dell'Isola¹⁰.

Un fattore negativo non trascurabile del gesso è la sua igroscopicità, cioè la tendenza ad alterarsi a causa dell'umidità dell'aria o della presenza di acqua con conseguente perdita delle sue caratteristiche di adesività e di presa. Per proteggerle da acqua e umidità, le *volte realine* erano realizzate in ambienti chiusi¹¹.

⁸ Non si hanno neppure notizie riguardanti un uso della malta cementizia, molto utilizzata invece in Spagna, se non in sporadici interventi di recupero.

⁹ Ciò comporta che la pasta va confezionata nella quantità minima che si ritiene possa essere utilizzata e adoperata immediatamente dopo la preparazione, senza disturbare il processo di presa, fatto che causerebbe inevitabilmente la perdita della sua capacità adesiva.

¹⁰ Si pensi ad esempio ai paesi dell'entroterra, come Sutera, dove l'uso della pietra di gesso come materiale da costruzione era esteso alla edificazione dei muri portanti delle abitazioni e, all'interno delle stesse, alla realizzazione degli elementi voltati.

¹¹ Quando il gesso è messo in opera, la presenza di cloruri nei laterizi con cui veniva a contatto poteva costituire un altro fattore deleterio che poteva compromettere la stabilità delle strutture voltate.

La realizzazione dei mattoni in laterizio, che prendevano il nome di mattoni *pantofali* o *parmarizzi* (che in altri contesti stanno ad indicare mattoni quadrati di lato un palmo, dunque all'incirca 25 cm) avveniva nei cosiddetti *stazzoni* (dal latino *statio*, fabbrica di tegole, mattoni e vasellame), anche questi, come le *carcare*, diffusi fino al secolo scorso in diverse parti della Sicilia dove era prolifica la lavorazione dell'argilla, come a Santo Stefano di Camastra, nel messinese (Ministero di Agricoltura, 1893).

I mattoni *pantofali* hanno la particolare caratteristica di essere estremamente sottili, tanto che in quelli riscontrati lo spessore varia da 1,5 cm fino a 1 cm (non sono rari, inoltre, i casi in cui la misura arriva a 0,8-0,9 cm¹²) (Figura III.1). Questa loro conformazione ha come conseguenza lo spessore ridotto delle *volte realine*. Per quanto riguarda le altre due dimensioni, le misure più ricorrenti sono 12x24 cm e 13x26 cm, entrambe con gli spessori già indicati. I mattoni di misure maggiori sono stati riscontrati più raramente e in edifici meno recenti, motivo per cui si ritiene che questi fossero stati utilizzati in tempi più remoti, mentre quelli di misura 12x24 cm si reputa siano subentrati in seguito.



Figura III.1. Parmarizzo dello spessore di 0,8 cm rinvenuto a Partinico (foto dell'Autore).

¹² Per il Palais Bourbon Jacques François Blondel si avvalese di mattoni sottili con spessore di 2,7 cm (Blondel, 1771), cioè circa due o tre volte lo spessore di quelli reperiti in Sicilia.

Una caratteristica spesso riscontrata nelle *volte realine* è il fatto che i mattoni di cui sono costituite non hanno una superficie perfettamente piana ma piuttosto presentano una leggera curvatura, dovuta all'essiccazione della terracotta, che permette di poterli meglio adattare alla conformazione geometrica della volta.

Oltre a ciò, nei *pantofali* che si sono potuti prelevare (da volte ormai crollate e non più recuperabili) conservandone l'integrità, così come in molti estradossi ispezionabili, si è osservato che, in molti casi, una delle loro facce presenta delle striature longitudinali realizzate semplicemente con le dita delle mani o con lo strumento adoperato per stendere l'argilla. Questi incavi poco profondi, che possono sembrare dei difetti, erano in realtà un modo utile per aumentare la superficie di contatto e fare aggrappare meglio la pasta di gesso interposta, che i maestri *dammusari* (costruttori di *dammusi*) utilizzavano per legare i diversi elementi e strati delle *volte realine*. In particolare, la faccia scabra veniva posta all'intradosso per permettere l'aggrappo dell'intonaco e ciò testimonia la sapienza costruttiva dei *mastri fabricatori* (Figura III.2).

Figura III.2. A sinistra, mattone con la tipica curvatura centrale. A destra, mattone con la faccia striata (foto dell'Autore).



La colorazione dei mattoni è un altro aspetto interessante, emerso nel corso delle indagini effettuate (Figura III.3): si è constatato, infatti, che in una volta in cui è visibile l'intradosso ammattonato spesso i *parmarizzi* non hanno tutti lo stesso viraggio ma questo può differire anche di molto. Il diverso colore dei laterizi è dovuto alla modalità e al tempo di cottura che questi hanno subito in fornace, oltre che alla posizione da essi occupata rispetto alla fiamma; da ciò deriva che esistono tre tipi di mattoni: i mattoni molto cotti, chiamati *ferrognoli*, che subiscono un processo di vetrificazione e sono di colore bluastro-verdognolo; i mattoni poco cotti, detti *albasi*, che tendono a deformarsi ed hanno un colore tendente al giallognolo; i mattoni *forti*, di colore rosso vivo, che sono, invece, i migliori da utilizzare (Menicali, 1992) per le caratteristiche più omogenee che possiedono.

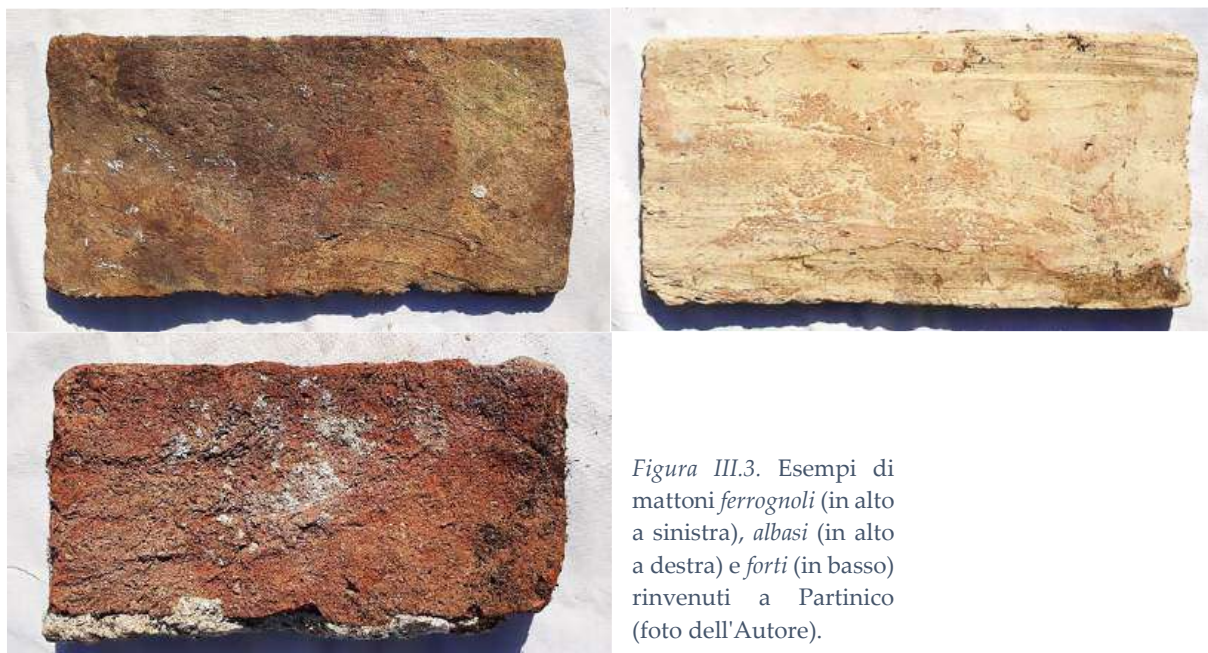


Figura III.3. Esempi di mattoni *ferrognoli* (in alto a sinistra), *albasi* (in alto a destra) e *forti* (in basso) rinvenuti a Partinico (foto dell'Autore).

La caratteristica fondamentale che fa delle *volte realine* delle costruzioni coesive, e non a gravità in accordo con la distinzione introdotta da Guastavino (Huerta Fernández, 2006), è data dal fatto che queste hanno un comportamento statico simile a quello di un coperchio di terracotta (Blondel, 1771), cioè i materiali costituenti, dopo essere stati assemblati, si comportano come un corpo unico. Ciò è dovuto essenzialmente all'aderenza tra i mattoni *pantofali* e il gesso con cui vengono messi in opera (Figura III.4).

Il termine *aderenza* è usato per definire la resistenza e l'estensione del contatto tra due elementi/strati o materiali (ad esempio come nel presente caso gesso-laterizio, oppure intonaco-muratura o ancora acciaio-calcestruzzo e così via) ed è funzione soprattutto del potere adesivo del materiale che funge da legante.

È stato dimostrato da alcuni studi (Binda Mayer L. & Baronio G., 1986) che l'aderenza fra malta e mattone non è solamente di tipo meccanico, ma anche di tipo chimico, cioè agisce a livello particellare: si è visto infatti che quando la velocità di assorbimento iniziale dei mattoni è compresa entro certi limiti, fenomeni di reazione chimica possono avvenire nelle zone a contatto tra i due materiali e il prodotto di reazione che si forma, difficilmente analizzabile vista l'esiguità del suo spessore, disponendosi nelle cavità all'interfaccia (tra malta e mattone) elimina ogni soluzione di continuità e rinsalda il loro legame.

In altri casi può anche succedere che l'eccessiva porosità dei mattoni riduca il contenuto di acqua all'interno della pasta di gesso con la conseguente formazione di un bordo impermeabile sulla superficie di contatto che impedisce lo scambio di acqua tra i due materiali creando una soluzione di continuità tra di loro e quindi una inevitabile perdita di aderenza.

Il meccanismo chimico di aderenza malta-laterizio è dimostrato da analisi ottiche, eseguite con microscopi ad alto ingrandimento (SEM); con queste si è potuto osservare come all'interfaccia pasta di gesso-mattone in laterizio vi sia una compenetrazione del legante nel laterizio e, in misura minore, anche una commistione di frammenti micrometrici di laterizio nella pasta di gesso adiacente (Binda Mayer L. & Baronio G., 1986). A tal proposito scrive Breyman nel suo trattato: «...nelle volte in cotto bisogna porre meno attenzione nell'esattezza di posa e di forma dei singoli mattoni, che al riunire il più perfettamente possibile i mattoni colla malta in una massa unica...» (Breyman, 1926).



Figura III.4. Maceria di volta realina tagliata in laboratorio, proveniente da Partinico, in cui si vede la perfetta aderenza tra laterizio e gesso.

Si notano anche, all'interno della matrice gessosa e dell'intonaco in alto, piccole tracce di altri materiali estranei (foto dell'Autore).

III.1.2 LE CENTINE

Similmente a quanto avviene per le bóvedas tabicadas spagnole di cui si è detto al Capitolo II, anche nel caso delle volte realine le centine richieste per la loro messa in opera erano in quantità minori rispetto ad altri sistemi. In particolare, lo scopo delle centine non era tanto quello di supportare la volta soprastante, quanto piuttosto quello di fornire una guida che permettesse alle mae-

stranze una corretta posa dei mattoni in modo da ottenere, soprattutto per lo strato di mattoni all'intradosso, le forme prefissate riducendo i margini di errore.

Le tipologie di *volte realine* maggiormente presenti sul territorio siciliano, ovvero di cui restano evidenze, sono quelle a botte e a botte con teste di padiglione (dette anche *a conca*)¹³.

Per le centine necessarie alla realizzazione delle volte non erano richieste grandi quantità di legname, come sarebbe invece necessario per volte in concrezione, e il più delle volte si preferiva utilizzare legname di risulta, unendolo con chiodi, piuttosto che procurarsene di nuovo, garantendo un certo risparmio nella costruzione.

Nel caso di *volte realine* a botte con teste di padiglione, situate prevalentemente ai piani superiori delle abitazioni e in ambienti a pianta rettangolare, la centinatura era costituita, solitamente, da un travetto in legno, posto al centro della stanza da voltare, che avrebbe sostenuto tutto il peso della struttura fittizia in legno: da questa si irradiavano alcune assi - spesso quattro in concomitanza dei quattro angoli della stanza - terminanti in corrispondenza dei piani di imposta della volta; sopra queste tavole si inserivano quelle tagliate e assemblate in modo da formare la linea curva della volta; infine tra queste assi incurvate si frappevano altre assi opportunamente distanziate tra loro per posizionare i *parmarizzi* (Figura III.5).

¹³ Altre volte riscontrate, ma in quantità minori, sono del tipo *a collo d'oca* (o *rampanti*, utilizzate soprattutto per le rampe delle scale), a crociera, a padiglione e a vela.

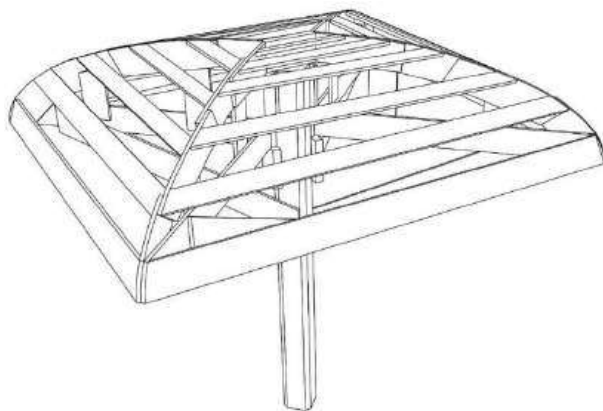


Figura III.5. Rappresentazione schematica della centina utilizzata per volte realine a botte con teste di padiglione da realizzare ai piani superiori (disegno dell'Autore).

Più semplice risultava la conformazione della centina per *volte realine* a botte (Figura III.6), localizzate in prevalenza negli ambienti a pianta rettangolare ai piani terreni: due dime costruite secondo forme e dimensioni volute, erano intervallate da una serie di assi di legno poste longitudinalmente, cosicché per ambienti di una certa profondità bastava spostare il modulo in legno creato potendo, in tal modo, proseguire con la costruzione.

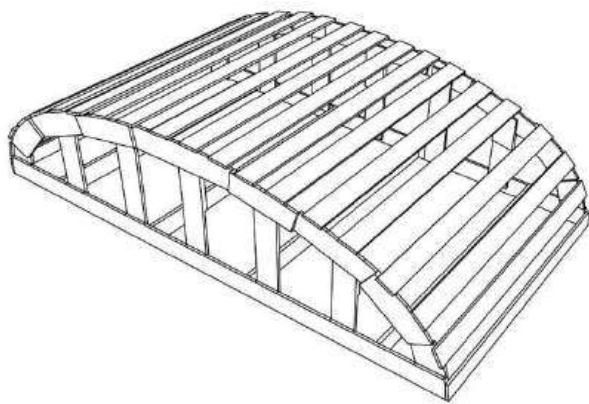


Figura III.6. Rappresentazione schematica della centina utilizzata per volte realine a botte da realizzare ai piani terra (disegno dell'Autore).

Per le altre tipologie di *volte realine* non si hanno testimonianze riguardanti il metodo di realizzazione delle centine, tuttavia si

ritiene plausibile ipotizzare che siano state utilizzate delle soluzioni simili a quelle relative alle *volte realine* a botte e a conca.

Le centine, una volta costruite ed utilizzate, nella maggior parte dei casi non venivano subito smontate in quanto potevano essere riutilizzate all'interno di uno stesso edificio o, caso non raro, in edifici limitrofi: ciò rappresentava un vantaggio dal punto di vista sia economico, data la necessità ridotta di legname, che temporale, influenzando non poco sulle tempistiche per l'entrata in esercizio delle volte.

Le curve che dovevano dare forma alle volte e alle centine, spesso a sesto ribassato o ad arco policentrico, venivano eseguite a piè d'opera e diversi metodi erano utilizzati a tal fine. Il più elementare e veloce, per volte semplici, era quello della lenza ancorata ad un punto e fatta girare dall'altro capo, in cui era posizionato un lapis, in modo da creare un arco a tutto sesto.

Con opportuni accorgimenti, sempre con lo stesso metodo, era possibile disegnare diverse altre tipologie di archi e curve in ragione delle diverse esigenze.

III.2 LA MESSA IN OPERA

III.2.1 LA DISPOSIZIONE DEI MATTONI

La fase principale di realizzazione delle *volte realine* era preceduta dal tracciamento, sui muri d'ambito, della forma della volta da costruire. Il tracciamento dipendeva da diversi fattori quali il tipo di volta, la monta o freccia, la luce da coprire; nel caso di *volte realine* a botte, ad esempio, oltre al tracciamento della direttrice bisognava tracciare anche il piano di imposta.

Non appena il tracciamento veniva eseguito, si procedeva alla formazione degli incavi¹⁴ in corrispondenza delle linee segnate così da formare il cosiddetto *insaraciato* per l'alloggiamento dei primi filari della volta (Figura III.7).

In taluni casi riscontrati, l'*insaraciato* risulta pressoché inesistente - essendo ridotto ad un semplice picchettamento sulle murature d'ambito - e l'imposta della volta poggia su un esiguo cuneo di malta posto inferiormente ad essa (Figura III.8).



Figura III.7. Volte realine a botte collassate in cui è visibile l'*insaraciato* per l'alloggiamento dei mattoni delle volte e delle relative controvoltine. Tracce di picchettamento sono visibili anche parallelamente alla direttrice delle volte (foto dell'Autore).

¹⁴ In questa operazione era sempre da tenere in conto l'espansione del gesso una volta asciugato.

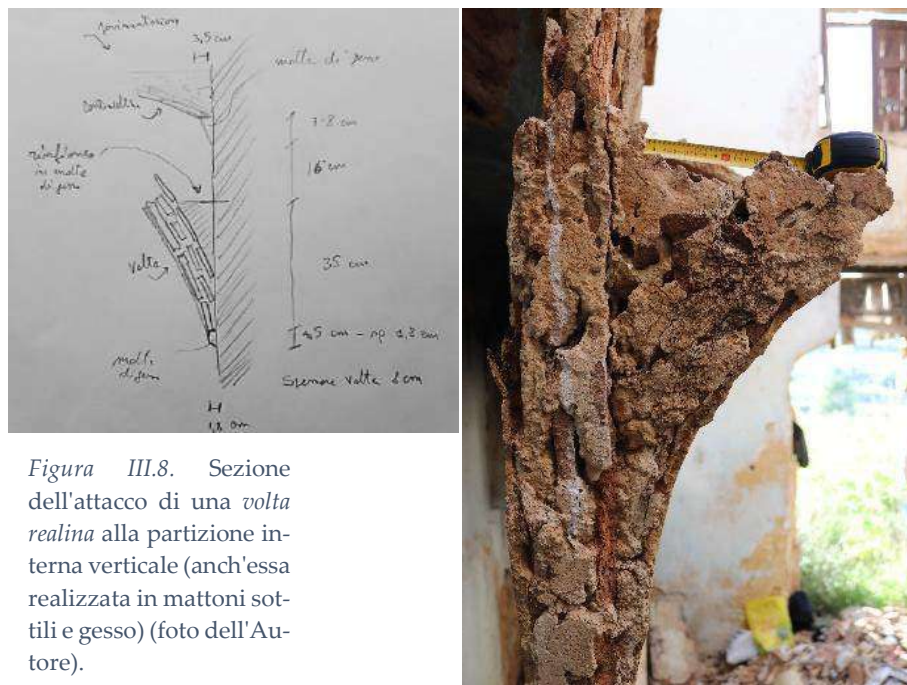


Figura III.8. Sezione dell'attacco di una *volta realina* alla partizione interna verticale (anch'essa realizzata in mattoni sottili e gesso) (foto dell'Autore).

Il posizionamento dei mattoni del primo strato (Figura III.9) costituiva il momento più significativo della fase di messa in opera delle *volte realine*: dal primo strato dipendevano infatti sia la giusta curvatura che il corretto funzionamento di tutta la volta, per cui una corretta posa era indispensabile. La possibilità di posizionare i mattoni parallelamente o perpendicolarmente ai piani di imposta o alle generatrici della volta permetteva di ottenere un andamento della curvatura quanto più fedele alle tracce e alle geometrie prefissate.

I mattoni, posizionati in piano sia nel primo che negli altri strati, cominciavano ad essere inseriti al bordo dell'*insaraciato* in modo da ottenere, alla fine, una perfetta continuità tra il muro e la volta.



Figura III.9. Esempi di intradossi di *volte realine* in cui lo scrostamento dell'intonaco permette di apprezzarne la disposizione dei mattoni (foto dell'Autore).

La messa in opera degli strati successivi era simile a quella del primo strato: sfalsando in entrambe le direzioni i giunti rispetto

allo strato sottostante e con lo stesso procedimento, si inseriva il secondo (e poi, eventualmente, il terzo) strato di mattoni sottili. Dalle indagini effettuate sono emersi due casi di *volte realine*, non portanti, realizzate con sola funzione di controsoffittatura, e portanti, utili al sostegno del solaio soprastante¹⁵: nel caso di volte non portanti erano sufficienti due soli strati di mattoni, mentre nel caso di volte portanti gli strati erano in tutti i casi non più di tre¹⁶ (Figura III.10).

In entrambi i casi, i *parmarizzi* del secondo strato erano disposti ruotandoli di 90 gradi rispetto a quelli del primo strato, in modo da ottenere una maggiore collaborazione tra gli strati adiacenti. Al contrario, talvolta, in contrapposizione a quanto scriveva il conte d'Espie, cioè che «...i giunti del secondo strato non devono assolutamente incontrare quelli del primo...» (Lemma, 1996), è stato più volte riscontrato uno sfalsamento dei giunti pressoché insignificante tra uno strato e l'altro adiacenti, nonché, in uno stesso strato, uno spessore dei giunti variabile da pochi millimetri fino a qualche centimetro.

È stato curioso osservare come spesso il terzo e ultimo strato sia stato messo in opera non con *parmarizzi* integri, ma con pezzi di questi: da ciò si capisce come lo spreco di materiali fosse ridotto al minimo indispensabile.

(Imbornone & Failla, n.d.)(Imbornone & Failla, n.d.)(Imbornone & Failla, n.d.)¹⁵ Scrive Imbornone: «...(le volte realine) si distinguono in “realine di calpestio” con funzioni portanti, e “realine di soffitto”, non calpestabili...» (Imbornone & Failla, n.d.).

¹⁶ È bene sottolineare che le luci che tali volte ricoprivano non superavano i 10 m, per cui in caso di luci superiori probabilmente sarebbero stati aggiunti ulteriori strati.

Un'ultima fase, riscontrata poche volte, è quella corrispondente ad una colata di gesso stesa con le nude mani¹⁷, che aveva lo scopo di uniformare e di irrigidire tutta la volta appena terminata.



Figura III.10. Rovina di una volta realina da cui si evince la successione di strati di laterizi e di gesso (foto dell'Autore).

III.2.2 SOLUZIONI DI RINFORZO ALL'ESTRADOSSO

Il funzionamento statico delle *volte realine*, che segue i dettami delle strutture coesive, fa sì che queste siano sottoposte prevalentemente a compressione e che gli sforzi su di esse esercitati - sia il peso proprio che i carichi permanenti, come i solai, e i carichi accidentali - vengano per intero trasferiti alle murature d'ambito, generando in tal modo degli spostamenti pressoché nulli negli elementi voltati¹⁸.

¹⁷ Durante tutte le fasi costruttive il gesso veniva steso con le mani senza l'utilizzo della cazzuola, che si pensava restituisse una superficie troppo liscia, al punto da non permettere l'aderenza col mattone.

¹⁸ Il ragionamento qui proposto è da intendersi in condizioni statiche, escludendo dunque le azioni orizzontali, in particolare quelle derivanti da movimenti tellurici, che potrebbero fare cedere le murature su cui le volte poggiano, causandone in tal modo il dissesto o il totale collasso.

Figura III.11. Sezione costruttiva esemplificativa di una volta realina con l'indicazione degli elementi costituenti (disegno dell'Autore).

Laddove le *volte realine* erano scariche, ossia soggette solamente al peso proprio, le *volte realine* di calpestio presentavano invece, nella zona estradosso, delle soluzioni di diversa natura utili al rinforzo delle volte stesse (Figura III.11) (Tabella III.1) (Fatta et al., 2017) (Fatta et al., 2016a).

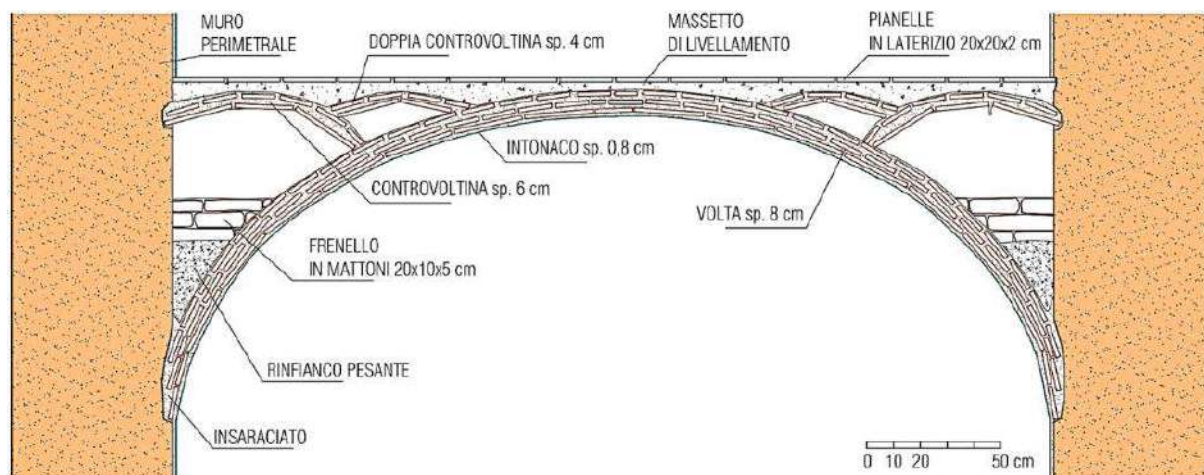


Tabella III.1. Soluzioni di rinforzo all'estradosso delle volte realine.

Soluzione	Collocazione all'estradosso	Materiale/i	Spessore	Finalità
Rinfianchi	Ai lati della volta, tra la linea di imposta e il piano alle reni	Materiale sciolto e compattato, di risulta o derivante dai residui della fabbrica (pietrame informe, calcinacci di varia natura e pezzatura, tubi fittili, corna di bue)	-	Assicurano che la curva delle pressioni sia contenuta nel terzo medio di tutte le sezioni dell'arco, che sarà quindi soggetto soltanto a compressione

Riempimenti	Ai lati della volta, tra il piano alle reni e la sommità della volta	Materiale sciolto non compattato, di risulta o derivante dai residui della fabbrica	-	Servono a livellare e a creare il piano di posa per il solaio soprastante la volta
Frenelli	Ai lati della volta	Conci di calcarenite o mattoni di laterizio allettati con malta di gesso, o ciottoli di grandi dimensioni e forma allungata adagiati tra volta e muro	10-15 cm	Sostituiscono o coadiuvano il rinfianco della volta così da costituire un valido contrasto alle spinte sulle reni, irrigidendo al contempo il guscio nelle zone in cui si manifestano tensioni di trazione, e dunque contribuendo all'indeformabilità della geometria
Controvoltine	Ai lati della volta	Mattoni sottili e gesso	5-6 cm	Distribuiscono metà del carico gravante sulla volta alle murature attigue, bilanciando il carico rimanente in modo più uniforme vicino all'asse della volta (se combinato con i rinfianchi)
Nervature	Nelle discontinuità o lungo i lati corti della volta	Mattoni sottili e gesso	<3 cm	Aumentano la sezione resistente della volta nelle zone soggette a sollecitazioni più elevate, contribuendo in modo significativo alla stabilità

Doppie controvol-tine	Tra le controvol-tine e la volta principale	Mattoni sottili e gesso	e <5 cm	Convogliano e distribuiscono i carichi vicino all'asse della volta. Inoltre servono a creare un piano di posa del solaio superiore più regolare
-----------------------	---	-------------------------	---------	---

III.2.2.1 Rinfianchi e riempimenti

Dai piani di imposta, e fino ai piani alle reni¹⁹, erano inseriti dei rinfianchi in materiale di risulta (pietrame informe, calcinacci di varia natura e pezzatura, tubi fittili, corna di bue (Fatta, Campisi, Castri, et al., 2007)) spesso compattato o mescolato con malta in modo da consolidarlo e aumentarne la massa (Figura III.12). I rinfianchi facevano sì che la zona dell'arco da loro influenzata funzionasse da piedritto ed avesse funzione stabilizzante, dal momento che servono a contenere la curva delle pressioni all'interno della sezione dell'arco, proprio come postulato, con il Teorema della sicurezza, da Jacques Heyman (Heyman, 2021).

¹⁹ I piani alle reni sono i piani localizzati in corrispondenza della zona in cui si verifica l'inversione delle sollecitazioni agenti sulla volta. Nel caso di archi a pieno sesto, ad esempio, essi sono posizionati a circa 30° rispetto al piano di imposta della volta.



Figura III.12. Rinfianco dell'estradosso di una volta realina a sesto ribassato (foto dell'Autore).

Dalle reni fino alla sommità delle *volte realine* si potevano avere dei riempimenti in materiale leggero, ossia non compattato, in modo da ottenere una superficie orizzontale su cui procedere alla posa del solaio di piano.

III.2.2.2 Frenelli

Si definiscono *frenelli* (o *mediantoli*, secondo il Marvuglia (Fatta, Campisi, & Vinci, 2007)) i muri posti all'estradosso delle volte, ad una distanza variabile l'uno dall'altro, in funzione delle dimensioni della volta. Potevano essere di diversi componenti ma i più usuali, data la facilità di reperimento, erano realizzati con conci di calcarenite messi in opera con malta (Figura III.13) o in mattoni in laterizio con malta di gesso, o ancora in ciottoli di grandi dimensioni e di forma allungata, in questo caso posti a secco tra la volta e il muro perimetrale.

Lo spessore non eccedeva i 10-15 cm; la loro funzione principale era quella di sostituire o coadiuvare la massa del rinfiando delle volte in modo da essere un valido contrasto alle spinte sulle reni, irrigidendo la volta sottile proprio nelle zone in cui si manifestano tensioni di trazione, e, dunque, contribuendo all'indeformabilità della geometria della stessa.



Figura III.13. Esempi di frenelli posti all'estradosso delle volte realine di due edifici ecclesiastici.

Si noti come le dimensioni, soprattutto in altezza, possono essere estremamente variabili (foto dell'Autore).

III.2.2.3 Controvoltine

Si tratta di volte di dimensioni minori rispetto alla *volta realina* principale; nel caso di *volte realine* a botte erano posizionate ai fianchi della volta su cui si innestavano, mentre nel caso di *volte realine* a conca potevano essere inserite in modo che ogni loro generatrice fosse parallela ai muri perimetrali. Erano anch'esse realizzate come *volte realine*, dunque in mattoni sottili e pasta di gesso, e il loro spessore non superava i 5-6 cm (Figura III.14). il loro obiettivo principale era quello di livellare l'estradosso, venendo dunque inserite in luogo dei riempimenti leggeri, in modo da formare una base per i successivi strati del solaio e la posa della pavimentazione. Non mancava, inoltre, un positivo contributo alla statica della *volta realina* stessa: infatti, oltre a ridurre notevolmente la quantità di riempimento necessario a definire il piano all'estradosso, scaricavano direttamente sui muri perimetrali metà del carico accidentale che gravava sulla *volta realina*, ridistribuendone la parte restante in maniera più uniforme su una porzione prossima all'asse della volta stessa.



Figura III.14. Esempi di controvoltine (foto dell'Autore).

III.2.2.4 Nervature

Identificate anche come *costolonature*, le *nervature* sono dei rinforzi applicati sulle *volte realine* che servono ad incanalare e scaricare meglio i carichi propri delle volte, aumentando la sezione resistente nelle zone in cui le tensioni sono massime, e dando, dunque, un contributo notevole alla stabilità delle *volte realine*.

Sono costituite da una o più file di mattoni *pantofali* posti con la faccia maggiore appoggiata sopra la volta o lungo il lato corto della volta o parallelamente alla sua generatrice, o ancora nelle linee di intersezione tra la botte e il fuso nel caso di *volte realine* a conca. Le *nerature* sono state riscontrate, in particolare, nelle volte non portanti e a due strati; la loro presenza, inoltre, è stata attestata anche in alcuni casi, all'intersezione tra le lunette laterali e la volta principale (Figura III.15); non è stata riscontrata invece all'intersezione unghie-fusi e fusi-fusi, dove invece in alcuni casi si è trovato uno spessore di pasta di gesso applicato all'estradosso.



Figura III.15. Estradosso di una *volta realina* con *nerature* applicate all'intersezione tra lunette e volta principale (foto dell'Autore).

III.2.2.5 Doppie controvoltine

Raramente documentate all'estradosso di *volte realine*, sono le *doppie controvoltine*, piccole volte poste tra le *controvoltine* e la volta principale (Figura III.16). Come per le *controvoltine*, lo scopo era quello di centralizzare i carichi e distribuirli uniformemente su una porzione prossima all'asse della volta; tuttavia, la loro presenza era utile, soprattutto, per rendere ancora più piana la superficie che si veniva a formare al di sopra della *volta realina*, economizzando in tal modo sul materiale di riempimento. Questi elementi, realizzati - anche in questo caso - in mattoni e gesso, data la loro esigua dimensione erano formati accostando via via due mattoni per tutta la loro lunghezza.



Figura III.16. Doppia controvoltina (in rosso), parzialmente murata, posta all'estradosso di una volta realina. In blu è evidenziata la volta realina e in nero la controvoltina (foto e rielaborazione grafica dell'Autore).

III.3 ANALISI STRUTTURALE DI UNA VOLTA REALINA

La tecnica correlata alla costruzione di *volte realine*, come già asserito, è oggi desueta e si ritrova relegata ai casi di *volte realine* ancora esistenti correlate alla tradizione costruttiva tipica di molte aree della Sicilia, sia occidentali che orientali.

I casi di *volte realine* analizzati nel corso della ricerca di cui si discute in questa tesi sono localizzati principalmente nei centri storici delle città o, più raramente, in abitazioni rurali. Le modeste dimensioni dei vani delle abitazioni che le *volte realine* sono chiamate a coprire non consentono di apprezzare appieno le potenzialità della tecnica costruttiva ad esse correlata: se confrontate con le grandi volte *tabicade* di origine iberica, ad esempio (come nella già citata Basilica di San Francesco il Grande a Madrid, o nella Cattedrale di San Giovanni il Divino a New York), si capisce come il contesto in cui le *volte realine* vennero adottate ne abbia condizionato un migliore e più proficuo sviluppo.

III.3.1 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

Lo studio della caratterizzazione meccanica dei provini prelevati da due *volte realine* di due città siciliane tra loro molto distanti, Partinico (in provincia di Palermo) e Villalba (in provincia di Caltanissetta), fa meglio comprendere come con una stessa tecnica si possano ottenere degli elementi tra loro intrinsecamente differenti²⁰.

I provini ricavati da una maceria proveniente da una *volta realina* di un edificio (Figura III.17) situato nel centro storico di Partinico

²⁰ I risultati qui presentati sono tratti da (Di Maggio et al., 2020) e (Vallone et al., 2017).

sono stati sottoposti a prova di resistenza a compressione e a flessione²¹. Entrambe le prove sono state svolte applicando il carico parallelamente ai mattoni in laterizio (Figura III.18).

Il valore medio di resistenza a compressione, derivante dai valori ricavati per ognuno dei tre provini analizzati, risulta essere di 8,75 MPa.

Il valore medio di resistenza a trazione, calcolato dalla media dei valori ottenuti per i provini, escludendo i valori anomali, è risultato pari a 0,98 MPa.



Figura III.17. Volta realina, localizzata nel centro storico di Partinico, da cui sono stati ricavati i campioni (foto di D. Giardina).

²¹ Per entrambe le prove è stata usata la macchina universale BTC-EXOTROPIC 001 della Zwick/Roell.



Figura III.18. Prova di compressione (a sinistra) e di trazione (a destra) di due dei provini analizzati (foto di C. Vinci).

Alla stessa prova di compressione sono stati posti i provini ricavati dai detriti formati in seguito al crollo di una delle volte di un casale rurale a Villalba (Figura III.19).

Il valore di resistenza a compressione ricavato è pari a 13 MPa. In questo caso, si è eseguita anche la prova di flessione su tre punti sulla malta, che ha permesso di ricavare un valore di resistenza a trazione pari ad 1 MPa (Figura III.20).

Un confronto tra i due casi permette di notare come i diversi materiali costituenti le due volte realine abbiano influito nei risultati delle prove effettuate. Infatti, la volta di Partinico - costituita da tre strati di mattoni spessi circa 1 cm intervallati da pasta di gesso - ha una resistenza a compressione, di 8,75 MPa, molto differente dalla volta di Villalba - costituita da due strati di mattoni di 1,5 cm di spessore intervallati da una pasta di gesso con aggiunta di cenere - dove il valore arriva a 13 MPa.

Figura III.19. Volta realina, localizzata nelle campagne di Villalba, da cui sono stati ricavati i campioni (Vallone et al., 2017).

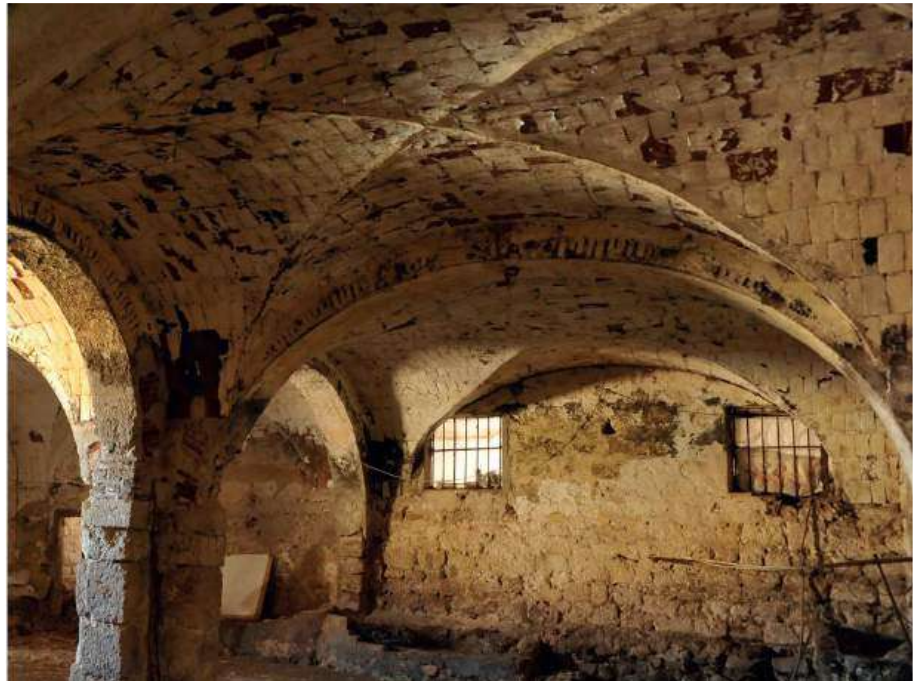


Figura III.20. Prova di compressione della muratura (a sinistra) e di trazione della malta (a destra) di due dei provini analizzati (Vallone et al., 2017).



III.3.2 RILIEVO E MODELLAZIONE DELLA VOLTA

Al fine di studiare il comportamento degli orizzontamenti voltati qui esaminati, si è presa in considerazione, tra quelle riscontrate, una *volta realina* il più possibile rappresentativa del *modus operandi* delle maestranze locali siciliane: di fatto, trattandosi di volte realizzate con la stessa tecnica, dunque con materiali, spessori e caratteristiche pressoché simili, si è scelto di considerare una *volta realina* realmente esistente e localizzata in un edificio a Partinico (PA).

Si tratta di una *volta realina*, a botte con sesto ribassato e portante, dunque in tre strati di mattoni e gesso dello spessore complessivo di 8 cm, con dimensioni planimetriche di circa 4x7 m e freccia di 1,05 m (Figura III.21).

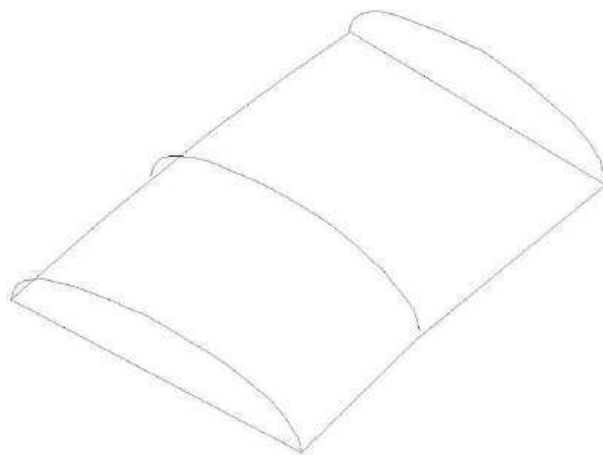


Figura III.21. Volta realina considerata per l'analisi strutturale (foto dell'Autore).

Il rilievo effettuato²² ha restituito le dimensioni e la conformazione in pianta e il profilo esatto della volta individuata come caso studio (Figura III.22). La pianta della volta non è risultata perfettamente regolare, presentando, quindi, delle imposte discontinue e degli angoli non retti; inoltre, e ciò che è stato importante allo scopo dell'analisi, il profilo dell'intradosso della volta è risultato irregolare e variabile lungo il suo sviluppo. Queste apparenti quanto trascurabili inesattezze sono dovute al fatto che spesso le volte erano completate inferiormente da uno strato di intonaco che occultava eventuali imperfezioni, le quali invece riemergono a seguito dei successivi scrostamenti dovuti ad interventi di recupero piuttosto discutibili.

Figura III.22. Restituzione grafica a fil di ferro del rilievo effettuato sulla volta (disegno dell'Autore).

Si può notare come il profilo geometrico della *volta realina* non sia perfettamente regolare, così come non è regolare il vano sotteso alla volta stessa.



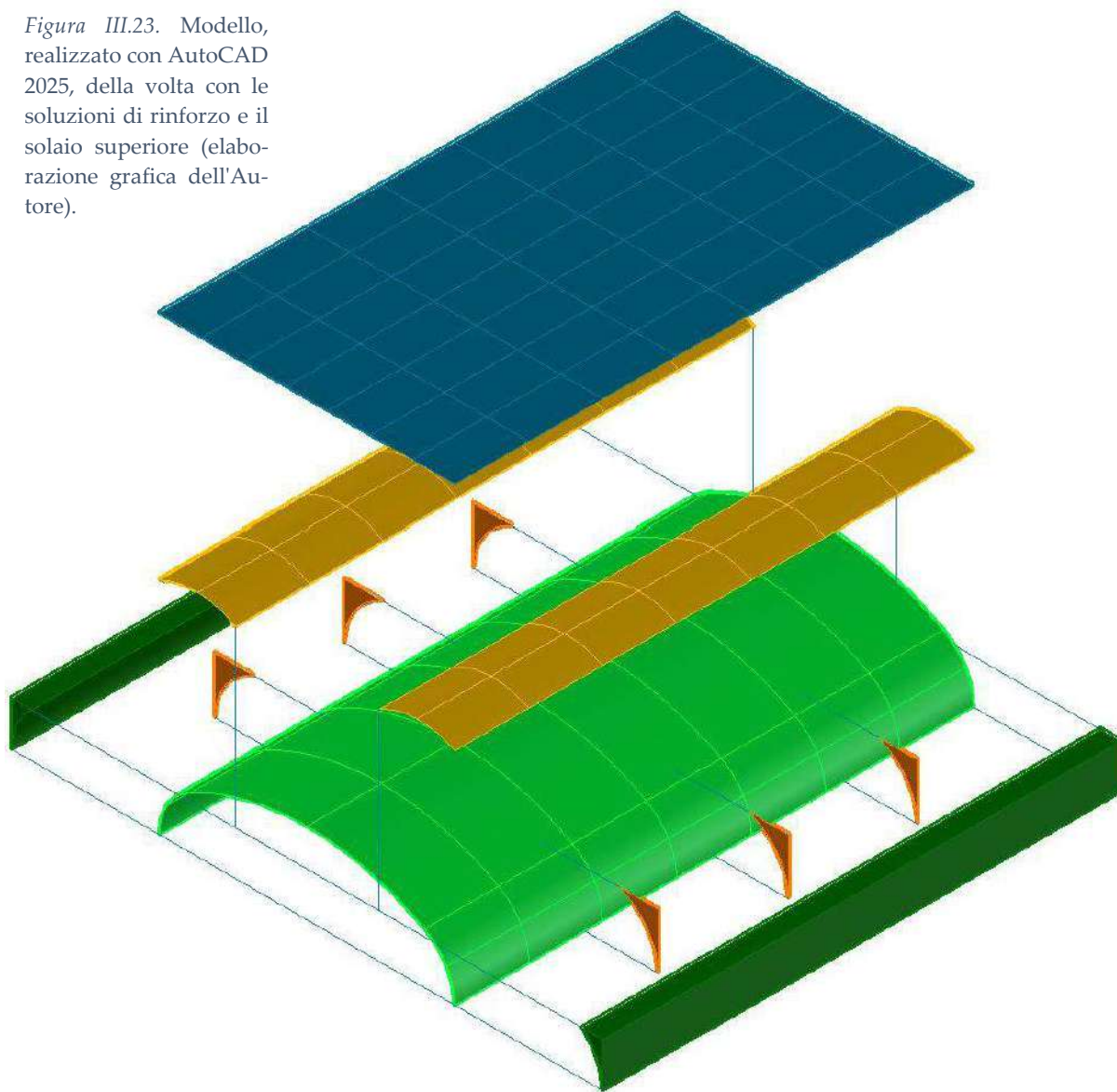
Per procedere con l'analisi strutturale, risulta necessario semplificare il profilo della volta in modo da renderlo omogeneo lungo tutta la sua superficie: ciò permette di ottenere dei risultati, derivati dal calcolo, privi dei possibili errori derivanti proprio da una superficie non perfettamente priva di irregolarità. A tal fine, si è

²² Tramite un distanziometro professionale, Disto X della Leica.

proceduto a riprodurre il profilo rilevato della *volta realina* con uno dei metodi geometrici di rappresentazione degli archi a sesto ribassato, riscontrando nell'arco a tre centri quello che meglio si approssima all'arco di partenza. Facendo poi traslare il profilo lungo la generatrice si è ottenuta la superficie della volta da analizzare.

Come si è avuto modo di chiarire, le *volte realine* sono completate all'estradosso con soluzioni di rinforzo che ne migliorano le caratteristiche di resistenza strutturale; alcune di queste soluzioni - *rinfianchi, frenelli, controvoltine* - sono state dunque necessariamente aggiunte al modello e analizzate, mentre le altre - *doppie controvoltine e nervature* -, dal momento che il loro apporto al rinforzo della volta è di gran lunga minore, sono state tralasciate. Completa il modello, realizzato con il *software* AutoCAD 2025, il solaio superiore, simulato con una superficie orizzontale, utile per la corretta distribuzione dei carichi gravanti sulla volta (Figura III.23).

Figura III.23. Modello, realizzato con AutoCAD 2025, della volta con le soluzioni di rinforzo e il solaio superiore (elaborazione grafica dell'Autore).



III.3.3 ANALISI STRUTTURALE

L'analisi strutturale della *volta realina* considerata come caso studio è stata condotta con il *software* di simulazione COMSOL Mul-

tiphysics® (versione 6.2). Il modulo utilizzato, tra i diversi presenti nel programma, è stato quello riguardante la Structural Mechanics; per modellare la volta, e così anche i *frenelli*, le *controvolte* e il *solaio superiore*, sono stati usati gli elementi *Shell*, mentre per i *rinfianchi* si sono utilizzati elementi tipo *Solid*.

I passaggi seguiti per lo studio della *volta realina* sono stati essenzialmente:

- importazione della geometria;
- attribuzione delle proprietà meccaniche;
- assegnazione dei *layer*;
- caratterizzazione degli elementi *Shell* e *Solid*;
- generazione della *mesh*;
- risultati.

III.3.4 IMPORTAZIONE DELLA GEOMETRIA

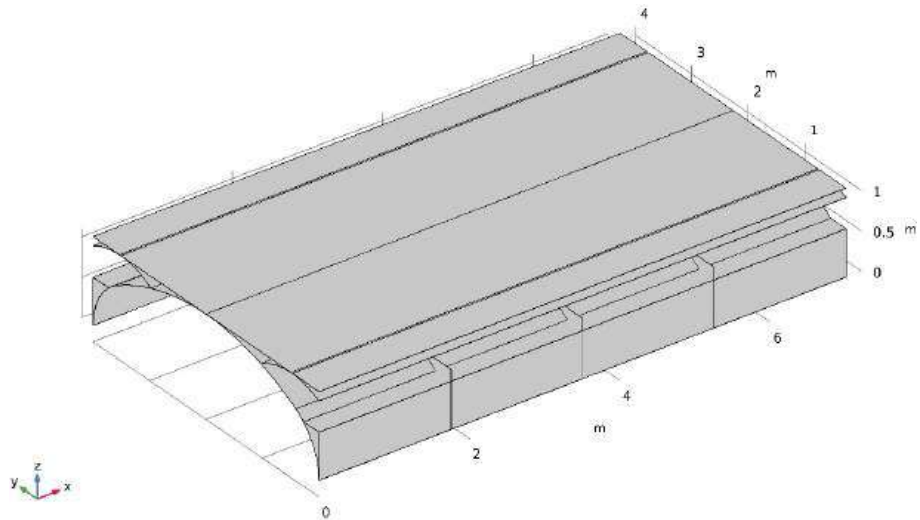
Le ragioni della realizzazione di una superficie, invece che di un volume, in grado di rappresentare la *volta realina* e gli elementi estradossali considerati risiedono nel fatto che l'uso di elementi *Shell* all'interno del programma di modellazione implica che le geometrie da analizzare siano proprio delle superfici senza spessore, che saranno caratterizzate all'interno del *software* stesso. Per i *rinfianchi*, non essendo possibile una loro schematizzazione in elementi bidimensionali, sono stati scelti elementi *Solid* da fare lavorare assieme agli altri *Shell*²³.

Da AutoCAD 2025 le superfici e i solidi dei *rinfianchi* sono stati importati su COMSOL. L'origine del sistema di riferimento è

²³ Il *software*, infatti, in virtù della sua natura di *Multiphysics*, offre la possibilità di simulare in una stessa struttura diverse interfacce fisiche - come sono proprio *Shell* e *Solid* -.

stata posta in corrispondenza della terminazione del piano di imposta della volta, mentre le quote sono espresse univocamente in m (Figura III.24).

Figura III.24. Modello della *volta realina* da analizzare, completa di soluzioni all'estradosso, importato su COMSOL Multiphysics.



III.3.5 ATTRIBUZIONE DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE

Concordemente con quanto descritto in precedenza, i materiali costituenti la volta e inseriti per lo studio sono il laterizio per i mattoni e il gesso per il legante.

I valori delle proprietà assegnate ai due materiali sono i seguenti (Tabella III.2):

Tabella III.2. Valori caratteristici di laterizio e gesso.

	Peso specifico [kg/m ³]	Modulo elastico [GPa]	Coeff. di Poisson [-]
Laterizio	2000	17	0,20
Gesso	650	4	0,15

La superficie della *volta realina*, composta per l'appunto da mattoni e pasta di gesso, è stata computata come un materiale lineare

elastico ortotropo (in cui, cioè, le proprietà meccaniche variano lungo le tre direzioni principali ortogonali), dal momento che è soggetta a piccole deformazioni.

In regime elastico lineare vale la legge di Hooke generalizzata:

$$\boldsymbol{\sigma} = [\mathbf{C}]\boldsymbol{\varepsilon}$$

In cui:

$\boldsymbol{\sigma}$ è il vettore delle tensioni;

$[\mathbf{C}]$ è la matrice di rigidezza elastica (6x6);

$\boldsymbol{\varepsilon}$ è il vettore delle deformazioni.

Un materiale ortotropo, come la muratura considerata per la volta, ha tre direzioni principali (x e y nel piano, e z ortogonale al piano), per cui i parametri elastici indipendenti da determinare sono il modulo elastico E, il modulo di rigidezza a taglio G e il coefficiente di Poisson ν . Nello specifico:

$E_x, E_y, E_z, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$.

La matrice $[\mathbf{C}]$ in forma simbolica (3D) è:

$$[\mathbf{C}] = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} 1 - \nu_{yz}\nu_{zy} & \nu_{yx} + \nu_{yz}\nu_{zx} & \nu_{zx} + \nu_{zy}\nu_{yx} & 0 & 0 & 0 \\ \nu_{xy} + \nu_{xz}\nu_{zy} & 1 - \nu_{xz}\nu_{zx} & \nu_{zy} + \nu_{zx}\nu_{xy} & 0 & 0 & 0 \\ \nu_{xz} + \nu_{xy}\nu_{yz} & \nu_{yz} + \nu_{yx}\nu_{xz} & 1 - \nu_{xy}\nu_{yx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1 - \nu_{xy}\nu_{yx}) \frac{E_y E_z}{E_y + E_z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1 - \nu_{xz}\nu_{zx}) \frac{E_x E_z}{E_x + E_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1 - \nu_{yz}\nu_{zy}) \frac{E_x E_y}{E_x + E_y} \end{bmatrix}$$

Δ è un fattore che assicura la simmetria termodinamica, cioè che il lavoro elastico sia conservativo, ed è espresso da:

$$\Delta = 1 - \nu_{xy}\nu_{yx} - \nu_{yz}\nu_{zy} - \nu_{zx}\nu_{xz} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{zx}$$

Gli spessori per ogni strato, dall'intradosso all'estradosso della volta, sono:

$$s_1 = 1.0, s_2 = 1.5, s_3 = 1.0, s_4 = 1.5, s_5 = 1.0, s_6 = 2.0$$

Per uno spessore totale $s_{tot} = 8.0$ cm.

Le frazioni di spessore si calcolano come $f_i = s_i/s_{tot}$:

$$s_1 = 0.125, s_2 = 0.1875, s_3 = 0.125, s_4 = 0.1875, s_5 = 0.125, s_6 = 0.25$$

Il modulo di Young per gli strati in parallelo, dunque per le direzioni x e y, è pari a:

$$E_x = E_y = \sum_i f_i E_i = 0.125 \cdot 17 + 0.1875 \cdot 4 + 0.125 \cdot 17 + 0.1875 \cdot 4 + 0.125 \cdot 17 + 0.25 \cdot 4 = 8.875 \text{ GPa}$$

Il modulo di Young per gli strati in serie, per la direzione z, è:

$$\frac{1}{E_z} = \sum f_i \frac{1}{E_i} = 3 \cdot \frac{0.125}{17} + 2 \cdot \frac{0.1875}{4} + \frac{0.25}{4} = 0.178309 \text{ GPa}^{-1}$$

$$\Rightarrow E_z = \frac{1}{0.178309} = 5.61 \text{ GPa}$$

I moduli di taglio per i due materiali costituenti, mattoni (m) e gesso (g), sono:

$$G_m = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{17}{2(1+0.20)} = \frac{17}{2.4} = 7.0833 \text{ GPa}$$

$$G_g = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{4}{2(1+0.15)} = \frac{4}{2.3} = 1.7391 \text{ GPa}$$

Per cui il modulo di taglio nel piano è:

$$G_{xy} = \sum f_i G_i = 3 \cdot (0.125 \cdot 7.0833) + 2 \cdot (0.1875 \cdot 1.7391) + 0.25 \cdot 1.7391 = 3.744 \text{ GPa}$$

Mentre i moduli di taglio ortogonali al piano sono uguali a:

$$\frac{1}{G_{xz}} = \frac{1}{G_{yz}} = \sum f_i \frac{1}{G_i} = 0.4123$$
$$\Rightarrow G_{xz} = G_{yz} = \frac{1}{0.4123} = 2.424 \text{ GPa}$$

Per la determinazione dei coefficienti di Poisson:

$$\nu_{ij}^{\text{eff}} = \sum f_i \nu_i = 0.16875 \approx 0.169$$
$$\Rightarrow \nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0.169$$

I valori reciproci, necessari per la simmetria, sono:

$$\nu_{ji} = \nu_{ij} \frac{E_j}{E_i}$$
$$\Rightarrow \nu_{yx} = \nu_{xy} \frac{E_y}{E_x} = 0.169 \text{ (qui } E_x = E_y \Rightarrow \nu_{yx} = \nu_{xy})$$
$$\Rightarrow \nu_{zx} = \nu_{xz} \frac{E_z}{E_x} = 0.169 \cdot \frac{5.61}{8.875} = 0.1068 \approx 0.107$$
$$\Rightarrow \nu_{zy} = \nu_{yz} \frac{E_z}{E_y} = 0.107$$

La densità della muratura è stata calcolata come:

$$\rho = \sum f_i \rho_i = 0.125 \cdot 2000 + 0.1875 \cdot 650 + 0.125 \cdot 2000 + 0.1875 \cdot 650 + 0.125 \cdot 2000 + 0.25 \cdot 650 = 1156 \text{ kg/m}^3$$

La matrice [C] così determinata è:

$$[C] = \begin{bmatrix} 9.380 & 1.786 & 1.192 & 0 & 0 & 0 \\ 1.786 & 9.380 & 1.293 & 0 & 0 & 0 \\ 1.192 & 1.293 & 5.861 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.424 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.424 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.744 \end{bmatrix} \text{ GPa}$$

Ricapitolando, i valori inseriti nel programma di simulazione sono:

$$s = 0.08 \text{ m}$$

$$E_x = E_y = 8.875 \text{ GPa}$$

$$E_z = 5.61 \text{ GPa}$$

$$G_{xy} = 3.744 \text{ GPa}$$

$$G_{xz} = G_{yz} = 2.424 \text{ GPa}$$

$$\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0.169$$

$$\rho = 1156 \text{ kg/m}^3$$

I valori restanti sono stati computati automaticamente.

Tra gli elementi presenti all'estradosso, le controvoltine, dal momento che sono costituite degli stessi materiali della volta principale, sono state considerate come ortotrope, mentre i frenelli e il solaio sovrastante²⁴ sono stati computati come isotropi. Anche i rin fianchi, modellati come *Solid*, sono stati considerati come isotropi. Le proprietà delle soluzioni estradosali sono riassunte nella tabella che segue (Tabella III.3).

²⁴ Si noti che il solaio ha il solo scopo di creare un piano su cui fare gravare il carico uniformemente distribuito, per cui le sue caratteristiche sono trascurabili rispetto allo scopo per cui è stato considerato.

	Mate- riale/i	Peso speci- fico [kg/m ³]	Modulo elastico [GPa]	Coeff. di Poisson [-]
Frenelli	Mattoni e calce	2000	2	0,25
Controvoltine	Mattoni sottili e gesso	1156	8,875 (E _x , E _y) 5,61 (E _z)	0,169
Rinfianchi	Materiale sciolto compat- tato	1500	25	0,20

Tabella III.3. Proprietà delle soluzioni all'estradosso.

III.3.6 ASSEGNAZIONE DEI LAYER

Alla caratterizzazione dei materiali fa seguito la loro collocazione all'interno del modello in via di definizione.

Per la volta, trattandosi di due materiali distinti, all'interno del *software* vanno inseriti come degli strati (*layer*) sovrapposti e alternati l'un l'altro (*layered material*): partendo dall'estradosso, a tre strati di mattoni si alternano tre strati di gesso inseriti con un preciso spessore (Figura III.25).

Layer	Material	Rotation (deg)	Thickness
Layer 1	Brick 1 (mat12)	0.0	0.01[m]
Layer 2	Gypsum paste 1 (mat13)	0.0	0.015[m]
Layer 3	Brick 1 (mat12)	90.0	0.01[m]
Layer 4	Gypsum paste 1 (mat13)	0.0	0.015[m]
Layer 5	Brick 1 (mat12)	0.0	0.01[m]
Layer 6	Gypsum paste 1 (mat13)	0.0	0.02[m]

Figura III.25. Layered material della volta realina.

Lo stesso ragionamento è stato fatto per le controvoltine, ma avendo queste uno spessore minore (5 cm) in quanto costituite

solo di due strati di mattoni, il *layered material* risultante è di conseguenza differente (Figura III.26).

Figura III.26. *Layered material* delle controvoltine.

Layer	Material	Rotation (deg)	Thickness
Layer 1	Brick 1.1.1 (mat22)	0.0	0.01[m]
Layer 2	Gypsum paste 1.1.1 (mat21)	0.0	0.015[m]
Layer 3	Brick 1.1.1 (mat22)	90.0	0.01[m]
Layer 4	Gypsum paste 1.1.1 (mat21)	0.0	0.015[m]

Un accorgimento riguarda la rotazione di 90° del secondo strato di mattoni: ciò in coerenza con quanto descritto precedentemente, dunque per favorire una migliore collaborazione alla resistenza strutturale.

III.3.7 CARATTERIZZAZIONE DEGLI ELEMENTI *SHELL* E *SOLID*

Oltre alle proprietà e ai valori assegnati di cui già si è detto, per la caratterizzazione degli elementi *Shell* e *Solid* altre azioni sono state necessarie.

Il sistema di riferimento coincide con quello importato da AutoCAD.

L'*offset*, cioè l'estrusione del guscio in base al suo spessore effettivo, avviene dalla superficie di partenza verso l'alto (in base alla posizione della superficie, *bottom surface on boundary*) (Figura III.27).

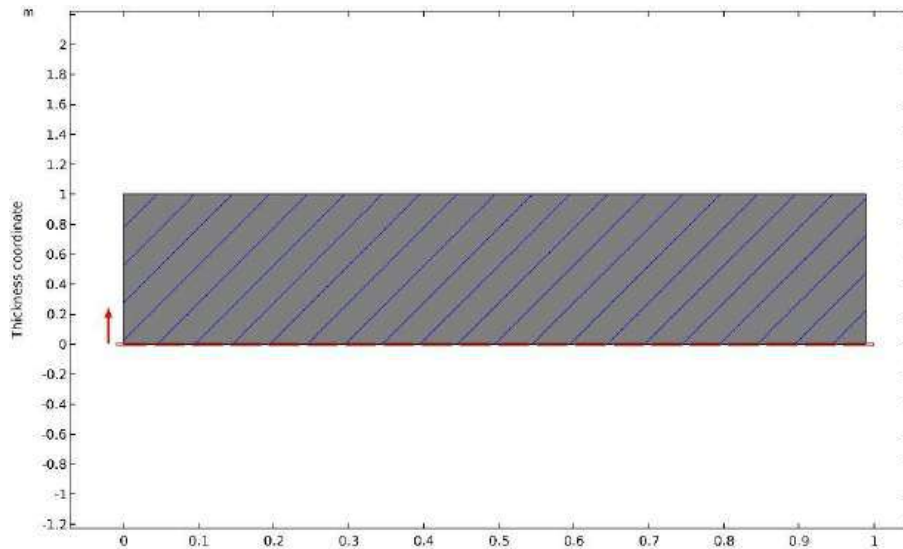


Figura III.27. Bottom surface on boundary.

I vincoli assegnati variano in ragione dei diversi elementi della *volta realina* considerati. Vincoli carrello (*simply supported*) sono stati inseriti alle imposte della volta principale così come tra frenelli e muri perimetrali, mentre il collegamento tra controvoltine e muri perimetrali avviene tramite incastro (*fixed constraint*). I muri perimetrali sono stati simulati applicando ai rinfianchi un *prescribed displacement*, cioè impedendone lo spostamento lungo la direzione y .

Vincoli appoggio (*no rotation*), che non permettono la rotazione, sono stati posti per il solaio superiore²⁵ di modo che questo non impedisca la completa applicazione dei carichi: oltre al peso pro-

²⁵ Il solaio ha dimensioni di 4x7 m e spessore di 10 cm. Il materiale scelto per caratterizzarlo è il calcestruzzo: tale scelta arbitraria serve a dimostrare come, anche a fronte di un carico eccessivo come può essere per l'appunto quello di un solaio in calcestruzzo, la volta realizzata con la tecnica in questione non presenta delle criticità.

prio (*gravity*), è stato applicato, secondo normativa (*Aggiornamento Delle «Norme Tecniche per Le Costruzioni», 2018*), un carico permanente uniformemente distribuito di 2 kN/m^2 .

III.3.8 GENERAZIONE DELLA MESH

La *mesh* della volta completa è stata generata in modo automatico su COMSOL (*physics-controlled mesh*). Gli elementi generati sono triangolari e la loro misura è stata regolata su “*extra fine*” (per comprendere meglio, la scelta può andare da “*extremely fine*”, seguita subito dopo dall’“*extra fine*” qui utilizzato, per arrivare fino a “*extremely coarse*”, in cui la *mesh* è composta da triangoli di grandi dimensioni che riducono la precisione rispetto alla volta di partenza) (Figura III.28).

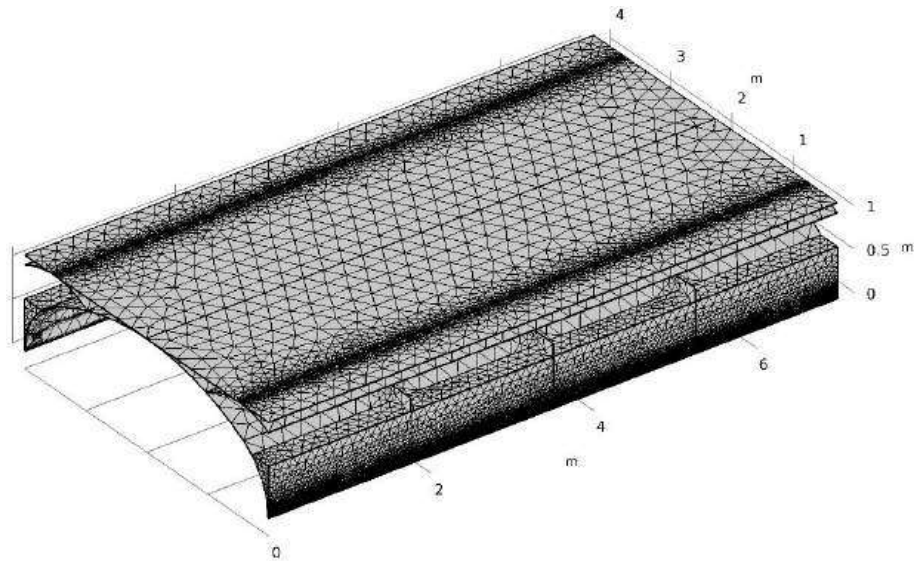


Figura III.28. Mesh della volta.

La qualità della *mesh* e la regolarità dei suoi elementi componenti si misura attraverso la “*skewness*”, o scostamento angolare, intesa come misura della distorsione di un elemento rispetto alla sua

forma ideale di triangolo equilatero. L'intervallo di valori è compreso tra 0, nel caso di celle con scarsa qualità (dunque distanti dalla forma ideale del triangolo equilatero), e 1, nel caso di celle di qualità ottima in forma di triangoli equilateri (Figura III.29).

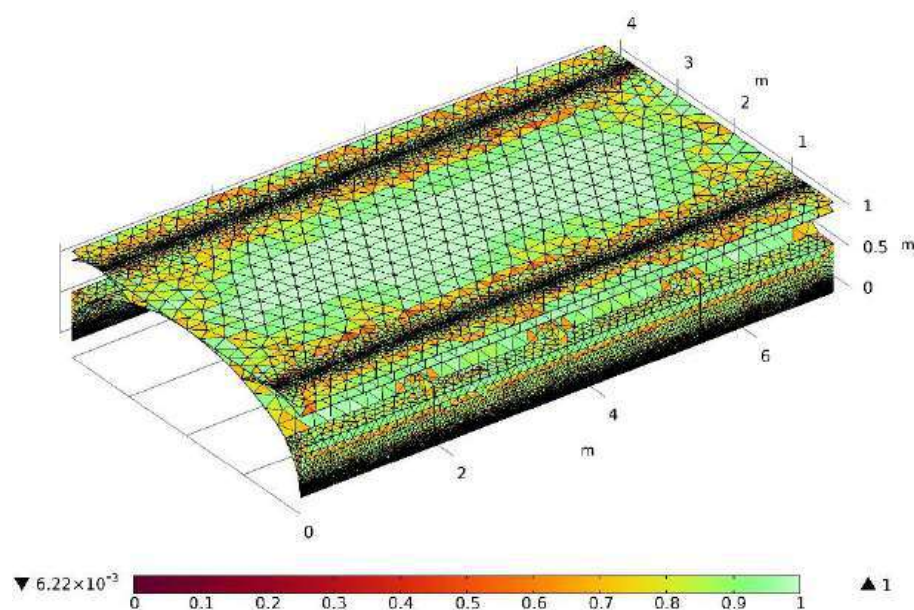
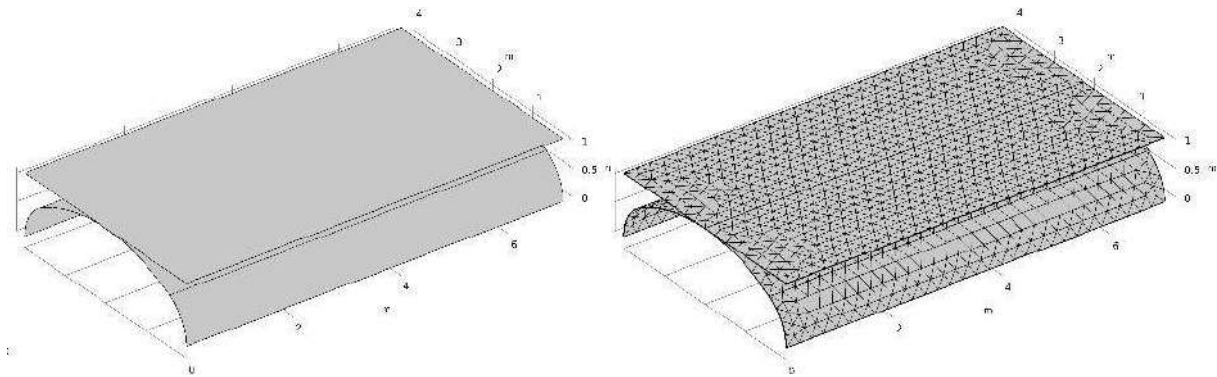


Figura III.29. Skewness della volta.

III.3.9 RISULTATI DELL'ANALISI

L'analisi condotta con il programma avanzato di simulazione ha restituito diversi risultati ritenuti di significativo interesse per la ricerca. Particolare attenzione viene riservata al confronto tra la *volta realina* semplice (Figura III.30), priva cioè di qualsiasi elemento di rinforzo, e la volta completa di frenelli, controvoltine e rinfianchi: da questo paragone si può infatti apprezzare come l'uso di queste soluzioni sia necessario per una migliore risposta alle sollecitazioni applicate.

Nella pagina seguente
Figura III.30. Volta realina semplice (a sinistra) e relativa mesh (a destra).



III.3.9.1 Deformazione

In seguito alla definizione delle caratteristiche della volta, all'assegnazione dei vincoli e all'applicazione dei carichi, l'esito dell'analisi di più immediata lettura (perché qualitativamente visibile) è quello della deformazione. Il risultato "*deformation*" si riferisce alla deformazione spaziale della geometria del guscio sotto carico, mostra cioè quanto e in che modo si è spostata la struttura - spostamenti u , v e w lungo le direzioni x , y e z - rispetto alla configurazione iniziale.

Deformation non è una quantità fisica in sé, ma una delle opzioni di *post-processing* grafico, utile, in generale, per l'individuazione di flessioni, torsioni o deformazioni localizzate.

Nel caso della volta senza rinforzi estradossali, a questa viene sovrapposto soltanto il solaio in calcestruzzo, di modo che i carichi agenti risultano essere: la forza di gravità, il peso del solaio e il carico uniformemente distribuito applicato al disopra del solaio.

Come si vede dalla figura (Figura III.31), la zona più sollecitata del solaio, e di conseguenza della volta sottostante, è quella centrale in cui si raggiunge una sollecitazione di 1 MPa; altre aree maggiormente interessate sono quelle in corrispondenza delle

reni ²⁶: in questo caso all'estradosso gli sforzi di trazione raggiungono i 0,5-0,6 MPa, mentre all'intradosso gli sforzi di compressione arrivano a 1 MPa.

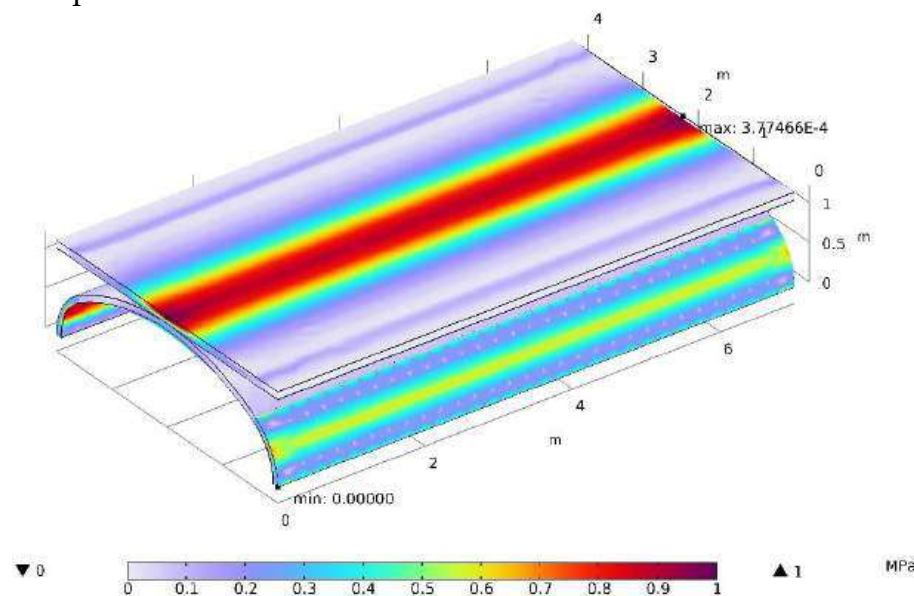


Figura III.31. Deformazione della volta semplice.

In seguito all'addizione delle soluzioni all'estradosso, le deformazioni della volta nel suo complesso appaiono molto differenti (Figura III.32): essa appare pressoché scarica, essendo le forze per unità di superficie comprese tra 0 e 0,5 MPa con i *rinfianchi* che

²⁶ Dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si denota un repentino cambiamento cromatico nella zona delle reni: ciò è dovuto alla costruzione geometrica della volta che, una volta importata in COMSOL, ha dato luogo a questa contingenza. Si precisa comunque che ciò non influenza i risultati del calcolo, come si vedrà anche nel caso degli spostamenti.

non superano i 0,1 MPa²⁷, e picchi isolati di 3,5 MPa si hanno soltanto in corrispondenza dell'apice della volta stessa.

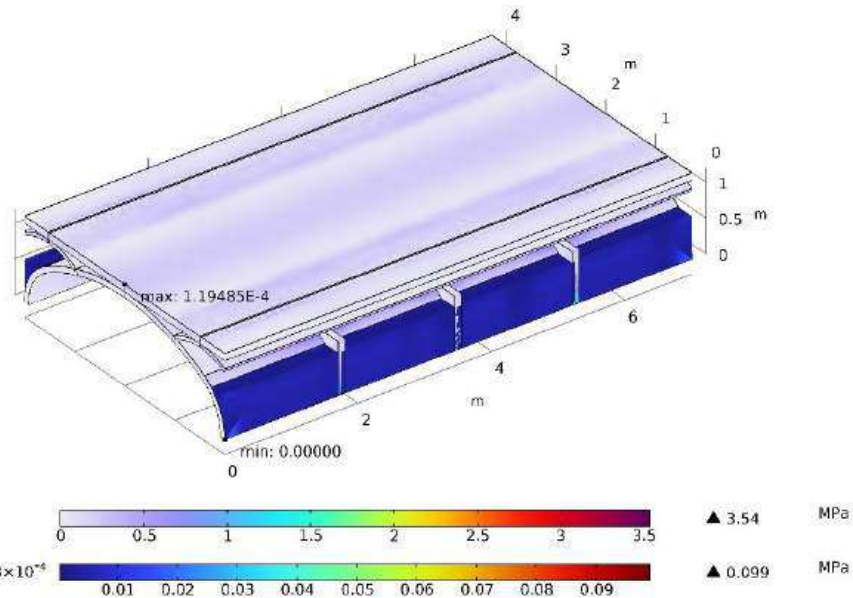


Figura III.32. Deformazione della volta completa.

III.3.9.2 Spostamenti

Strettamente connessi alla deformazione, o meglio alla configurazione deformata del guscio, sono gli spostamenti che ogni suo punto subisce per via delle condizioni di carico applicate.

In luogo della struttura deformata, gli spostamenti sono resi evidenti attraverso uno spettro di colori applicato alla superficie nella sua configurazione originaria (non deformata), associando ad ogni diverso colore una differente quantità di spostamento.

Attraverso una scala di colori viene indicato il maggiore o minore spostamento di una determinata area della volta: in tal

²⁷ Come si vede dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, i rinfianchi hanno una scala cromatica differente rispetto al resto della volta. Ciò è dovuto al fatto che essi sono stati modellati come *Solid*, mentre tutto il resto della volta e di *controvoltine*, *frenelli* e solaio come *Shell*.

modo, la scala cromatica indica la deformazione dell'involucro a guscio sotto le condizioni di carico assegnate, potendo identificare al contempo i punti di flessione massima così come le zone critiche di deformazione.

Oltre allo spostamento della struttura, attraverso "max/min line" è possibile individuare i punti di massima e minima deformazione, determinando in essi i valori, espressi in m, di spostamento corrispondenti (*displacement magnitude*).

Quanto visto in precedenza per le deformazioni si ritrova, ovviamente, negli spostamenti: per la volta singola (Figura III.33) si nota infatti che gli spostamenti minimi (pressoché nulli) si hanno in corrispondenza dei vincoli che collegano la struttura ai muri perimetrali; spostamenti di media intensità (dell'ordine di $1,5 \cdot 10^{-4}$ m) si hanno nei fianchi mentre gli spostamenti massimi sono localizzati in chiave, dove infatti si ha il punto di massimo dello spostamento equivalente a $3,7 \cdot 10^{-4}$ m.

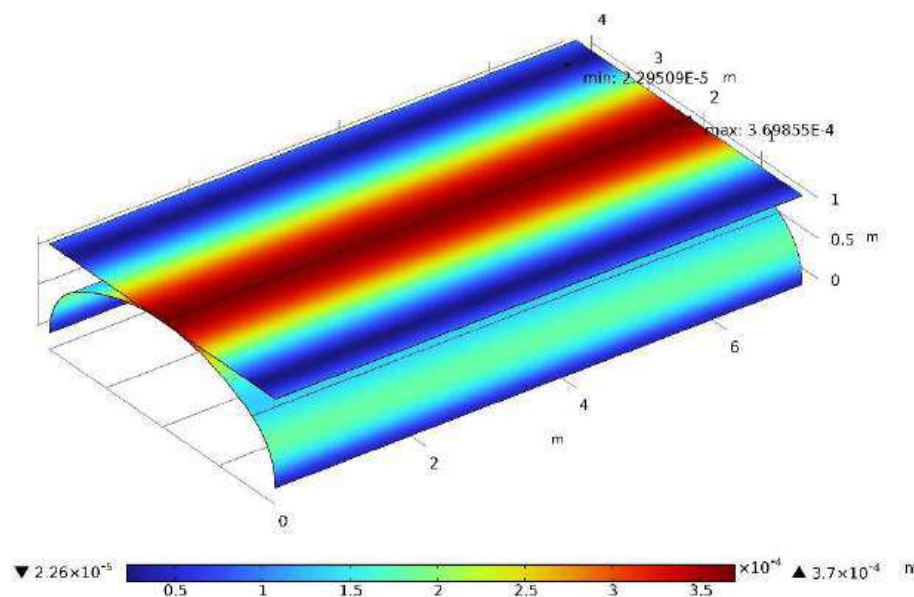


Figura III.33. Spostamenti della volta semplice.

Per ciò che riguarda la volta completa (Figura III.34), anche in questo caso gli spostamenti di minore entità si hanno in corrispondenza delle zone vincolate, mentre spostamenti di $7\text{-}8\cdot 10^{-5}$ m si hanno nell'area centrale e gli spostamenti maggiori ($1,2\cdot 10^{-4}$ m) sono posizionati ai due lati della volta che non sono stati vincolati. Da notare è inoltre la risposta dei rinfianchi alle sollecitazioni applicate, dal momento che in essi gli spostamenti sono dell'ordine di circa $8\cdot 10^{-8}$ m, praticamente nulli.

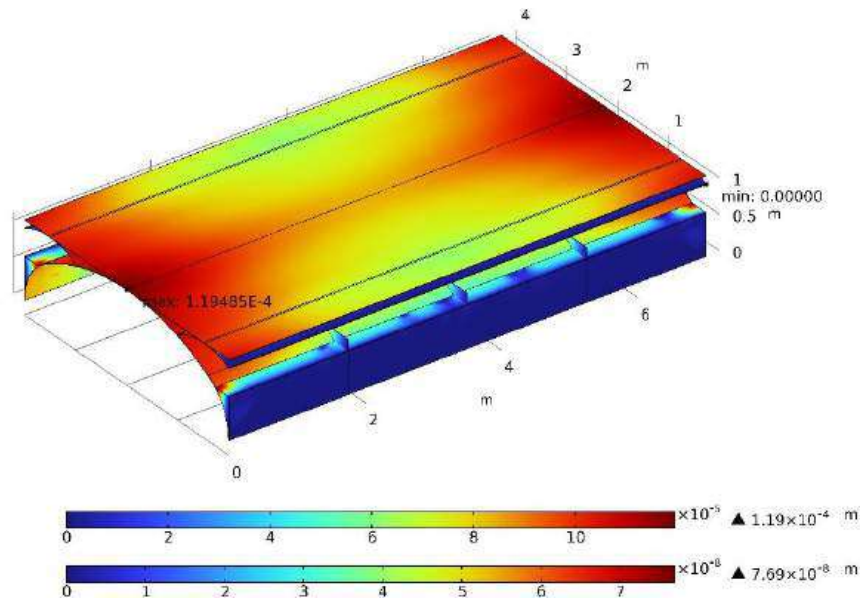


Figura III.34. Spostamenti della volta completa.

Dai due risultati esposti, deformazioni e spostamenti, oltre al comportamento della *volta realina* ciò che emerge maggiormente è l'entità della risposta che la volta, in entrambe le situazioni considerate, oppone ai carichi applicati. Se si pensa che, a fronte di carichi applicati non indifferenti, il massimo valore di spostamento riscontrato è dell'ordine dei 10^{-4} m - dunque dei decimi di

mm - si può iniziare a comprendere il motivo dell'enfasi posta su questa particolare tecnica costruttiva²⁸.

III.3.9.3 Tensioni principali sulla superficie

Il risultato "*principal stress surface*" fa riferimento alle tensioni principali calcolate sulla superficie media del guscio e proiettate nel piano ad essa tangente.

Nella rappresentazione grafica vengono indicati, attraverso delle frecce con lunghezza logaritmica, i versi e le direzioni lungo cui agiscono le tensioni principali (cioè i valori massimi e minimi di tensione normale in un punto):

σ_1 = tensione principale massima (freccia rossa)

σ_2 = tensione principale intermedia (freccia blu)

σ_3 = tensione principale minima (freccia verde)

Ognuna delle tensioni principali ha una direzione nello spazio, chiamata "autovettore", definita da tre componenti lungo x, y e z, per un totale di nove componenti direzionali:

$\sigma_{1x}, \sigma_{1y}, \sigma_{1z} \rightarrow$ direzione di σ_1

$\sigma_{2x}, \sigma_{2y}, \sigma_{2z} \rightarrow$ direzione di σ_2

$\sigma_{3x}, \sigma_{3y}, \sigma_{3z} \rightarrow$ direzione di σ_3

²⁸ Ancora una volta si deve sottolineare che le dimensioni della volta considerate in certi casi non sono paragonabili a quelle di gusci progettati e realizzati con tecniche differenti. Resta comunque indubbia la capacità di resistenza strutturale e gli altri giovamenti che le volte realine sono in grado di offrire.

I vettori così definiti indicano in quale direzione agisce ciascuna delle tre tensioni principali in ogni punto del guscio²⁹. Attraverso questi è possibile analizzare l'orientamento delle tensioni nei punti critici, calcolare le proiezioni delle tensioni lungo direzioni specifiche, nonché effettuare delle verifiche di resistenza su materiali anisotropi o laminati.

In definitiva, il calcolo della *principal stress surface*, oltre ad indicare dove il guscio è più sollecitato in termini di compressione o di trazione, può essere utilizzato anche per la verifica strutturale dello stesso, l'analisi di instabilità o collasso (dunque per la diagnostica strutturale) o ancora per la visualizzazione di campi di tensione semplificati.

Il risultato restituito per il caso della volta semplice (Figura III.35) mostra che la zona maggiormente sollecitata è quella compresa, in ognuno dei due lati, tra i piani di imposta e i piani alle reni, concentrandosi in esse le più consistenti azioni di compressione (indicate con le frecce blu). Sollecitazioni di compressione importanti si riscontrano anche in chiave, mentre i fianchi tra reni e chiave sono interessati prevalentemente da sollecitazioni di trazione (indicate con le frecce rosse).

²⁹ Come riportato nel manuale: «...for a 3D stress state, the principal stresses are the eigenvalues of the stress tensor. Each has an associated eigenvector, giving the principal direction. These vectors are orthogonal and define a coordinate system aligned with the principal axes...» (*Structural Mechanics Module User's Guide*, Shell Theory and Stress Analysis Sections COMSOL Documentation).

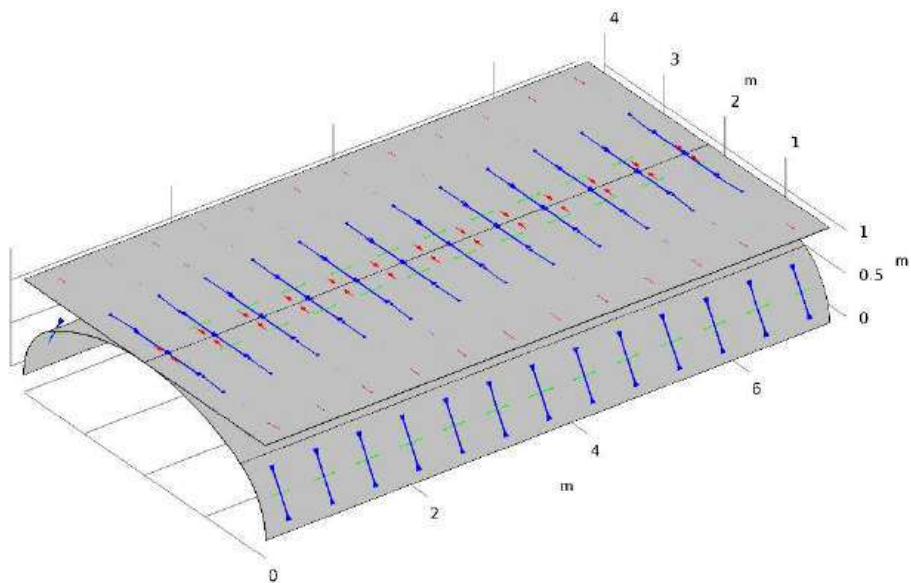


Figura III.35. Tensioni principali della volta semplice.

La volta completa di soluzioni estradossali (Figura III.36) è interessata esclusivamente da sollecitazioni di compressione: in questo caso le zone maggiormente compresse sono quelle comprese tra i piani di imposta e le reni, mentre il resto della volta è pressoché scarico. Le uniche azioni di trazione sono quelle esercitate sui rinfianchi.

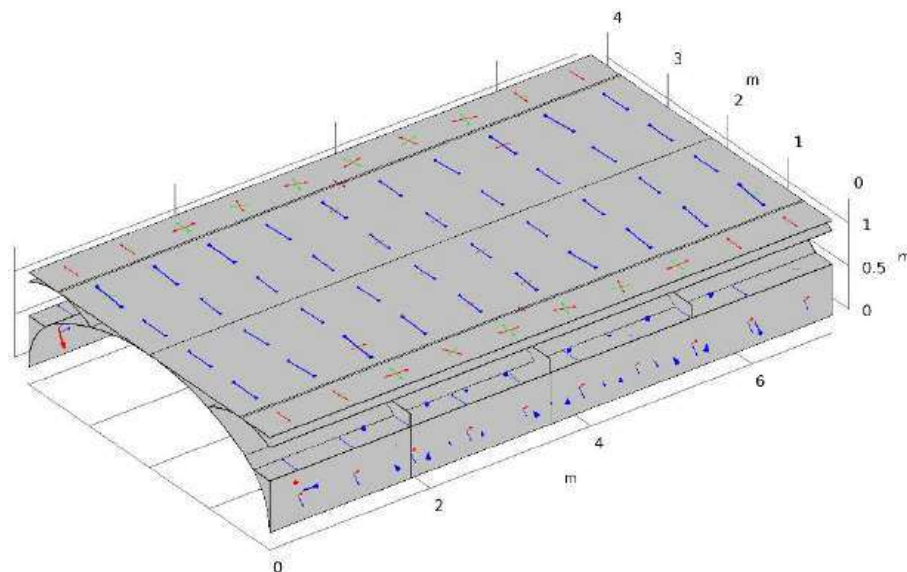


Figura III.36. Tensioni principali della volta composta.

Anche in questo caso, la comparazione tra le due situazioni permette di confermare numericamente ciò che era già stato anticipato in precedenza: l'importanza delle soluzioni applicate all'estradosso nel rendere l'orizzontamento voltato un elemento soggetto unicamente a sollecitazioni di compressione, dunque una struttura coesiva come lo sono anche altri tipi di gusci sottili.

III.3.9.4 Tensioni sulle superfici inferiore e superiore

Gli stati di tensione principali nelle superfici superiore e inferiore del guscio vengono determinati attraverso le cosiddette "stress variables at top surface" e "stress variables at bottom surface". La *top surface* indica la superficie positiva rispetto alla normale del guscio (dipendentemente dalla direzione del proprio sistema locale), mentre con *bottom surface* si intende la superficie negativa rispetto alla normale.

La determinazione del comportamento strutturale del guscio su queste due superfici è utile per controllare le sollecitazioni di trazione o compressione presenti in esso³⁰.

Le tensioni agenti sulla volta semplice sono concentrate alle reni - nel caso della superficie inferiore (Figura III.37) e con un valore massimo di circa 0,7 MPa - e in chiave - nel caso della superficie superiore (Figura III.38), dove viene raggiunto un massimo di circa 0,5 MPa -. Le restanti zone della volta risultano invece scariche.

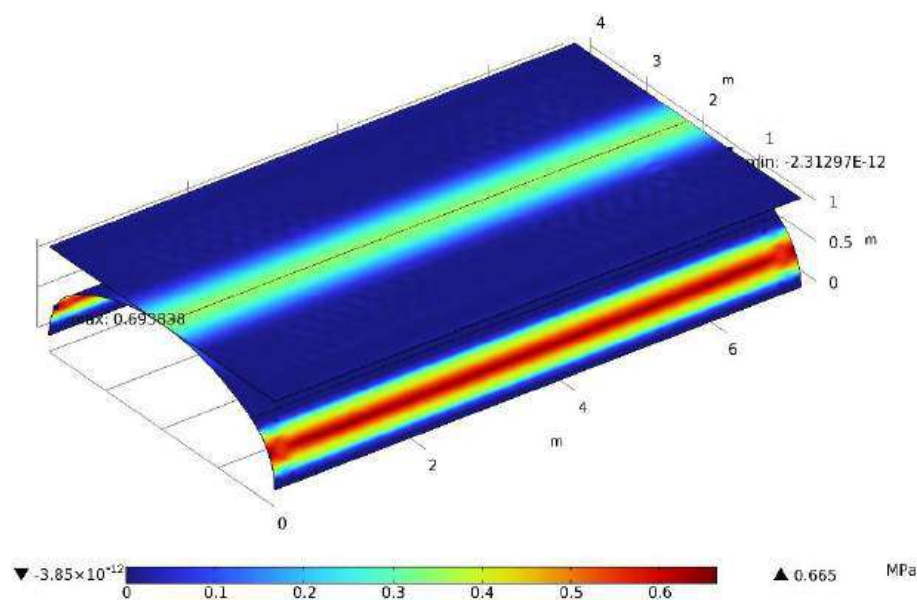


Figura III.37. Tensioni sulla superficie inferiore della volta semplice.

³⁰ Anche in questo caso, il comando "max/min line" permette di rintracciare i valori massimo e minimo di tensione, nonché la loro collocazione esatta nella superficie, superiore o inferiore, del guscio.

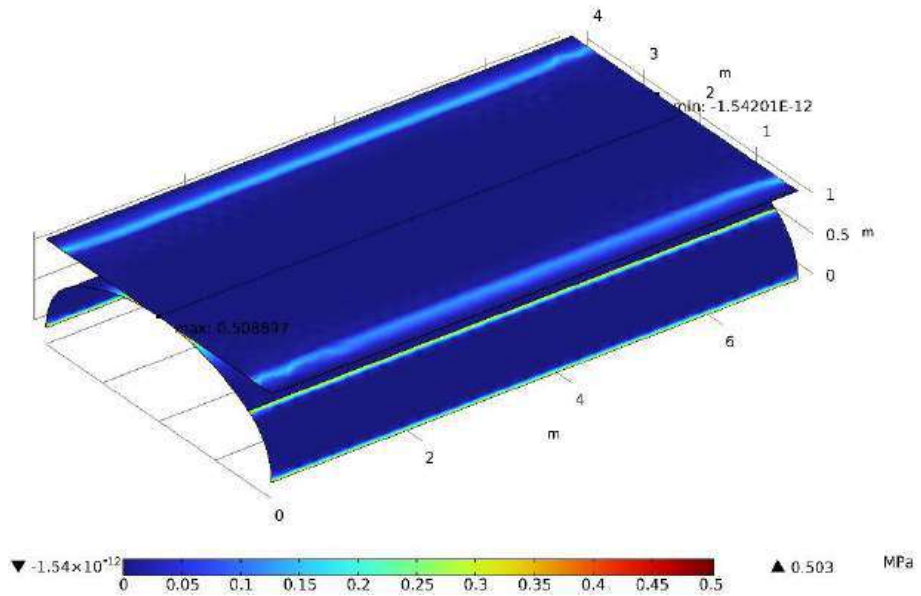


Figura III.38. Tensioni sulla superficie superiore della volta semplice.

In questo caso il confronto con la volta completa risulta superfluo, dal momento che in quest'ultima sia l'intradosso (Figura III.39) che l'estradosso (Figura III.40) sono soggetti uniformemente a sollecitazioni comprese tra 0 e 0,2 MPa. Picchi di valori di tensione - trascurabili se messi in rapporto all'intera struttura - si raggiungono puntualmente in prossimità dei frenelli, dove si perviene ad un valore di 2,03 MPa.

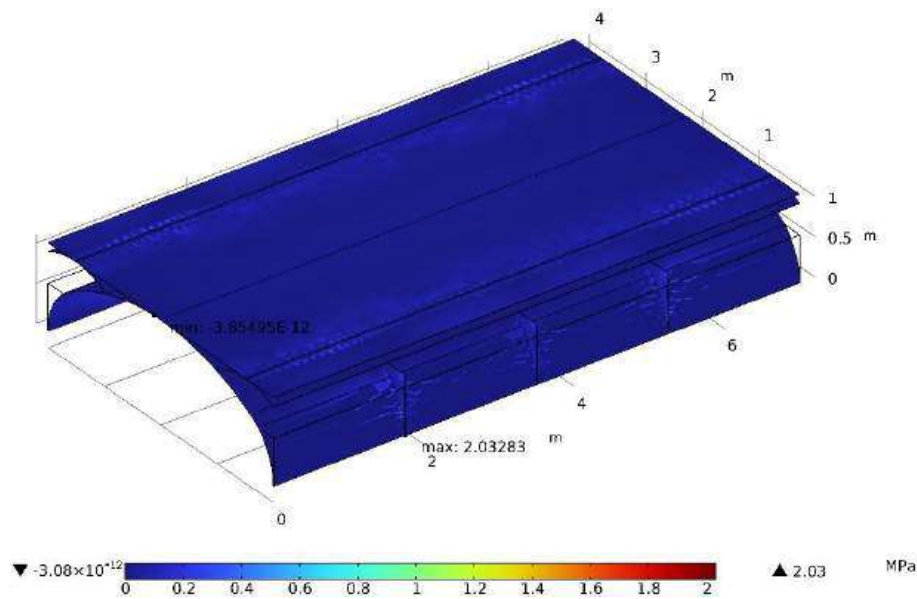


Figura III.39. Tensioni sulla superficie inferiore della volta completa.

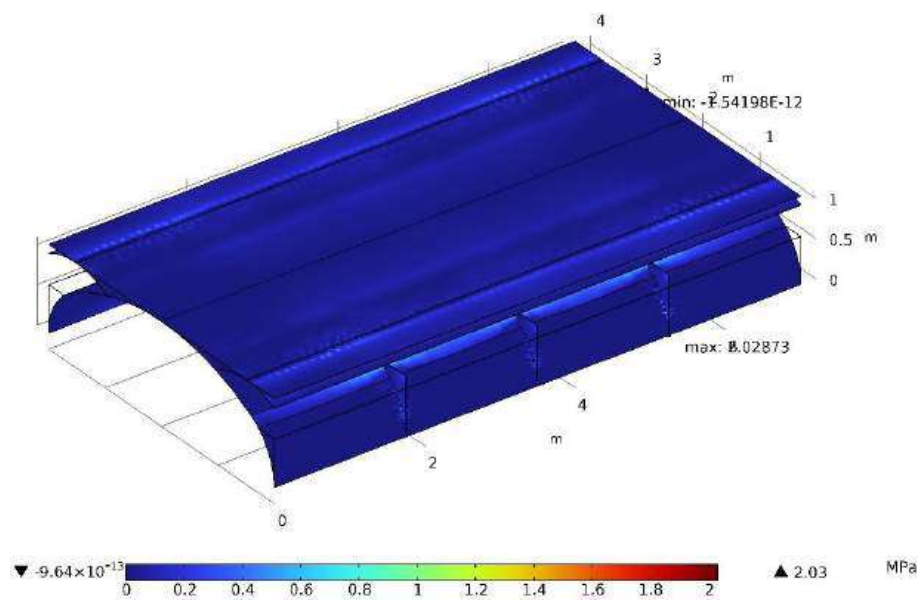


Figura III.40. Tensioni sulla superficie superiore della volta completa.

III.4 OSSERVAZIONI SULLE VOLTE REALINE

Alla luce di quanto esposto sulle *volte realine* e sulla tecnica utilizzata per la loro realizzazione, nonché di quanto emerso dall'analisi effettuata, alcune considerazioni sono ricavabili a conferma delle potenzialità insite negli elementi voltati realizzati secondo questa tecnica: in generale, ciò che risalta è la perfetta corrispondenza dei risultati dell'analisi rispetto a quanto è stato teorizzato.

Il comportamento monolitico, lo stesso che Guastavino attribuisce alle costruzioni coesive (Gulli, 2006), è reso manifesto già nella volta priva di rinforzi superiori. La resistenza manifestata dalla *volta realina*, unitamente ai valori di deformazioni e spostamenti assolutamente trascurabili, sono distintivi proprio di tale tipologia di costruzioni e la perfetta aderenza (che porta alla indistinguibilità) dei materiali costituenti rende possibili questi risultati.

Altro aspetto fondamentale è l'utilità degli elementi posti all'estradosso (*rinfianchi pesanti, controvoltine e frenelli*). Il loro inserimento all'interno del modello strutturale, proprio come indicato nella letteratura di riferimento, oltre a ridurre di $2/3$ l'entità dello spostamento massimo della volta sottoposta a carichi³¹, garantisce alla volta di essere sottoposta unicamente a sollecitazioni di compressione, condizione, anche questa, indispensabile per classificare le *volte realine* come gusci sottili.

Se a queste considerazioni si aggiunge anche il fatto che la tecnica *realina* preveda l'uso di materiali "poveri", l'utilizzo di centine ridotte e di casseforme (quando presenti) discontinue, tempi di

³¹ L'inserimento degli elementi di rinforzo, infatti, fa sì che lo spostamento massimo, da $3,7 \cdot 10^{-4}$ m, si riduca a $1,2 \cdot 10^{-4}$ m.

posa relativamente brevi e conseguentemente un'economia generale dei costi di messa in opera, si capisce bene come una riscoperta della tecnica - con opportune modificazioni e miglioramenti legati ad un uso più attuale - non sia da sottovalutare e da escludere.

III.5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». (2018). 42.

Bares, M. M., & Nobile, M. R. (2011). Volte tabicadas nelle grandi isole del Mediterraneo: Sicilia e Sardegna (XV-XVIII secolo). In A. Zaragozà, R. Soler, & R. Marin (Eds.), *Simposio Internacional sobre bóvedas tabicadas*. (pp. 119–131). Universitat Politècnica de Valencia.

Binda Mayer L., & Baronio G. (1986). Indagine sull'aderenza tra legante e laterizio in malte ed intonaci di "cocciopesto", in *Intonaci colore e coloriture nell'edilizia storica. Atti Del Convegno Di Studi, Roma 1984*.

Blondel, J.-F. (1771). *Cours d'architecture, ou Traité de la décoration, distribution et construction des bâtiments* (Vol. 6). Desaint Libraire.

Breymann, G. A. (1926). *Trattato generale di costruzioni civili con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose: Vol. Volume primo*.

Di Bartolomeo, G. M. (2007). *Storia di Partinico, Manoscritto inedito del 1805* (trascrizione e commenti di G. Schirò e G. Nania, Ed.). Regione Siciliana, Assessorato BBCCAA e Pubblica Istruzione.

Di Maggio, S., Fatta, G. (relatore), Vinci, C. (relatore), & Cucchiara, C. (correlatore). (2020). *Delle volte realine a Partinico* [Tesi di Laurea Magistrale]. Università degli Studi di Palermo.

Dolce, C. (1823). *Sul tremuoto avvenuto in Palermo il giorno 5. Marzo 1823. Riflessioni di ****. dalla Tipografia del fu Francesco Abbate Q.mDom.

Fatta, G., Campisi, T., Castri, M. L., & Vinci, C. (2007). LE VOLTE SOTTILI IN MATTONI IN FOGLIO IN AREA PALERMITANA. *International Conference and Exhibition Costruire in "Pietra" Fra Innovazione e Tradizione - CITTAM*, 545–553.

Fatta, G., Campisi, T., & Vinci, C. (2007). VOLTE "REALINE" E SOLAI IN GESSO NELLA TRADIZIONE SICILIANA. *Costruire in "Pietra" Fra Innovazione e Tradizione, International Conference and Exhibition-CITTAM*.

Fatta, G., Campisi, T., & Vinci, C. (2016a). INTERVENTI SU VOLTE SOTTILI DI MATTONI IN FOGLIO IN SICILIA. In A. Guida & A. Pagliuca (Eds.), *Colloqui.AT.e 2016 - MATER(1)A*. Gangemi Editore spa.

Fatta, G., Campisi, T., & Vinci, C. (2016b). Timbrel vaults in Sicily: analysis of a little-known construction technique. *Construction History*, 31(2), 107–132.

Fatta, G., Campisi, T., & Vinci, C. (2017). Timbrel vaults in Sicily. Constructive techniques and intervention methodologies. *TEMA: Technologies Engineering Materials Architecture*, 3(2), 24–36.

Gulli, R. (2006). *La costruzione Coesiva. L'opera dei Guastavino nell'America di fine Ottocento*. Marsilio Editori.

Heyman, J. (2021). *El arco de fabrica*. INSTITUTO JUAN DE HERRERA.

Huerta Fernández, S. (2006). La construcción tabicada y la teoría cohesiva de Rafael Guastavino. In S. Huerta Fernández (Ed.), *Escritos sobre la construcción cohesiva y su función en la arquitectura*. Instituto Juan de Herrera.

Imbornone, P., & Failla, A. (n.d.). *Le volte realine: caratteristiche costruttive e statiche*.

Lemma, M. (1996). *Dei tetti ammattonati. Nuova edizione critica del trattato scritto da Félix Francois d'Espie (1754)*. il Cardo Editore.

Mazzamuto, A. (2003). *Giovanni Biagio Amico: architetto e trattatista del Settecento*. Flaccovio (Salvatore Fausto).

Menicali, U. (1992). *Menicali, Umberto. "I materiali dell'edilizia storica: tecnologia e impiego dei materiali tradizionali"*.

Ministero di Agricoltura, I. e C. (1893). *Annali di Statistica. Statistica Industriale. Notizie sulle condizioni industriali della Provincia di Palermo*.

Nobile, M. R. (2020). NUOVI MAESTRI E NUOVI CANTIERI: L'ARCHITETTURA IN SICILIA NEL XV SECOLO. In G. D'Agostino, S. Fodale, M. Miglio, A. M. Oliva, D. Passerini, & F. Senatore (Eds.), *LA CORONA D'ARAGONA E L'ITALIA - Atti del XX Congresso di Storia della Corona d'Aragona* (pp. 1433–1444). Nella sede dell'Istituto Palazzo Borromini.

Vallone, F., Fatta, G. (relatore), Cucchiara, C. (correlatore), & Vinci, C. (correlatore). (2017). *Il casale Miccichè a Villalba. Analisi storico-costruttiva e progetto di recupero* [Tesi di Laurea Magistrale]. Università degli Studi di Palermo.

Vinci, C. (2009). TERREMOTI E PREGIUDIZI NELLA CULTURA COSTRUTTIVA DELLA SICILIA OCCIDENTALE DEL XIX SECOLO. In O. Fiandaca & R. Lione (Eds.), *IL SISMA -ricordare prevenire progettare* (pp. 187–196). Alinea editrice srl.

IV.
GUSCI MODELLATI
TRAMITE *HÄNGEFORM*

SINOSSI

Oltre ai metodi di progettazione dei gusci di cui si è già avuto modo fin qui di esporre e di cui si sono messe in evidenza le principali caratteristiche, i metodi introdotti nel secolo scorso dall'ingegnere svizzero Heinz Isler - *pneuforn*, *fließform*, *hängeform* - si distinguono per la loro ingegnosità dovuta, in primo luogo, all'apparente semplicità che li contraddistingue.

Derivanti tutti e tre dall'acume di Isler, questi metodi gli hanno permesso di progettare e in seguito costruire, tra gli anni Cinquanta del secolo scorso e i primi anni Duemila, ben oltre mille strutture a guscio, di cui molte ancora oggi esistenti.

In particolare, i gusci di Isler modellati secondo *hängeform* (letteralmente, *forma sospesa*) sono quelli ritenuti, per le ragioni che verranno in seguito date, i più interessanti: di questi, infatti, non soltanto verranno approfondite le caratteristiche costruttive, ma - al fine di appurarne le capacità di resistenza descritte nella letteratura di riferimento - verrà condotta una analisi strutturale a partire dalla loro modellazione basata sugli elaborati di progetto originali.

IV.1 IL METODO DELL'HÄNGEFORM

IV.1.1 I MODELLI FISICI DI ISLER

Heinz Isler (1926-2009) può essere considerato uno dei progettisti che con le sue intuizioni e realizzazioni, nel secolo scorso, ha prepotentemente influenzato le modalità di determinazione della forma, progettazione e messa in opera delle strutture a guscio sottile¹.

Dei circa 1400 gusci progettati da Isler (di cui molti ancora esistenti e in buone condizioni), la più larga parte sono stati realizzati in Svizzera, mentre altri sono invece localizzati nelle adiacenti Francia, Germania e Italia (Seifert & Wolff, 2010) (Beckh et al., 2022)² (Figura IV.1).

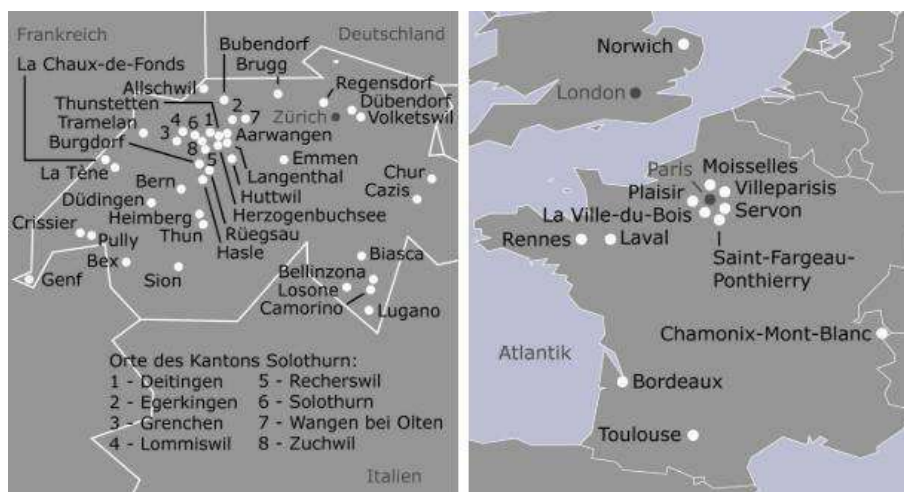


Figura IV.1. Localizzazione dei gusci di Heinz Isler in Svizzera (in alto a sinistra), in Francia e Inghilterra (in alto a destra), nella Germania meridionale (in basso a sinistra), in Austria e Arabia Saudita (in basso a destra) (Seifert & Wolff, 2010).

¹ L'influenza esercitata da Isler nella progettazione e costruzione di strutture a guscio sottile nel XX secolo è paragonabile, o in alcuni casi superiore, a quella di progettisti a lui coevi o antecedenti quali Guastavino Moreno, Dieste, Torroja o Candela, solo per citarne alcuni.

² Alcune strutture a guscio di Isler sono state realizzate anche nel Regno Unito, in Austria e in Arabia Saudita (Seifert & Wolff, 2010).

Figura IV.1. (continua)



Nel contributo presentato in occasione del primo convegno della neocostituita International Association for Shell Structures³, tenutosi a Madrid nel 1959, dall'evocativo titolo *New shapes for shells* (Chilton, 2009), Isler ha illustrato quelli che, negli anni a venire, sarebbero stati (con gli opportuni perfezionamenti e le necessarie modifiche) i metodi da lui utilizzati per la determinazione di gusci dalle forme "libere", ossia non definibili con i tradizionali canoni geometrici⁴. I tre metodi proposti erano (Billington, 2003a; Chilton, 2009):

³ L'organizzazione, che dopo qualche anno prenderà il nome di International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), fondata nel 1959 da Eduardo Torroja. Ancora oggi riunisce gli studiosi e gli appassionati al tema dei gusci sottili.

⁴ Data l'assoluta novità delle proposte di Isler, dopo la sua presentazione nel corso del convegno del 1959, non mancarono osservazioni e critiche da parte di personaggi di spicco quali Eduardo Torroja, il francese Nicholas Esquillan o il britannico Ove Arup. Le critiche vertevano soprattutto sul fatto che non vi fossero delle esperienze fatte precedentemente nell'uso di tali modelli, nonché sulla questione dei presunti costi di costruzione delle centine eccessivamente elevati rispetto al costo totale che avrebbe avuto il guscio (Billington, 2003b).

- *the freely shaped hill*, in cui, per esempio, la forma era data da un cumulo di terra opportunamente plasmata, sopra la quale veniva eseguito il getto per il guscio. Questo metodo è stato presto accantonato e sostituito dal *foam flow method (fließform)*, per il quale la forma era determinata dall'espansione che subiva la schiuma poliuretanicca una volta spruzzata in piccole casse di legno. Esempio di guscio determinato in tal modo è quello del Migros Supermarkt a Bellinzona (Figura IV.2);
- *the membrane under pressure (pneuforn)*, per cui a determinare la forma era una membrana in gomma piena di aria. Con questo metodo, da cui derivano le cosiddette *bubble shell*, è stata progettata la Coop Versandhalle a Wangen bei Olten (Figura IV.3);
- *the hanging cloth reversed (hängeform)*⁵, per cui un tessuto appeso per le sue estremità, imbibito di malta, fatto asciugare e ribaltato definisce la forma del guscio.



Figura IV.2. Migros Supermarkt a Bellinzona (Gozzi, 2024).

⁵ Di questo metodo si parlerà estesamente nel prossimo paragrafo.

Figura IV.3. Coop Versandhalle a Wangen bei Olten (<https://structurae.net/de/bauwerke/coop-verteilzentrum>).



La ferma convinzione di Isler sull'efficacia dei metodi da lui proposti è testimoniata dalla *figura 9* contenuta in *New shapes for shells*, denominata "Natural hills on different edge lines" (Figura IV.4): si tratta di 39 disegni (opera dello stesso Isler) raffiguranti altrettanti gusci dalle forme molto diverse l'uno dall'altro e ricavabili con i metodi prima descritti; a questi, in fondo all'ultima colonna, segue l'abbreviazione "etc.", che allude all'infinita potenzialità nella determinazione di nuove forme (Chilton, 2009).

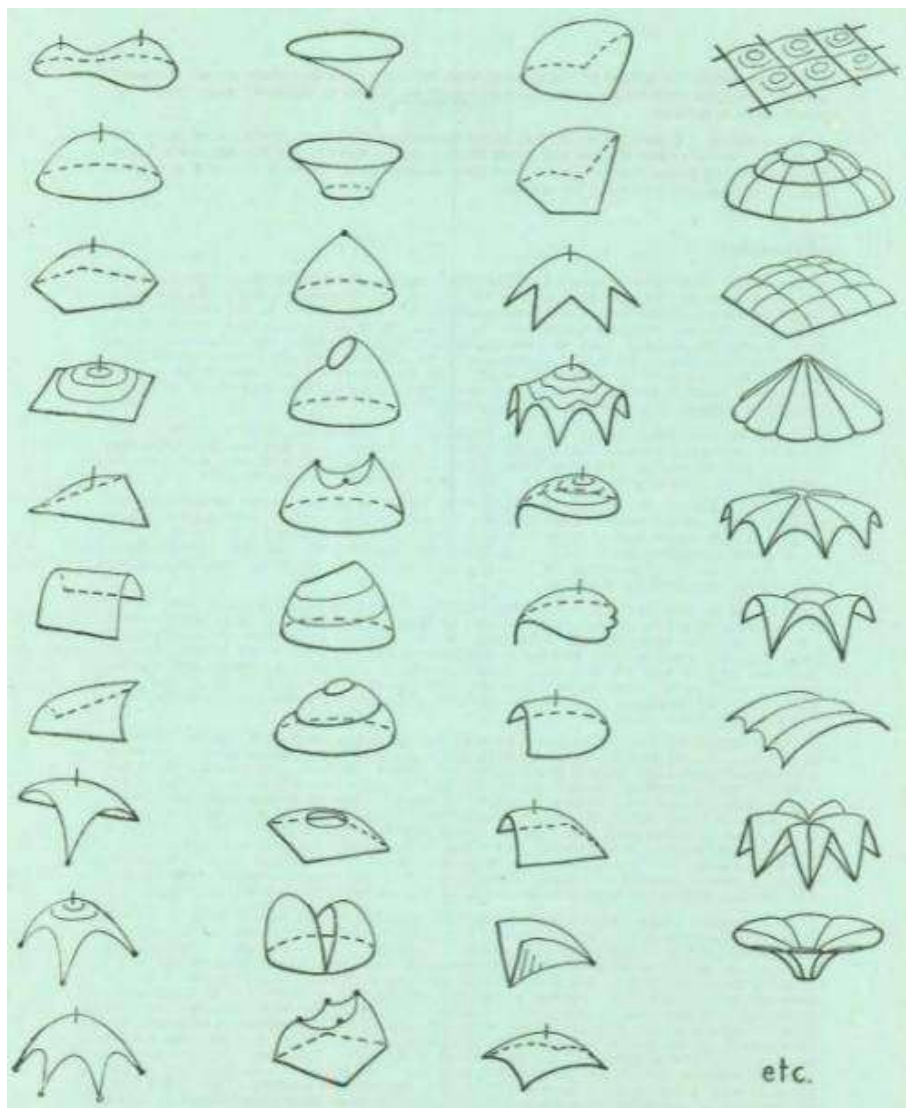


Figura IV.4. "Natural hills on different edge lines" di Heinz Isler (Chilton, 2009).

Oltre a questi metodi sperimentali, che hanno costituito i pilastri della produzione ultradecennale di Isler, lo stesso ingegnere si è avvalso anche del metodo più tradizionale di progettazione di gusci attraverso le forme geometriche o di traslazione (*geometri-*

sche form). Esempi ne sono i gusci a doppia curvatura del Gartencenter Wyss a Zuchwil (1960) (Figura IV.5) e della Heilig-Geist-Kirche a Lommiswil (1966-67).

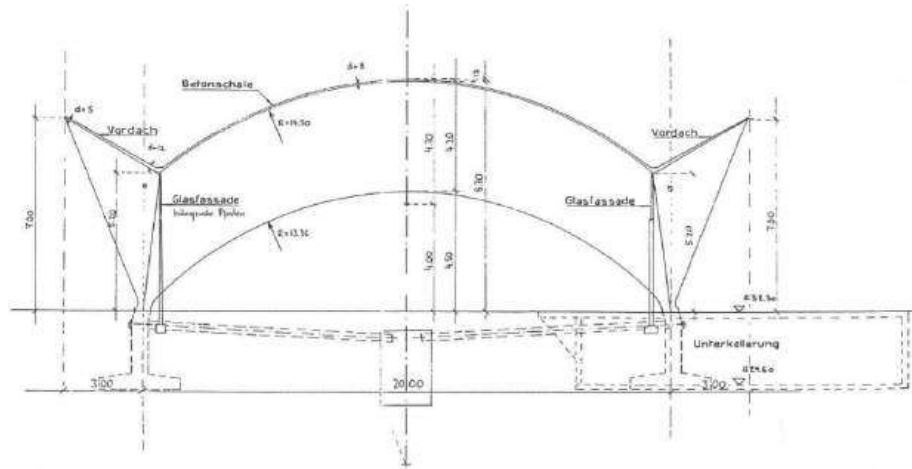


Figura IV.5. Disegno di progetto del guscio del Gartencenter Wyss a Zuchwil (Blank, 2008).

La soluzione a doppia curvatura - riscontrabile in tutti i modelli e i gusci realizzati da Isler - è quella che permette di sfruttare appieno le potenzialità del calcestruzzo armato a fronte dell'esiguo spessore assegnato alle strutture da mettere in opera. Oltre a ciò, concorrono alla resistenza ed efficiente prestazione delle opere di Isler anche l'assenza di *gap* lungo lo spessore, nella curvatura o lungo il contorno degli stessi: per raggiungere questo risultato, la superficie del guscio, le soluzioni di rinforzo e i supporti sono integrati in un'unica forma, senza soluzione di continuità (Billington, 1985).

IV.1.2 L'HÄNGEFORM

Il processo di determinazione della forma dei gusci tramite *hängeform* consiste, come suggerito dallo stesso nome, nell'appendere la membrana ad un telaio per un certo numero di punti (tre

o più): in tal modo, la forma che ne risulta è indicativa del percorso attraverso il quale vengono trasmessi i carichi. L'unica forza agente su un sistema così conformato è la forza peso della stessa membrana, la quale non può resistere a sollecitazioni di flessione o compressione, ma soltanto di trazione.

Impregnando il tessuto (con del gesso idrato o con poliestere fibro-rinforzato) è possibile ottenere un modello solidificato che, rimosso dal telaio su cui era stato in precedenza appeso e capovolgendolo, rappresenta in scala un guscio. La forma così risultante è ora ideale per la realizzazione di gusci in materiali resistenti prevalentemente a compressione, primo fra tutti il calcestruzzo armato (Figura IV.6).

Figura IV.6. Fasi di formazione del modello *hängeform* (Chilton & Isler, 2000).





Figura IV.6. (continua)

Allo stesso risultato Isler era arrivato immergendo dei tessuti in acqua e lasciandoli all'aperto sottoposti alle rigide temperature dell'inverno svizzero: dopo il congelamento, i tessuti capovolti restituivano dei modelli di gusci hängeform (Figura IV.7). Con questo metodo, sviluppato da Isler⁶ nel 1955, è possibile definire in modo naturale la forma strutturale dei gusci.

⁶ A tal proposito, racconta lo stesso Isler: «...One day on my shell I saw a piece of cloth hanging in the reinforcement and because the light was very low I saw the shadow and it was a shape, a beautiful perfect shape. That brought me to the idea that I need not a balloon to create the shape, ... a hanging membrane is doing automatically a very similar shape. And this can be square, can be rectangular, in the round, whatever you like-an automatic shape. I saw that and said we have another one, another way to find three-dimensional shapes, no more by inflation, by air pressure, but by gravitation...» (Chilton & Isler, 2000). Trad.: «...Un giorno, sul mio guscio, ho visto un pezzo di stoffa appeso al rinforzo e, poiché la luce era molto fioca, ho visto l'ombra e ho notato che era una forma, una forma bella e perfetta. Questo mi ha fatto pensare che non avevo bisogno di un palloncino per creare la forma, ... una membrana appesa crea automaticamente una forma molto simile. E questa può essere quadrata, rettangolare, rotonda, come preferisci: una forma automatica. Ho visto questo



Figura IV.7. Esempio di membrana, lasciata congelare all'aperto, sospesa e invertita (Chilton, 2012).

Il principio alla base del metodo dell'*hängeform* - il ricavare una forma resistente a compressione capovolgendo una forma appesa resistente a trazione - è essenzialmente uguale a quello usato per la determinazione della curva catenaria. Infatti:

«...the hanging cloth is for three-dimensional problems what the catenary line is for two-dimensional arches. They obey the same fundamental principle...»⁷ (Chilton, 2009)

e ho detto che avevamo trovato un altro modo per ottenere forme tridimensionali, non più tramite gonfiaggio, tramite pressione dell'aria, ma tramite gravità...».

⁷ Trad.: «...il telo sospeso è per i problemi tridimensionali ciò che la linea catenaria è per gli archi bidimensionali. Essi obbediscono allo stesso principio fondamentale...».

In tal senso, un confronto è possibile tra i modelli fisici di Isler - che lavorava per modelli continui (a partire dalle membrane) - e quelli dell'architetto catalano Antoni Gaudì (1852-1926) - che lavorava per modelli discreti (a partire dalle catenarie), come quello realizzato per la basilica della Sagrada Familia di Barcellona - (Figura IV.8).



Figura IV.8. Riproduzione del modello della Sagrada Família (<https://conicheearchitettura.weebly.com/gaudigrave-e-le-sue-opere.html>).

IV.1.3 CARATTERISTICHE DEI GUSCI *HÄNGEFORM*

Tra i metodi di Isler brevemente illustrati, quello dell'*hängeform* si distingue per diversi aspetti. In particolare, esso risulta il più efficace in quanto l'ispirazione alla natura e alle sue forme (il biomorfismo di cui si è detto nel Capitolo I) è insita nel metodo stesso che porta alla forma finale: è la natura, infatti, che dà immediatamente (con la forza di gravità) la forma alla membrana una volta appesa; nei metodi *pneuforn* e *fließform*, al contrario, tutto è definito sulla base di intuizioni fisiche: la pressione da dare ai modelli delle *bubble shell*, ad esempio, era decisa da Isler arbitrariamente e sulla base dell'esperienza accumulata nel corso

degli anni; ciò comportava, spesso, che l'ottimizzazione dei gusci così ottenuti non fosse del tutto efficace.

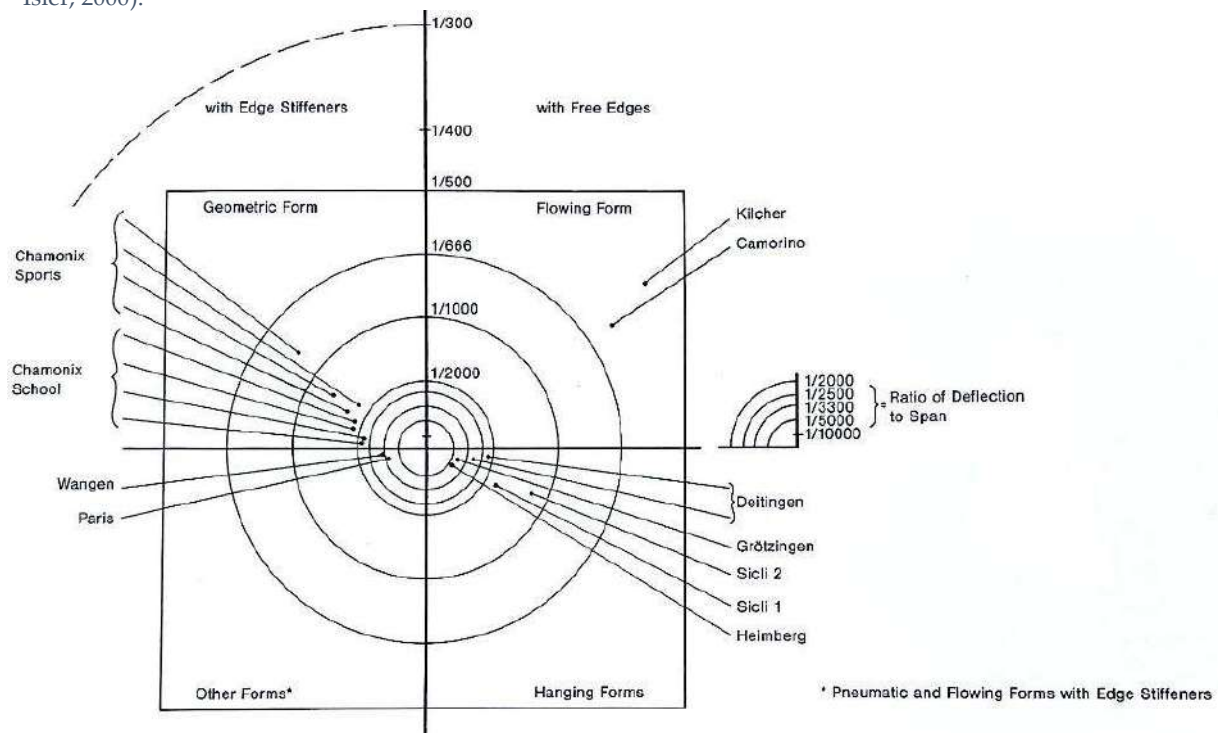
All'intuizione della forma ha fatto seguito la verifica della sua efficacia: in tal senso, l'indice utilizzato da Isler per valutare la rigidità, e dunque il grado di sicurezza, dei suoi gusci già in fase di scelta del modello fisico migliore è quello del rapporto tra la freccia⁸ massima e la lunghezza della campata (*ratio of maximum deflection⁹ to span length*). Questo rapporto, fissato ad un limite di 1/300 nelle normative svizzere e americane a cui Isler si è riferito (Billington, 2003a), nel caso dei gusci a forma libera di Isler si attesta ben al di sotto di questo limite, come si vede dal grafico a bersaglio (Figura IV.9). In dettaglio, analizzando il grafico (messo a punto dallo stesso Isler) si osserva come ad ogni quadrante corrispondano gusci costruiti secondo i metodi descritti e come il rapporto - sempre inferiore al limite di 1/300 - decresca in particolare per i gusci modellati secondo *hanging form*, arrivando fino a 1/4000 per il Naturtheater Grötzingen ad Aichtal (1977) e a 1/5000 per la Schwimmhalle di Heimberg (1978) (Billington, 2003a). Una eccezione è costituita dal Feuerlöscherfabrik Sicli a Ginevra (1967-70, oggi sede di mostre e spettacoli e, nel seminterrato, dell'archivio di architettura contemporanea della città (Beckh et al., 2022)): in questo caso il più alto rapporto (tra 1/400 e 1/800) è dovuto ad un errore causato

⁸ Si intende con *freccia* del guscio la massima deviazione verticale (sotto carichi applicati o sotto la forza di gravità) rispetto alla forma iniziale non deformata della superficie del guscio, ovvero, in generale, «...il valore dello spostamento ortogonale all'asse dell'elemento...» (*Aggiornamento Delle «Norme Tecniche per Le Costruzioni»*, 2018).

⁹ Nel caso dei gusci, la *freccia*, spostamento verticale in direzione della gravità, può farsi equivalere alla *deflessione*, spostamento in qualunque direzione.

dall'inesattezza del modello di determinazione della forma (Billington, 2003a); ciò a testimonianza di come l'accuratezza dei modelli iniziali sia fondamentale per il raggiungimento di un risultato ottimale.

Figura IV.9. Misura della deflessione per diversi gusci di Isler (Chilton & Isler, 2000).



IV.2 IL PROCESSO DI FORM FINDING

Quello dell'individuazione e realizzazione del modello fisico a partire dai metodi precedentemente visti è soltanto il primo passo per giungere alla definizione e costruzione del guscio completo. Come afferma lo stesso Isler:

«...Of course, this is only the first step to finding the form. Afterwards one has to do the exact structural analysis, the modelling investigation, the layout of reinforcement and prestressing elements, and the support

details. Also, the designer needs to think out the construction problems and finally to observe carefully the structure while it is in use...»¹⁰ (Billington, 2003a)

Le diverse fasi, tra loro conseguenti e strettamente interconnesse, sono state da Isler sviluppate seguendo delle procedure ben precise che non hanno portato soltanto alla realizzazione dei diversi gusci ma anche al loro monitoraggio nel corso degli anni.

L'obiettivo era quello di arrivare alla realizzazione di gusci in grado di resistere ai carichi a cui sarebbero stati sottoposti - e dunque di ottenere il massimo dell'efficienza meccanica - ma con l'impiego di una minima quantità di materiale, rendendo le strutture in tal modo "sostenibili"¹¹ (Beckh et al., 2020).

IV.2.1 ANALISI STRUTTURALE

Dopo avere definito il modello che avrebbe avuto il guscio, era necessario calcolare le forze agenti sia sul guscio stesso che sugli appoggi a terra. Dal momento che la resistenza della struttura di calcestruzzo impiegato era nettamente superiore (circa 80 volte)

¹⁰ Trad.: «...naturalmente, questo è solo il primo passo per trovare la forma. Successivamente occorre eseguire l'analisi strutturale esatta, lo studio della modellazione, la disposizione degli elementi di rinforzo e precompressione e i dettagli di supporto. Inoltre, il progettista deve riflettere sui problemi di costruzione e infine osservare attentamente la struttura mentre è in uso...».

¹¹ Studiando a posteriori le opere di Isler, si nota che queste sono state concepite, progettate e realizzate proprio secondo i principi di sostenibilità: «...high efficiency with the lowest environmental impact, care of natural resources, minimum quantity of building materials, strength achieved through the form, and low stresses that lead to low maintenance and long life...» (Beckh et al., 2020). Trad.: «...alta efficienza con il minimo impatto ambientale, cura delle risorse naturali, quantità minima di materiali da costruzione, resistenza ottenuta grazie alla forma e bassi livelli di deformazione che garantiscono una manutenzione ridotta e una lunga durata...».

rispetto alle sollecitazioni dovute ai carichi agenti sui gusci, questa prima fase di analisi non richiedeva particolari accorgimenti. Lo stesso Isler affermava che i calcoli necessari per determinare le forze agenti nei gusci erano relativamente semplici e risolvibili con calcoli manuali (Beckh et al., 2020).



Figura IV.10. Dima utilizzata per le misurazioni dei modelli di guscio (Chilton, 2012).



Figura IV.11. Reticolo tracciato sul modello in gesso del guscio (Chilton, 2012).

IV.2.2 STUDIO DEI MODELLI

I modelli realizzati per determinare la forma dei gusci (spesso in scala 1:50 o 1:100), di dimensioni molto ridotte, venivano accuratamente rilevati in modo da essere riprodotti in scala reale.

La misurazione era eseguita con una particolare dima creata da Isler che permetteva di ottenere dimensioni accurate¹² (Figura IV.10); tale accuratezza era possibile anche attraverso un reticolo, orientato secondo un sistema di coordinate spaziali (x,y,z) , precedentemente tracciato sul modello in gesso (Figura IV.11). Il reticolo non veniva disegnato in modo uniforme sul guscio, bensì risultava più fitto in corrispondenza delle zone in cui la curvatura del guscio era maggiore, come ad esempio nei supporti angolari (Chilton, 2012). Un ulteriore accorgimento consisteva nel ripetere ogni misurazione più volte, di modo che il calcolo della loro media fosse assunto come la quota da utilizzare per ogni determinato punto.

In tal modo era possibile constatare immediatamente la presenza di errori o imperfezioni (Billington, 2003a), spesso dovuti al metodo e ai materiali impiegati.

¹² Questo tipo di dima consisteva essenzialmente di «...a timber box with scale rules embedded in the side frames to give x and y coordinates. The z-coordinate was found using a guided pointed probe suspended neutrally (with its weight balanced) from a dial gauge...» (Chilton, 2012).

In scala maggiore rispetto ai modelli in gesso di partenza erano anche realizzati da Isler i modelli in resina epossidica, utili per dimostrare la resistenza strutturale e la stabilità delle forme ottenute attraverso l'applicazione di differenti condizioni di carico (Chilton, 2012). Una serie di elementi in legno, pendenti da tiranti ancorati al guscio, era disposta in modo da creare dei carichi uniformemente distribuiti misurati con estensimetri (Figura IV.12).

Questo articolato apparato permetteva anche di applicare dei carichi non uniformi e di studiare l'effetto dell'applicazione di elementi precompressi.



Figura IV.12. Modello di carico del guscio di Sargans (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_M_7_6_251_1).

IV.2.3 APPLICAZIONE DI ELEMENTI DI RINFORZO

Una volta studiati i modelli in resina epossidica e appurata la presenza di zone sottoposte a sforzi di trazione ai gusci sono stati applicati degli elementi di rinforzo.

Tra questi, al fine di presollecitare il guscio, vi è l'inserimento di travi di controventamento ai supporti: la pretensione è ottenuta con la predisposizione, all'interno di queste travi, di una serie di cavi (Figura IV.13).

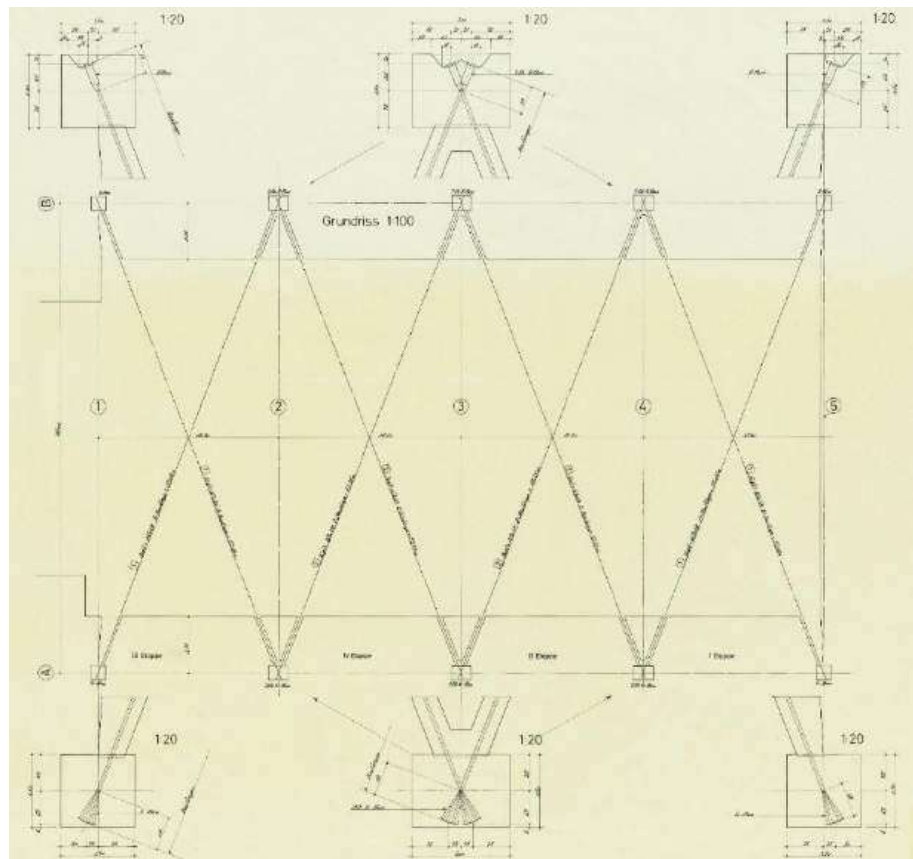


Figura IV.13. Travi di controventamento nel Tenniscenter Paradies ad Allschwil (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0421_20).

Alcuni dei gusci realizzati su progetto di Isler sono caratterizzati da una controcurvatura ai bordi (Billington, 1985). Questa, presente in modo più o meno evidente in involucri strutturali come il già menzionato Gartencenter Wyss (Figura IV.14) o la Schwimmhalle di Brugg (1981) si è resa necessaria per irrigidire i gusci, evitando in tal modo l'uso di nervature così come la presenza di soluzioni di continuità¹³. Anche nei gusci ripetuti modularmente e derivati dallo stesso progetto di partenza, come il Tenniscenter Dreilinden di Langenthal (1979-80), il Tenniscenter ad Heimberg (1978) o il Flugzeugmuseum a Dübendorf (1986-88) i giunti tra i bordi di ogni modulo, simili a nervature, in realtà sono incurvati per offrire una maggiore rigidità. Una soluzione siffatta è una diretta conseguenza derivante dal processo di determinazione della forma del guscio tramite modelli in scala: infatti, è proprio nel momento in cui si appende la membrana che ai suoi lati si formano queste pieghe che, non appena capovolta la membrana stessa, formeranno proprio le controcurvature del guscio.

¹³ Oltre a quanto asserito, le controcurvature permettono anche il convogliamento delle acque piovane agli appoggi dei gusci, come accade nel caso del guscio sovrastante la piscina dell'Hotel Splendide Royal, a Lugano (1972-74, demolito nel 2019) (Gozzi, 2024).



Figura IV.14. Gartencenter Wyss a Zuchwil (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_09_F.1).

L'efficacia del metodo dell'*hängeform* rispetto agli altri metodi definiti da Isler si può comprendere, ad esempio, considerando l'accorgimento da lui adottato nel caso del guscio del supermercato Migros di Bellinzona, realizzato a partire da un modello ricavato con *fließform*: l'espedito consisteva nell'inserimento di tiranti di pretensione verticali - inseriti in facciata ma nascosti dietro i serramenti (Figura IV.15) - utili ad evitare l'insorgere di problemi di flessione e sbandamento sugli angoli del guscio, dunque per la correzione di una geometria non del tutto ottimale.

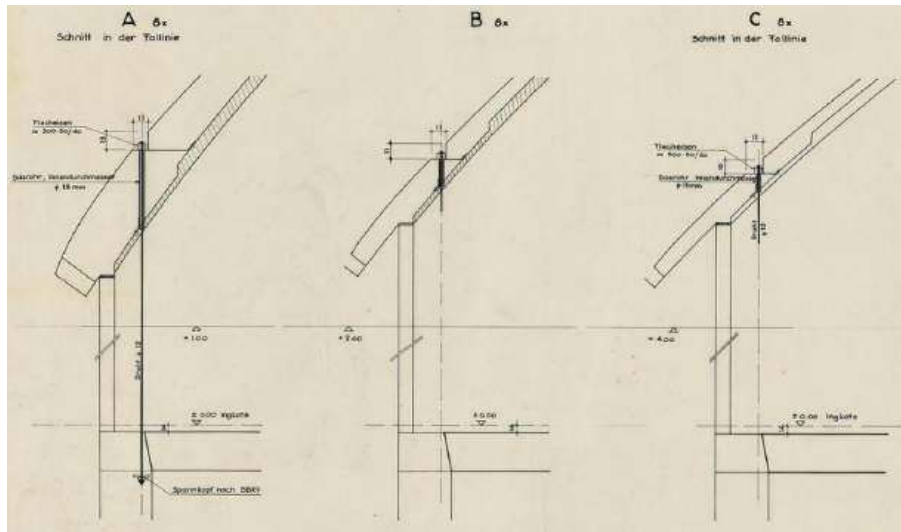


Figura IV.15. Applicazione di tiranti $\phi 12$ nella facciata del supermercato Migros a Bellinzona (Gozzi, 2024).

IV.2.4 COSTRUZIONE

Dopo il completamento delle fasi di studio preliminare e analisi dei modelli, era possibile procedere alla fase di realizzazione dei gusci.

Le forme libere e le grandi dimensioni che i gusci avrebbero assunto una volta messi in opera richiedevano l'utilizzo di centine (formate da archi in legno lamellare) accuratamente conformati secondo le geometrie richieste e adagiate sopra impalcature tubolari leggere e tavole di legno (Billington, 2003a) (Figura IV.16). Superiormente alle travi un assito di tavole fungeva da cassero; altre volte invece, al disopra di un manto discontinuo di tavole, pannelli isolanti in fibra di legno fungevano da casseforme a perdere per il successivo getto del guscio (Billington, 1985).

La possibilità di utilizzare più volte le travi lamellari, modellate *ad hoc* per consentire la realizzazione delle forme libere dei gusci, era fondamentale per ottimizzare i costi di costruzione.

Figura IV.16. Impalcatura e sistema di centina-tura della Schwimmhalle ad Heimb-berg (gta Archiv/archi-vio Isler rif. 217_0370_F_4).



I calcoli effettuati da Isler per ogni guscio hanno compreso anche la definizione delle armature sia nella parte intradossale che nella parte estradossale delle strutture a guscio: ciò era reso necessario per prevenire ulteriori eventuali carichi puntuali o la formazione di momenti flettenti non considerati in fase di progettazione. Le armature erano disposte a formare delle maglie quadrate lungo tutta la superficie del guscio. Di conseguenza, nella maggior parte dei casi, è stata impedita la formazione di fessure e l'infiltrazione di acqua con la successiva corrosione delle armature.

Salvo alcune eccezioni¹⁴, tutti i gusci di Isler sono stati progettati per essere realizzati in calcestruzzo armato (Figura IV.17).

¹⁴ Il riferimento è a gusci da assemblare in serie con luci di 9 m in poliestere rinforzato con fibre di vetro (1982-1983), per edifici in caverna (*Kavernenbauten*) da utilizzare come deposito di munizioni (Lykov, 2025) (Figura IV.18).



Figura IV.17. Ultimazione del getto di calcestruzzo nel guscio del Theater unter den Kuppeln a Stetten (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0329_F_3).



Figura IV.18. Gusci prefabbricati in poliestere rinforzato con fibre di vetro (Lykov, 2025).

IV.2.5 MONITORAGGIO

La fase di monitoraggio, avviata da Isler subito dopo la messa in opera dei gusci, è fondamentale per comprenderne e poterne

prevedere (per le realizzazioni successive) i difetti eventualmente derivanti da una errata progettazione o messa in opera. Nel caso dei gusci di Isler, la meticolosità dell'ingegnere nella progettazione e successiva realizzazione dei gusci ha avuto come risultato l'assenza di fessurazioni e, dunque, di infiltrazioni all'intradosso¹⁵. La resistenza delle strutture a guscio di Isler è stata verificata quantitativamente, molto tempo dopo la loro realizzazione, attraverso le misure della deflessione (di cui si è avuto modo di dire in precedenza) che confermano un minimo, o in alcuni casi nullo, spostamento della freccia (Chilton & Isler, 2000).

Nel lungo periodo - che nel caso di alcuni gusci arriva fino a 30 anni -, l'assenza di rivestimenti superficiali applicati all'estradosso dei gusci ha reso possibile, specie nei gusci immersi nel paesaggio naturale (Figura IV.19), la formazione di uno strato naturale di licheni che proteggono il calcestruzzo, specie le armature, dall'infiltrazione dell'acqua (Chilton & Isler, 2000).

¹⁵ Come afferma Billington: «...Isler's forms are so carefully designed that there is no cracking of the concrete and hence no leaking, and, therefore, no roofing need be applied to the concrete...» (Billington, 1985). Trad.: «...le forme di Isler sono progettate con tanta cura che il calcestruzzo non si crepa e quindi non ci sono infiltrazioni, e quindi non c'è bisogno di mettere una copertura sul calcestruzzo...».



Figura IV.19. Modello del guscio di Bellinzona (Borgart & Eigenraam, 2012).

IV.3 INDAGINE SUI GUSCI DI HEINZ ISLER

Il metodo di determinazione della forma dei gusci tramite *hängeform* permette di ottenere una vasta gamma di strutture a guscio sottoposti, prevalentemente, a sollecitazioni di compressione.

Al fine di appurare che l'effettivo comportamento statico di tali elementi sia quello descritto in letteratura, e con l'obiettivo di partire da questi per arrivare, nel prosieguo della tesi, alla definizione di nuovi sistemi di gusci, è stato necessario studiarne alcuni aspetti peculiari in modo da giungere, in ultima istanza, alla loro analisi dal punto di vista strutturale.

IV.3.1 INDIVIDUAZIONE DEI GUSCI RAPPRESENTATIVI

La prima delle fasi che hanno portato allo studio strutturale è stata quella dell'individuazione, tra le opere di Isler, di alcuni dei gusci *hängeform* ritenuti tra i più rappresentativi.

I gusci presi in considerazione sono i gusci¹⁶ dell'Autobahnra-
ststätte (stazione di servizio autostradale) Deitingen, sull'auto-
strada A1 nei pressi di Flumenthal, del 1968 (Figura IV.20) e il
guscio sovrastante la piscina dell'Hotel Splendide Royal, a Lu-
gano (1972-74, demolito nel 2019) (Figura IV.21) nonché il gu-
scio¹⁷ a copertura del Flugzeugmuseum (museo dell'aviazione) a
Dübendorf del 1986-88 (Figura IV.22).

La scelta di questi tre gusci deriva principalmente dalle forme tra
loro molto differenti; di conseguenza, ciò ha offerto la possibilità
di indagare il comportamento strutturale di tre gusci ricavati dal
metodo dell'*hängeform* ma la cui forma, spessore, dimensioni e,
di conseguenza, la cui risposta strutturale risultano del tutto dif-
ferenti. Inoltre, la possibilità di disporre dei disegni originali ha
reso possibile riprodurre queste forme nonché di poterne stu-
diare gli aspetti più strettamente strutturali ed esecutivi come, ad
esempio, la quantità e la disposizione delle armature, così come
delle barre di pretensionamento.

Le centine dei tre gusci che si è deciso di studiare sono state in
seguito reimpiegate, o sono già esse stesse di reimpiego, per la
messa in opera di altri gusci simili: il riferimento è a Deitingen,
dove la centina è stata impiegata due volte per i due gusci affian-
cati, o alla forma e dimensioni del museo di Dübendorf, del tutto

¹⁶ Si tratta di due gusci uguali in ogni loro parte, per cui ai fini dello studio se
ne considera uno soltanto.

¹⁷ In questo caso, si tratta di quattro gusci accostati a formare la copertura del
museo ma indipendenti tra loro, per cui se ne considera un solo modulo.

simili al Tenniscenter ad Heimberg (1978) o al Tennishalle Paradies ad Allschwil (1982)¹⁸. In tal senso, i tre gusci presi in considerazione sono rappresentativi anche perché del tutto simili, e in certi casi uguali, ad altri progettati da Isler.

Figura IV.20. Guscio di Deitingen (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_F_135_01).



Nella pagina seguente
Figura IV.21. Guscio dell'Hotel Splendide Royal (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0292_F.2).

¹⁸ Anche il guscio dell'hotel sito a Lugano avrebbe dovuto riproporre la geometria utilizzata nel Fabrikationshalle (capannone industriale) Kilcher di Rechterswil (1965), da cui deriva anche il Gantcenter Bürgi di Camorino (1971), salvo poi essere stato progettato a partire da una *hängeform* (Gozzi, 2024).

Figura IV.22. Guscio del museo dell'aviazione a Dübendorf (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0473_F.2).



IV.3.2 SCHEMATIZZAZIONE DEI GUSCI

La schematizzazione dei gusci di Isler individuati come casi di studio ha costituito una tappa fondamentale per giungere alla loro analisi strutturale.

Alla frammentarietà delle informazioni riscontrate, unitamente alla incongruenza spesso riscontrata in letteratura sulle effettive dimensioni e spessori da prendere in considerazione, si è posto rimedio grazie alla possibilità di consultare e osservare nel dettaglio alcuni dei disegni di progetto originali¹⁹.

Attraverso le dimensioni rinvenute per ogni guscio e tenendo presente che le geometrie dei gusci derivate da un telo sospeso possono considerarsi come delle catenarie sviluppate anche nella terza dimensione²⁰, la schematizzazione dei gusci è stata eseguita, attraverso il software di modellazione Rhinoceros® 8, relativamente alla loro superficie media (Figura IV.23).

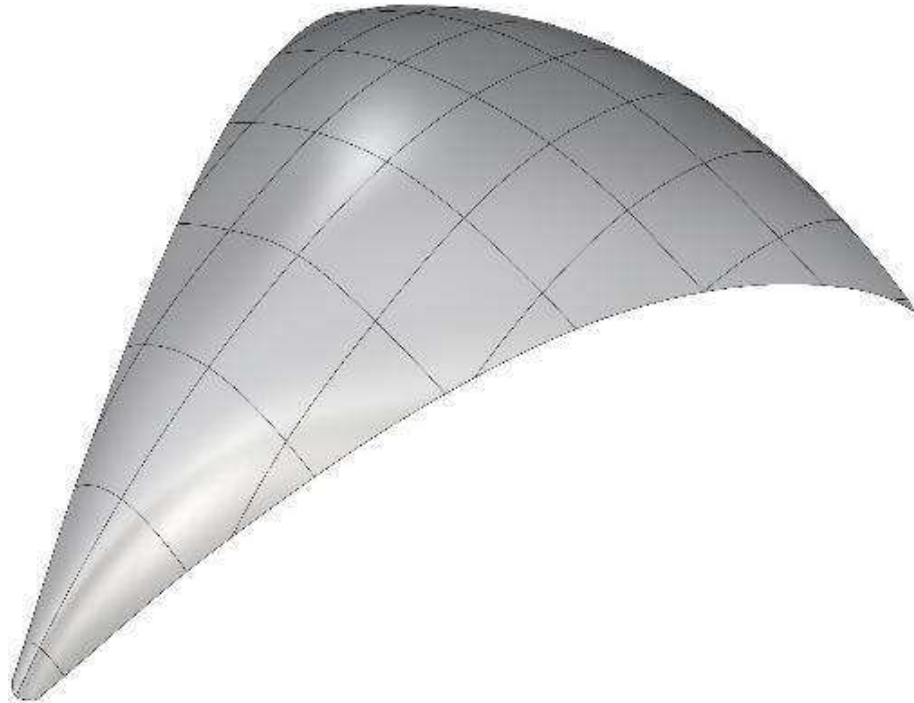
Una serie di punti, disposti in ben precise posizioni (ad esempio lungo i bordi, nelle zone in cui varia lo spessore, alle basi) e differenti da guscio a guscio, è stata aggiunta nella prospettiva di assegnare ad ognuno di questi lo spessore della determinata zona in cui è posizionato²¹.

¹⁹ Tali disegni, fruibili digitalmente, appartengono all'archivio di Isler, incluso nel gta Archiv dell'ETH di Zurigo.

²⁰ Dunque, in tal senso, cercando di ricavare le forme effettive a partire proprio dalle curve catenarie.

²¹ Anche la fase di inclusione dei punti è stata eseguita su Rhinoceros® 8.

Figura IV.23. Modello rielaborato con Rhinoceros® 8 del guscio di Deitingen.



IV.4 ANALISI STRUTTURALE DI GUSCI HÄNGEFORM

Similmente a quanto fatto per lo studio della *volta realina* (Capitolo III), l'analisi strutturale dei tre casi di studio presi come esempio dei gusci *hängeform* di Heinz Isler è stata condotta con il software di simulazione COMSOL Multiphysics® (versione 6.2). Il modulo utilizzato, tra i diversi presenti nel programma, è stato quello riguardante la *Structural Mechanics*, mentre per modellare le strutture sono stati usati gli elementi *Shell* con studio stazionario.

I passaggi seguiti per lo studio di ognuno dei gusci²² sono essenzialmente:

- importazione della geometria;
- individuazione dei materiali;
- definizione dello spessore variabile;
- assegnazione dei *layer*;
- caratterizzazione dell'elemento Shell;
- generazione della *mesh*;
- risultati.

Come si vede, la procedura generale è del tutto simile a quella applicata per la *volta realina*; tuttavia, nel dettaglio di ognuno dei passaggi sono emerse delle differenze significative, come si vedrà qui di seguito.

IV.4.1 IMPORTAZIONE DELLA GEOMETRIA

Da Rhinoceros, le superfici medie dei gusci precedentemente realizzate sono state esportate in AutoCAD 2025 e salvate in formato *.dwg* (Figura IV.24): ciò ha consentito di importare le superfici su COMSOL, non essendo possibile l'importazione diretta dei file *.3dm* generati con Rhinoceros.

L'origine del sistema di riferimento, per ogni superficie studiata, è stata posta in corrispondenza di uno dei sostegni alla base, mentre le quote sono espresse univocamente in m.

²² Di seguito si riportano i passaggi generali, mentre nei paragrafi successivi, dedicati all'approfondimento dei gusci presi in esame, per ognuno di questi saranno descritti tutti i passaggi in modo specifico.

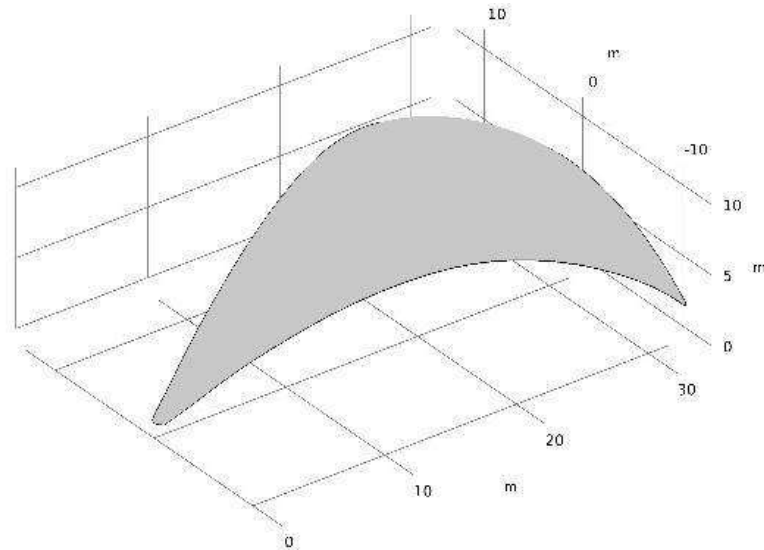


Figura IV.24. Modello del guscio di Deitingen importato su COMSOL.



IV.4.2 INDIVIDUAZIONE DEI MATERIALI

Coerentemente con quanto progettato da Isler, il materiale assegnato ai gusci oggetto di studio è il calcestruzzo armato, in questo caso suddiviso nei due materiali componenti: calcestruzzo e acciaio.

I valori delle proprietà assegnate ai due materiali, considerati equivalenti per tutti e tre i gusci, sono i seguenti (Tabella IV.1):

Tabella IV.1. Valori caratteristici di calcestruzzo e acciaio.

	Peso specifico [kg/m³]	Modulo elastico [GPa]	Coeff. di Poisson [-]
Calcestruzzo	2450	32,5	0,21
Acciaio	7850	205	0,28

Per quanto riguarda il calcestruzzo, dai disegni esecutivi è possibile riscontrare la tipologia prevista da progetto per il guscio di Dübendorf distinta tra fondazioni e guscio vero e proprio, mentre nel caso del guscio di Deitingen si ha una distinzione tra gli

appoggi alla base e l'estensione della superficie del guscio²³; le esatte denominazioni riportate nei disegni esecutivi sono:

per il guscio di Dübendorf,

fondazioni: Beton BH PC300kg/m³ $\beta_{w28} \geq 300$ kg/cm²

guscio: Beton BH PC350kg/m³ $\beta_{w28} \geq 400$ kg/cm²

per il guscio di Deitingen,

appoggi: Beton BH400

guscio: Beton BH350

Dunque, si tratta di calcestruzzi ad alta resistenza (*Béton Haute Résistance* o *Beton Hochfest*, BH appunto) con resistenza a compressione (*Pression de Compression*, PC) compresa tra i 300 e i 400 kg/cm².

Dal momento che non è possibile verificare con assoluta certezza che le tipologie sopra individuate siano quelle effettivamente adoperate nella fase di realizzazione dei gusci e che, inoltre, scopo del presente lavoro è quello di confrontare in particolare le diverse geometrie dei gusci, si è deciso di assumere come unica tipologia di calcestruzzo quello avente valore di resistenza a compressione pari a 350 kg/cm² ²⁴.

²³ Non si hanno invece riscontri per quanto riguarda la tipologia, o le tipologie, adoperate per mettere in opera il guscio di Lugano.

²⁴ A supporto di questa scelta, si riporta quanto affermato da Baghdadi et al.: «...The typical concrete mixture of Isler's shells constitutes of cement percentage of maximum (325 kg/m³), gravel stone with a maximum dimension of (15 mm) [...] for the concrete of 28 MPa (C-28) compression strength...» (Baghdadi et al., 2019). Trad.: «...La miscela di calcestruzzo tipica dei gusci di Isler è costituita da una percentuale massima di cemento (325 kg/m³), ghiaia con una dimensione massima di (15 mm) [...] per il calcestruzzo con resistenza a compressione di 28 MPa (C-28)...».

Meno complessa è risultata invece la scelta della tipologia di acciaio impiegato, trattandosi di un tipo di acciaio strutturale di uso comune²⁵.

IV.4.3 DEFINIZIONE DELLO SPESSORE VARIABILE

Il passaggio su AutoCAD, oltre a consentire di importare la geometria su COMSOL, è stato necessario per ricavare le coordinate spaziali dei punti prima determinati per ogni guscio e tabellarle in un documento di testo *.txt* avente come colonne, per l'ap-punto, le coordinate x, y e z e lo spessore s in quella determinata posizione²⁶ (Tabella IV.2).

L'importazione su COMSOL e la successiva interpolazione hanno reso possibile attribuire ai gusci, in modo molto accurato, gli spessori variabili lungo le loro superfici.

x [m]	y [m]	z [m]	s [m]
6.0000	-2.8646	4.0243	0.1200
6.0000	2.8042	4.1099	0.1200
710.0000	4.4461	6.2576	0.1200
10.0000	-4.4967	6.2065	0.1200
16.7881	7.2325	8.3605	0.1200
16.7881	-7.2665	8.3358	0.1200
22.8801	9.7332	7.9148	0.1200
22.8801	-9.7522	7.9022	0.1200
31.3453	6.3606	6.3327	0.1200
31.3453	-6.3605	6.3327	0.1200

Tabella IV.2. Coordinate del guscio di Deitingen e relativo spessore.

²⁵ L'uso di acciaio di uso comune si riscontra anche in (Baghdadi et al., 2019), dove per i calcoli effettuati si è ricorso all'acciaio standardizzato denominato ASTM A992, presente soprattutto nel mercato siderurgico americano.

²⁶ All'interno del documento *.txt*, tutte queste misure si intendono espresse in m.

31.5005	0.0150	7.2867	0.1200
0.5400	0.0000	0.6461	0.5400
3.0000	0.0000	3.3281	0.3600
6.0000	0.0000	5.9472	0.2000
10.0000	0.0000	8.5408	0.1000
16.7881	0.0000	11.0761	0.1000
22.8801	6.3606	9.9063	0.1000
22.8801	-6.3605	9.9063	0.1000
22.8801	0.0000	11.1716	0.1000
25.8801	0.0000	10.4667	0.1000
28.8801	0.0000	9.2542	0.1500
28.8801	-6.3605	8.0058	0.1650
28.8801	6.3606	8.0058	0.1650
28.8801	12.1961	5.0266	0.1800
28.8801	-12.2003	5.0239	0.1800
30.4701	0.0000	8.1917	0.2300
30.4701	12.8488	3.6229	0.3000
30.4701	-12.8491	3.6226	0.3000

IV.4.4 ASSEGNAZIONE DEI *LAYER*

Alla caratterizzazione dei materiali fa seguito la loro collocazione all'interno del modello in via di definizione. Trattandosi di due materiali distinti, all'interno del software vanno inseriti come degli strati (*layer*) sovrapposti così suddivisi: uno strato centrale di calcestruzzo a cui sono accostati due strati di acciaio (le armature inferiore e superiore) e, più esternamente a questi, gli strati di calcestruzzo con funzione di copriferro.

Gli strati del materiale (*layered material*) derivante da questa sovrapposizione sono stati inseriti non con un preciso spessore, dal momento che questo varia in ogni guscio lungo tutto il suo sviluppo, ma in percentuale.

Per il calcolo di dette percentuali si è preso come riferimento il guscio di Deitingen, essendo questo il più completo per ciò che riguarda le informazioni disponibili. Dalla tavola della distinta delle armature si sono ricavate le lunghezze di tutte le barre separatamente per le armature inferiore - *unter*, dove si sono impiegati ferri $\phi 8$, $\phi 12$ e $\phi 14$ - e superiore - *oben*, in cui i ferri hanno diametri $\phi 8$, $\phi 10$ e $\phi 12$ -. Moltiplicando le lunghezze di ogni tipologia di barra per l'area si sono ricavati i volumi:

<i>unter</i>	<i>oben</i>
$V_{\phi 8} = 0,510 \text{ m}^3$	$V_{\phi 8} = 0,320 \text{ m}^3$
$V_{\phi 12} = 0,114 \text{ m}^3$	$V_{\phi 10} = 0,060 \text{ m}^3$
$V_{\phi 14} = 0,066 \text{ m}^3$	$V_{\phi 12} = 0,580 \text{ m}^3$
$V_{\text{unt}} = 0,690 \text{ m}^3$	$V_{\text{ob}} = 0,960 \text{ m}^3$

Come si vede, la quantità di armatura inferiore è minore rispetto a quella superiore; ciò è coerente con il fatto che, per involucri strutturali di questo tipo, l'armatura superiore è la più sollecitata, essendo soggetta a carichi gravitazionali, mentre l'armatura inferiore, sebbene ridotta, deve comunque garantire una adeguata resistenza ad azioni secondarie quali ad esempio variazioni termiche, ritiro o eccentricità dei carichi.

Il volume totale delle armature è dunque:

$$V_{\text{arm}} = V_{\text{unt}} + V_{\text{ob}} = 1,65 \text{ m}^3$$

Il volume dell'intero guscio, composto cioè da calcestruzzo più barre di armatura, è stato ricavato su COMSOL integrando la superficie del guscio per lo spessore (variabile) e ottenendo:

$$V_{\text{guscio}} = 71,38 \text{ m}^3$$

La percentuale di armatura ($\%_{\text{arm}}$) del guscio è ottenuta dal rapporto:

$$71,38:100=1,65:\%_{\text{arm}}, \text{ da cui } \%_{\text{arm}} = 2,31\%$$

Similmente si calcolano le percentuali di armatura inferiore e superiore, ottenendo:

$$71,38:100=0,69:\%_{\text{unt}}, \text{ da cui } \%_{\text{unt}} = 0,97\%$$

$$71,38:100=0,96:\%_{\text{ob}}, \text{ da cui } \%_{\text{ob}} = 1,34\%$$

Non avendo nessuna informazione, dalle fonti consultate, riguardanti il copriferro dei gusci *hängeform* di Isler, si assume che questo sia pari a 2 cm sia all'intradosso che all'estradosso²⁷. Per calcolare la percentuale di copriferro da inserire nel *layered material* si procede similmente a quanto fatto prima. Per trovare il volume di copriferro, considerando che la superficie del guscio ha area, calcolata su COMSOL integrando la superficie per il valore 1:

$$A_{\text{guscio}} = 509,58 \text{ m}^2$$

Si moltiplica questa per 2 cm = 0,020 m, ottenendo:

$$V_{\text{cf}} = 509,58 \times 0,020 = 10,19 \text{ m}^3$$

Ripetendo il rapporto:

²⁷ Tale valore si ritiene possa essere accettabile considerando anche che in certi punti lo spessore totale in alcuni gusci può arrivare ad un valore minimo di 8 cm.

$71,38:100=10,19:\%_{ocf}$, da cui $\%_{ocf}= 14,27\%$

La percentuale di calcestruzzo ($\%_{ocls}$) è allora:

$$\%_{ocls}= 100-2,31-14,27 \times 2= 69,15\%$$

Ricapitolando, il *layered material* è così composto (considerando gli strati dall'estradosso all'intradosso del guscio) (Tabella IV.3):

Tabella IV.3. Riepilogo dei valori trovati.

	Percentuale [%]	Frazione decimale [0-1]
Copriferro all'estradosso	14,27	0,1427
Armatura superiore	1,34	0,0134
Calcestruzzo	69,15	0,6915
Armatura inferiore	0,97	0,0097
Copriferro all'intradosso	14,27	0,1427

Un ultimo accorgimento riguarda la rotazione di 90° dell'armatura superiore rispetto a quella inferiore: ciò per ottenere una disposizione incrociata dei ferri e in tal modo simulandone il comportamento reale di resistenza a trazione lungo le due direzioni secondo le quali sono orientati (Figura IV.25).

Figura IV.25. Layered material.

Layer	Material	Rotation (deg)	Thickness
Layer 4	Concrete (mat3)	0.0	0.1427
Layer 1	Structural steel (mat4)	0.0	0.0134
Layer 2	Concrete (mat3)	0.0	0.6915
Layer 3	Structural steel (mat4)	90.0	0.0097
Layer 5	Concrete (mat3)	0.0	0.1427

IV.4.5 CARATTERIZZAZIONE DELL'ELEMENTO *SHELL*

Per caratterizzare l'elemento *Shell* in modo da ottenere un guscio il più possibile fedele, dal punto di vista strutturale, a quelli progettati e realizzati da Isler, si sono definite le seguenti proprietà:

Materiale. Il materiale è stato definito come elastico lineare a comportamento isotropo e il modulo di Young e il coefficiente di Poisson sono quelli derivati dal materiale assegnato; inoltre, il sistema di riferimento coincide con quello importato in precedenza.

Spessore e *offset*. Lo spessore assegnato è quello ricavato dall'interpolazione di cui prima si è detto, mentre l'*offset*, cioè l'estrusione del guscio in base al suo spessore effettivo, avviene dalla superficie di partenza verso l'alto (in base alla posizione della superficie, *bottom surface on boundary*) (Figura IV.26).

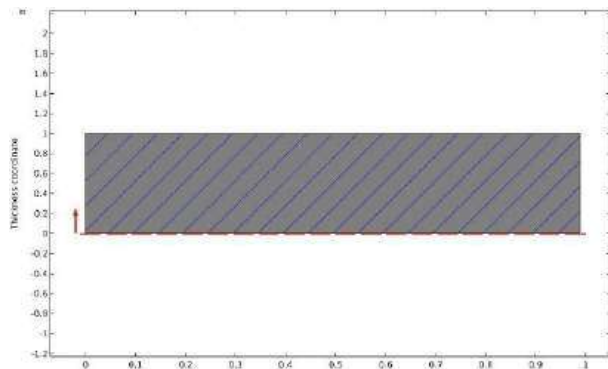


Figura IV.26. *Bottom surface on boundary.*

Bordi. In tutti e tre i casi analizzati (dunque anche nel caso del guscio di Dübendorf che è unito ad altri moduli uguali), i bordi si sono considerati come liberi, cioè non vincolati. Vincoli ad in-

castro (*fixed constraint*) sono stati posti solamente in corrispondenza degli appoggi alla base, simulando la presenza delle fondazioni.

Forze applicate. Dal momento che i gusci realizzati a partire da *hängeform* sono concepiti per essere liberi da qualsiasi supporto o vincolo (escludendo ovviamente gli incastri alla base), l'unica forza computata per tali strutture è la forza di gravità, distribuita uniformemente su tutta la loro superficie superiore e diretta secondo l'asse *z*, ma in verso negativo.

IV.4.6 GENERAZIONE DELLA MESH

La *mesh* dei diversi gusci è stata generata in modo automatico su COMSOL (*physics-controlled mesh*). Gli elementi generati sono triangolari e la loro misura è stata regolata su "*extra fine*" (per comprendere meglio, la scelta può andare da "*extremely fine*", seguita subito dopo dall'"*extra fine*" qui utilizzato, per arrivare fino a "*extremely coarse*", in cui la *mesh* è composta da triangoli di grandi dimensioni).

La qualità della *mesh* e la regolarità dei suoi elementi componenti si misura attraverso la *skewness*, o scostamento angolare, intesa come misura della distorsione di un elemento rispetto alla sua forma ideale. L'intervallo di valori è compreso tra 0, nel caso di celle con scarsa qualità (dunque distanti dalla forma ideale del triangolo equilatero), e 1, nel caso di celle di qualità ottima in forma di triangoli equilateri²⁸.

²⁸ Approfondendo i singoli gusci, verranno indicati i valori esatti riscontrati per ognuno di essi.

IV.4.7 RISULTATI DELL'ANALISI

L'analisi condotta con il programma avanzato di simulazione ha restituito diversi risultati ritenuti di significativo interesse per la ricerca e che verranno presentati nelle seguenti schede di approfondimento per ognuno dei tre gusci. I risultati ottenuti sono riferibili a:

- deformazione;
- spostamenti;
- tensioni principali sulla superficie;
- tensioni sulle superfici inferiore e superiore.

Questi, in termini di spostamenti e stati tensionali, non sono da intendersi come verifiche di progetto ai sensi delle normative vigenti, bensì come indicatori quantitativi comparativi, finalizzati alla comprensione del comportamento strutturale relativo delle diverse geometrie analizzate.

L'adozione di valori indicativi, coerenti per ordine di grandezza con la letteratura sui gusci sottili e con le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati, consente di:

- confrontare in modo omogeneo gusci caratterizzati da geometrie, dimensioni e schemi statici differenti;
- individuare le zone critiche soggette a trazione e il ruolo svolto dagli elementi di rinforzo;
- evidenziare il grado di comportamento funicolare raggiunto da ciascuna configurazione.

Tale approccio è ritenuto appropriato poiché l'obiettivo principale dell'indagine non è la verifica ultima di sicurezza, ma la valutazione dell'efficacia della forma strutturale derivata dal processo di *form-finding*.

IV.4.8 APPLICAZIONE DELLE BARRE DI RINFORZO

I diversi valori ottenuti hanno evidenziato alcuni punti critici dei gusci in cui, oltre alle sollecitazioni di compressione attese, sono presenti anche sollecitazioni di trazione. Per ovviare a questo inconveniente, sono state inserite nelle aree interessate delle barre di rinforzo, ricavate dai disegni di progetto consultati. A seguito di questa applicazione il calcolo strutturale evidenzia un netto miglioramento dei risultati, avendo ottenuto dei valori di trazione trascurabili.

IV.5 SCHEDA DI APPROFONDIMENTO DEL GUSCIO

AREA DI SERVIZIO AUTOSTRADALE, DEITINGEN

IV.5.1 QUADRO DI SINTESI

Luogo	autostrada A1, Deitingen-Flumenthal (Canton Soletta, Svizzera)
Periodo di costruzione	1967-1968
Committente	BP AG, Schweiz
Stato di conservazione	ottimale, dal 2000 tutelato come monumento storico cantonale
Materiale	calcestruzzo armato appoggi: Beton BH400 guscio: Beton BH350
Concetto statico	guscio bilanciato con cavi di precompressione
Metodo di <i>form-finding</i>	<i>hängeform</i> (forma sospesa)
Geometria	
configurazione	guscio su 3 appoggi a quote differenti
dimensioni	pianta: 31,60x26,00 m h max: 11,50 m h degli appoggi: 0,00 e 3,47 m superficie: 509,58 m ²
spessore	sp. min: 9-10 cm sp. max: 54 cm (all'appoggio)
Contesto	
destinazione	uso commerciale
inserimento	ambiente semi-rurale

IV.5.2 PREMESSA

I gusci²⁹ progettati e realizzati per la stazione di servizio BP a Deitingen possono sicuramente annoverarsi tra le opere più rap-

²⁹ Come in precedenza asserito, si tratta non di uno, ma di due gusci di uguali forma e dimensioni posti l'uno di fronte all'altro. Essi sono stati progettati per lavorare assieme attraverso dei collegamenti posti sotto terra ma, dovendo reimpiegare la stessa centina per entrambi, non si sono potuti costruire contemporaneamente: per ovviare a ciò, Isler ha progettato e messo in pratica una

presentative dell'intera produzione di Isler. Sono diverse le ragioni a sostegno di questa affermazione, prima fra tutte la forma desueta che li contraddistingue rispetto agli altri gusci di Isler e, più in generale, dei progettisti suoi coevi: si tratta, in entrambi i casi, di una superficie triangolare, definita secondo un modello fisico, con tre terminazioni - gli appoggi - di cui due collocate a quota maggiore (+3,47 m, cioè superiormente all'edificio, adibito a ristorante, su cui i gusci poggiano) rispetto alla terza, collocata a quota stradale.

Quello di Deitingen è il primo lavoro progettato e realizzato con il metodo della membrana sospesa, ma già è possibile apprezzare l'effettivo potenziale che gusci siffatti offrono, e in particolare lo spessore, che nella zona sommitale raggiunge un valore minore di 10 cm, a fronte di una superficie superiore ai 500 m². A ciò si aggiunge l'assenza di costole di rinforzo e supporto alla superficie: «...les deux ailes conchoïdes ne comportent pas d'éléments perturbateurs. La forme est dépouillée, mais logique, et la structure est économe. Rien ne peut être réduit ou supprimé...»³⁰ (Alenspach & Isler, 2000).

IV.5.3 DESCRIZIONE

Le informazioni riguardanti il processo di progettazione e costruzione dei gusci sono carenti e spesso non coincidenti, tanto che la più completa e attendibile fonte da cui queste si possono

soluzione temporanea (*temporary prestressing*) che ha permesso al primo guscio di mantenersi da solo prima della costruzione del secondo (Billington, 2003a).

³⁰ Trad.: «...le due ali concoidi non presentano elementi di disturbo. La forma è essenziale, ma logica, e la struttura è economica. Nulla può essere ridotto o eliminato...».

ricavare sono i disegni di progetto e le fotografie (o i negativi) consultabili *online* nel già menzionato gta Archiv di Zurigo³¹.

L'ingente mole di dati sui gusci di Deitingen ricavabili dall'archivio permette di approfondire alcuni aspetti e alcune fasi comuni anche agli altri gusci ma dei quali non si hanno notizie documentali complete.

Una prima riflessione va fatta sui modelli fisici, utili alla determinazione della forma, realizzati da Isler. Dai modelli in gesso presenti nel laboratorio³² dell'ingegnere svizzero ci si può rendere conto dell'accuratezza e della precisione con cui questi venivano realizzati: uno stampo³³ da cui viene poi ricavato il calco in gesso è esemplificativo del procedimento precedentemente descritto (Figura IV.27); mentre una serie di calchi (Figura IV.28), tutti differenti tra loro ma riguardanti i gusci di Deitingen, testimoniano di come il processo che porta alla determinazione della forma più idonea sia un approccio per reiterati tentativi (*trial-and-error approach* (Boller et al., 2024)), dovuti in certi casi alla fragilità del gesso che, rompendosi, rende inutilizzabile il modello.

³¹ Altra fonte sono gli scritti di autori, come John Chilton o David P. Billington, che hanno conosciuto personalmente Isler e/o che ne hanno consultato a fondo l'archivio all'ETH.

³² Localizzato in Kanton Bern, il laboratorio di Isler constava principalmente di tre ambienti: il *model workshop*, dove venivano realizzati i modelli fisici; il *measuring model workshop*, dove i modelli venivano testati e analizzati dal punto di vista del comportamento strutturale; e la *model room* dove i modelli venivano esposti (si traggono queste informazioni da <https://www.youtube.com/watch?v=6TIEzvcchMI>).

³³ In questo caso, la membrana utilizzata, probabilmente in cuoio, è fissata a tre sostegni in legno al disotto dei quali si trova un disegno della pianta del guscio, in modo da ottenere una maggiore precisione.

Figura IV.27. Stampo per la determinazione del modello (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_M_7_10_415_3).



Figura IV.28. Calchi in gesso (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0140_F_M.1).



Oltre ai modelli in gesso, utili per la iniziale definizione del guscio, è ancora possibile trovare anche dei modelli dei gusci di Deitingen in materiale polimerico³⁴ (Figura IV.29). Su questi sono presenti dei fori numerati, posti ad una determinata distanza l'uno dall'altro, utili ad appendere i pesi per testare la resistenza sotto le specifiche condizioni di carico applicate. A testimonianza dell'accuratezza riposta da Isler per i suoi progetti, i punti numerati del guscio si ritrovano anche in alcuni dei disegni di progetto (Figura IV.30).

³⁴ In archivio si trovano pure gli stampi preparatori in gesso o altro materiale utili a formare questi modelli.

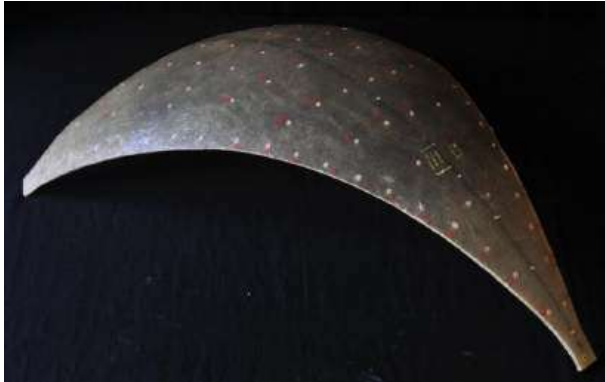


Figura IV.29. Modello di guscio in materiale polimerico con fori numerati (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_M_7_6_401_4).

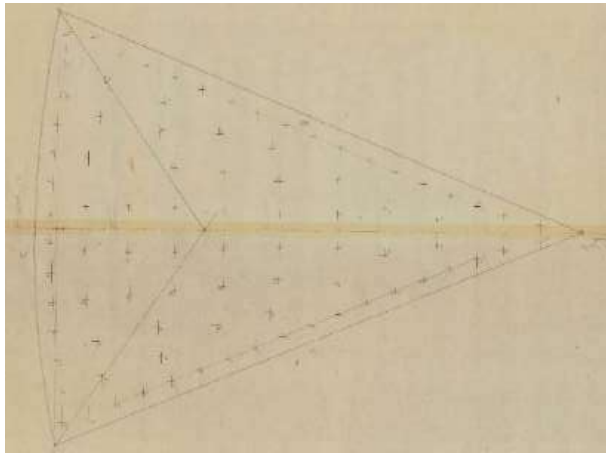


Figura IV.30. Disegno del guscio con l'indicazione dei punti (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0135_R9_16).

Per lo stesso scopo, cioè per testare il guscio sotto l'applicazione di carichi, è stato realizzato il modello in plexiglas in scala maggiore³⁵. Questo, modellato secondo forma e dimensioni (compreso lo spessore) del guscio da costruire a scala reale, è collocato all'interno di una struttura in legno appositamente conformata³⁶

³⁵ Come si sarà notato, non vengono dati dei valori precisi sulle dimensioni dei modelli così come sulle scale di riduzione o di ingrandimento o ancora sui pesi applicati, ciò perché questi valori non sono presenti né nella letteratura di riferimento, né tantomeno nelle fonti d'archivio.

³⁶ L'etichetta posta sullo strumento riporta la denominazione "*Messmodell für statische Untersuchung*", cioè "modello di misura per l'analisi statica".

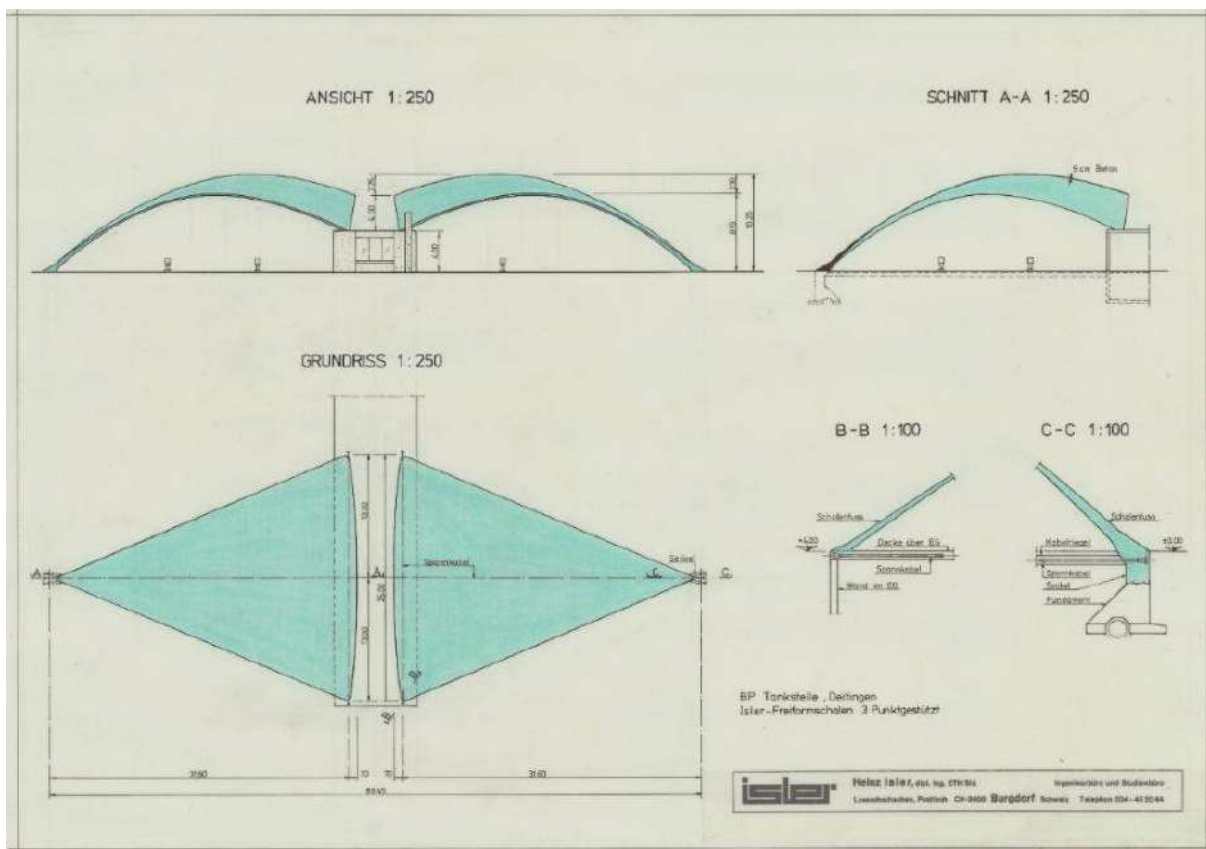
(Figura IV.31). Sui fori praticati sul modello sono state fissate delle cordicelle terminanti in una serie di tozzetti in legno orizzontali; a questi, a loro volta, sono stati ancorati dei tozzetti di dimensioni maggiori al di sotto dei quali si trova un ultimo tronchetto più grande: è su questo, in ultima istanza, che grava il blocco che funge da carico applicato al guscio. Completano lo strumento di misurazione una sequenza di elettrodi le cui terminazioni sono poste all'intradosso e all'intradosso del modello, probabilmente perché utili a quantificare gli spostamenti indotti dal carico applicato.



Figura IV.31. Modello di misura per l'analisi statica del guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_M_7_6_451_6).

I disegni architettonici di pianta, prospetto e sezione (Figura IV.32), unitamente ai disegni di dettaglio, sono stati fondamentali per la rielaborazione grafica di uno dei due gusci oggetto di studio.

Figura IV.32. Tavola con pianta, prospetto e sezione del guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_Praentationsplaene_Deitingen_1).



Le dimensioni planimetriche e le quote altimetriche ricavate hanno permesso di ricostruire il guscio su Rhinoceros; la curvatura, ovvero le curvature nelle diverse direzioni sono state ricavate attraverso il disegno di curve catenarie, in seguito confrontate con i disegni di Isler in modo da rendere il modello tridimensionale quanto più accurato possibile.

m alla base) e che affonda per 3,20 m sotto il suolo. La tavola con i particolari costruttivi dedicata agli appoggi offre ulteriori informazioni:

per l'appoggio a quota 0,00 m,

- la disposizione delle armature proprio in queste zone delicate del guscio, in particolare con la presenza di più ferri e staffe $\phi 10$ con passo 15 cm - poi 20 cm - fino ad una distanza di circa 3 m dal piede della struttura;
- il collegamento, attraverso ferri di chiamata $\phi 12$, al plinto di fondazione sottostante;
- la parte terminale dei trefoli di pretensionamento posti orizzontalmente, dunque all'interno del piano di calpestio;

per l'appoggio a quota 3,47 m,

- la disposizione delle armature con la presenza di più ferri e staffe, anche in questo caso, $\phi 10$ con passo 15 cm - poi 20 cm - fino ad una distanza di circa 2 m dal piede della struttura;
- il collegamento con l'edificio sottostante; a questo proposito, si nota come guscio e edificio siano pressoché indipendenti tra di loro e collegati attraverso poche barre di acciaio (soltanto 2 nella sezione), per cui si può considerare il guscio come appoggiato sull'edificio.

I trefoli di pretensionamento (indicati come *litzenkabel*, cavi metallici, o *spannkabel*, cavi di tensione) prima accennati, inseriti negli appoggi, sono approfonditi in un'ulteriore tavola esplicativa

(Figura IV.34) (oltre a trovarsi anche in una delle sezioni del disegno architettonico); dal confronto di queste tre tavole³⁷ emergono ulteriori particolari prima non evidenti. I cavi di tensione, secondo quanto illustrato nel disegno di progetto in scala 1:250, sarebbero posti uno in corrispondenza del piano stradale come collegamento tra i due appoggi inferiori dei due gusci - dunque raggiungerebbe una lunghezza di circa 70 m -, mentre altri due cavi andrebbero a collegare, uno in ognuno dei due gusci, i due appoggi posti a quota 3,47 m - dunque avrebbero una lunghezza di circa 26 m ciascuno -³⁸.

Il cavo di collegamento superiore non è presente nella tavola di dettaglio degli appoggi, così come non è presente nella tavola esplicativa del posizionamento dei trefoli, in cui questi vengono assegnati soltanto all'appoggio inferiore. Qui si riscontra una ulteriore dissomiglianza rispetto agli altri elaborati tecnici; infatti, sono presenti anche dei cavi che dall'appoggio inferiore si distendono per circa 13-14 m sullo spessore del guscio. Fondamentalmente, si tratta di 6 cavi di diametro 1/2" e lunghezza 13 m (a cui si aggiunge 1 m di ancoraggio, in cui ogni cavo si tripartisce in modo da ancorarsi ad una area maggiore del guscio) distanziati di 50 cm l'uno dall'altro. All'interno dello spessore del guscio, questi sono posizionati all'estradosso "nella posizione più alta possibile" (*in höchst möglicher Lage*, come riportato nel disegno)³⁹.

³⁷ Per riepilogare: la tavola con il disegno architettonico del guscio, in scala 1:250 (le sezioni degli appoggi in scala 1:100); la tavola con i particolari degli appoggi, in scala 1:20; e infine la tavola dedicata ai trefoli nell'appoggio inferiore, in scala 1:50.

³⁸ Sul diametro di questi cavi non si hanno informazioni.

³⁹ Le informazioni ricavate da queste tavole saranno di fondamentale importanza nella fase di analisi dei gusci.

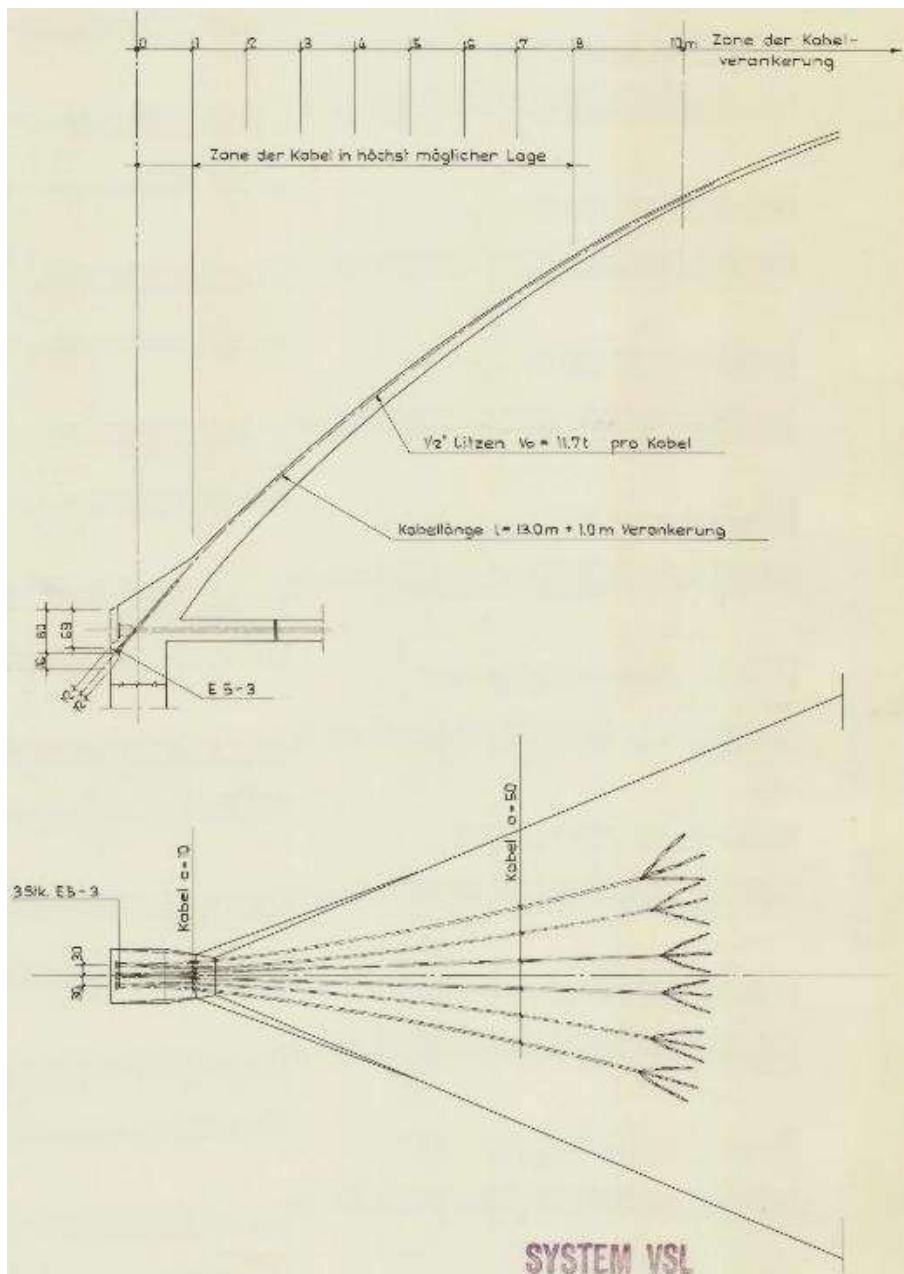
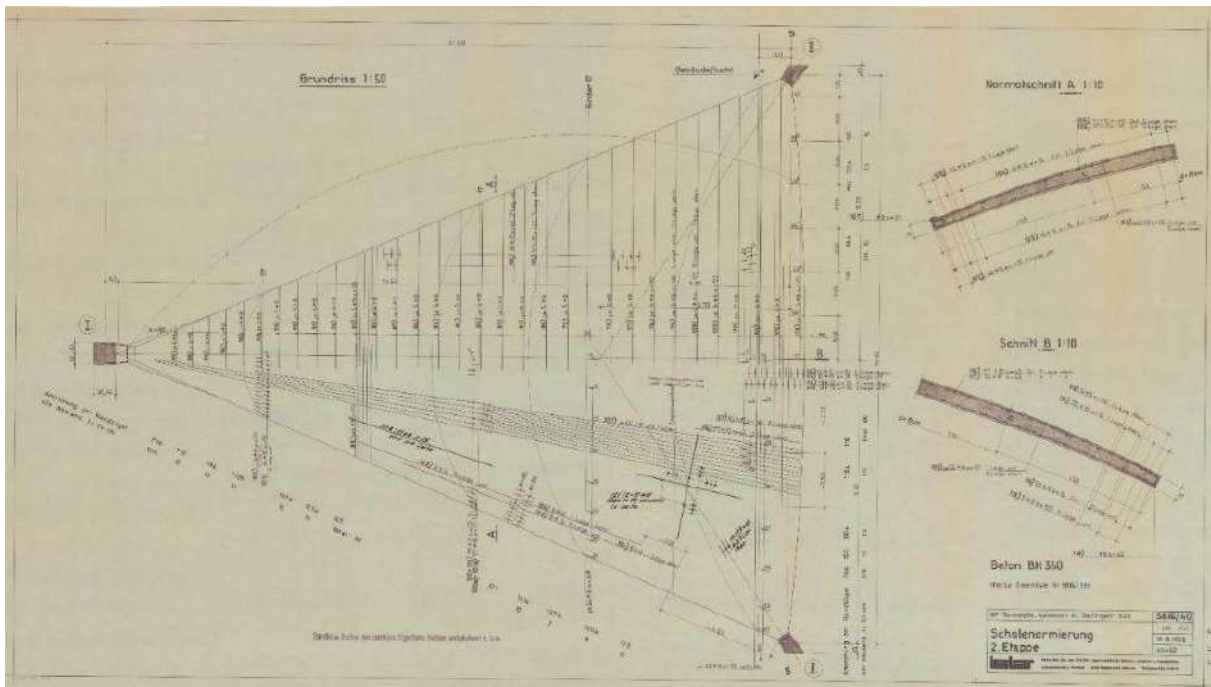


Figura IV.34. Tavola con l'indicazione dei cavi metallici (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0135_R3_1).

L'apparente difformità tra gli elaborati delle diverse tavole potrebbe spiegarsi considerando gli inevitabili cambiamenti che

spesso si apportano in fase di costruzione, quando cioè tutto quanto progettato viene messo alla prova dei fatti e migliorato. L'elaborato riguardante l'armatura del guscio (in scala 1:50) (Figura IV.35), utile nella fase di quantificazione della quantità e delle tipologie di ferri utilizzati, contiene al suo interno altre indicazioni, quali la tipologia di calcestruzzo (Beton BH350), la disposizione delle barre longitudinali e trasversali, nonché un inquadramento in scala maggiore (1:10) sui lati del guscio, da cui si evince oltre alla variazione dello spessore anche la presenza di rompigoccia nei bordi inferiori⁴⁰.

Figura IV.35. Tavola con l'armatura del guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0135_R3_3).



⁴⁰ Oltre a ciò, nei due lati maggiori del guscio, superiormente, il bordo di calcestruzzo è leggermente più spesso, di circa 2 cm, in modo da creare una linea di gronda che convoglia l'acqua piovana alla base del guscio, evitando così lo stillicidio libero.

La distinta dei ferri è stata tabellata e, per ognuno di questi, è stata riportata l'indicazione delle quote dei ferri sagomati, l'indicazione della posizione esatta in cui collocarli, il numero di pezzi uguali e i metri totali (Figura IV.36). Attraverso il computo metrico Isler ha ricavato il peso totale dell'acciaio occorrente, potendo stimare i costi di costruzione con buona approssimazione (Figura IV.37).

Figura IV.36. Esempio di foglio con distinta dei ferri (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_A365_Tab_14).

H. ISLER DIPL. ING. BURGDORF Poststraße 5-Tel: (034) 24320 Lynschneichen Tel. (034) 32044						Blatt Nr. 6 Essenliste Nr. 124/125			Blatt Nr. 3 Essenliste Nr. 124/125				
Bauprojekt: St-Deckel, Autokabinen, Rohlingen - 1/2/1						Verleget: Sacke & Exp. F. Isler			Stahlwerke: Stahl II				
Essenliste Nr. 124/125 zu Plan Nr. 124/125 Dat: 2.2.41						Verleget: Pos. 12			Verleget: Pos. 13				
Verleget	Pos.	Q	Abmessungen	Stück	Stück m	Total m ²	Verleget	Pos.	Q	Abmessungen	Stück	Stück m	Total m ²
				19	10	190							
				20	10	200							
				21	10	210							
				22	10	220							
				23	10	230							
				24	10	240							
				25	10	250							
				26	10	260							
				27	10	270							
				28	10	280							
				29	10	290							
				30	10	300							
				31	10	310							
				32	10	320							
				33	10	330							
				34	10	340							
				35	10	350							
				36	10	360							
				37	10	370							
				38	10	380							
				39	10	390							
				40	10	400							
				41	10	410							
				42	10	420							
				43	10	430							
				44	10	440							
				45	10	450							
				46	10	460							
				47	10	470							
				48	10	480							
				49	10	490							
				50	10	500							
				51	10	510							
				52	10	520							
				53	10	530							
				54	10	540							
				55	10	550							
				56	10	560							
				57	10	570							
				58	10	580							
				59	10	590							
				60	10	600							
				61	10	610							
				62	10	620							
				63	10	630							
				64	10	640							
				65	10	650							
				66	10	660							
				67	10	670							
				68	10	680							
				69	10	690							
				70	10	700							
				71	10	710							
				72	10	720							
				73	10	730							
				74	10	740							
				75	10	750							
				76	10	760							
				77	10	770							
				78	10	780							
				79	10	790							
				80	10	800							
				81	10	810							
				82	10	820							
				83	10	830							
				84	10	840							
				85	10	850							
				86	10	860							
				87	10	870							
				88	10	880							
				89	10	890							
				90	10	900							
				91	10	910							
				92	10	920							
				93	10	930							
				94	10	940							
				95	10	950							
				96	10	960							
				97	10	970							
				98	10	980							
				99	10	990							
				100	10	1000							

H. ISLER DIPL. ING. BURGDORF Lyssachschachen Tel. (034) 320 4

Bauobjekt: BP-Tankstelle, Autobahn N1 Deitingen-Süd

Verlegeort: Stahlstützen im EG. Stahlorte: ST 42-3

Stückliste Nr. SB16/115 zu Plan Nr.: SB16/15 Dat.: 8. 2. 68 Gez.: bi

Pos.-Nr.	anzl.	Benennung	Profil	Länge mm		Gewicht kg		Bemerkungen
				abzugs	total	m ²	total	
1	30	Jansen R45	23,2x10,6x9,8	3420	1050	123	495	Typ. A+B
2	22	Fussplatte	140x20-230	230	7,14	220	1588	Typ. A+B
3	22	Kopfplatte	140x20-220	220	7,14	220	1588	Loch $\phi 10$ A+B
4	30	Dorne	$\phi 20$ mm	150	4,5	247	111	Typ. A+B
5	29	Bockplatte	180x20-260	260	7,54	288	1772	Typ. A+B
6	43	Flacheisen	80x6-250	250	1,20	188	206	Typ. A
7	103	Flacheisen	80x6-290	290	1,20	188	177	Typ. B
8	8	Fussplatte	140x20-230	230	7,14	220	1588	Loch $\phi 10$
9	8	Kopfplatte	140x20-220	220	7,14	220	1588	Loch $\phi 10$ 152 ⁺ / 157 ⁺
10	10	Bockplatte	180x20-260	260	7,54	288	1772	Loch $\phi 10$
Summe						50653		
3 % Tol.						1520		
Tol. z. Sp.						52173		

Figura IV.37. Esempio di foglio con computo metrico (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_A358_SB16_Stahlstuetzen).

Lo studio delle fotografie, soprattutto di quelle scattate in fase di costruzione dei gusci, serve a chiarire alcuni aspetti non deducibili dai disegni. Delle fotografie ritenute più significative si darà una descrizione nelle didascalie associate (da Figura IV.38 a Figura IV.42).



Figura IV.38. Fase di centinatura del guscio (Bösiger, 2011).

Come si vede, per dare la giusta forma al guscio, al di sotto della cassaforma sono stati posizionati dei tralicci d'acciaio, sorretti dall'impalcatura sottostante, in modo da avere anche una base su cui muoversi per la posa delle assi della cassaforma.



*Figura IV.39. Impalcatura del guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0140_F_1).
Da questa prospettiva si comprende, oltre alla grande quantità di tubi d'acciaio
usata per la centinatura, come le assi di legno poggino su dei tralicci curvi.*



Figura IV.40. Fase di cassetatura del guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0140_F_2).

Si nota dalla foto come, al di sopra del cassero in legno, sia stato posto prima del getto un rivestimento, probabilmente per ottenere all'intradosso una superficie senza asperità e imperfezioni.



Figura IV.41. Dettaglio dell'appoggio inferiore (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0140_F_3).

Si nota in questo caso - oltre alla trave che collega l'appoggio all'appoggio inferiore dell'altro guscio e in cui è inserito un cavo precompresso - la presenza di due cavi che collegano questo appoggio agli altri due appoggi superiori del guscio. Si tratta della soluzione temporanea messa in pratica da Isler per evitare problemi di natura strutturale prima della costruzione del secondo guscio.

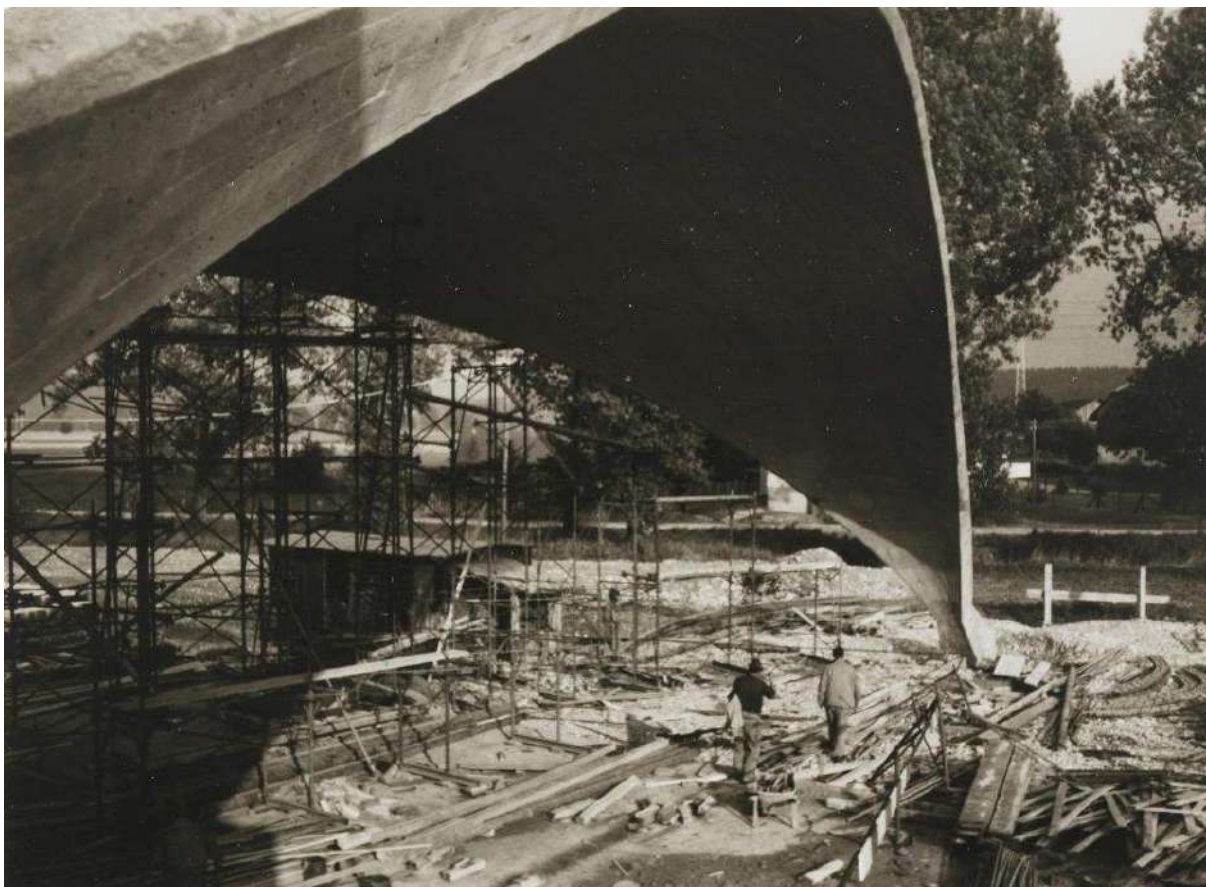


Figura IV.42. Intradosso del guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_68_21_15).
La foto risale alla fase successiva allo smontaggio della centinatura del primo guscio realizzato, nel quale sono tuttavia ancora presenti i cavi temporanei che collegano l'appoggio inferiore a quelli superiori.

IV.5.4 MODELLAZIONE STRUTTURALE E RISULTATI

La modellazione con COMSOL Multiphysics® del guscio di Deitingen ha permesso di verificarne il comportamento strutturale in tre differenti situazioni:

- guscio “semplice”, cioè senza ulteriori elementi di rinforzo;
- guscio con cavi di pretensione applicati agli appoggi;

- guscio con cavi di rinforzo applicati all'appoggio inferiore.

Per quanto riguarda i vincoli assegnati, nel caso di guscio semplice sono stati vincolate le fondazioni attraverso degli incastri (*fixed constraint*).

Nel secondo caso alle fondazioni del guscio sono stati applicati dei carrelli (*simply supported*), il vincolo tra appoggi superiori e il cavo di pretensione tra questi inserito è un *rigid connector*, mentre il cavo di pretensione inferiore (considerato di lunghezza pari alla metà della lunghezza reale), se per un'estremità è rigidamente connesso (*rigid connector*) all'appoggio inferiore, all'altra estremità è incastrato in modo da simulare l'altra metà del cavo connessa all'appoggio del secondo guscio qui non considerato.

Nel caso del guscio con i cavi di rinforzo, questi ultimi sono connessi al guscio attraverso dei *rigid connector*, mentre gli appoggi del guscio sono vincolati con incastri.

Seguendo i dati contenuti nei disegni, la sezione dei cavi di pretensione si è considerata con diametro di 6 cm, mentre quella dei cavi di rinforzo ha diametro di 1,3 cm. L'acciaio scelto per entrambe le tipologie di cavi, già contenuto nella libreria di COMSOL, è denominato "*steel AISI 4340*": si tratta di un acciaio caratterizzato da densità di 7850 kg/m³, modulo di Young di 205 GPa e coefficiente di Poisson di 0,28.

Per permettere ai cavi di pretensione di contrastare le spinte esercitate agli appoggi dei gusci a cui sono stati ancorati, si è proceduto ad applicare sui cavi una variazione di temperatura di 250 K in modo da simulare la pretensione. La variazione per unità di lunghezza è uguale a:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

dove

$\alpha=12,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{K}$ è il coefficiente di espansione termica

$L_0=1$ è la lunghezza iniziale

$\Delta T=T_{\text{ref}}-T=293,15-543,15=-250 \text{ K}$ è la differenza di temperatura applicata

Per i tre casi si è ricavata la *mesh*, della quale si riporta la *skewness* che ne deriva, da cui si evince come i triangoli che costituiscono la *mesh* si discostano dall'essere di uguali dimensioni ed equilateri nelle aree prossime agli appoggi nonché, usando il linguaggio della geometria euclidea, lungo le tre mediane del triangolo che è il guscio, dunque in corrispondenza delle variazioni di curvatura (Figura IV.43).

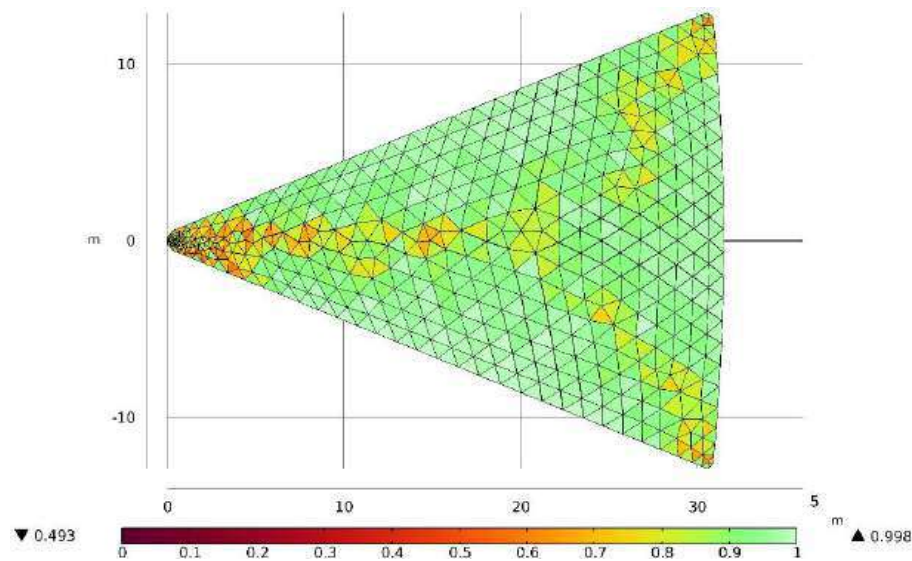


Figura IV.43. Mesh e skewness di guscio semplice e con cavi di pretensione.

Mentre la *mesh* del guscio con applicati i cavi di pretensione è uguale a quella del guscio semplice, più articolata risulta la *mesh* dopo l'applicazione dei cavi di rinforzo: infatti, nell'area di in-

fluenza dei cavi i triangoli componenti la *mesh* sono di dimensioni inferiori rispetto al resto del guscio, diminuendo in tal senso proprio il valore della *skewness* (Figura IV.44).

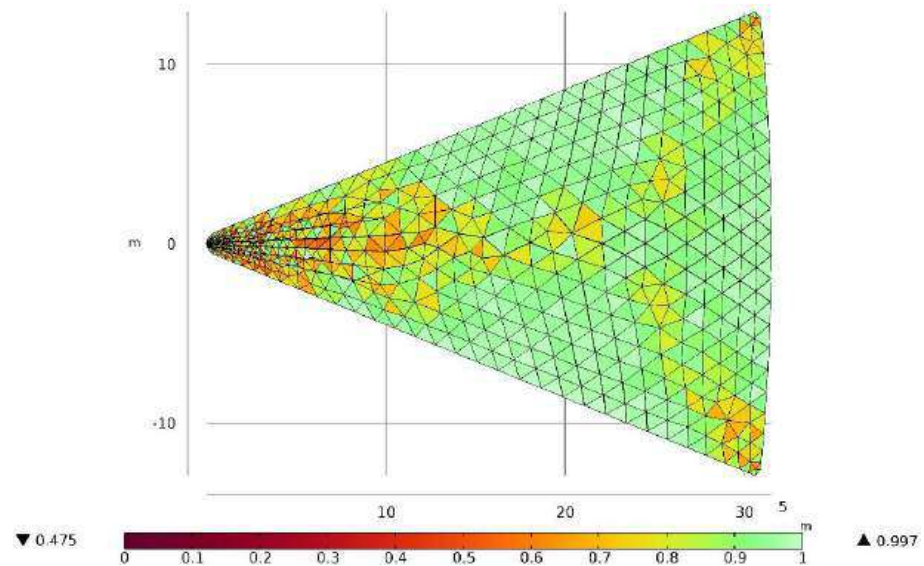


Figura IV.44. Mesh e skewness del guscio con cavi di rinforzo.

I valori tabellati dei punti con l'indicazione dei diversi spessori (Tabella 2), inseriti all'interno di COMSOL e convertiti in un'unica funzione, sono stati interpolati a formare dei piani verticali, paralleli al piano yz ed equidistanti tra loro (Figura IV.45). L'intersezione di detti piani con la superficie del guscio ha come risultato proprio il guscio con gli spessori variabili assegnati nelle diverse zone, visibile graficamente attraverso una gamma di colori giacenti sul guscio (Figura IV.46), a conferma della corrispondenza del risultato con i dati di partenza.

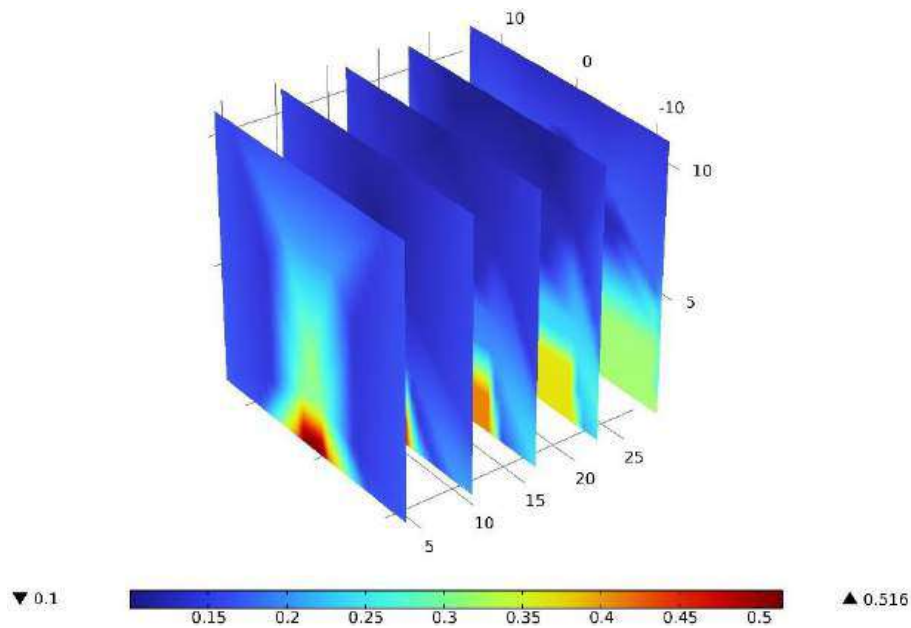


Figura IV.45. Piani risultanti dall'interpolazione.

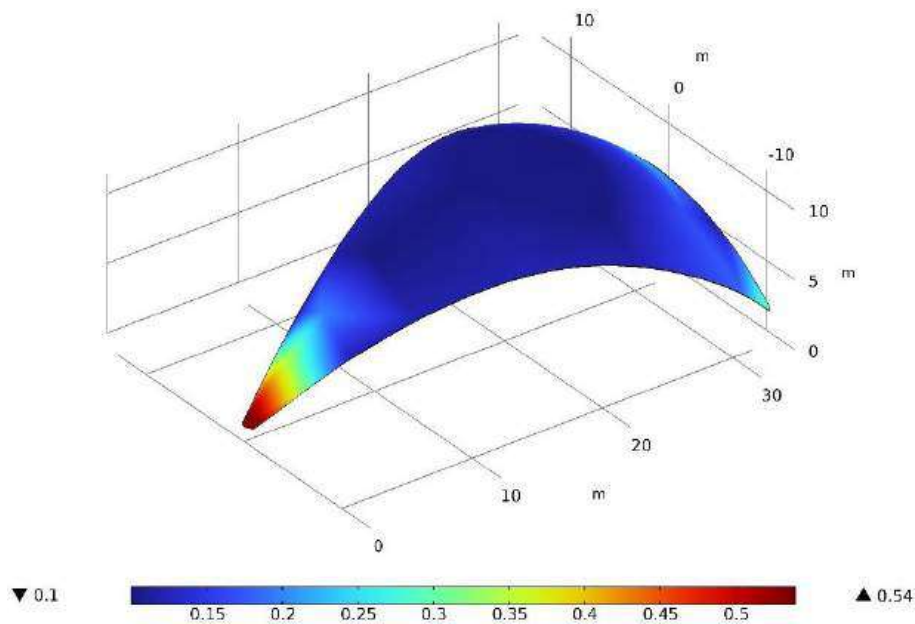


Figura IV.46. Spessore variabile del guscio.

L'integrale della superficie (*surface integration*) ha consentito di ricavare i valori di area e volume del guscio oggetto di studio:

per ricavare l'area è stato sufficiente integrare per il valore 1, mentre per ricavare il volume si è integrata la superficie per lo spessore del guscio. Da ciò si sono determinati i valori:

$$A= 509,58 \text{ m}^2$$

$$V= 71,38 \text{ m}^2$$

Nel guscio privo di rinforzi, le azioni su di esso esercitate conducono ad una configurazione deformata in cui gli spostamenti di maggiore entità (di circa 18 mm) si verificano in corrispondenza dei due bordi di lunghezza maggiore del guscio, essendo ciò influenzato sia dalla maggiore luce ricoperta sia dalla differenza di quota tra l'appoggio inferiore e gli appoggi superiori (Figura IV.47 e Figura IV.48).

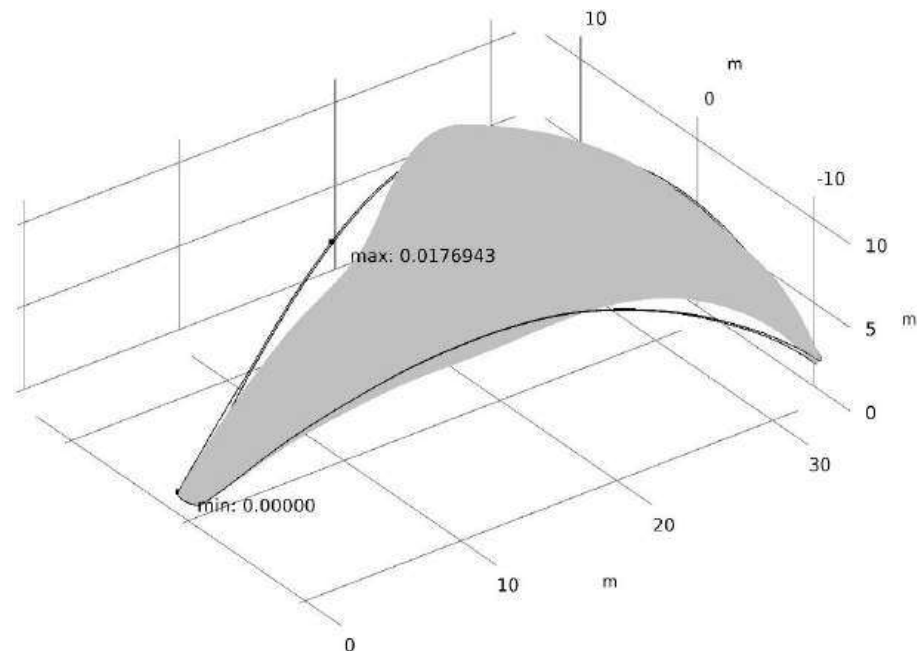


Figura IV.47. Configurazione deformata (amplificata di un fattore uguale a 100 per renderla visibile) del guscio e indicazione degli spostamenti massimo e minimo.

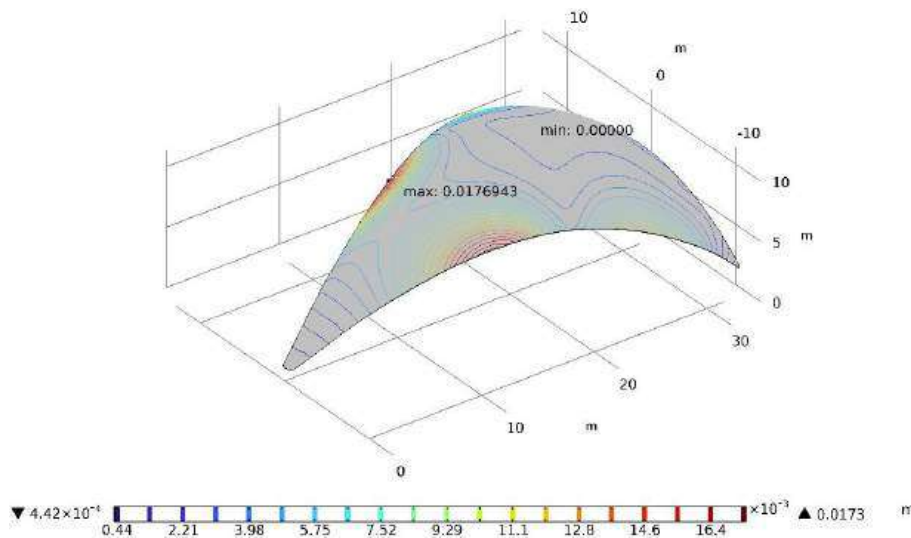


Figura IV.48. Spostamenti del guscio.

L'inserimento dei cavi di pretensionamento in corrispondenza dei tre appoggi ha come effetto la riduzione del modulo del vettore spostamento massimo da 18 a 15 mm (Figura IV.49), mentre l'andamento degli spostamenti lungo la superficie del guscio rimane pressoché inalterato (Figura IV.50). Ciò a dimostrazione dell'efficacia dell'inserimento dei cavi di pretensione in luogo dei vincoli ad incastro precedentemente assegnati agli appoggi.

Figura IV.49. Configurazione deformata (amplificata di un fattore uguale a 100 per renderla visibile) del guscio con cavi di pretensione (in verde) e indicazione degli spostamenti massimo e minimo. Si noti come il massimo valore di spostamento dei cavi è nell'ordine dei 10^{-11} m.

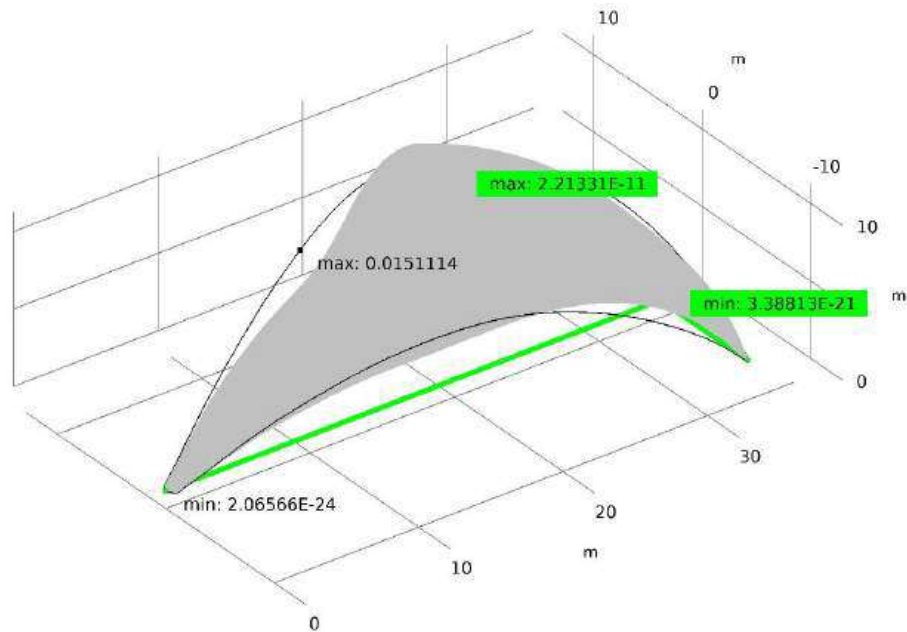
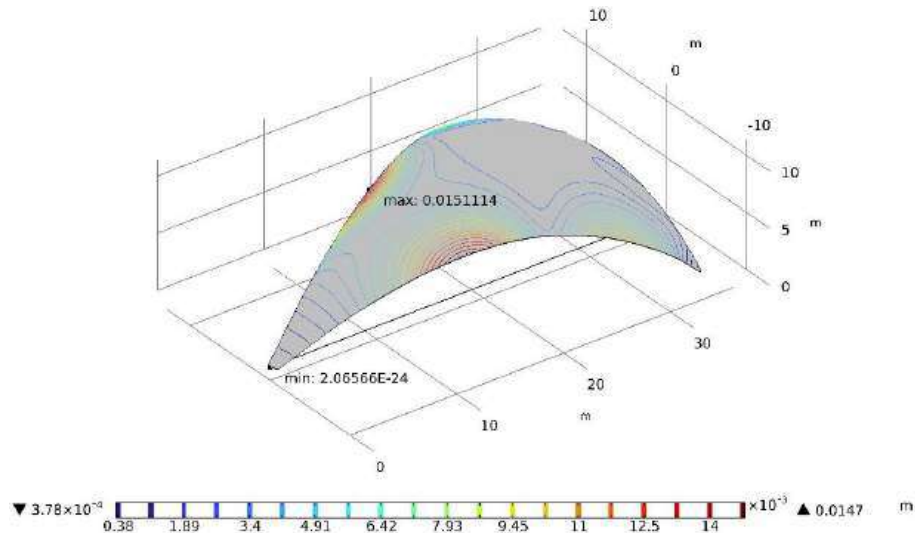


Figura IV.50. Spostamenti del guscio con cavi di pretensione.



La giustapposizione dei cavi di rinforzo al guscio semplice ha come risultato una differente configurazione deformata, da cui si evince il ruolo fondamentale esercitato proprio dai cavi (Figura

IV.51). Inoltre, è possibile notare uno spostamento pressoché nullo nella parte inferiore del guscio, nonché una drastica riduzione del valore di massimo spostamento, ridotto fino a 4 mm e localizzato nella zona centrale del bordo tra i due appoggi superiori (Figura IV.52): ciò fa a supporre che dei cavi di rinforzo potrebbero essere stati posti anche nei due appoggi in quota, ma di ciò non si hanno riscontri dalla consultazione dell'archivio o di altre fonti.

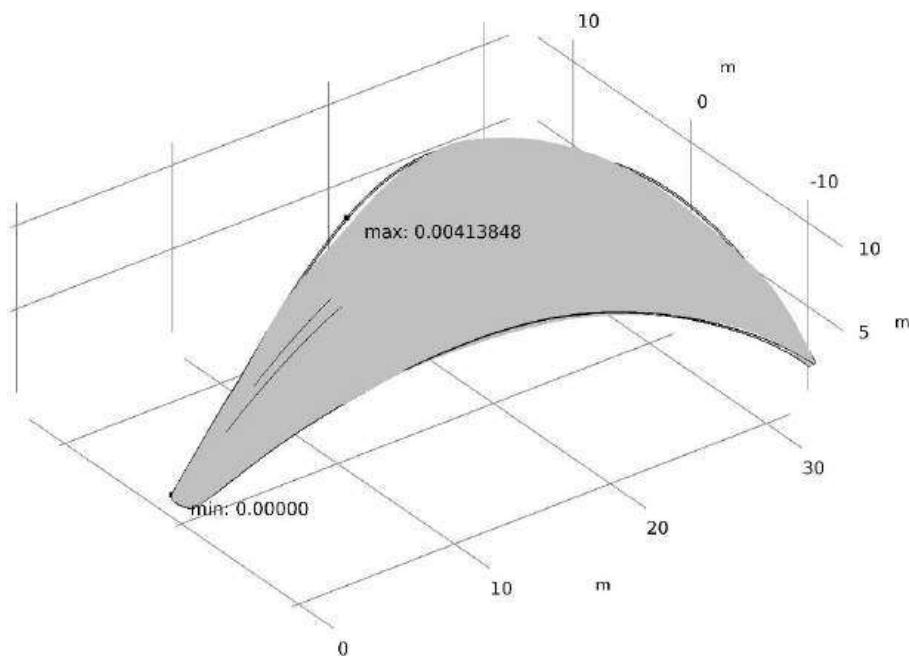


Figura IV.51. Configurazione deformata (amplificata di un fattore uguale a 100 per renderla visibile) del guscio con cavi e indicazione degli spostamenti massimo e minimo.

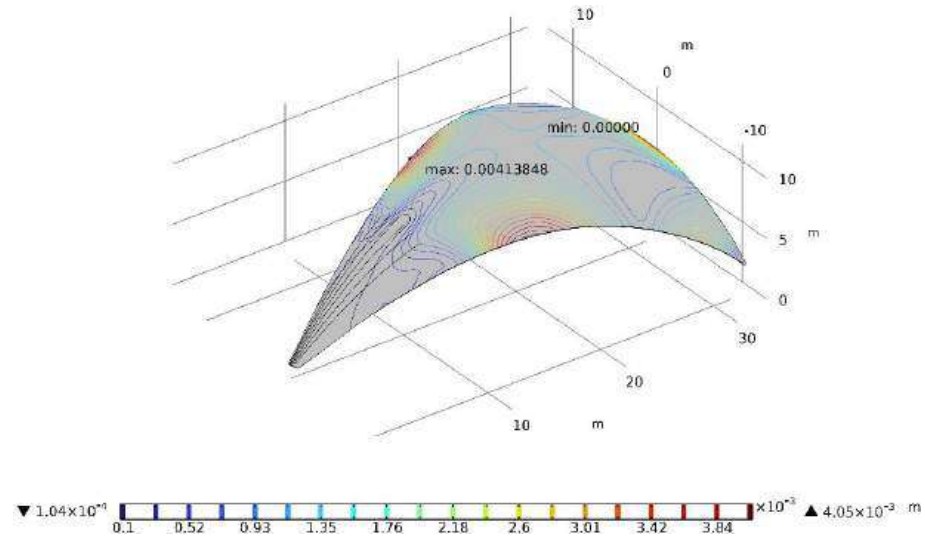


Figura IV.52. Spostamenti del guscio rinforzato con cavi.

Le tensioni principali sulla superficie del guscio, sia esso semplice che con i cavi di pretensione applicati, sono distribuite coerentemente con le deformazioni (Figura IV.53): in questo senso, le tensioni principali massime di trazione agiscono nella zona centrale del guscio al disopra dell'appoggio inferiore e nelle aree in prossimità dei bordi laterali in cui la struttura si deforma maggiormente. Le tensioni di compressione si trovano invece soprattutto lungo i bordi laterali e nell'area compresa tra gli appoggi superiori. Tensioni principali minime (in verde) agiscono nella zona del guscio posta a quota maggiore, in cui lo spessore è minimo.

Di estremo interesse si ritiene essere il paragone con le tensioni agenti sul guscio a seguito dell'introduzione dei cavi metallici (Figura IV.54): in questo caso, gli sforzi di trazione sono concentrati alle estremità dei cavi mentre le sollecitazioni di compressione agenti sulla superficie del guscio si concentrano nell'area attorno ai cavi, risultando invece pressoché nulle nel resto della superficie.

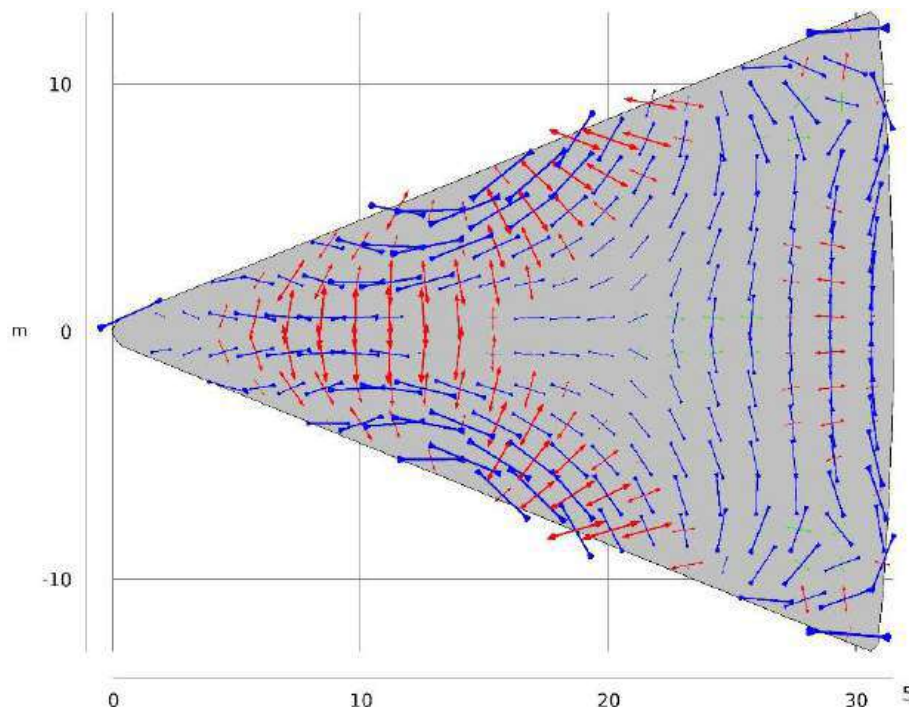


Figura IV.53. Tensioni principali agenti sulla superficie nel caso di giunco semplice e con cavi di pretensione.

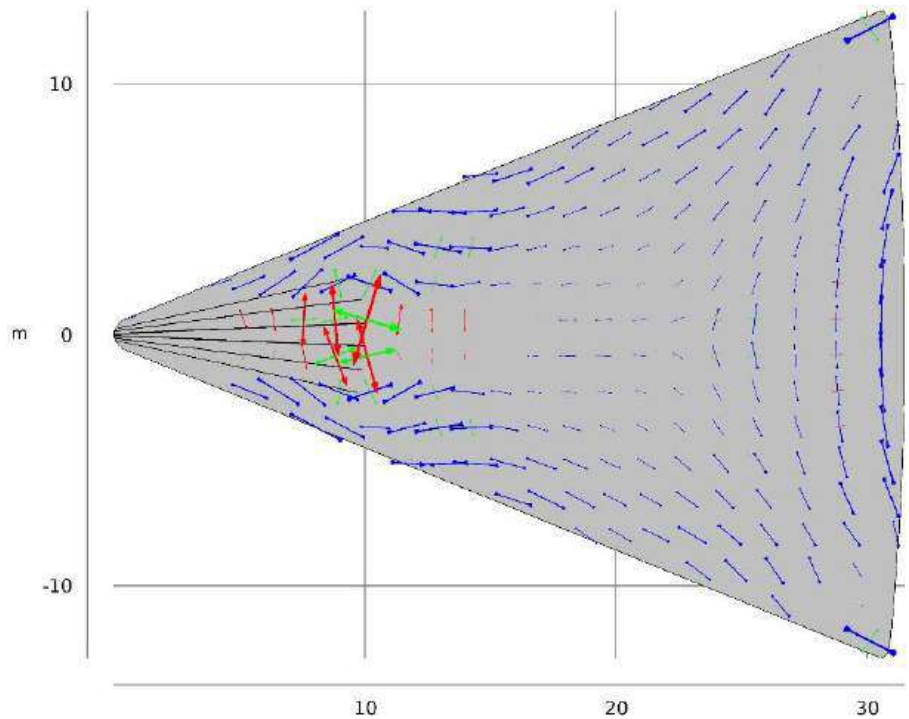
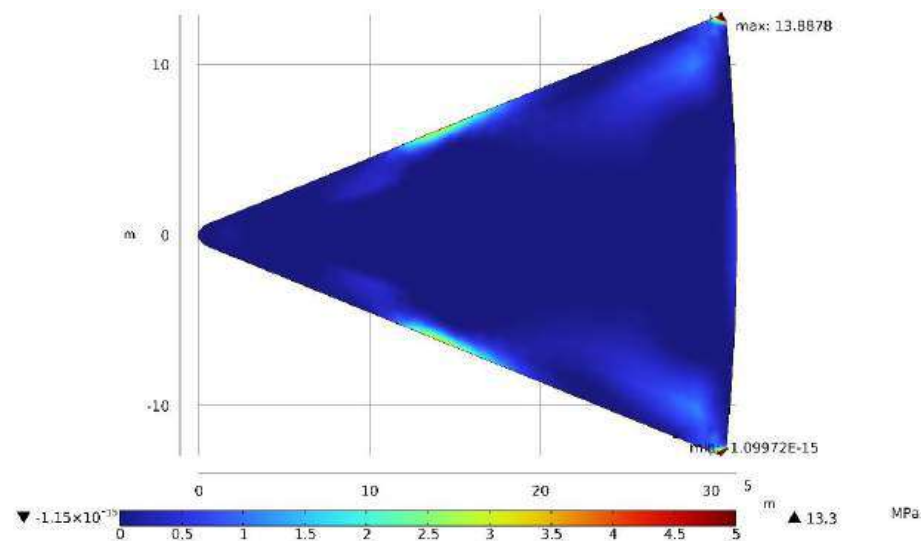


Figura IV.54. Tensioni principali agenti sulla superficie dopo l'inserimento dei cavi di rinforzo.

Analizzando gli stati di tensione principali agenti nella superficie inferiore del guscio (*stress variables at bottom surface*) (anche in questo caso, come sarà nel caso della superficie superiore, i risultati per guscio semplice e guscio con cavi di pretensione sono del tutto simili) (Figura IV.55) si può vedere come quasi l'intera superficie sia soggetta a tensioni minori di 1 MPa e le uniche aree con tensioni maggiori siano lungo i bordi centrali - dove si raggiungono i circa 2 MPa - e nei due appoggi superiori - in cui si raggiungono anche la tensione minima di 0 MPa e la tensione massima di circa 13,9 MPa -: quest'ultimo valore, molto differente dall'andamento generale lungo tutta la superficie del guscio, potrebbe derivare dalla restituzione grafica del guscio che presenta delle imperfezioni, per cui si ritiene inverosimile e dunque trascurabile.

Figura IV.55. *Principal stress at bottom surface* per guscio semplice e con cavi di pretensione.



Un simile comportamento si verifica per gli stati di tensione agenti sulla superficie superiore (*principal stress at top surface*) (Figura IV.56): le tensioni in tutta la superficie non superano gli 1,5

MPa, raggiungono i 2,5 MPa nell'appoggio inferiore e il massimo di 5,9 MPa in corrispondenza di uno degli appoggi superiori⁴¹. Anche in questo caso, dunque, i valori agli appoggi possono essere trascurati.

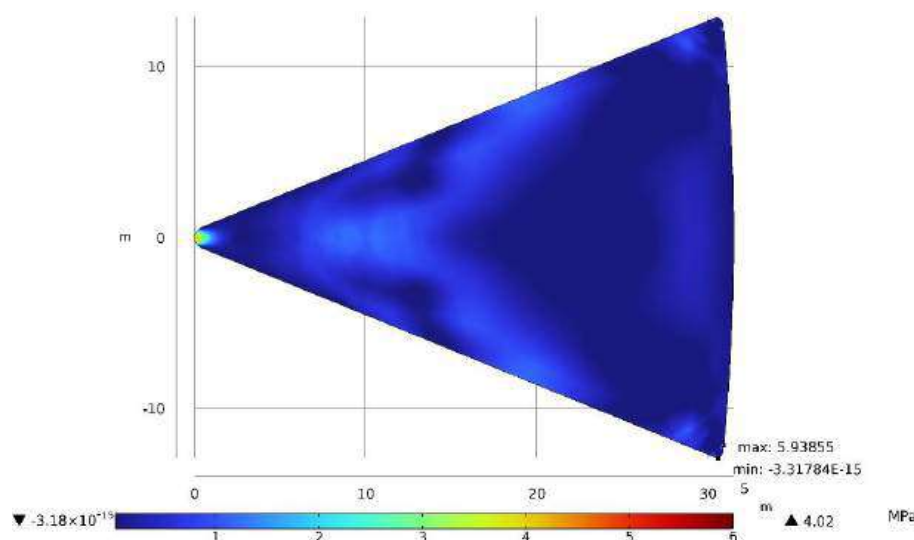


Figura IV.56. Principal stress at top surface per guscio semplice e con cavi di pretensione.

Il miglioramento apportato con l'inserimento dei cavi di rinforzo è, anche nel caso delle tensioni principali agenti sulle superfici inferiore e superiore, ben evidente. Dai grafici delle due differenti superfici emerge come, soprattutto per la *bottom surface* (Figura IV.57), le tensioni siano per quasi l'intero guscio comprese tra 0 e 0,5 MPa, raggiungendo solo un picco di 6,07 MPa in corrispondenza dell'appoggio superiore. Non molto diversa è la situazione nel caso della *top surface* (Figura IV.58), dove i valori di tensione nel guscio variano tra 0 e 1 MPa, e dove il massimo valore (circa 4 MPa) si ha, anche in questo caso, in uno dei due appoggi superiori.

⁴¹ Nello stesso appoggio si trova anche la tensione minima di 0 MPa.

Figura IV.57. Principal stress at bottom surface in seguito all'applicazione dei cavi di rinforzo.

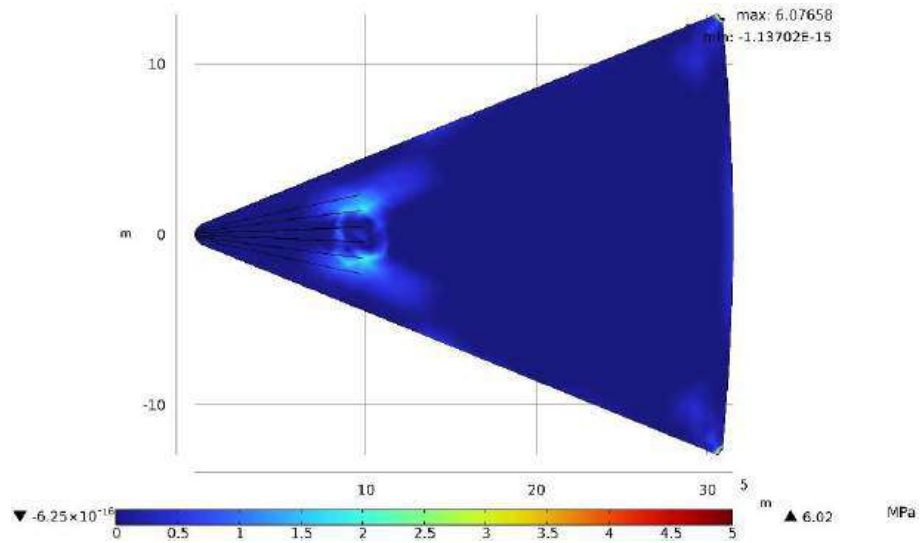
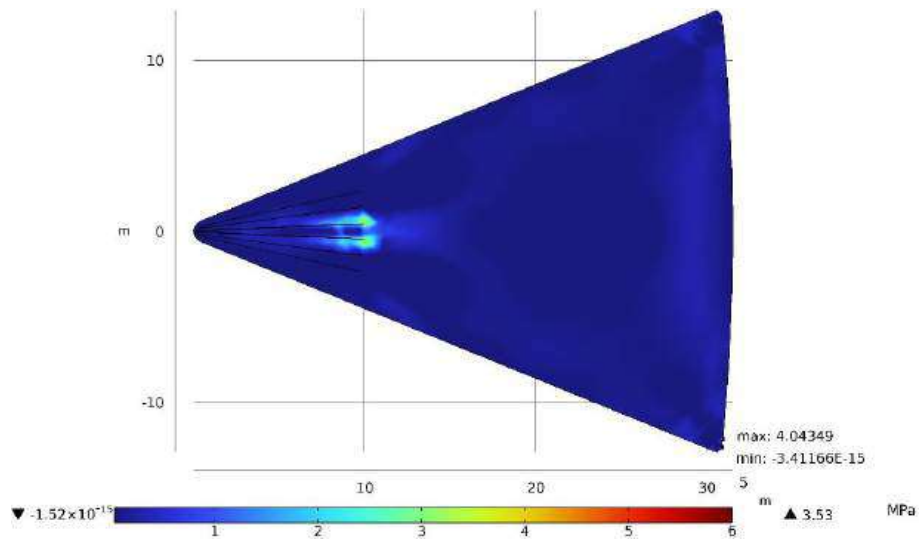


Figura IV.58. Principal stress at top surface in seguito all'applicazione dei cavi di rinforzo.



IV.6 SCHEDA DI APPROFONDIMENTO DEL GUSCIO

PISCINA DELL'HOTEL SPLENDIDE ROYAL, LUGANO

IV.6.1 QUADRO DI SINTESI

Luogo	Lugano (Canton Ticino, Svizzera)
Periodo di costruzione	1972-1974
Committente	Hotel Splendide Royal
Stato di conservazione	demolito nel 2019
Materiale	calcestruzzo armato
Concetto statico	guscio bilanciato con cavi di precompressione
Metodo di <i>form-finding</i>	<i>hängeform</i> (forma sospesa)
Geometria	
configurazione	guscio su 4 appoggi
dimensioni	pianta: 16,00x16,00 m h max: 4,86 m h degli appoggi: 0,00 m superficie: 256,00 m ²
spessore	sp. min: 8 cm sp. max: 16,50 cm (all'appoggio)
Contesto	
destinazione	impianto sportivo e ricreativo
inserimento	ambiente urbano

IV.6.2 PREMESSA

Il guscio dell'Hotel Splendide Royal di Lugano, il primo realizzato per ospitare una piscina coperta, è stato progettato e realizzato tra il 1972 e il 1974 e demolito nel 2019, per permettere una riconfigurazione generale dell'area esterna dell'hotel.

Il modello fisico (Figura IV.59) utilizzato per la determinazione della forma è quantomai esplicitativo del fatto che la controcurvatura ai bordi, utile sia per scopi statici che per un migliore convogliamento delle acque piovane, non è un elemento avulso e distinto dall'intero guscio, ma piuttosto è un risultato del processo di *form finding*, e dunque in perfetta continuità con l'insieme.

Figura IV.59. Modello fisico del guscio (gta Archiv/archivio Isler 217_M_7_5_872_1).



Il guscio è a pianta quadrata⁴², di lato 16 m, e raggiunge un'altezza di circa 5 m, se non si considera l'ulteriore altezza dell'oblò a chiusura dell'oculo centrale di diametro 4,50 m. Come per tutti i gusci di Isler, anche in questo caso lo spessore risulta variabile lungo l'estensione della superficie, andando dai 16,5 cm ai quattro appoggi alla base fino agli 8 cm nell'area circostante l'oculo. Inoltre, all'intradosso, e più precisamente nella parte racchiusa dalle vetrate di separazione dall'ambiente esterno, si aggiunge un ulteriore spessore di 7,5 cm dato dai pannelli isolanti integrati nel guscio⁴³ (Figura IV.60): questi sono già stati installati durante la fase di realizzazione delle casseforme, fungendo in tal modo da cassero a perdere per le successive fasi di armatura e getto del calcestruzzo (Figura IV.61).

La centina è stata organizzata secondo una serie di travi reticolari metalliche, con aste di parete esagonali, sorrette da un ponteggio

⁴² I gusci a pianta quadrata sono ricorrenti nell'opera di progettazione di Isler, basti pensare ad esempio alle piscine coperte di Heimberg (1978) o di Brugg (1981) progettate secondo *hängeform*, o ai Gartencenter di Zuchwil (1960, una *geometrische form*), o di Camorino (1971, una *fließform*) o, ancora alle *pneuforn* di Thunstetten (1955) e di Thun (1958-1963).

⁴³ Non si hanno notizie riguardanti la tipologia di pannelli utilizzati per l'isolamento.

a telai prefabbricati e puntellanti a loro volta delle travi in legno e delle assi tra loro distanziate in modo da collocarvi al disopra i pannelli isolanti. Le piccole dimensioni di assi e travi hanno contribuito notevolmente, nonostante l'imprescindibile esigenza di maestranze specializzate, all'economia generale del cantiere (Gozzi, 2024).

Figura IV.60. Intradosso del guscio durante la fase di realizzazione (gta Archiv/archivio Isler 217_0292_FX_1_1).



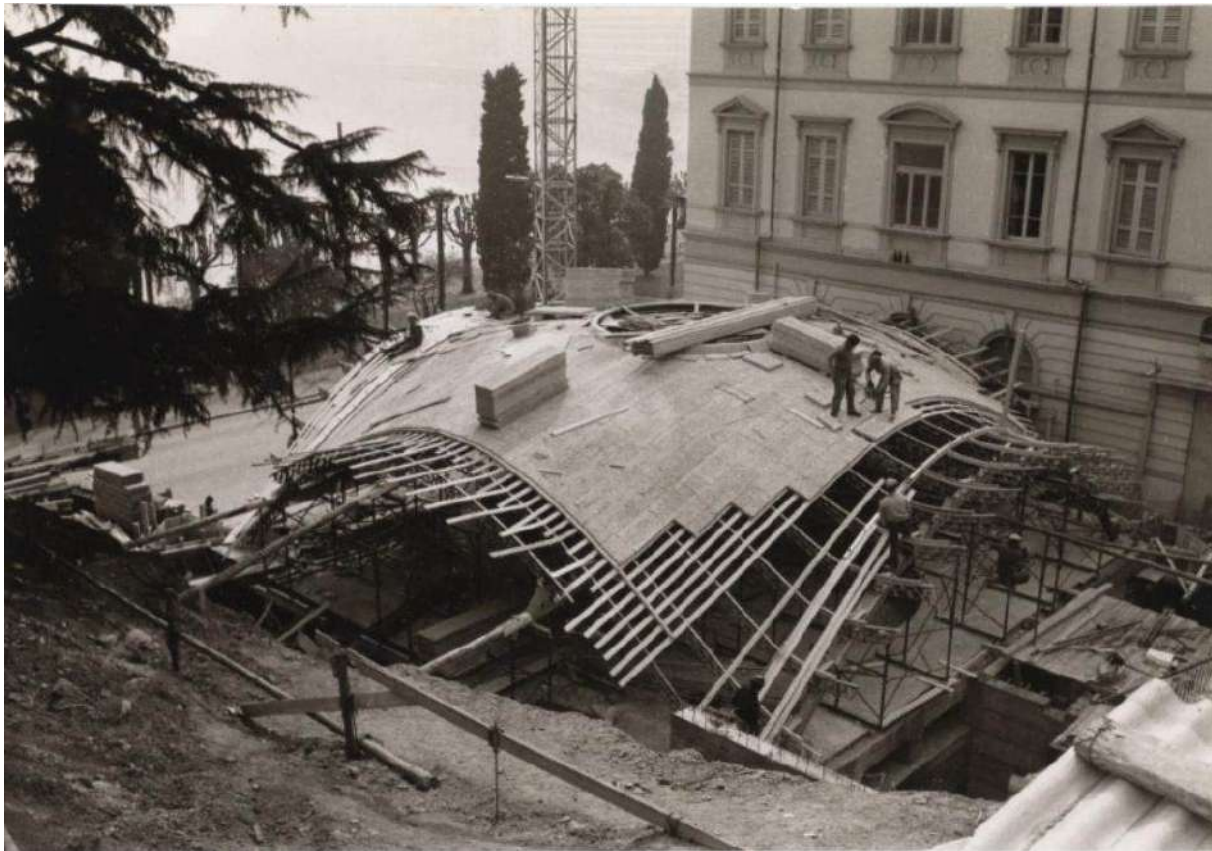


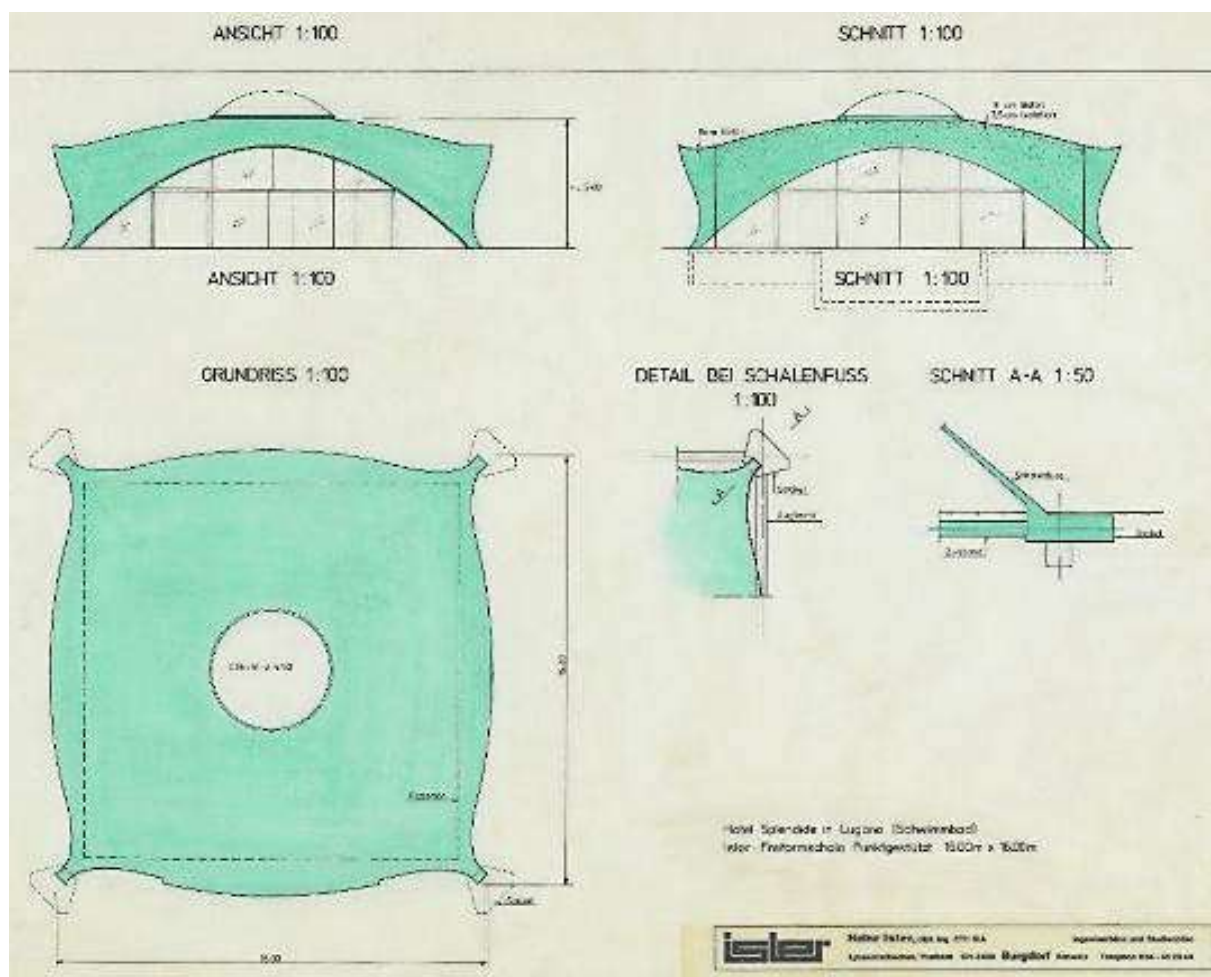
Figura IV.61. Realizzazione della cassaforma per il guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0292_FX_1_3).

Dalle tavole di progetto (Figura IV.62 e Figura IV.63), oltre al guscio in sé, emerge anche come questo sia ancorato al suolo: ogni piede del guscio (*schalenfuss*) poggia su una base (*sockel*) di altezza 50 cm posizionata al disopra di quattro pilastri di fondazione, con sezione quadrata di 50 cm, affondati "fino alla roccia buona". Il collegamento di questi pilastri avviene attraverso una trave di 30x40 cm che corre lungo il perimetro del guscio e che ospita i tiranti, le estremità dei quali sono all'interno di ognuna delle basi prima descritte.

Dai piedi del guscio si diramano diagonalmente, similmente a quanto avviene nei gusci di Deitingen, 12 barre $\phi 18$, 6 poste

all'intradosso e 6 all'estradosso, di lunghezza di circa 3,60 m (nella loro proiezione in pianta): è interessante notare come, mentre le barre superiori sono poste parallelamente l'una rispetto all'altra, le barre inferiori sono invece disposte a raggiera in modo da influenzare, con il loro apporto strutturale, una più ampia zona dell'intradosso del guscio.

Figura IV.62. Pianta, prospetto, sezione e particolari del guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_IK_8_7).



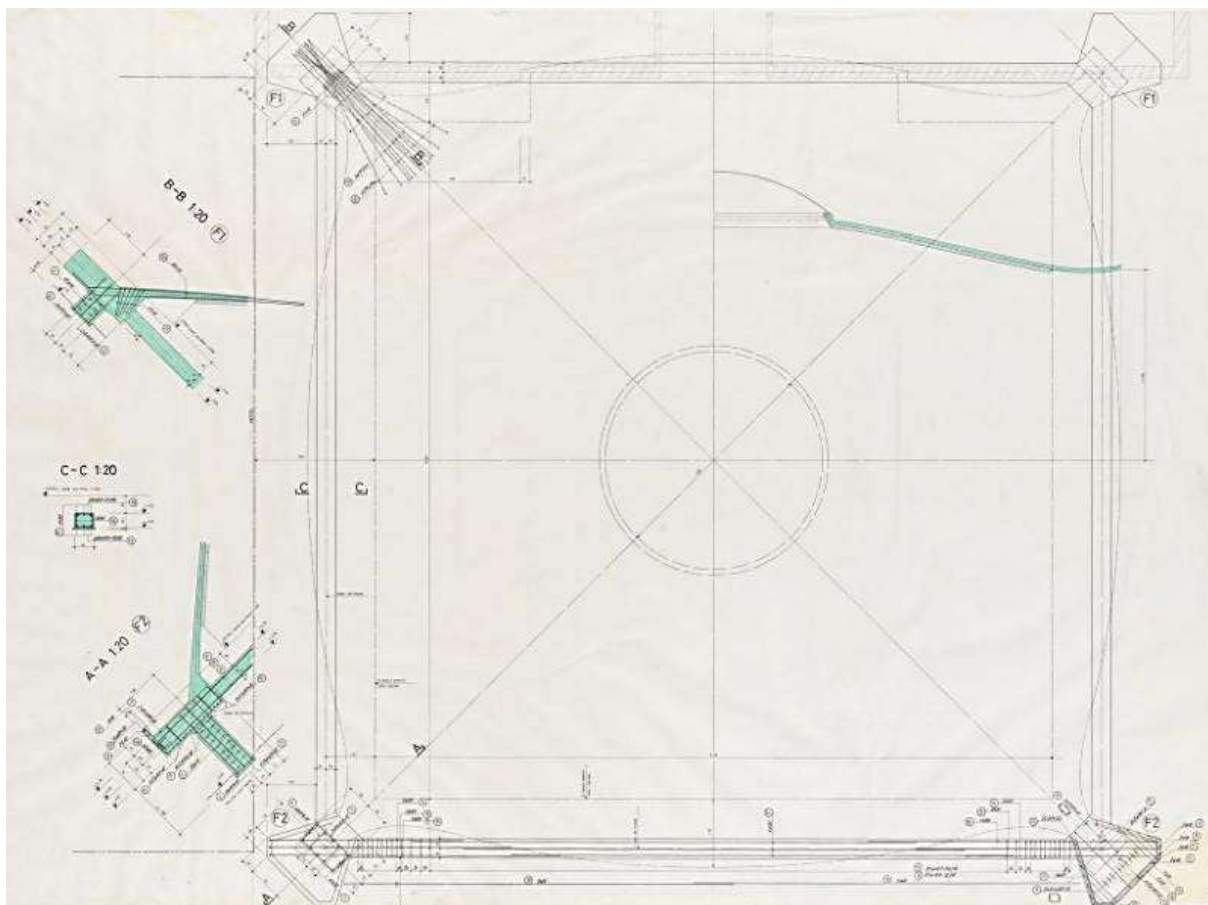


Figura IV.63. Tavola di dettaglio del guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0292_2).

IV.6.3 MODELLAZIONE STRUTTURALE E RISULTATI

Le fasi seguite per giungere alla modellazione strutturale, e dunque ai risultati che questa restituisce, del guscio di Lugano sono simili a quelle messe in atto per il caso studio di Deitingen.

La modellazione del guscio (Figura IV.64), su Rhinoceros, è stata possibile grazie ai disegni di progetto di cui si è già detto e che hanno permesso di definire dimensionalmente il guscio in ogni sua parte, dagli appoggi fino all'oculo in sommità.



Figura IV.64. Guscio modellato su Rhinoceros.

Nel programma di modellazione strutturale, al guscio sono stati assegnati vincoli ad incastro nei piedi che poggiano sulle quattro basi, mentre i bordi e il perimetro dell'oculo sono stati mantenuti come bordi liberi (Figura IV.65). Il materiale è uguale a quello descritto nella parte generale, mentre l'offset è stato assegnato come *"bottom surface on boundary"*. Anche in questo caso, l'unica forza agente è la forza di gravità.

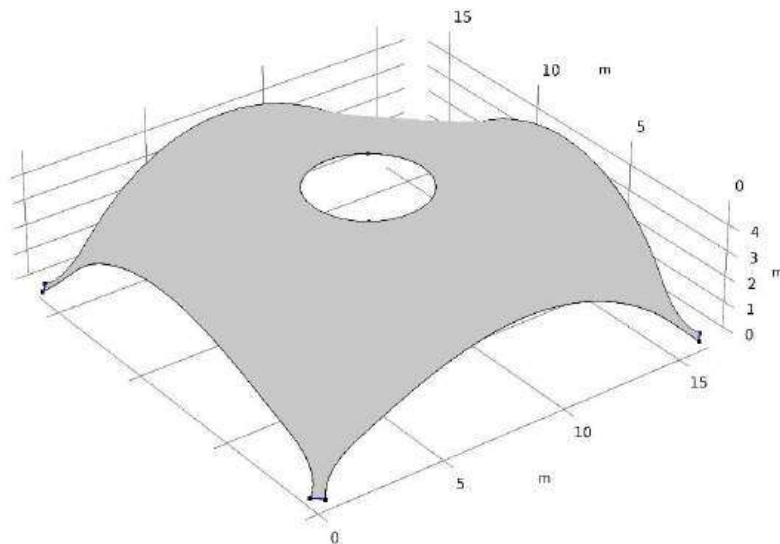


Figura IV.65. Bordi liberi, in nero, e appoggi vincolati, in blu, del guscio.



Più complicata è risultata invece la definizione dei diversi valori dello spessore: dai disegni di Isler presenti in archivio è stato ricavato soltanto lo spessore minimo di 8 cm che va dall’oculo fino ai quattro bordi laterali, mentre l’altra misura certa dello spessore è quella di 16,5 cm ai piedi del guscio (Gozzi, 2024); per gli spessori intermedi si sono assegnati dei valori decrescenti dagli appoggi verso l’oculo, ottenendo una distribuzione ritenuta accettabile di tali valori, in seguito tabellati (Tabella IV.4) e utilizzati per lo studio su COMSOL attraverso l’interpolazione (Figura IV.66 e Figura IV.67).

x [m]	y [m]	z [m]	s [m]
-0.4892	7.8911	4.0137	0.0800
-0.0092	15.7902	-0.0003	0.2500
0.0000	0.0000	0.0000	0.2500
0.6163	0.6163	0.7293	0.1875
0.6166	15.1644	0.7329	0.1875
1.8439	7.8952	4.1148	0.0800
1.9618	13.8191	2.7732	0.1250

Tabella IV.4. Valori dello spessore per i diversi punti.

1.9666	1.9666	2.7273	0.1250
3.6135	12.1673	4.0910	0.0800
3.6184	3.6184	3.9995	0.0800
3.8687	7.8909	4.6177	0.0800
5.0464	10.7343	4.6351	0.0800
5.0465	5.0469	4.5788	0.0800
5.6405	7.8906	4.9230	0.0800
6.2960	9.4847	4.9233	0.0800
6.3009	6.3009	4.9066	0.0800
7.8914	13.9366	4.1147	0.0800
7.8922	11.9125	4.6177	0.0800
7.8930	10.1500	4.9218	0.0800
7.8948	5.6404	4.9230	0.0800
7.8955	3.8688	4.6178	0.0800
7.8963	1.8538	4.1166	0.0800
7.8973	-0.4891	4.0137	0.0800
7.9066	16.2702	4.0135	0.0800
9.4846	6.2958	4.9229	0.0800
9.4897	9.4896	4.9104	0.0800
10.1501	7.8906	4.9218	0.0800
10.7342	5.0467	4.6327	0.0800
10.7345	10.7344	4.6103	0.0800
11.9123	7.8905	4.6178	0.0800
12.1572	3.6233	4.0906	0.0800
12.1622	12.1622	4.0662	0.0800
13.8188	1.9614	2.7685	0.1250
13.8240	13.8239	2.7636	0.1250
13.9267	7.8904	4.1165	0.0800
15.1640	0.6161	0.7324	0.1875
15.1643	15.1642	0.7334	0.1875
15.7903	-0.0092	-0.0011	0.2500
15.7905	15.7905	-0.0004	0.2500
16.2702	7.8906	4.0136	0.0800

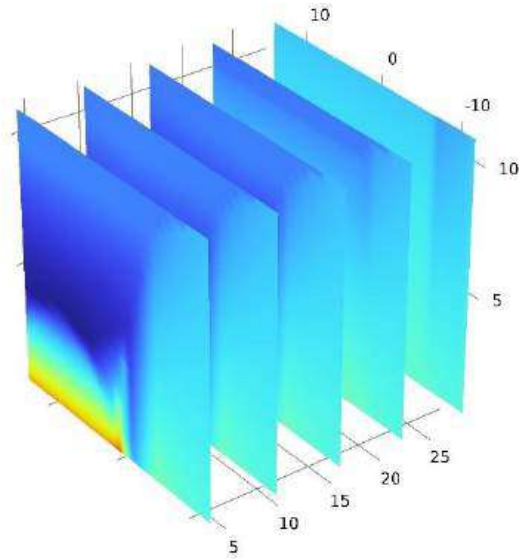


Figura IV.66. Interpolazione dello spessore.

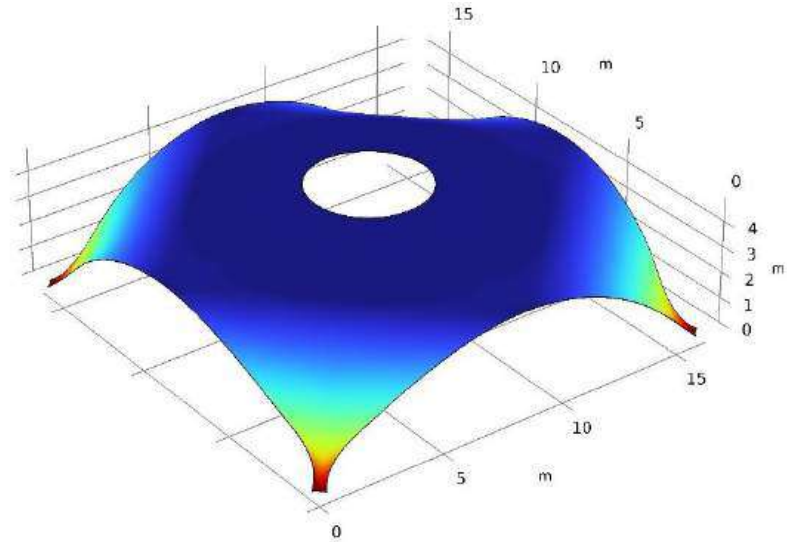
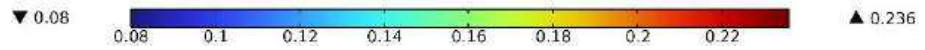
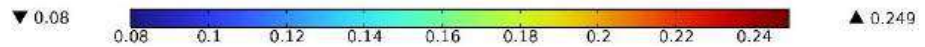


Figura IV.67. Variazione dello spessore nel guscio.



Per questo caso studio, si prendono in considerazione e si confrontano i risultati ottenuti, anche in questo caso, per il guscio

“semplice” e per il guscio con applicati i tiranti che collegano le quattro basi. Come nel caso di Deitingen, per mettere in tensione i tiranti è stata applicata una espansione termica negativa, usando gli stessi parametri visti per il caso studio precedente. Per quanto riguarda la *mesh* risultante, in entrambi i casi che si considerano, dai valori cromatici risultanti dalla *skewness* (Figura 68), si evince come i triangoli più regolari siano localizzati tra i bordi e l’oculo, mentre agli appoggi e nella circonferenza dell’oculo, oltre che nell’area di unione tra appoggi e circonferenza, si hanno i valori minimi di *skewness* e dunque i triangoli risultano di dimensioni minori ed irregolari.

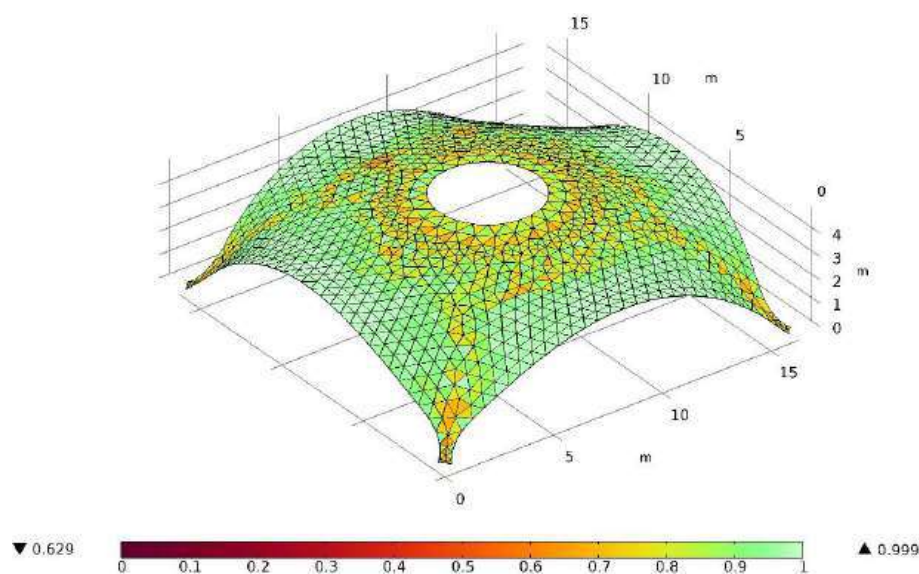


Figura IV.68. Mesh e skewness di guscio semplice e con tiranti.

L’applicazione dei tiranti ha effetto sulla configurazione deformata nonché sui valori di spostamento sulla superficie del guscio. Dal confronto tra la deformata del guscio semplice (Figura IV.69) e quella del guscio con tiranti (Figura IV.70) si nota che, nel secondo caso, essa risulta quasi del tutto inesistente. Ciò si

comprende meglio considerando il valore massimo del vettore spostamento, uguale a circa 4 mm nel caso di guscio semplice e a circa 0,5 mm, ben 1/8 rispetto al primo valore, nel caso di guscio con tiranti. Un simile rapporto si vede anche dal confronto dei grafici dello spostamento (Figura IV.71 e Figura IV.72), da cui si nota anche come l'andamento delle curve di spostamento, sebbene nel secondo caso diradato e con valori cromatici che indicano i minori valori sulla superficie del guscio, si mantenga inalterato nei due casi.

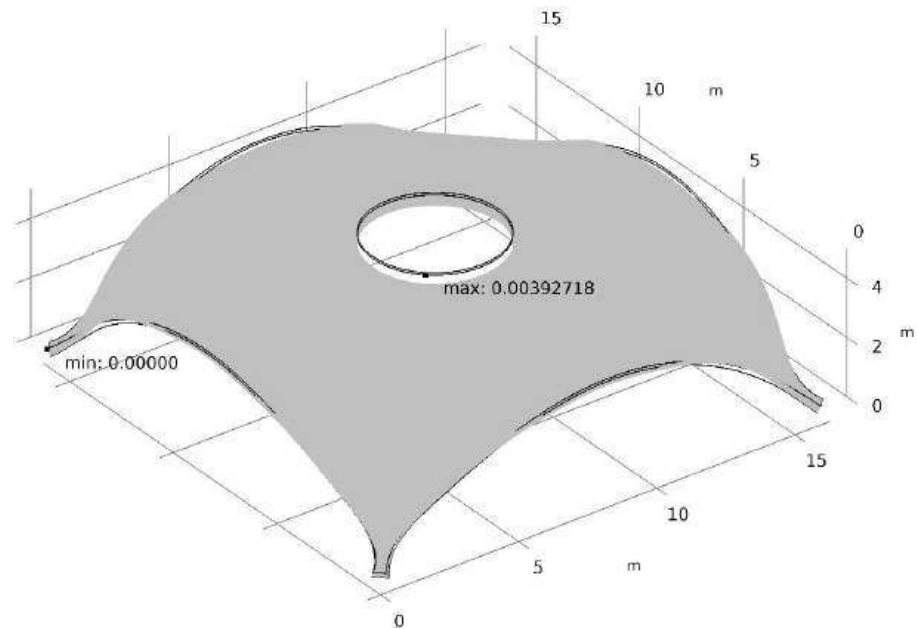


Figura IV.69. Configurazione deformata (amplificata di un fattore uguale a 100 per renderla visibile) del guscio semplice.

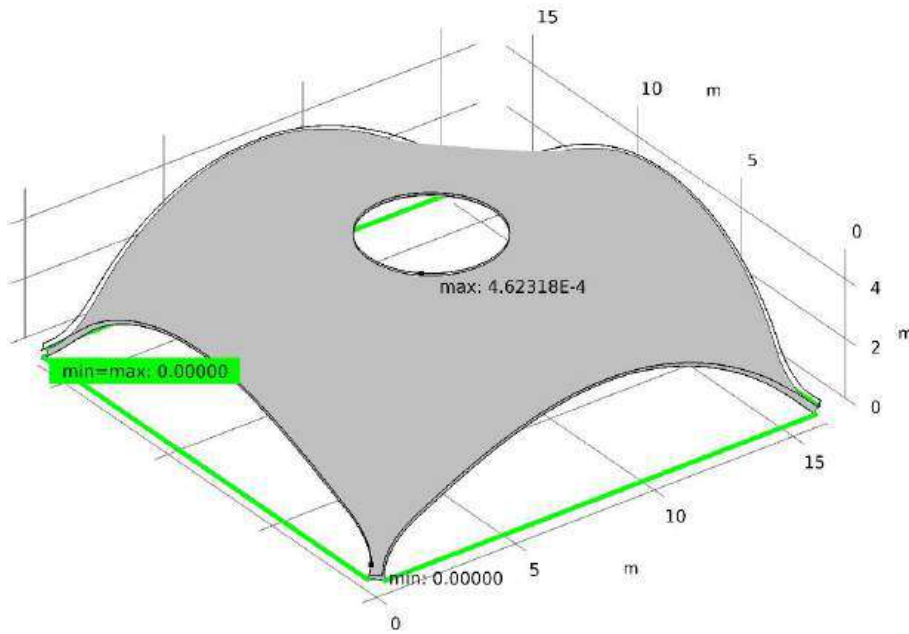


Figura IV.70. Configurazione deformata (amplificata di un fattore uguale a 100 per renderla visibile) del guscio con cavi (in verde). Si noti come il valore di deformazione dei cavi sia costantemente nullo.

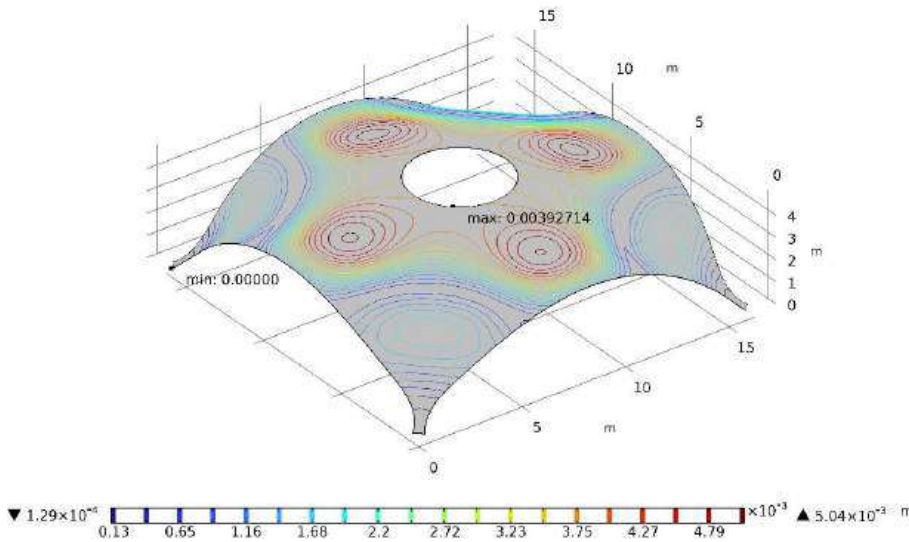
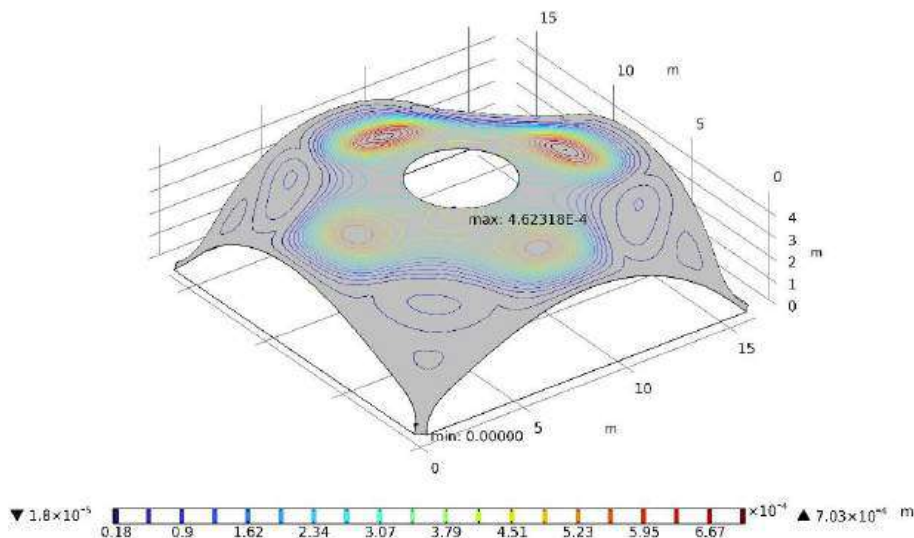


Figura IV.71. Andamento delle curve di spostamento nel caso di guscio semplice.

Figura IV.72. Andamento delle curve di spostamento nel caso di guscio con tiranti.



La distribuzione e il valore degli sforzi è ciò che maggiormente dimostra l'importanza dell'applicazione dei tiranti.

Dai grafici riportati (Figura IV.73 e Figura IV.74), si può vedere come gli sforzi principali che nel caso del guscio semplice sono distribuiti sul guscio alternando sforzi di trazione - principalmente ai quattro angoli - a sforzi di compressione - nelle aree sommitali -, con il contributo proveniente dai tiranti si annullano e, in particolare le sollecitazioni di compressione, risultano pressoché assenti.

Un simile ragionamento può farsi con le tensioni sulle superfici inferiore e superiore. In questo caso, infatti, dalle figure si può vedere come sia le *stress variables at bottom surface* (Figura IV.75) - principalmente presenti al disopra delle aree di maggiore compressione, dove si raggiungono valori di 2/2,5 MPa - che le *stress variables at top surface* (Figura IV.76) - localizzate nelle aree tese, con valori compresi tra 1 e 2 MPa -, con l'inserimento dei tiranti raggiungono dei valori uniformi compresi tra 0 e 0,5 MPa.

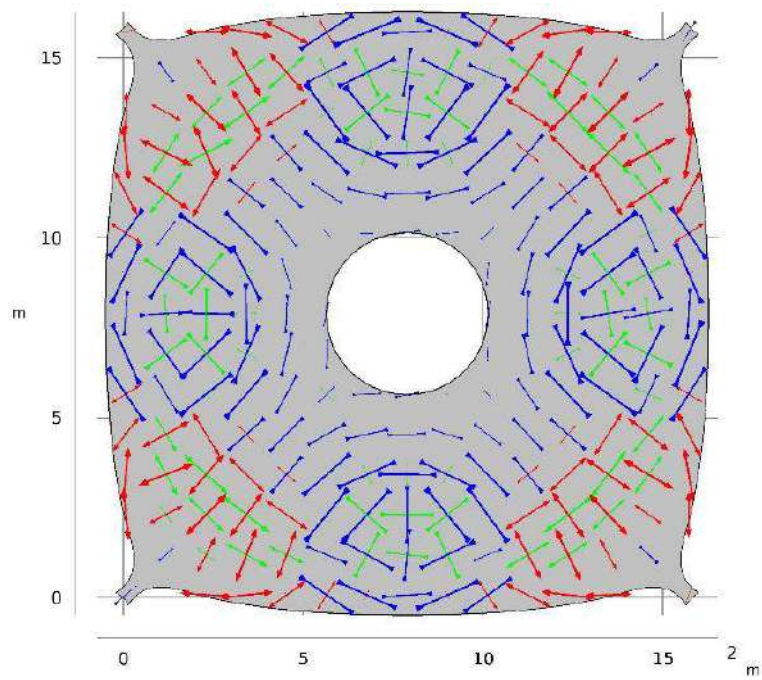


Figura IV.73. Sforzi principali del guscio semplice.

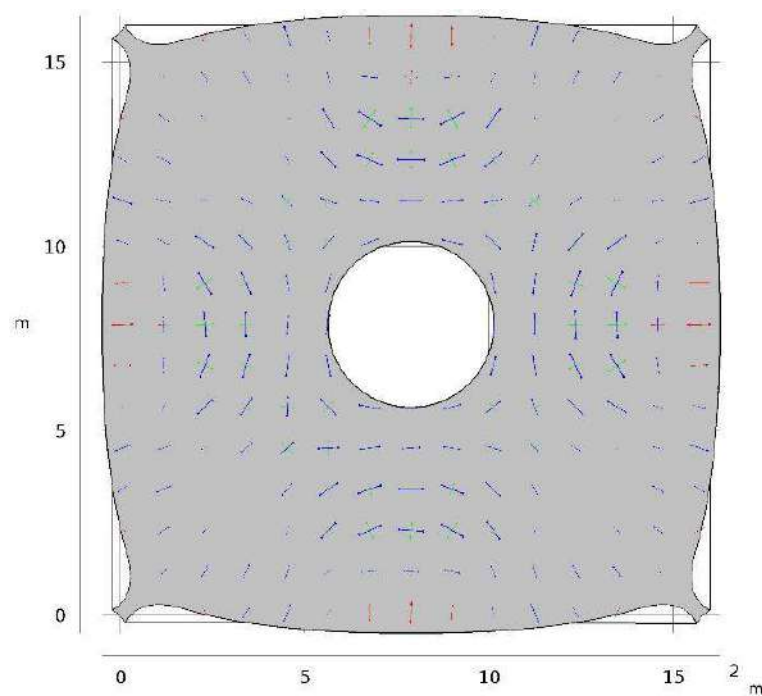


Figura IV.74. Sforzi principali del guscio con tiranti.

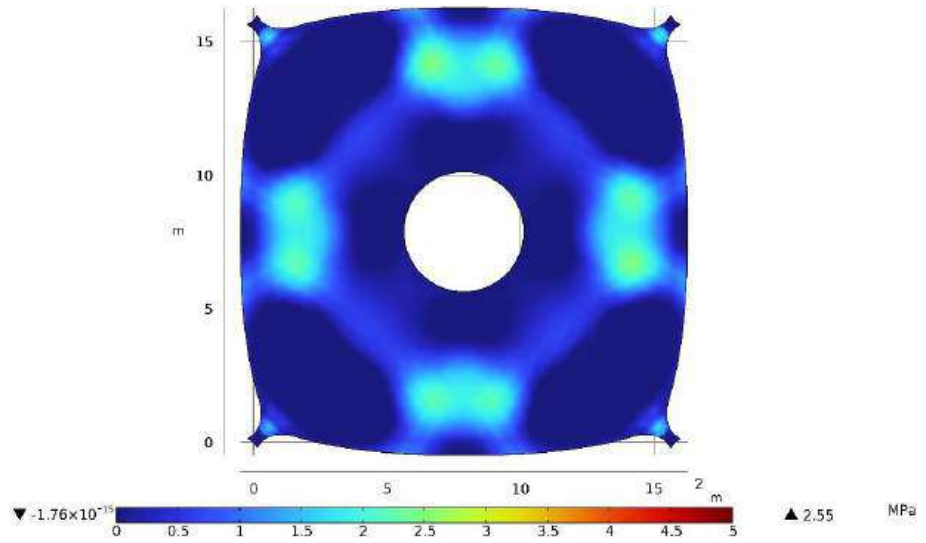
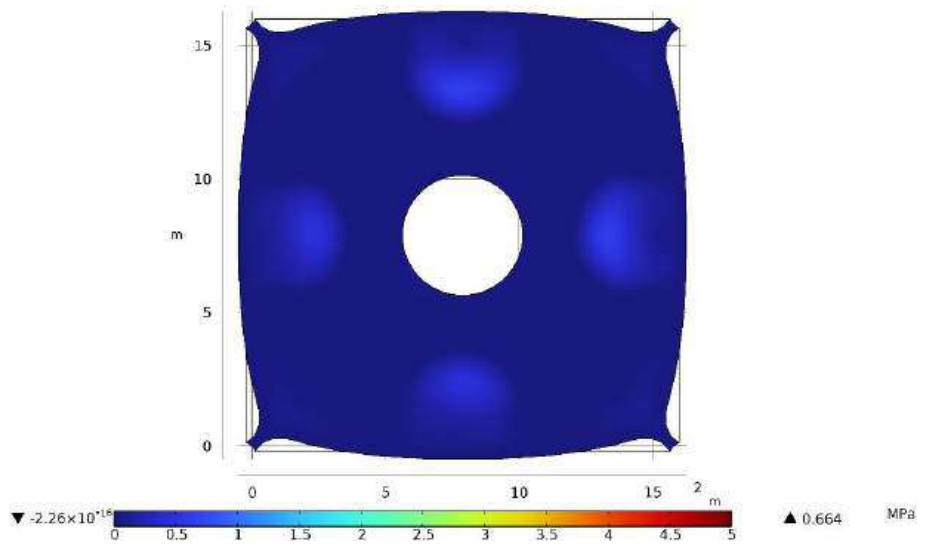


Figura IV.75. Stress variables at bottom surface per il guscio semplice e con tiranti.



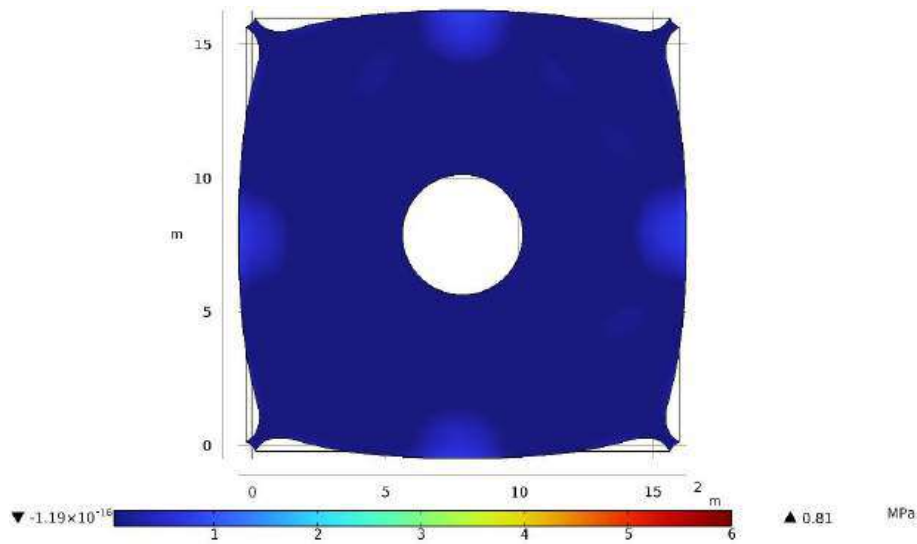
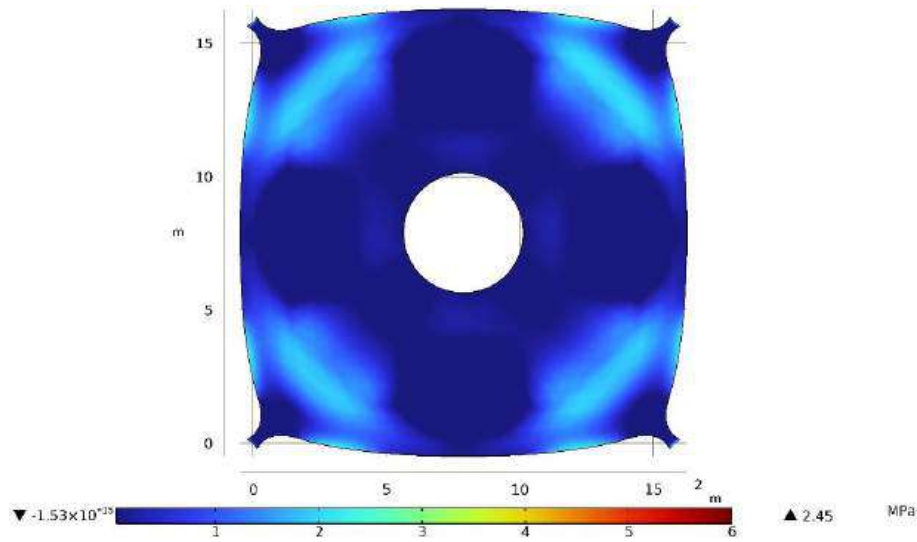


Figura IV.76. Stress variables at top surface per il guscio semplice e con tiranti.

IV.7 SCHEDA DI APPROFONDIMENTO DEL GUSCIO

MUSEO DELL'AVIAZIONE, DÜBENDORF

IV.7.1 QUADRO DI SINTESI

Luogo	Dübendorf (Canton Zurigo, Svizzera)
Periodo di costruzione	1986-1988
Committente	Verein der Freunde der Schweizerischen Luftwaffe und Stiftung Museum und historisches Material der Luftwaffe
Stato di conservazione	ottimo
Materiale	calcestruzzo armato fondazioni: Beton BH PC300kg/m ³ β w28 ≥300kg/cm ² guscio: Beton BH PC350kg/m ³ β w28 ≥400kg/cm ²
Concetto statico	guscio bilanciato con cavi di precompressione
Metodo di form-finding	<i>hängeform</i> (forma sospesa)
Geometria	
configurazione	4 gusci affiancati, ognuno adagiato su 4 appoggi
dimensioni (cadauno)	pianta: 18,60x48,00 m h max: 8,77 m h degli appoggi: 0,00 m superficie: 3800,00 m ²
spessore	sp. min: 9 cm sp. max: 22 cm (alla base)
Contesto	
destinazione	attività culturali e ricreative
inserimento	ambiente semi-urbano

IV.7.2 PREMESSA

Progettato da Isler e costruito tra il 1986 e il 1988 in un'area attigua all'aeroporto militare di Dübendorf (cittadina nei pressi di Zurigo), l'edificio che ospita il museo dell'aviazione è il risultato dell'accostamento, sui lati lunghi, di quattro gusci di uguali dimensioni (18,60x48,00 m in pianta) ottenuti attraverso il metodo della membrana sospesa.

La forma, le dimensioni e, più in generale, l'idea alla base di questa scelta non sono una novità nella produzione di Isler ma si ricollegano ad una collaudata tipologia già applicata negli anni precedenti in altre opere, in particolare per palazzetti dello sport, quali la Tennishalle Paradies ad Allschwil (1982) (Figura IV.77), il Tenniscenter ad Heimberg (1978) (Figura IV.78) e il Tenniscenter Dreilinden a Langenthal (1979-1980) (Figura IV.79).

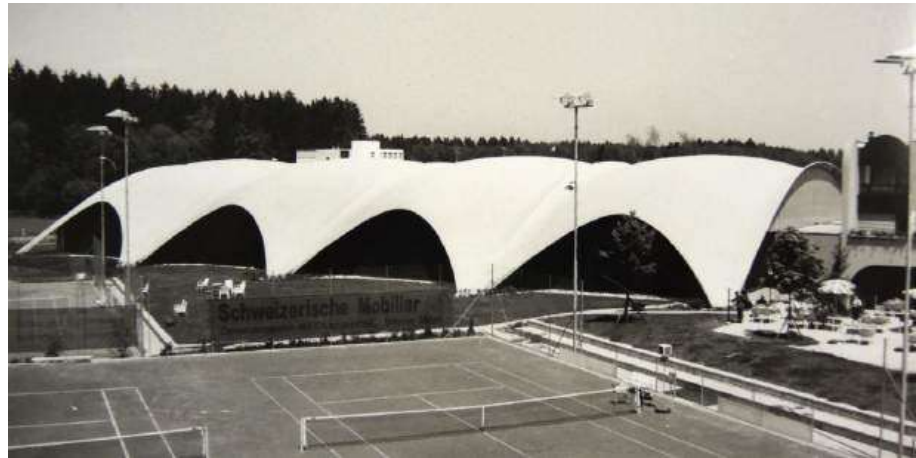


Figura IV.77. Tennishalle Paradies ad Allschwil (<https://architektur-basel.ch/eine-entdeckung-schalen-tragwerk-von-heinz-isler-in-allschwil/>).

Figura IV.78. Tenniscen-
ter ad Heimberg (gta Ar-
chiv/archivio Isler rif.
217_F_79_35_16A).



Figura IV.79. Tenniscen-
ter Dreilinden a Langen-
thal (gta Archiv/archivio
Isler rif. 217_0413_F.1).



Lo spessore apparentemente esiguo, che nella zona sommitale raggiunge la dimensione minima di 9 cm, permette al guscio di sostenere dei carichi puntuali costituiti dagli aerei appesi per l'allestimento del museo (Beckh et al., 2022) (Figura IV.80).



Figura 80. Interno del museo dell'aviazione (<https://airforcecenter.ch/bildergalerie/>).

IV.7.3 DESCRIZIONE

La determinazione e lo studio della forma attraverso i modelli fisici ha avuto, anche nel caso del guscio di Dübendorf, una rilevanza notevole. Oltre ai modelli in gesso e in vetroresina (Figura IV.81), in archivio sono presenti anche due modelli con costole (*rippenmodell*) (Figura IV.82) utili allo studio e definizione delle basi sopra le quali l'intero guscio (ovvero i quattro gusci affiancati) si sarebbero poggiati. In questo modello sono state inserite due soluzioni per le basi dell'involucro del museo, una soluzione d'angolo e una intermedia, utile per l'appoggio in cui si incontrano i due gusci affiancati.

Il modello statico (Figura IV.83), studiato attraverso una struttura in legno di supporto e con una serie di fili appesi e collegati a dei mozzetti in legno che a loro volta servono per sorreggere i carichi applicati inferiormente, risulta - data la regolarità geometrica - meno complesso del modello utilizzato per il guscio di

Deitingen: i quattro appoggi del guscio⁴⁴ sono ancorati alle basi attraverso dei perni in modo da simulare il vincolo di incastro; i punti del guscio su cui sono stati applicati i carichi sono simmetrici rispetto ai due assi di simmetria e, a giudicare dalle dimensioni degli elementi circolari presenti all'estradosso di sostegno ai fili, i carichi maggiori sono stati previsti nella calotta centrale, mentre nelle controcurvature lungo i lati lunghi si sono applicati dei carichi di minore entità.

Figura IV.81. Modello in vetroresina del guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_M_7_6_153_1).



Figura IV.82. Rippenmodell del guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_M_7_3_140_1).



⁴⁴ Anche questo guscio, come uno degli altri descritti, è in vetroresina, ma di dimensioni maggiori.



Figura IV.83. Modello statico del guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_M_7_6_154_1).

Lo studio degli elaborati riguardanti le fondazioni dell'involucro di Dübendorf (Figura IV.84) permette di individuarne le caratteristiche: si tratta, in primo luogo, di fondazioni profonde su pali di diametro 30 cm conficcati nel terreno per una profondità variabile da 40 cm a 1,05 m e lasciate sporgere sopra terra di circa 55-60 cm. Al disopra dei pali, divisi in gruppi da 3 o 4 a seconda se si trovano agli angoli della struttura o nell'area tra due gusci adiacenti, sono state realizzate le basi, di altezza 1 m, su cui sono collocati gli appoggi dei quattro gusci. Tali basi, di dimensioni 3,60x2,70 m agli angoli della struttura e 3,60x3,60 m nelle adiacenze tra i gusci, ospitano al loro interno le terminazioni dei cavi di pretensione.

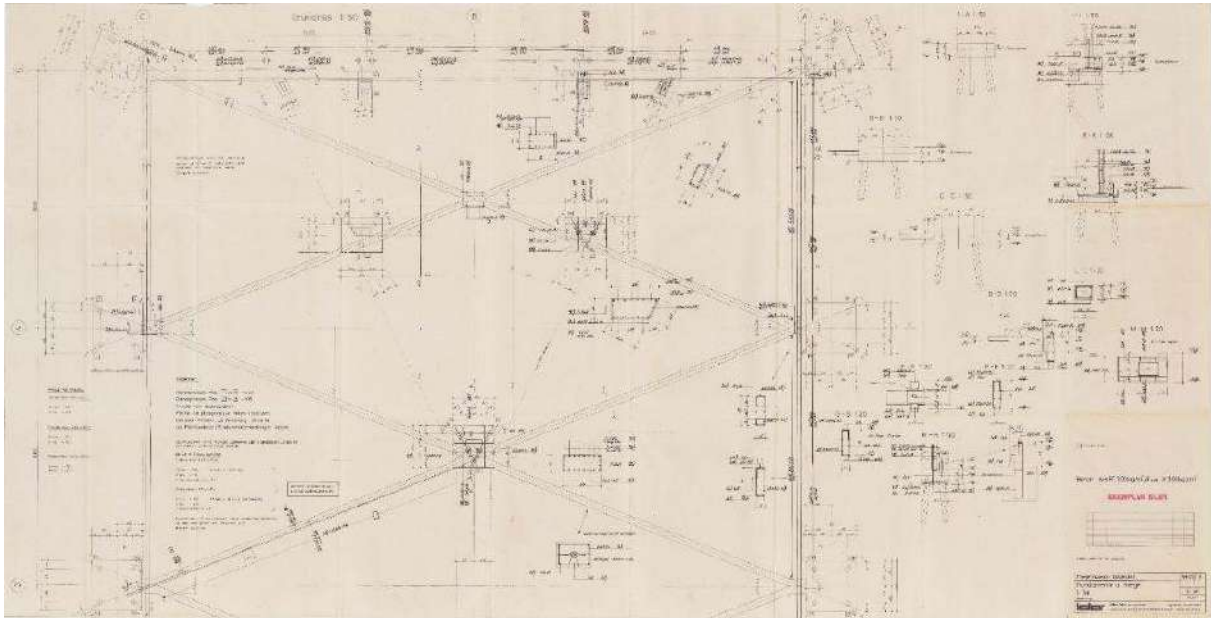


Figura IV.84. Pianta delle fondazioni (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0BSB423.59).

I cavi si trovano al disotto della linea di terra e sono disposti in modo da collegare, per ogni singolo guscio che compone l'intera struttura, gli appoggi diametralmente opposti, formando in tal modo dei controventamenti orizzontali. Ogni cavo si compone di 3 trefoli di diametro 7 mm e resistenza di 2160 kN, per un totale di 48 trefoli di lunghezza 59 m (Figura IV.85).

Le testate di ancoraggio dei cavi, ovvero dei trefoli che li compongono, vengono fissate da un lato ad una piastra (*Festanker*) - secondo un ancoraggio "a ventaglio" - posta all'estremità del blocco di calcestruzzo fungente da base (Figura IV.86), mentre dall'altro lato, in corrispondenza dell'ancoraggio mobile, ad una piastra e ad una testa di ancoraggio (Figura IV.87).

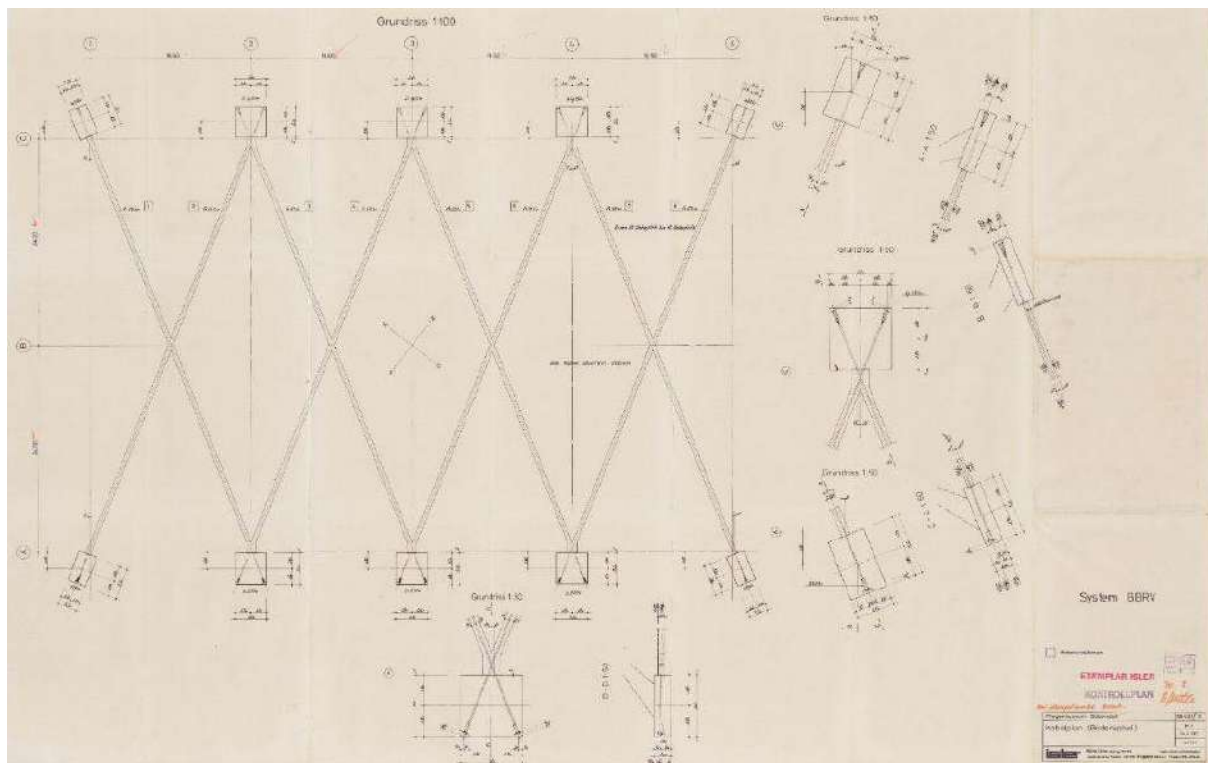


Figura IV.85. Disposizione dei cavi di pretesione (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0BSB423.1).

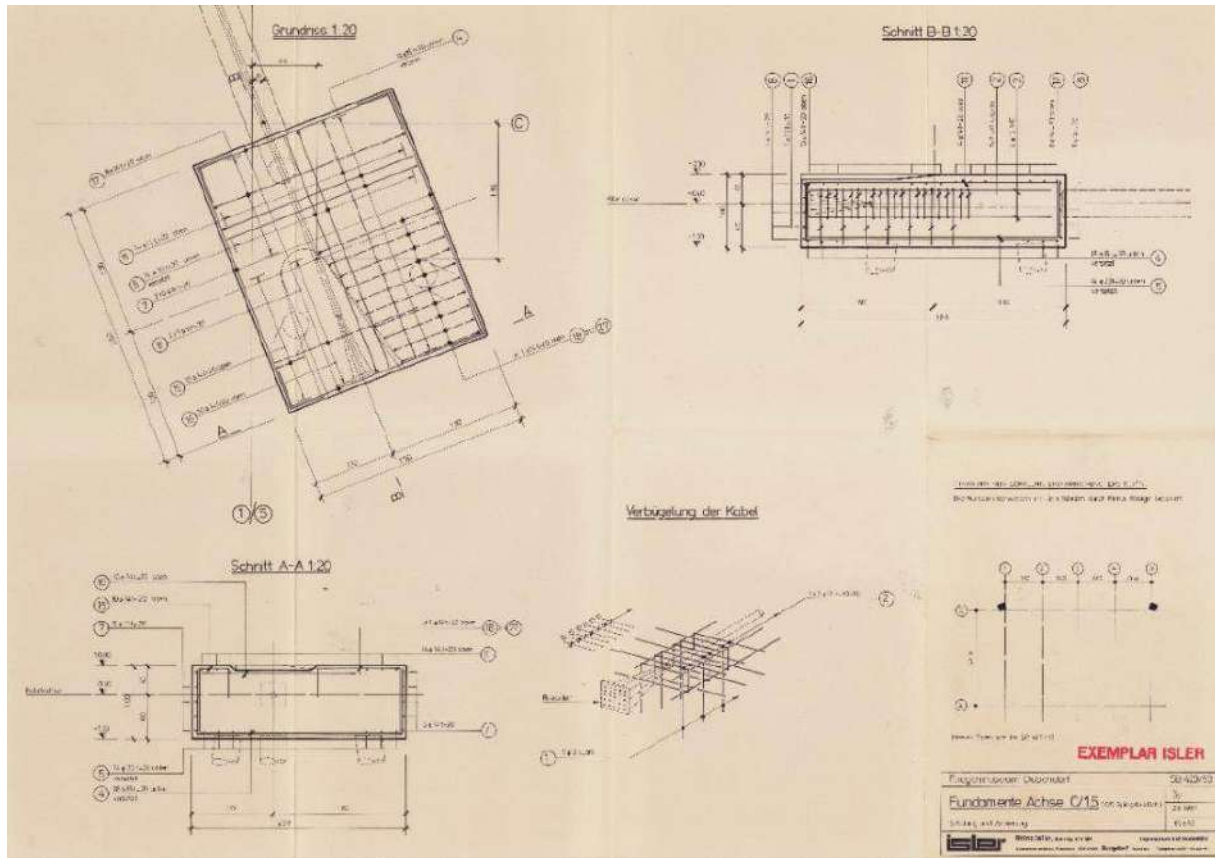
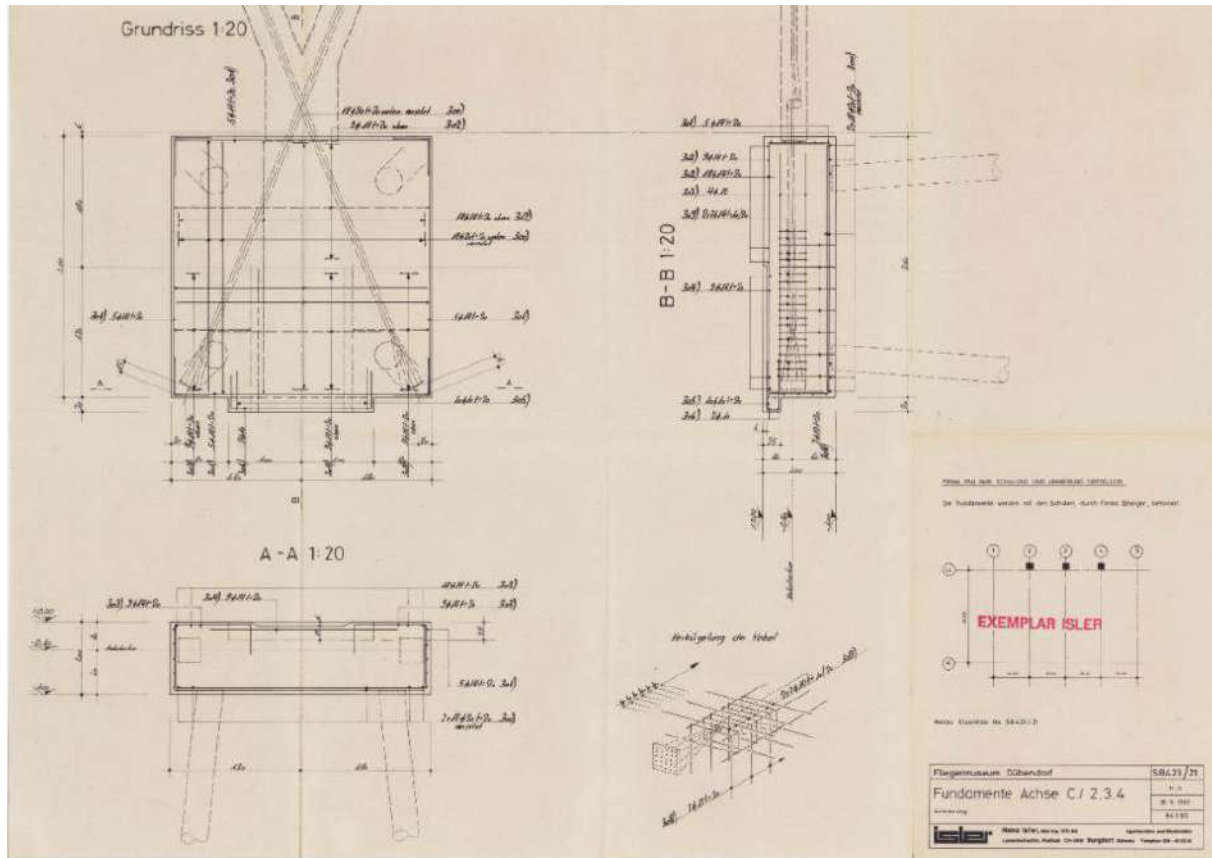


Figura IV.86. Dettaglio delle estremità dei cavi di pretensione in corrispondenza degli angoli e ancoraggio "a ventaglio" (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0BSB423.5).



L'armatura di ognuno dei quattro gusci è organizzata secondo uno schema così costituito:

- all'estradosso, una rete a maglia rettangolare copre l'intera superficie del guscio (Figura IV.88);
- al disotto della rete, una serie di barre d'acciaio, di diametri $\phi 10$, $\phi 12$ e $\phi 14$, sono posizionate nelle zone critiche del guscio, ovvero in sommità, lungo le controcurvature dei lati lunghi e all'intersezione tra controcurvature ai lati corti e guscio principale (Figura IV.89);

Figura IV.87. Dettaglio delle estremità dei cavi di pretensione in corrispondenza dei giunti tra i gusci, con piastra e testa di ancoraggio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0BSB423.45).

- ai piedi, centrali (Figura IV.90) e angolari (Figura IV.91), della struttura, dai quali si irradiano una serie di barre di armatura utili al contrasto delle azioni esercitate dal peso dell'involucro e gravanti proprio in corrispondenza a queste zone. A questo scopo sono utili anche i ferri delle staffe distanziati tra loro di 15 cm e di sezione variabile da $\phi 10$ a $\phi 6$.

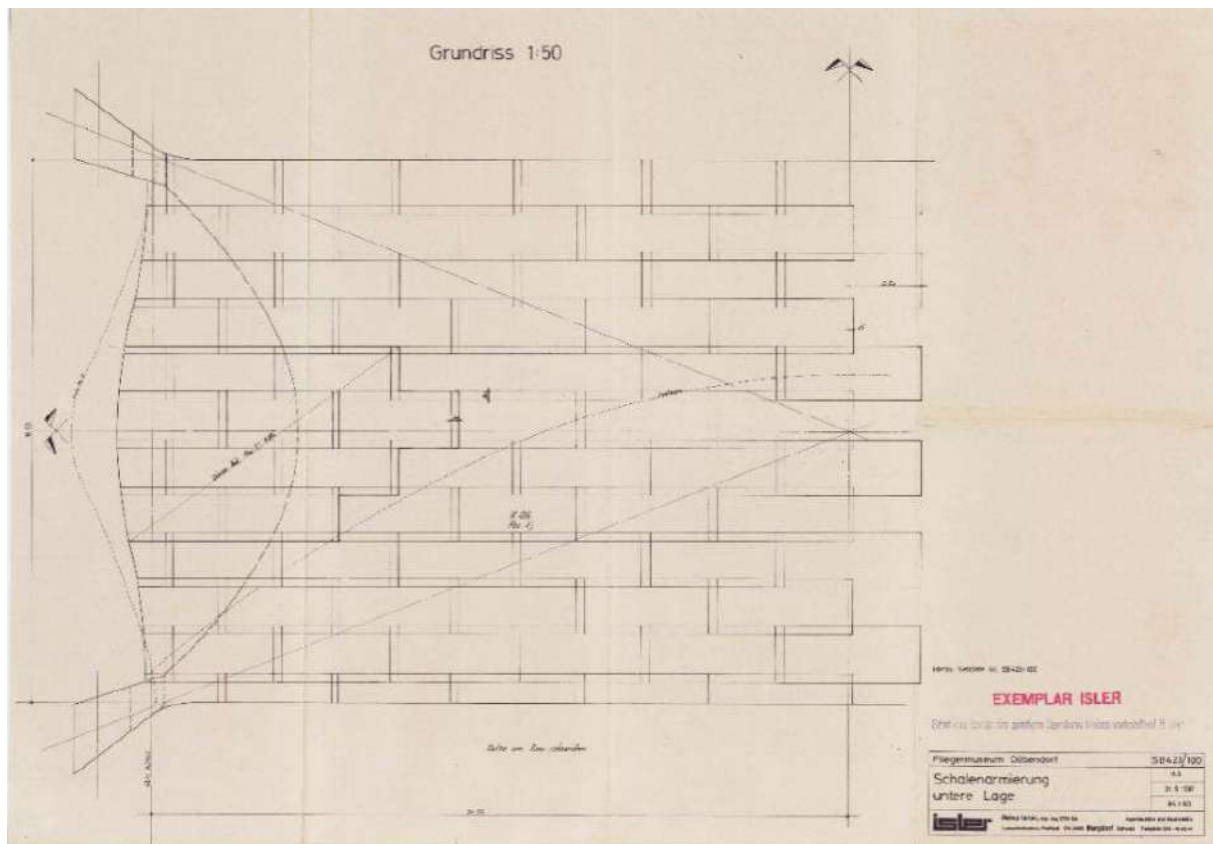


Figura IV.88. Armatura all'estradosso del guscio (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0BSB423.75).

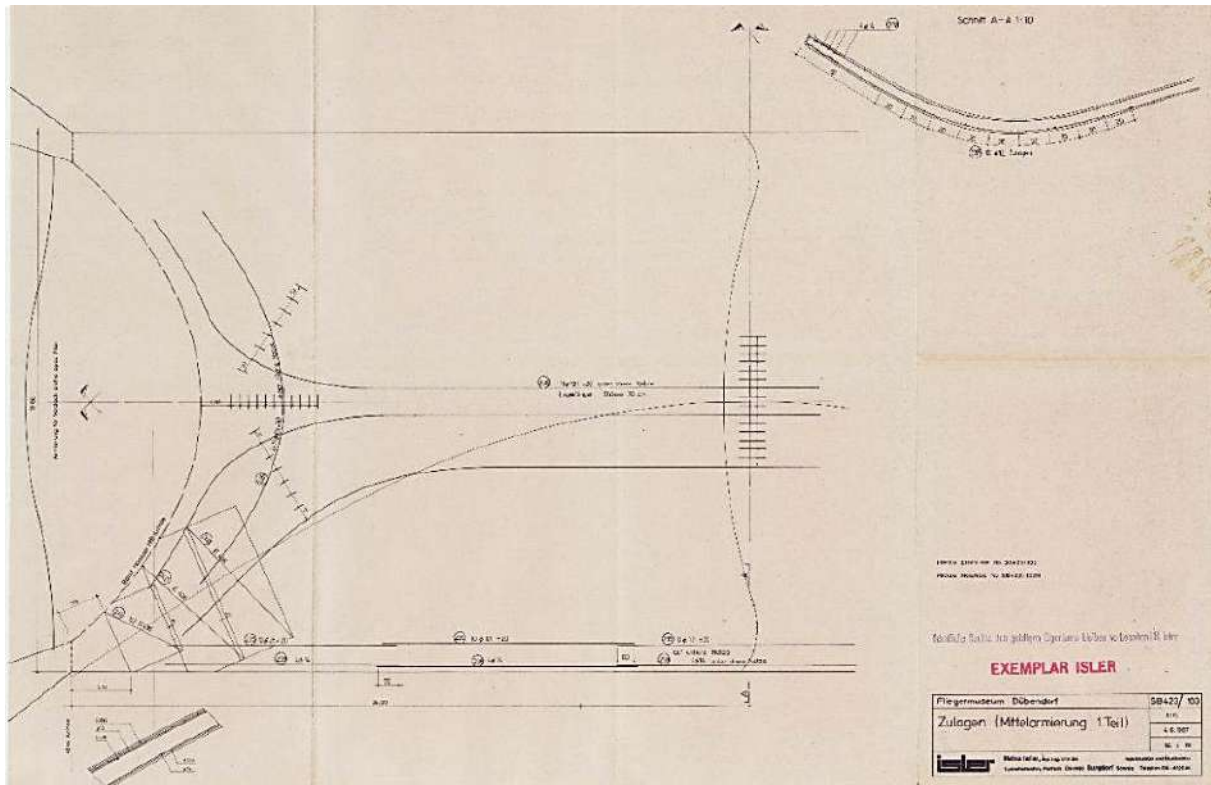


Figura IV.89. Barre posizionate nelle zone critiche (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_0BSB423.72).

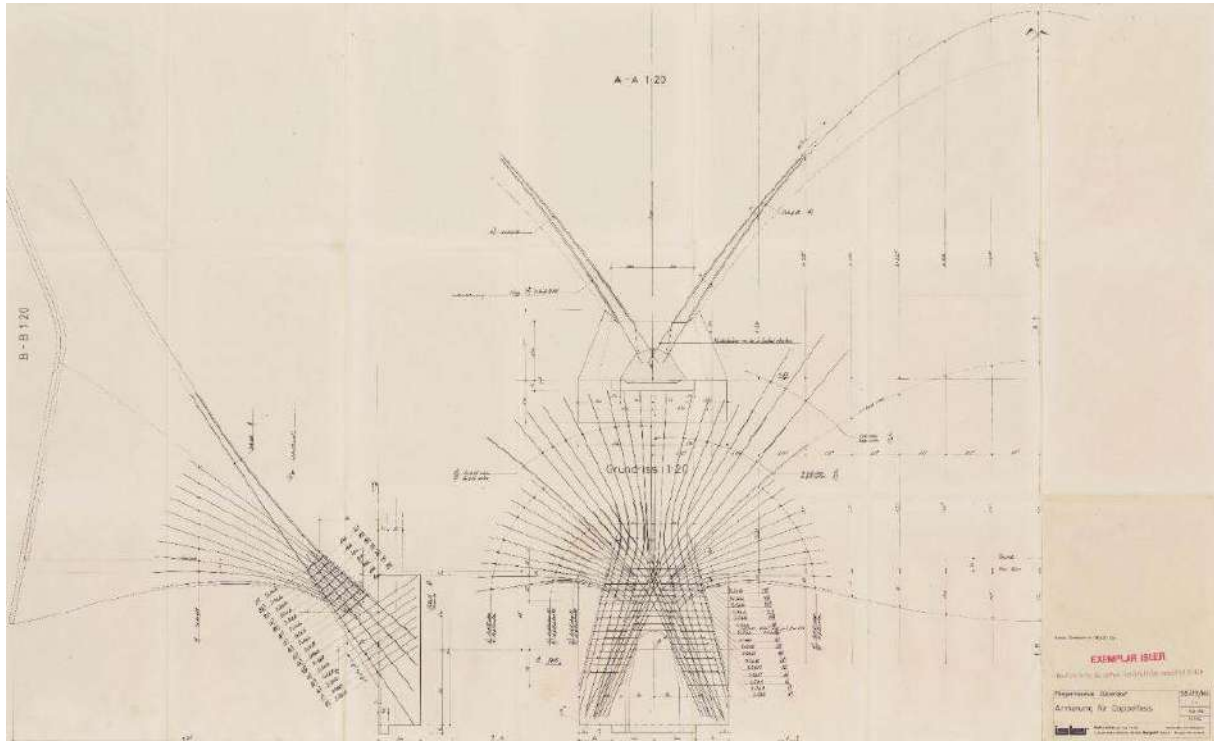


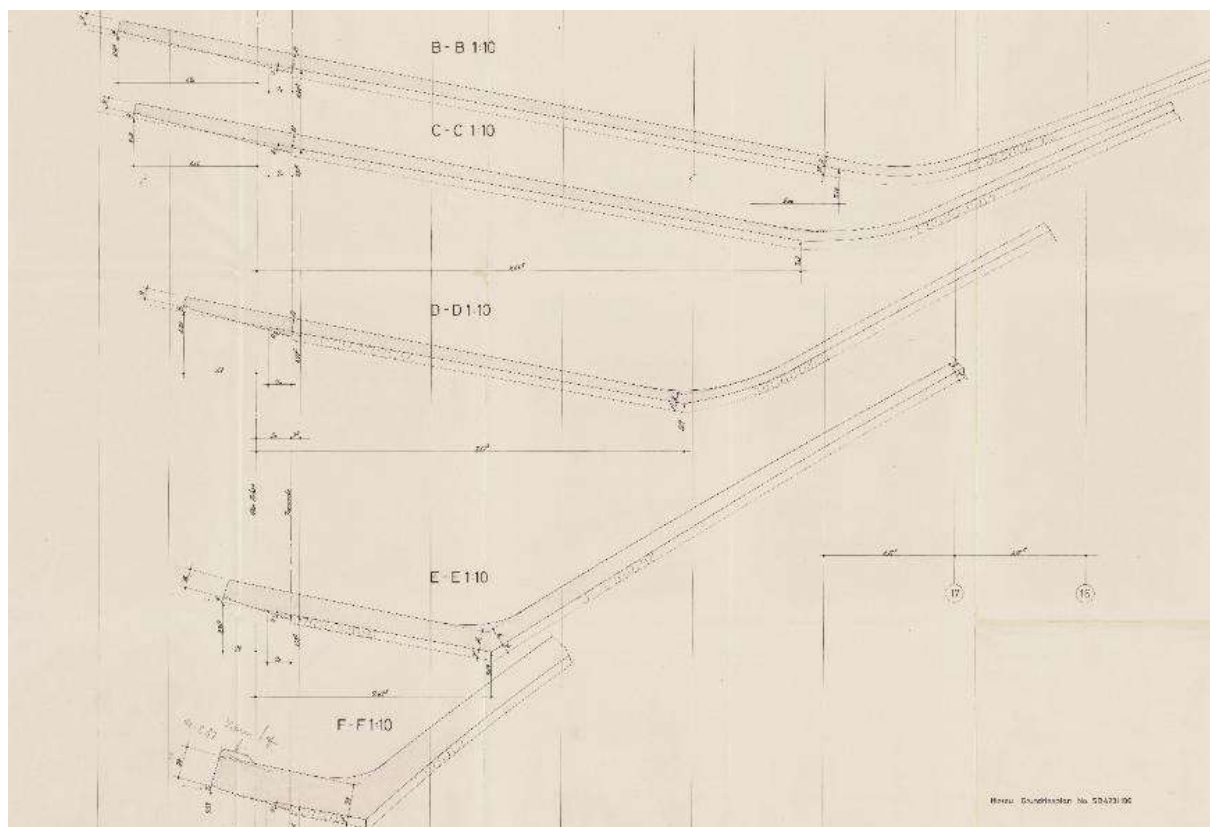
Figura IV.90. Barre ai piedi centrali della struttura (gta Archiv/archivio Isler rif. 217_OBSB423.71).

Nella pagina seguente
Figura IV.93. Fase di
getto del calcestruzzo
(Bösiger, 2011).

Figura IV.92. Sezioni
delle zone di collega-
mento tra controcurva-
ture e guscio principale,
da cui si possono distin-
guere i pannelli isolanti
(gta Archiv/archivio
Isler rif.
217_0BSB423.70).

dai pannelli di isolamento (Figura IV.92) posti all'intradosso del guscio come cassero a perdere⁴⁵.

Il getto di calcestruzzo è stato agevolato dalla presenza di una gru e, soprattutto per le zone maggiormente inclinate agli angoli con una pendenza fino a 45° (Bösiger, 2011), dall'uso di pompe per proiettare il materiale sulla cassaforma e sull'armatura. Ulteriori espedienti adottati sono stati il livellamento attraverso dei vibratori e il trattamento con macchine lisciatrici in modo da ottenere una superficie estradossale uniforme, liscia e impermeabile senza pori (Bösiger, 2011) (Figura IV.93).



⁴⁵ I pannelli hanno spessore di 7,5 cm, ma non si hanno notizie circa le altre dimensioni, così come riguardo al materiale di cui sono composti.



IV.7.4 MODELLAZIONE STRUTTURALE E RISULTATI

Dal punto di vista strutturale, l'obiettivo principale di Isler era quello di arrivare alla progettazione e realizzazione di una forma con deformazioni minime quando sottoposta al proprio peso:

«...slight deformation was predicted but only in the region of 15 mm over a 52 m span, and evenly over most of the surface. By prestressing, a precamber of slightly higher magnitude was produced - as pulling the supports together caused the roof to rise. After 20 years, by gradual deformation due to creep and other factors, the roof is expected to return approximately to its original shape - then the theoretical deformation would be near zero. This is the way that Isler likes to play - with the physical law that says internal energy is equal to the external energy, playing prestress against gravitation...»⁴⁶ (Chilton & Isler, 2000)

Dai risultati ottenuti, si può affermare che questa previsione è stata ampiamente rispettata.

Similmente agli altri due gusci di Isler presi come casi studio, il guscio di Dübendorf è stato dapprima modellato su Rhinoceros (Figura IV.94) e poi importato in COMSOL Multiphysics®, dove sono stati attribuiti i vincoli ad incastro alle quattro basi su cui il guscio poggia (Figura IV.95).

⁴⁶ Trad.: «...era stata prevista una leggera deformazione, ma solo in una zona di 15 mm su una campata di 52 m, e in modo uniforme su gran parte della superficie. Con la precompressione è stata prodotta una deformazione di entità leggermente superiore, poiché l'avvicinamento dei supporti ha causato il sollevamento del guscio. Dopo 20 anni, a causa della deformazione graduale dovuta allo scorrimento e ad altri fattori, si prevede che il guscio tornerà approssimativamente alla sua forma originale; quindi la deformazione teorica sarebbe vicina allo zero. Questo è il modo in cui Isler ama giocare: con la legge fisica che afferma che l'energia interna è uguale all'energia esterna, contrapponendo la precompressione alla gravità...».

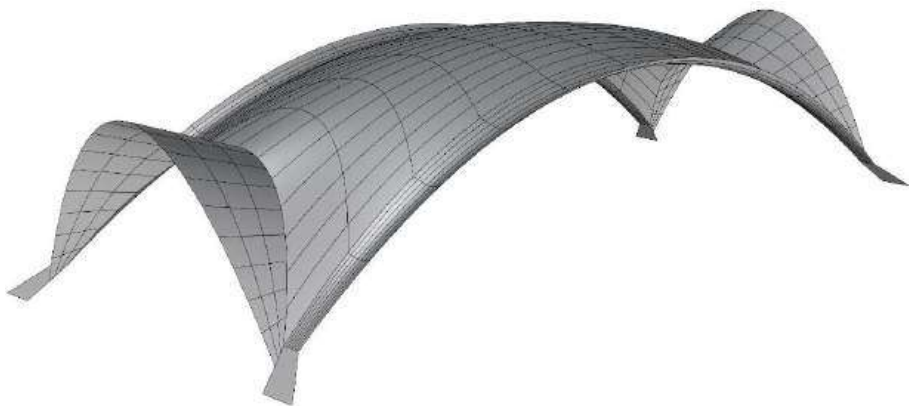


Figura IV.94. Guscio modellato su Rhinoceros.

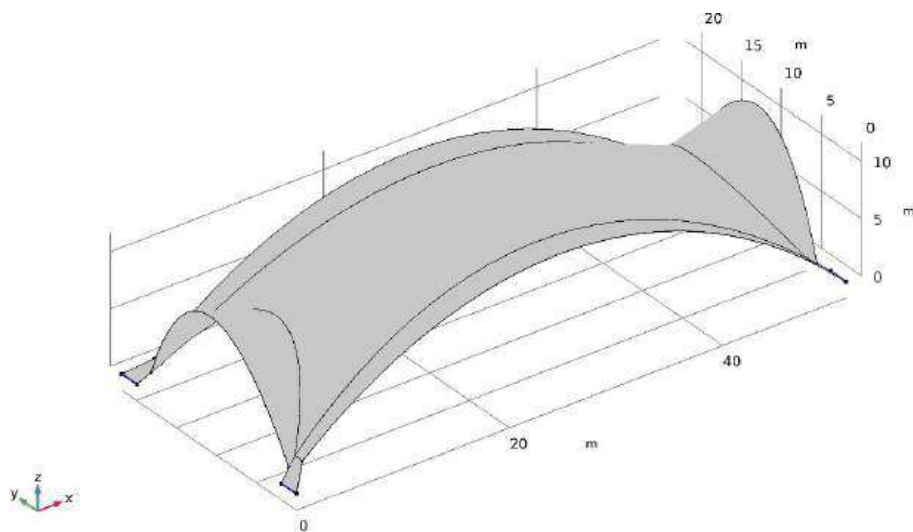


Figura IV.95. Guscio importato su COMSOL Multiphysics con indicazione del sistema di riferimento e dei vincoli applicati (in blu).

I valori tabellati dello spessore per ogni punto della superficie del guscio considerato (Tabella IV.5) sono stati immessi in COMSOL Multiphysics in modo da ottenere l'interpolazione (Figura IV.96) e, di conseguenza, il grafico della variazione dello spessore (Figura IV.97).

x [m]	y [m]	z [m]	s [m]
0.0000	0.0000	0.0000	0.7500
0.0000	19.9498	0.0000	0.7500

Tabella IV.5. Valori dello spessore per i diversi punti.

0.0000	21.8236	0.0000	0.7500
0.0000	1.8737	0.0000	0.7500
0.1277	10.9114	10.2320	0.0800
0.4142	15.8101	7.2190	0.0900
0.4142	6.0134	7.2190	0.0900
0.7685	3.5914	3.4933	0.2600
0.7685	18.2323	3.4931	0.2600
1.7824	20.2118	1.4620	0.5600
1.7824	2.5702	1.4620	0.5600
1.7824	1.6118	1.4620	0.5600
1.7824	19.2533	1.4620	0.5600
2.6412	3.3616	2.7451	0.3500
2.6412	18.4619	2.7452	0.3500
4.2640	5.2345	5.1698	0.2000
4.2640	16.5891	5.1698	0.2000
6.0112	3.1093	4.5481	0.3500
6.0112	18.7142	4.5481	0.3500
6.1173	12.3678	7.9389	0.0800
6.1173	9.4557	7.9389	0.0800
10.5700	20.2118	7.1939	0.2600
10.5700	10.9118	9.5276	0.2500
10.5700	1.6118	7.1939	0.2600
15.4345	3.9063	9.1105	0.1600
15.4345	17.9173	9.1105	0.1600
20.5408	20.2118	10.4410	0.0900
20.5408	10.9118	11.4086	0.1000
20.5408	1.6118	10.4410	0.0900
25.7824	20.2118	10.8703	0.0800
25.7824	10.9118	11.6603	0.0800
25.7824	1.6118	10.8703	0.0800
25.7824	17.6257	10.7796	0.1000
25.7824	4.1979	10.7796	0.1000
31.0240	20.2118	10.4410	0.0900
31.0240	10.9118	11.4086	0.1000
31.0240	1.6118	10.4410	0.0900

36.1303	17.9173	9.1105	0.1600
36.1303	3.9063	9.1105	0.1600
40.9947	20.2118	7.1939	0.2600
40.9947	10.9118	9.5276	0.2500
40.9947	1.6118	7.1939	0.2600
45.4474	9.4557	7.9389	0.0800
45.4474	12.3678	7.9389	0.0800
45.5535	18.7143	4.5481	0.3500
45.5535	3.1093	4.5481	0.3500
47.3007	16.5891	5.1698	0.2000
47.3008	5.2345	5.1698	0.2000
48.9236	18.4619	2.7452	0.3500
48.9236	3.3616	2.7451	0.3500
49.7824	19.2533	1.4620	0.5600
49.7824	20.2118	1.4620	0.5600
49.7824	1.6118	1.4620	0.5600
49.7824	2.5702	1.4620	0.5600
50.7962	18.2323	3.4931	0.2600
50.7962	3.5914	3.4933	0.2600
51.1505	6.0134	7.2190	0.0900
51.1505	15.8101	7.2190	0.0900
51.4371	10.9114	10.2320	0.0800
51.5647	0.0000	0.0000	0.7500
51.5647	19.9498	0.0000	0.7500
51.5647	21.8236	0.0000	0.7500
51.5647	1.8737	0.0000	0.7500

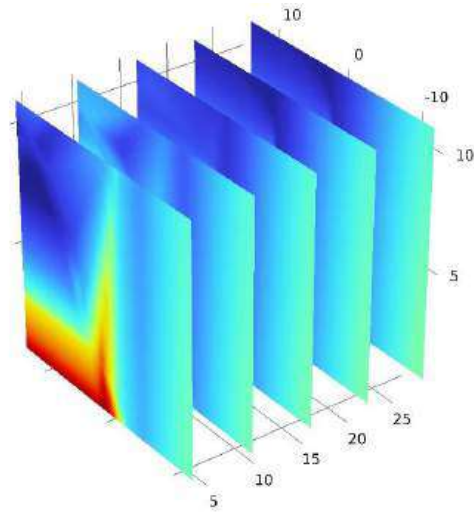


Figura IV.96. Interpolazione dello spessore.

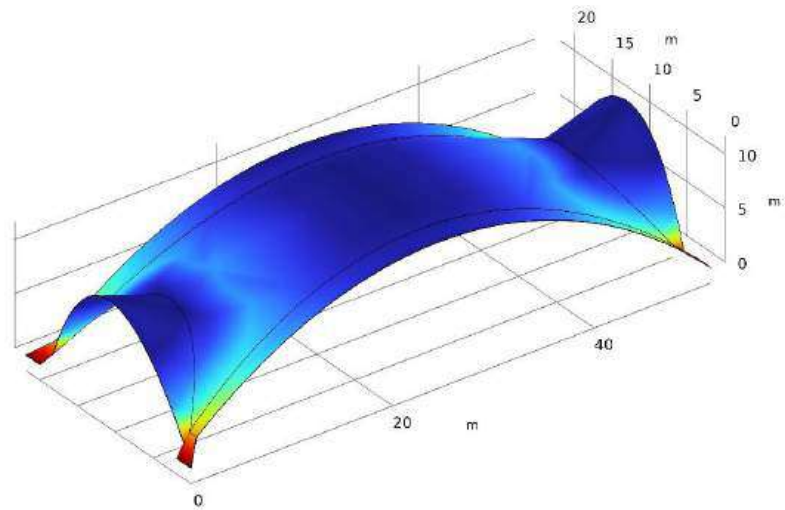
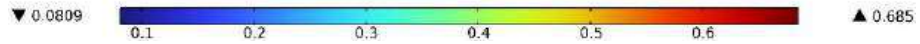
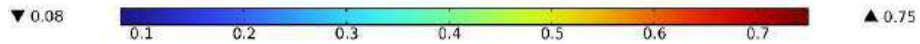


Figura IV.97. Variazione dello spessore nel guscio.



La *skewness* ottenuta dal calcolo mostra come la *mesh* in molti punti non sia ottimale. Infatti, dalla figura (Figura IV.98) si può vedere come alcune aree siano caratterizzate da un valore di *skewness* anche tendente allo 0,5, dunque molto basso: ciò deriva

con molta probabilità dalla complessità dell'intero guscio, dunque dai cambiamenti di curvatura e dalle soluzioni di continuità presenti tra la calotta centrale e le controcurvature laterali.

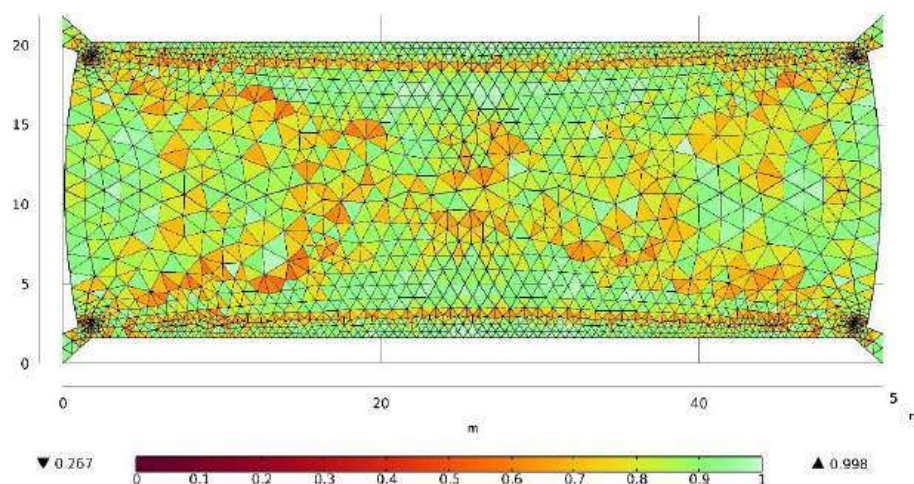


Figura IV.98. Skewness della mesh del guscio.

Come nei gusci precedentemente approfonditi, anche per il guscio di Dübendorf si ha riscontro circa l'applicazione di cavi inseriti per irrigidire la struttura, per cui viene proposto un confronto tra guscio "semplice" e guscio con cavi di controventamento⁴⁷.

L'effetto dell'applicazione dei cavi di controventamento non ha inciso nei risultati del calcolo in modo incisivo come per i gusci di Deitingen e di Lugano. Infatti, considerando la deformata (Figura IV.99 e Figura IV.100), si nota come essa in entrambi i casi sia pressoché equivalente e ciò è confermato dal valore del modulo di spostamento massimo, pari a 6 mm nel caso di guscio semplice e a 4 mm nel caso del guscio con cavi.

⁴⁷ Si precisa che i risultati riguardanti il guscio in esame fin qui esposti valgono anche nel caso del guscio con applicati i cavi.

Similmente avviene per le isoipse degli spostamenti (Figura IV.101 e Figura IV.102) che nei due casi hanno lo stesso andamento e gli stessi punti di massimo e minimo valore.

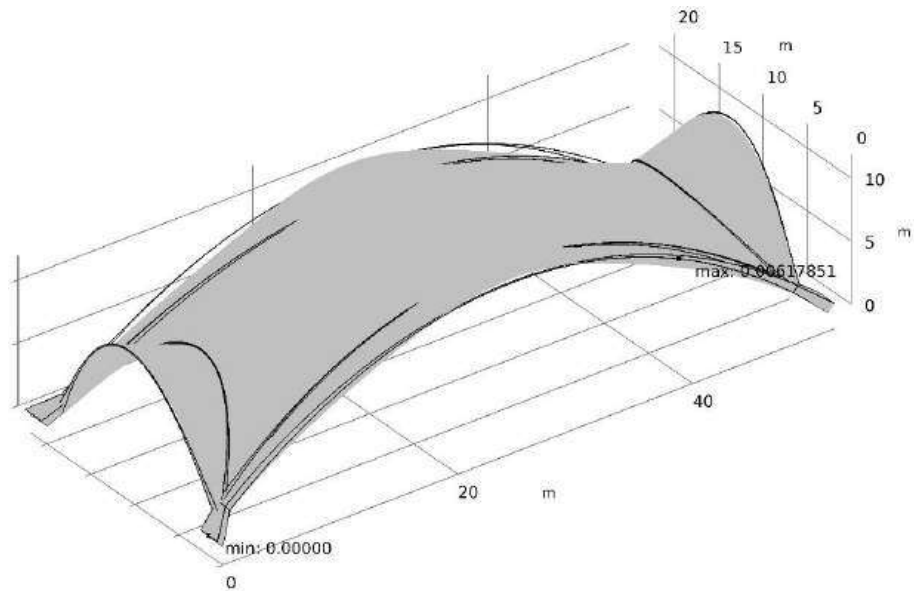


Figura IV.99. Configurazione deformata del guscio semplice.

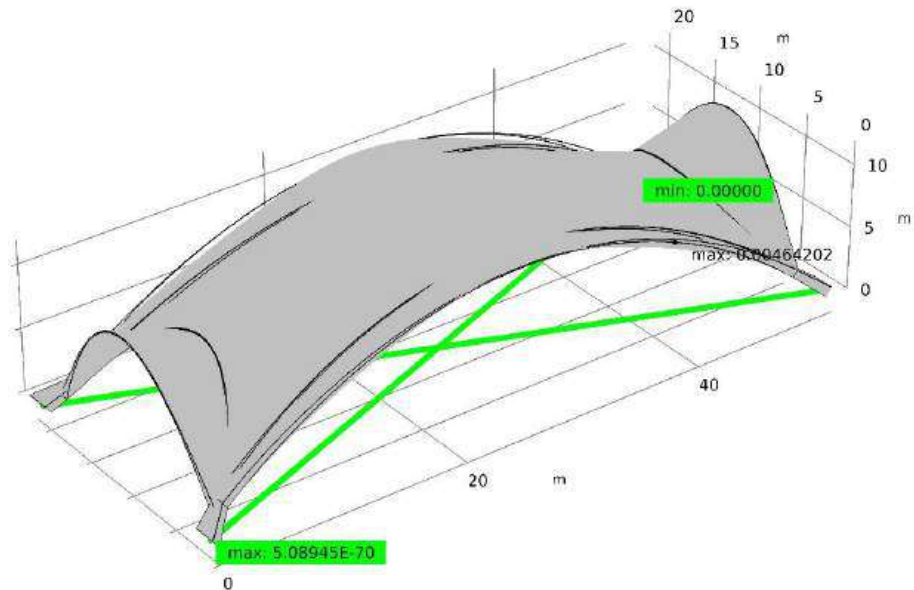


Figura IV.100. Configurazione deformata del guscio con cavi (in verde). Si noti come il valore di spostamento dei cavi è nullo.

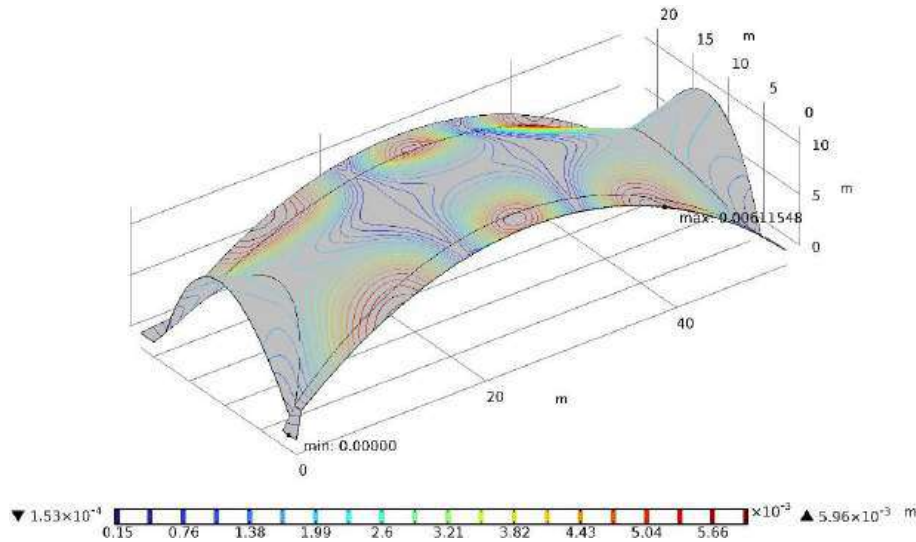


Figura IV.101. Andamento delle curve di spostamento nel caso di guscio semplice.

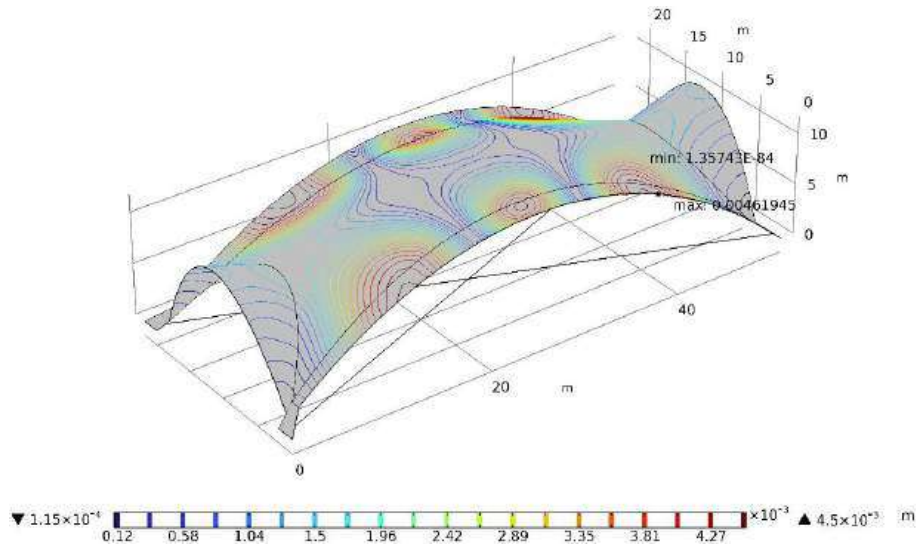


Figura IV.102. Andamento delle curve di spostamento nel caso di guscio con cavi di controventamento.

Per quanto riguarda le *stress variables at bottom surface* (Figura IV.103 e Figura IV.104), esse in entrambi i casi sono pressoché uguali e i valori restituiti dal calcolo indicano come la superficie sia soggetta a tensioni comprese tra 0 e 1 MPa, registrando soltanto dei picchi in alcuni punti isolati, dunque trascurabili.

Figura IV.103. Stress variables at bottom surface del guscio semplice.

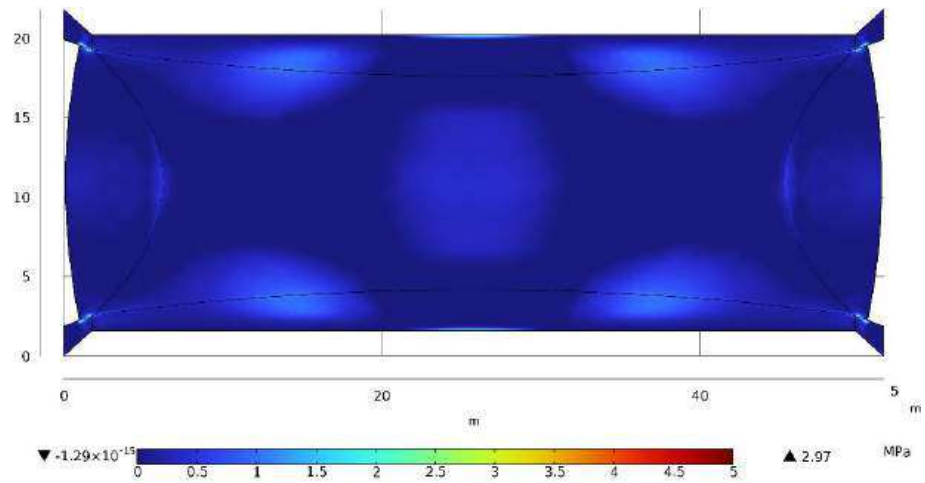
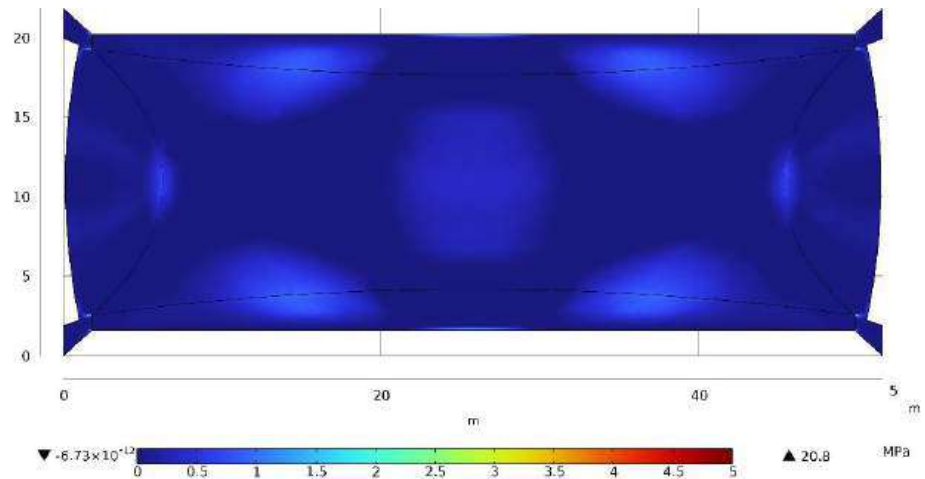


Figura IV.104. Stress variables at bottom surface del guscio con cavi.



Non dissimile appare la situazione nel caso delle tensioni nella superficie superiore (Figura IV.105 e Figura IV.106), in cui i valori, tranne alcune aree in cui raggiungono 1,5 MPa, sono per lo più compresi tra 0 e 1 MPa.

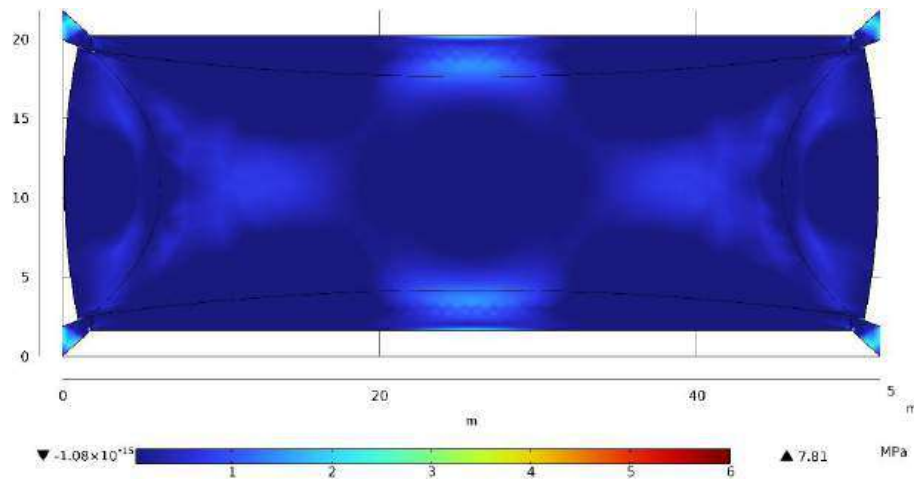


Figura IV.105. Stress variables at top surface del guscio semplice.

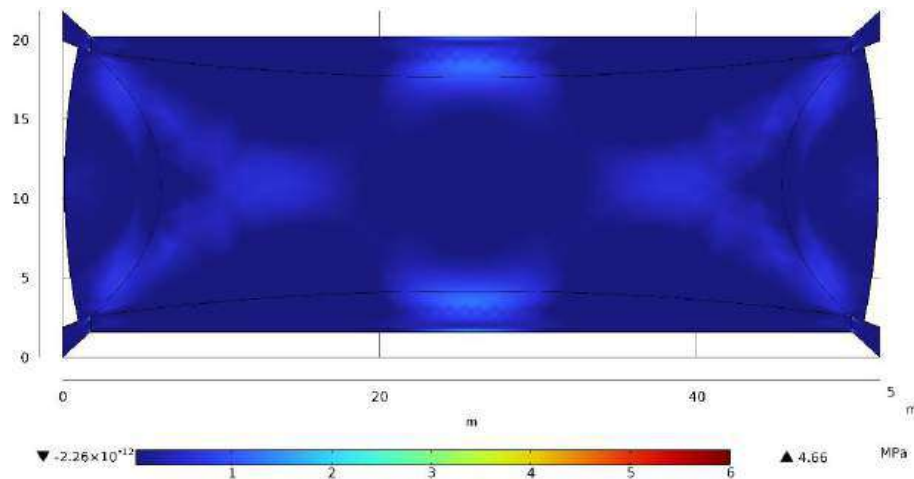


Figura IV.106. Stress variables at top surface del guscio con cavi.

IV.8 CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI

L'analisi strutturale condotta sui gusci di Deitingen, Lugano e Dübendorf porta ad alcune considerazioni fondamentali.

La prima è il comportamento del guscio che in tutti quelli analizzati, anche nel caso più proibitivo in cui non è rafforzato con ulteriori cavi, dimostra una grande capacità di resistenza alle azioni su di esso applicate.

Oltre a ciò, si può notare come la distribuzione delle tensioni nei gusci veda la prevalenza delle sollecitazioni di compressione, proprio rispettando quello che teoricamente è il principio su cui i gusci *hängeform* si basano. Le sollecitazioni di trazione presenti possono essere dovute o a modifiche apportate da Isler nella forma ricavata con la membrana sospesa in modo da adattare lo specifico guscio a determinate richieste o esigenze architettonico-strutturali o, più plausibilmente, ad inesattezze compiute in fase di modellazione o di calcolo strutturale da parte di chi qui scrive. In ogni caso, ad esse si pone un margine attraverso l'integrazione di cavi, che qui sono stati chiamati di rinforzo, di pretensione o di controventamento o tiranti, ma che comunque tutti portano al miglioramento della risposta strutturale di ognuno dei gusci in cui sono stati inseriti.

Un'ultima considerazione riguarda invece il comportamento dei gusci in base alla loro forma: infatti, come si è visto, ogni diversa forma ha comportato una risposta strutturale molto differente rispetto alle altre studiate, concordemente con le dimensioni degli spazi da coprire.

Entrando più nel dettaglio, i valori ricavati attraverso l'analisi FEM evidenziano come il guscio di Deitingen presenti spostamenti e tensioni significativamente inferiori rispetto agli altri due casi studio, confermando un comportamento strutturale prossimo alla compressione pura. I gusci di Lugano e Dübendorf mostrano, invece, la comparsa di tensioni di trazione localizzate, rispettivamente in corrispondenza dei bordi e dei giunti, rendendo necessario il contributo delle armature. Tuttavia, in tutti i tre casi i valori della freccia risultano minimi, a conferma dell'elevata rigidità globale delle strutture analizzate.

La scheda di sintesi seguente (Tabella IV.6) permette di comparare il comportamento dei tre gusci sulla base dei diversi parametri presi in considerazione.

Parametro	Deitingen	Lugano	Dübendorf
Superficie [m ²]	≈510	≈600	≈730
Spostamento verticale massimo s_{max} [mm]	4-6	8-12	7-10
Luce equivalente L_{eq} [m]	≈30	≈25	≈27
Rapporto s_{max}/L_{eq}	1/2500-1/3000	1/2000	1/2500
Tensione principale di compressione minima σ_{3min} [MPa]	da -4,0 a -5,5	da -4,0 a -5,5	da -4,0 a -5,5
Tensione principale di trazione massima σ_{1max} [MPa]	<0,3	1,2-1,8	1,5-2,2
Superficie soggetta a trazione [%]	<3%	6-10%	8-12%
Stato tensionale di trazione all'intradosso σ_1	assente	localizzata su bordi e appoggi	localizzata sui giunti
Stato tensionale di compressione all'estradosso σ_3	diffusa sull'intera superficie	diffusa sull'intera superficie	diffusa sull'intera superficie
Applicazione dei rinforzi: riduzione degli sforzi di trazione	-	<70%	<65%

Tabella IV.6. Scheda di sintesi dei tre gusci *hängeform* analizzati.

Il guscio di Deitingen, di superficie minore rispetto agli altri due, mostra spostamenti ridotti e tensioni di trazione trascurabili, senza concentrazioni critiche (rendendo in tal modo non necessario l'uso dei cavi di pretensione), mentre i gusci dell'Hotel Splendide Royal e del Museo dell'aviazione, di più grandi dimensioni, sono interessati da trazioni localizzate e dunque necessitano di rinforzi per ridurre significativamente le tensioni. Complessivamente, tutti i gusci mantengono uno stato di compressione diffusa prevalentemente all'estradosso, confermando la stabilità caratteristica delle strutture a guscio determinate tramite *hängeform*, con la rigidità e le trazioni che variano in funzione della dimensione, dello spessore e della complessità geometrica.

IV.9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*. (2018). 42.
- Allenspach, C., & Isler, H. (2000). Schalenformen nach den Gesetzen der Natur. *Baudoc Bulletin*, 12, 7–18.
- Baghdadi, A., Heristchian, M., & Kloft, H. (2019). Structural assessment of remodelled shells of Heinz Isler. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11(4), 491–502. <https://doi.org/10.1007/s40091-019-00248-4>
- Beckh, M., Dechau, W., Derleth, K., Kurz, P., & Schützeichel, R. (2022). *Heinz Isler. Schalen*. WÜSTENROT STIFTUNG.
- Beckh, M., Del Cueto Ruiz-Funes, J. I., Ludwig, M., Schätzke, A., & Schützeichel, R. (Eds.). (2020). *Candela Isler Müther. Positions on Shell Construction*. Birkhäuser.

Billington, D. P. (1985). *The TOWER and the BRIDGE - The New Art of Structural Engineering*. Princeton University Press.

Billington, D. P. (2003a). *The art of structural design. A Swiss legacy*. Princeton University.

Billington, D. P. (2003b). *The art of structural design. A Swiss legacy*. Princeton University.

Blank, S. (2008). Zuchwil, Gartenstrasse 32, GartenHaus Wyss AG. *Archäologie Und Denkmalpflege Im Kanton Solothurn*, 13. <https://doi.org/10.5169/seals-844259>

Boller, G., Block, P., & Schwartz, J. (2024). Heinz Isler's form-finding models for his "HIB" shells: between experiment and design. In S. Gabriele, A. Manuello Bertetto, F. Marmo, & A. Michelletti (Eds.), *Shell and Spatial Structures. Proceedings of IWSS 2023*. Springer.

Borgart, A., & Eigenraam, P. (2012). *Scanning in 3D and analysing the models of Heinz Isler, the preliminary results*.

Bösiger, H. (n.d.). THE BUILDING OF ISLER SHELLS. In *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES: J. IASS*.

Bösiger, H. (2011). THE BUILDING OF ISLER SHELLS. *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES: J. IASS*, 169(3), 161–172.

Chilton, J. (2009). *39 etc...: Heinz Isler's infinite spectrum of new shapes for shells*.

Chilton, J. (2012). Form-finding and fabric forming in the work of Heinz Isler. In J. Orr, M. Evernden, A. Darby, & T. Ibell (Eds.),

Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork.

Chilton, J., & Isler, H. (2000). *The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture* (1st ed.). Thomas Telford Publishing.

Gozzi, V. (2024). Heinz Isler in Ticino. *Archi*, 4, 36–65.

Lykov, E. (2025). *Das »System Isler« - Der Schalenbau im Schweizer Mittelland, 1955-2000*. transcript Verlag.

Seifert, S., & Wolff, M. (2010). Heinz Isler (1926-2009). Topografische Projektübersicht. *Www.Great-Engineers.de. Ein Internetlexikon Der Bauingenieure*. www.great-engineers.de.

V.
PARZIALIZZAZIONE
DI GUSCI SOTTILI

SINOSSI

Il capitolo è incentrato su quello che costituisce l'esito principale della presente trattazione: la definizione, a partire dai gusci esistenti di cui si è avuto modo di esaminare le caratteristiche e il comportamento strutturale, di elementi prefabbricati da assemblare in cantiere che restituiscano strutture a guscio con diverse forme e dimensioni e lo studio dei sistemi di connessione delle diverse parti componenti.

Per rendere questo sistema costruttivo applicabile a diverse casistiche, oltre che a studiare i gusci già esistenti per verificarne il mantenimento delle caratteristiche anche a seguito della loro parzializzazione, si è proceduto a delineare, tramite apposito *plug-in*, un modello di guscio parametrico che permette di ottenere delle strutture a guscio di diverse forme e dimensioni ma comunque mantenendo inalterato il comportamento e le caratteristiche propri di queste strutture. Il guscio parametrico così individuato tra tutti quelli possibili è stato studiato e parzializzato, dimostrando in tal modo quanto la soluzione proposta sia generalizzabile.

L'elaborazione di un siffatto sistema costruttivo offre diversi vantaggi, tra cui:

- una maggiore libertà nella progettazione di forme non derivanti dalle geometrie tradizionali, possibile grazie alle tecniche e tecnologie impiegate;
- l'utilizzo di minori quantità di materiali (si pensi ad esempio alle casseforme reimpiegabili) e di manodopera;
- il risparmio in termini economici e di tempo, nonché il minore impatto sull'ambiente, come conseguenza dei punti precedenti.

V.1 VANTAGGI E SVANTAGGI DEI GUSCI SOTTILI PREFABBRICATI

La progettazione, la realizzazione e la successiva messa in opera di gusci sottili prefabbricati, come già parzialmente visto per i diversi esempi che si è avuto modo di descrivere in precedenza, offrono diversi vantaggi se confrontate con i gusci realizzati *in loco*; a questi però vanno aggiunti anche gli svantaggi derivanti da una tale scelta costruttiva: tutto ciò considerato, per un più completo ed obiettivo studio, si è proceduto con un'analisi SWOT, prendendo dunque in considerazione i punti di forza (*Strenghts*), di debolezza (*Weaknesses*), le opportunità (*Opportunities*) e le minacce (*Threats*) derivanti dalla scelta di simili strutture. I principali risultati dell'analisi sono compendati nella Tabella V.1.

Tabella V.1. Analisi SWOT per gusci sottili prefabbricati.

Punti di forza	<ul style="list-style-type: none"> • Riduzione di materiale e peso strutturale derivante dagli spessori ridotti; • Produzione in ambiente controllato, dunque maggiore qualità e standardizzazione; • Rapidità di montaggio in cantiere; • Buone prestazioni strutturali (resistenza, inerzia termica, comportamento al fuoco); • Elevato potenziale architettonico: forme curve, coperture leggere, design innovativo.
Debolezze	<ul style="list-style-type: none"> • Maggiore sensibilità a tolleranze e precisione di montaggio; • Difficoltà logistiche nel trasporto e sollevamento di elementi sottili; • Limitata flessibilità progettuale e personalizzazione in opera; • Isolamento termico/acustico talvolta inferiore se non integrato; • Nodi di connessione e giunzioni strutturali critiche.
Opportunità	<ul style="list-style-type: none"> • Crescente domanda di costruzioni leggere, modulari e sostenibili; • Riduzione dell'impatto ambientale per minor uso di materie prime; • Integrazione con sistemi prefabbricati modulari e industrializzati; • Utilizzo in interventi di sopraelevazione o riqualificazione sismica.
Minacce	<ul style="list-style-type: none"> • Rischi normativi e certificativi (resistenza, durabilità, fuoco); • Errata progettazione o standardizzazione eccessiva, dunque rischio prestazionale; • Difficoltà di trasporto o montaggio in siti complessi; • Diffidenza del mercato verso elementi "troppo sottili"; • Complessità nelle manutenzioni o modifiche future.

Cercando di mettere in risalto i punti di forza, e dunque le opportunità da questi derivanti, e di ridurre al minimo le debo-

lezze, con le possibili minacce, si è da qui proceduto alla definizione della soluzione di gusci sottili prefabbricati che sarà gradualmente esposta nel capitolo.

V.2 PARZIALIZZAZIONE DEI GUSCI ESISTENTI

Al fine di dimostrare la bontà dell'obiettivo ultimo prefissato, si è ritenuto opportuno, in primo luogo, procedere con la parzializzazione di alcuni gusci esistenti di cui si sono già studiate le caratteristiche morfologiche, tipologiche e strutturali: ciò ha preliminarmente permesso di appurare che, anche a seguito del venir meno dell'integrità di ognuno dei singoli gusci e apportando delle opportune quanto indispensabili strategie per ripristinarne la perduta continuità, le caratteristiche delle strutture a guscio così formate sono del tutto simili a quelle dei gusci da cui derivano.

V.2.1 SCELTA DELLA TIPOLOGIA DI GUSCI DA PARZIALIZZARE

Tra le svariate tipologie di gusci sottili che si è avuto modo di studiare, e in particolare tra le due tipologie a cui è stato dedicato un maggiore approfondimento in quanto ritenute le più rappresentative date le loro peculiarità - le volte *realine* siciliane e i gusci *hängeform* di Isler -, si è scelto di considerare per lo studio che qui si propone proprio i gusci *hängeform*. Tale scelta è derivata dal confronto tra le due tipologie, condotto in prima istanza sulle loro caratteristiche generali e, in modo più specifico, sulla loro predisposizione ad essere parzializzate e prefabbricate. Le tabelle seguenti (Tabella V.2 e Tabella V.3) condensano questi due diversi approcci al confronto tra le tipologie di gusci considerate.

Tabella V.2. Confronto tra volte realine e gusci hängeform.

	<i>Volte realine</i>	<i>Gusci hängeform</i>
Contesto	Tradizione costruttiva mediterranea	Architettura moderna
Materiali	Mattoni in laterizio, malta di gesso	Calcestruzzo armato
Principio strutturale	Compressione pura (comportamento spingente, forma derivata empiricamente)	Compressione pura, forma ottimizzata mediante modelli pendenti (forma funicolare)
Metodo di progettazione	Empirico e artigianale, basato sull'esperienza costruttiva	Sperimentale e scientifico: modelli fisici di tessuto sospeso rovesciati per definire la geometria
Forma geometrica	Superfici a doppia curvatura ma spesso irregolari, adattate agli ambienti da voltare	Superfici a doppia curvatura generate naturalmente dalla gravità (forme funcolari ideali)
Spessore	Ridotto (diversi cm, in rapporto alla luce)	Molto ridotto (pochi cm), grazie all'ottimizzazione della forma
Peso proprio	Notevole	Ridotto
Resistenza e stabilità	Buona sotto carichi verticali, ma sensibile a spinte orizzontali e deformazioni	Ottima efficienza strutturale (lavora quasi interamente a compressione)
Costruzione	Richiede centine leggere e manodopera non specializzata	Realizzabile con casseri temporanei modellati dal tessuto o da reti sospese
Manutenzione	Legata ai materiali utilizzati	Legata alla qualità del calcestruzzo

Estetica	Espressione della tradizione locale e del sapere costruttivo	Espressione della logica strutturale e della forma "naturale"
Limiti principali	Peso, spessori maggiori, limitata possibilità di grandi luci	Complessità di realizzazione e controllo della forma, dipendenza dalla tecnologia del calcestruzzo
Punti di forza	Semplicità materiale, adattabilità, ridotto uso di centine, sostenibilità, coerenza con l'ambiente	Efficienza strutturale, leggerezza, estetica organica, ottimizzazione statica

	<i>Volte realine</i>	<i>Gusci hängeform</i>
Materiale e coesione strutturale	Mattoni e malta → struttura continua per giunti di malta; difficile separare in moduli senza perdere continuità	Calcestruzzo armato → può essere suddiviso in pannelli prefabbricati con giunti strutturali o cerniere
Geometria	Irregolare e adattata al contesto → difficile standardizzare moduli	Geometria definita da superfici funicolari precise → può essere suddivisa in segmenti regolari o pannelli
Spessore e peso	Elevato → difficile movimentazione dei pezzi prefabbricati	Molto sottile e leggero → più adatto al trasporto e montaggio
Tecniche costruttive	Tradizionalmente costruita in opera → poco compatibile con prefabbricazione	Può essere gettato in casseforme modulari ripetibili → alta compatibilità con prefabbricazione parziale

Tabella V.3. Confronto tra *volte realine* e *gusci hängeform*, basato sulla loro predisposizione alla parzializzazione e prefabbricazione.

Continuità strutturale dopo assemblaggio	Difficile ottenere continuità tra elementi prefabbricati di muratura (problema nei giunti)	Facile ottenere continuità tramite giunzioni in calcestruzzo armato o precompresso
Flessibilità e ripetibilità	Ogni volta è un pezzo unico e specificamente realizzato per quel determinato contesto	Le forme possono essere ripetute o scalate, favorendo produzione seriale
Possibilità di prefabbricazione parziale	Limitata a piccoli archi o porzioni, ma non all'intera volta	Elevata → la forma può essere suddivisa in gusci parziali o pannelli prefabbricati da assemblare

V.2.2 CRITERI DI PARZIALIZZAZIONE

I gusci *hängeform* presi in considerazione per essere parzializzati sono i tre gusci indagati precedentemente: il guscio della stazione di servizio autostradale Deitingen, sull'autostrada A1 nei pressi di Flumenthal (1968), il guscio dell'Hotel Splendide Royal, a Lugano (1972-74, demolito nel 2019) e il guscio del museo dell'aviazione di Dübendorf (1986-88).

Una volta appurato il loro effettivo comportamento strutturale sotto le azioni imposte (peso proprio della struttura e forza di gravità) è possibile procedere con la loro suddivisione in diverse parti¹ componenti, simulando in tal modo la loro prefabbricazione in stabilimento e il successivo assemblaggio in cantiere.

¹ Con "parti" o "elementi" si indicano i diversi pezzi dei gusci ricavati dalla loro parzializzazione.

L'individuazione dei piani di sezione utili alla parzializzazione dei gusci (o meglio alla superficie curva che, una volta estrusa, restituisce tali strutture) è attuata sulla base di diversi criteri:

- in primo luogo, è indispensabile che gli appoggi siano collegati alle basi su cui poggiano tramite dei vincoli ad incastro; questo impedisce che le spinte derivanti dal peso delle diverse parti, una volta assemblate, allontanino le basi causando il collasso della struttura;
- suddividendo la struttura si deve fare in modo che gli elementi laterali, quando assemblati, sorreggano l'elemento centrale, cosicché quest'ultimo risulti scarico e, dal punto di vista statico, semplicemente appoggiato;
- gli elementi laterali, dunque portanti, una volta assemblati, devono funzionare come un arco a tre cerniere - due laterali e una centrale - in modo da evitare labilità;
- gli elementi laterali devono essere tra loro connessi con vincoli cerniera, dunque privi di momenti flettenti;
- tra gli elementi laterali e l'elemento centrale si simula una connessione tramite sella Gerber, dunque delle cerniere interne al guscio;
- le sollecitazioni di trazione derivanti dall'analisi strutturale vanno circoscritte, attraverso il sezionamento della superficie, aggiungendo in tal modo in queste zone più armatura e/o aumentandone lo spessore;
- i piani di sezione, in ogni caso, devono essere distanziati dalle discontinuità presenti sulla superficie, cioè dai punti in cui si verifica un brusco cambiamento della curvatura: ciò per favorire una migliore connessione tra i diversi elementi del guscio;

- la connessione meccanica tra gli elementi può avvenire attraverso diverse soluzioni, derivate dal campo infrastrutturale, tra cui la connessione con giunto post-teso con tracciato curvilineo² e la connessione con giunto a tasca con barre³;
- i gusci vanno parzializzati anche facendo in modo da ottenere, per quanto possibile, degli elementi tra loro uguali, in modo da utilizzare meno casseforme per la loro realizzazione.

Seguendo questi criteri, si è proceduto a parzializzare i gusci di Isler applicando i piani di sezione come indicato nelle figure che seguono (come riferimento si sono considerate le tre diverse superfici dei gusci in cui sono evidenti le tensioni di trazione e compressione) (Figura V.1, Figura V.2 e Figura V.3, in cui i tre gusci sono rappresentati in modo da vedere il rapporto di grandezza tra di loro intercorrente).

² Questo tipo di connessione prevede che negli elementi si pratichino fori curvi o canaline all'interno dei quali, dopo il montaggio, si inseriscono dei cavi di acciaio (trefoli o funi). I cavi vengono poi tesi e bloccati con ancoraggi alle estremità. Infine, si può iniettare malta cementizia per proteggere i trefoli e solidarizzare il sistema.

³ Questo tipo di connessione prevede che i bordi degli elementi vengano ispessiti per ospitare le barre di acciaio (barre di armatura o barre filettate), inserite e ancorate (spesso con resina o malta ad alta resistenza) nei fori predisposti dell'altro elemento. L'ispessimento serve a garantire la resistenza a taglio e flessione nel giunto.

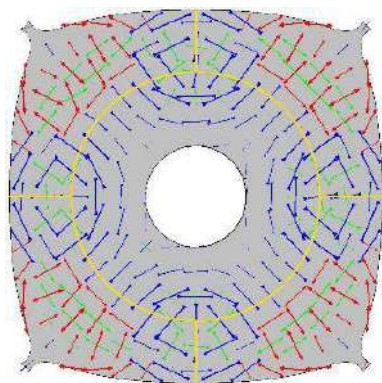
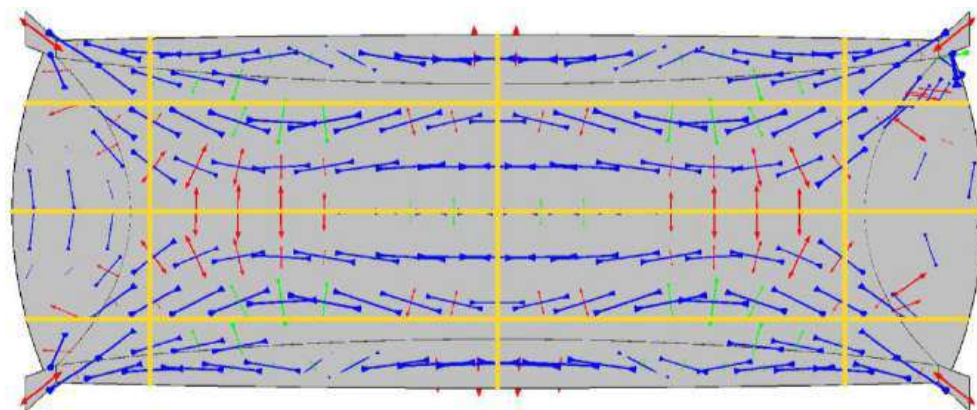
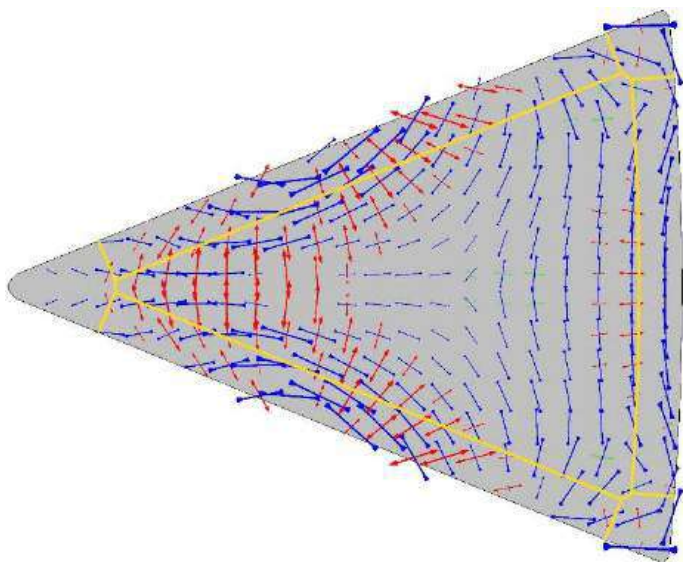


Figura V.1. Parzializzazione del guscio di Deitingen.

Figura V.2. Parzializzazione del guscio di Dübendorf.

Figura V.3. Parzializzazione del guscio di Lugano.

V.2.3 RISULTATI DELLA PARZIALIZZAZIONE

L'analisi dei tre gusci parzializzati è stata condotta con lo stesso software utilizzato in precedenza (COMSOL Multiphysics 6.2) e utilizzando uguali materiali, uguali spessori e uguali condizioni di carico assegnati ad ognuno dei gusci interi. Ciò ha permesso, una volta ottenuti i risultati, di potere effettuare un valido confronto per dimostrare l'efficacia del sistema che in questa sede si sta proponendo.

V.2.3.1 Guscio di Deitingen

La parzializzazione del guscio di Deitingen, effettuata applicando i criteri prima elencati, ha restituito una struttura composta di sette parti così suddivise: tre appoggi incastrati alla base su cui si innestano attraverso dei vincoli a cerniera altrettanti arconi (di cui due simmetrici) di larghezza 2 m; centralmente è invece posta una calotta appoggiata alle altre parti con delle selle Gerber simulate attraverso delle cerniere interne (Figura V.4). Come già detto, le dimensioni e lo spessore variabile sono mantenuti uguali al guscio di partenza.

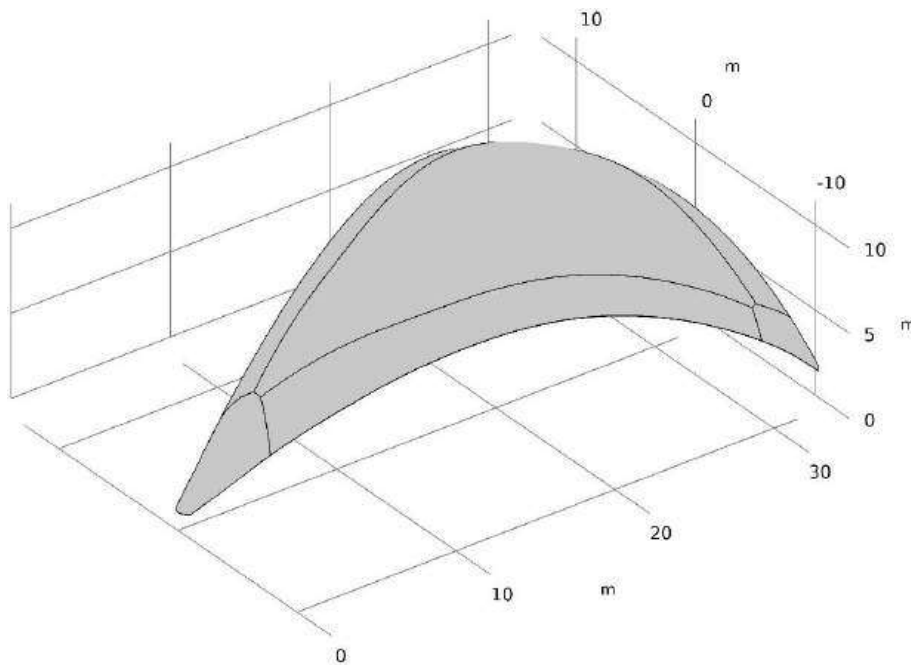
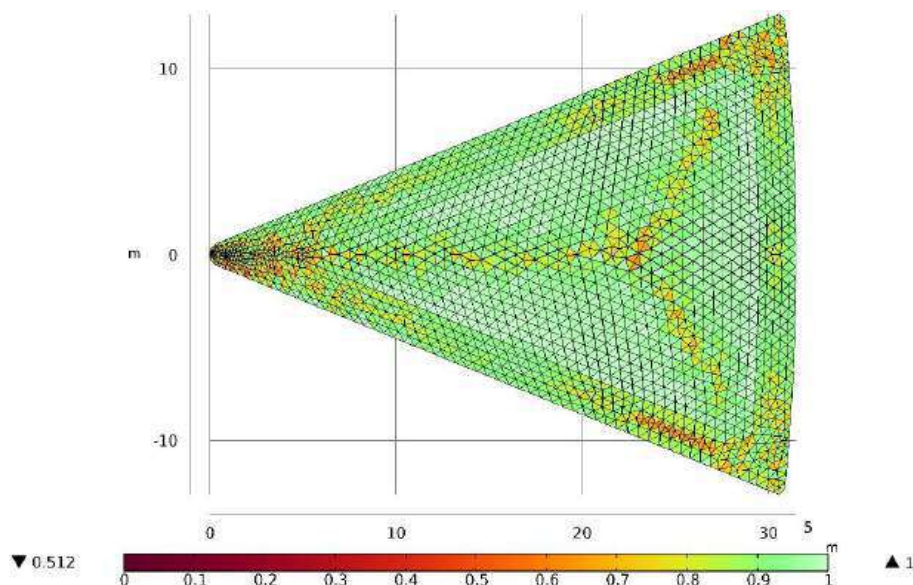


Figura V.4. Guscio di Deitingen parzializzato.

La *mesh* scelta, in questo caso, è stata scelta “*extremely fine*” ed è stata corretta in modo da evitare la formazione di discontinuità e di interstizi tra le superfici a contatto. In tal modo, la *skewness* risulta, tranne che in alcune zone in cui la variazione di curvatura, pressoché omogenea in gran parte delle superfici che formano il guscio (Figura V.5).

Figura V.5. Skewness del guscio di Deitingen parzializzato.



Dal punto di vista strutturale la parzializzazione del guscio permette di ottenere degli interessanti risultati, desumibili dal confronto con il guscio originale.

Le deformazioni massime si hanno, proprio come nel guscio di partenza, in corrispondenza degli arconi simmetrici, in cui si ha uno spostamento massimo di 4,5 mm (circa $\frac{1}{4}$ rispetto ai 18 mm registrati nel guscio intero), mentre gli altri elementi, in particolare gli appoggi e la calotta centrale, risultano scarichi (Figura V.6).

Tale situazione è ancora più evidente nei grafici degli spostamenti, dove le curve cromatiche sono indicative anche della diversa distribuzione degli spostamenti (Figura V.7).

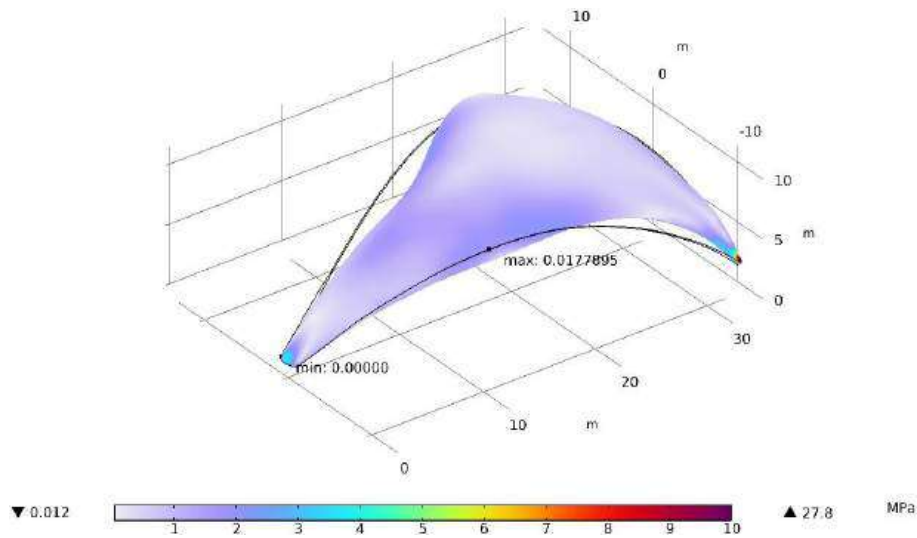
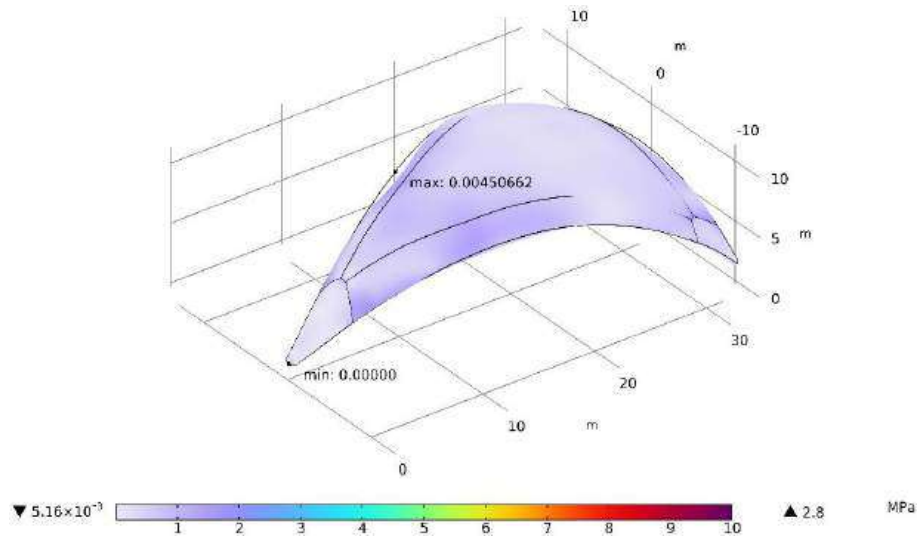


Figura V.6. Configurazione deformata del guscio originale e parzialmente.

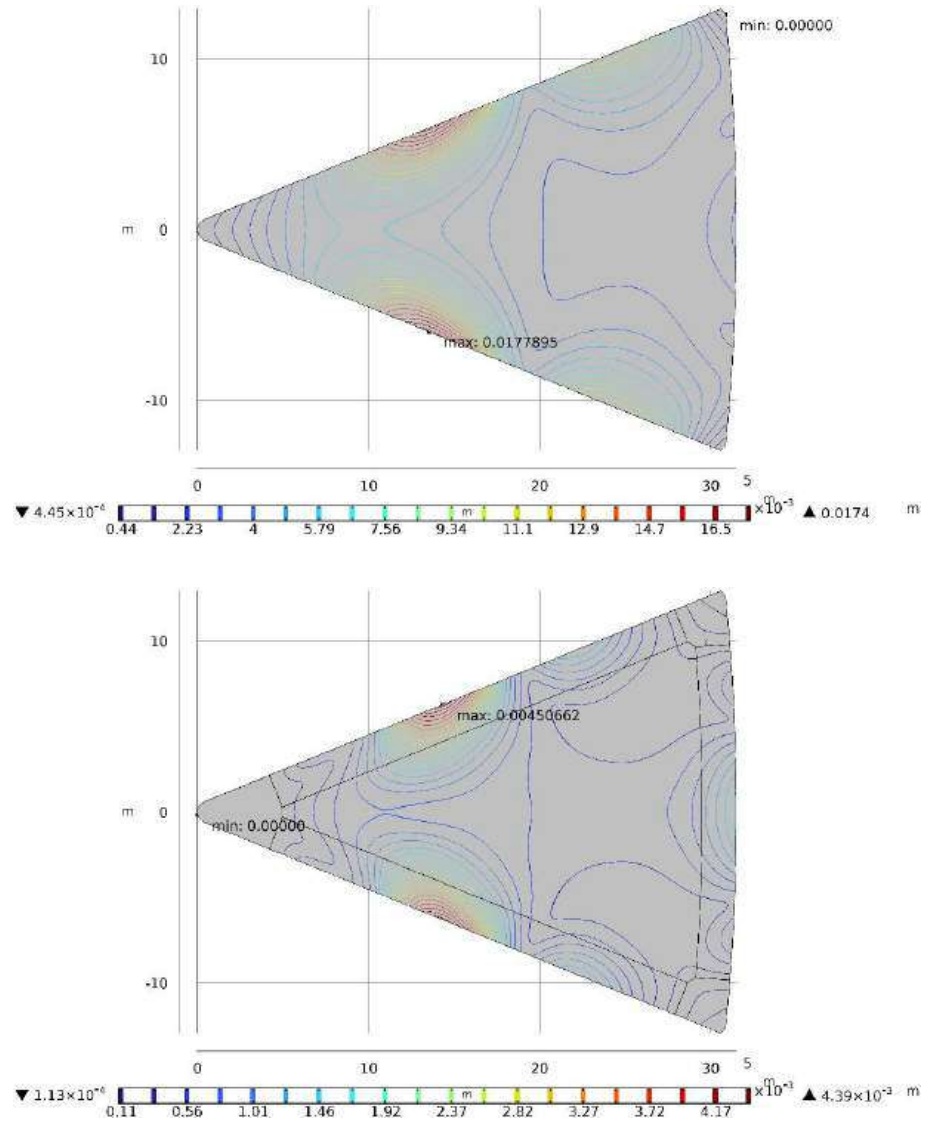


Figura V.7. Andamento degli spostamenti nei due diversi casi.

Più interessante appare il confronto dei grafici dell'andamento delle tensioni (Figura V.8): infatti, si nota come le sollecitazioni di trazione, nel primo caso concentrate in buona parte del guscio, dopo la parzializzazione sono pressoché annullate o, comunque, trascurabili rispetto a quelle di compressione ora prevalenti.

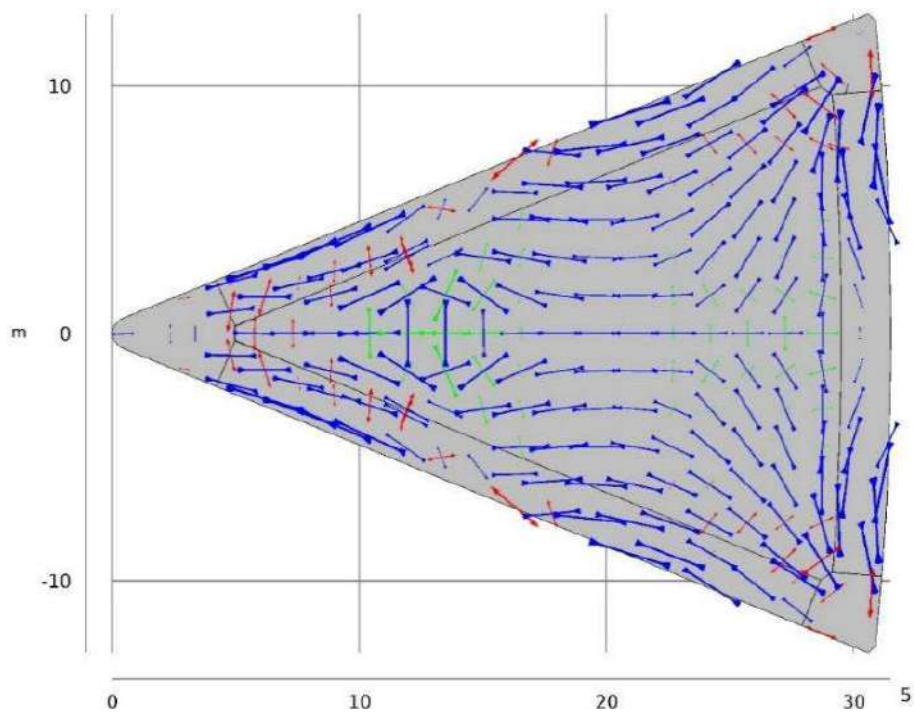
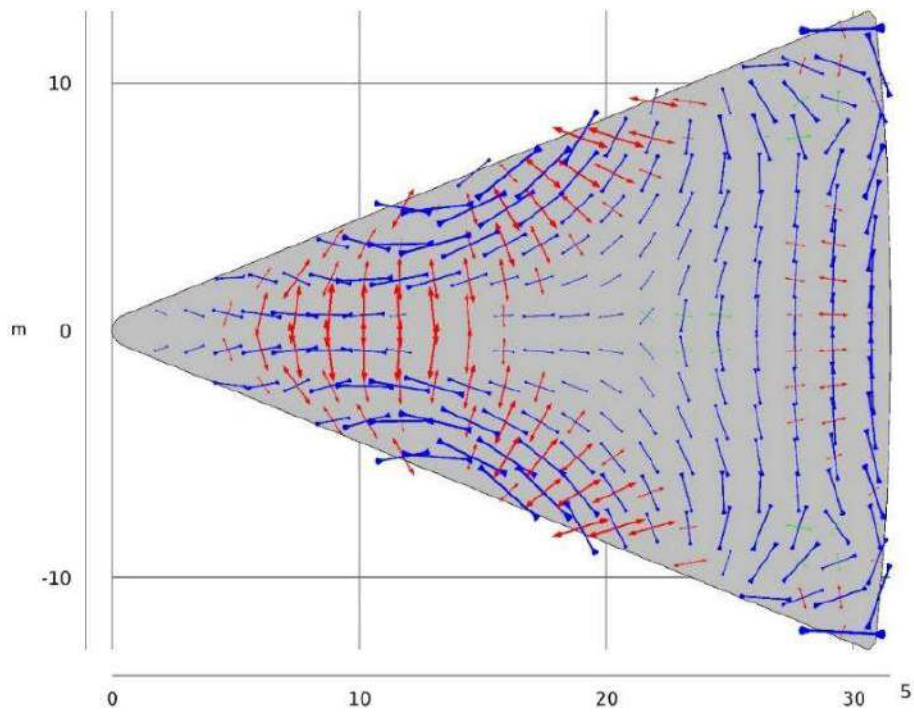


Figura V.8. Andamento delle tensioni nei due casi.

V.2.3.2 Guscio di Dübendorf

Rispetto al guscio di Deitingen, quello di Dübendorf presenta delle differenze, dimensionali e di forma, che hanno influito sui risultati ottenuti. In questo caso, l'intersezione del guscio con i piani secanti ha restituito sedici parti, di cui la maggior parte tra loro uguali data la simmetria⁴ (Figura V.9): quattro appoggi ancorati alla base, quattro elementi formanti i due costoloni dei lati lunghi, quattro elementi per i due lati minori e quattro parti formanti la calotta centrale. Anche in questo caso, le parti esterne sono vincolate tra loro e con i supporti laterali (incastrati, questi, a terra) attraverso delle cerniere, mentre i pezzi della calotta centrale sono appoggiati a quelli esterni e tra loro vincolati con delle cerniere interne a simulare le selle Gerber.

Dalla *skewness*, oltre agli elementi triangolari simil-equilateri, emergono, in rosso, degli elementi della *mesh* più irregolari (Figura V.10): ciò è dovuto alla correzione apportata per garantire la continuità tra le diverse parti componenti il guscio e impedire la formazione di interstizi che avrebbero causato il non corretto funzionamento strutturale del guscio.

⁴ Questa considerazione è utile nella prospettiva di un reiterato utilizzo delle casseforme.

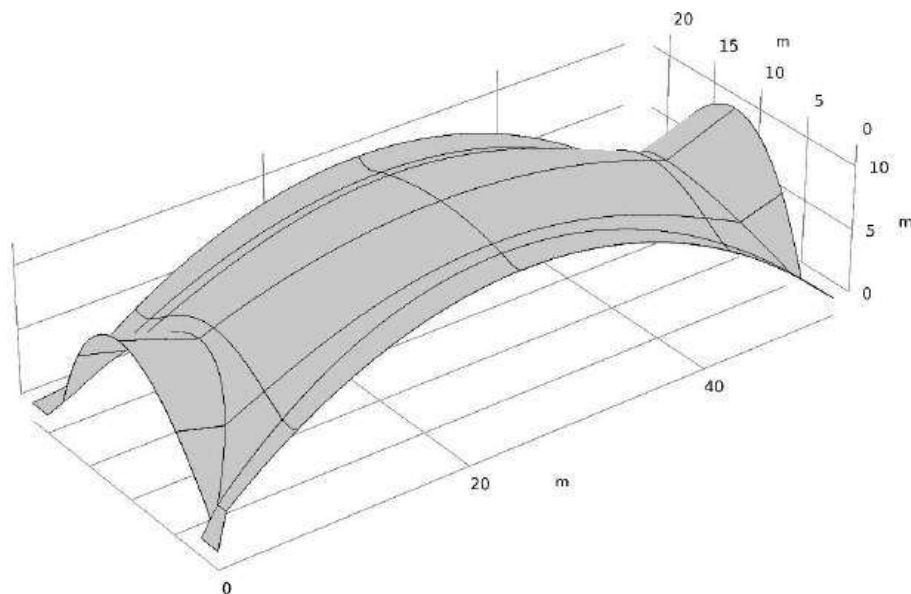


Figura V.9. Guscio di Dübendorf parzializzato.

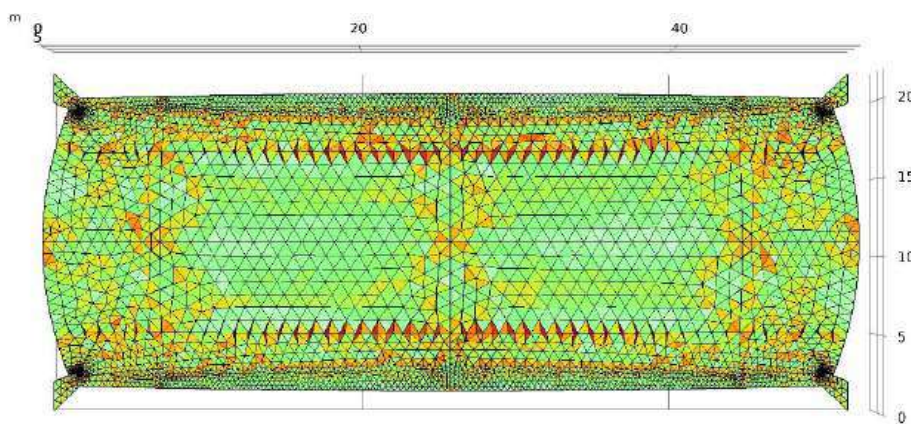


Figura V.10. Skewness del guscio parzializzato.

Strutturalmente, dal calcolo effettuato si evince come, rispetto al guscio nella sua integrità, il guscio parzializzato abbia una deformazione pressoché nulla, con uno spostamento massimo di circa

1 mm, vale a dire 1/6 rispetto alla situazione di partenza (Figura V.11).

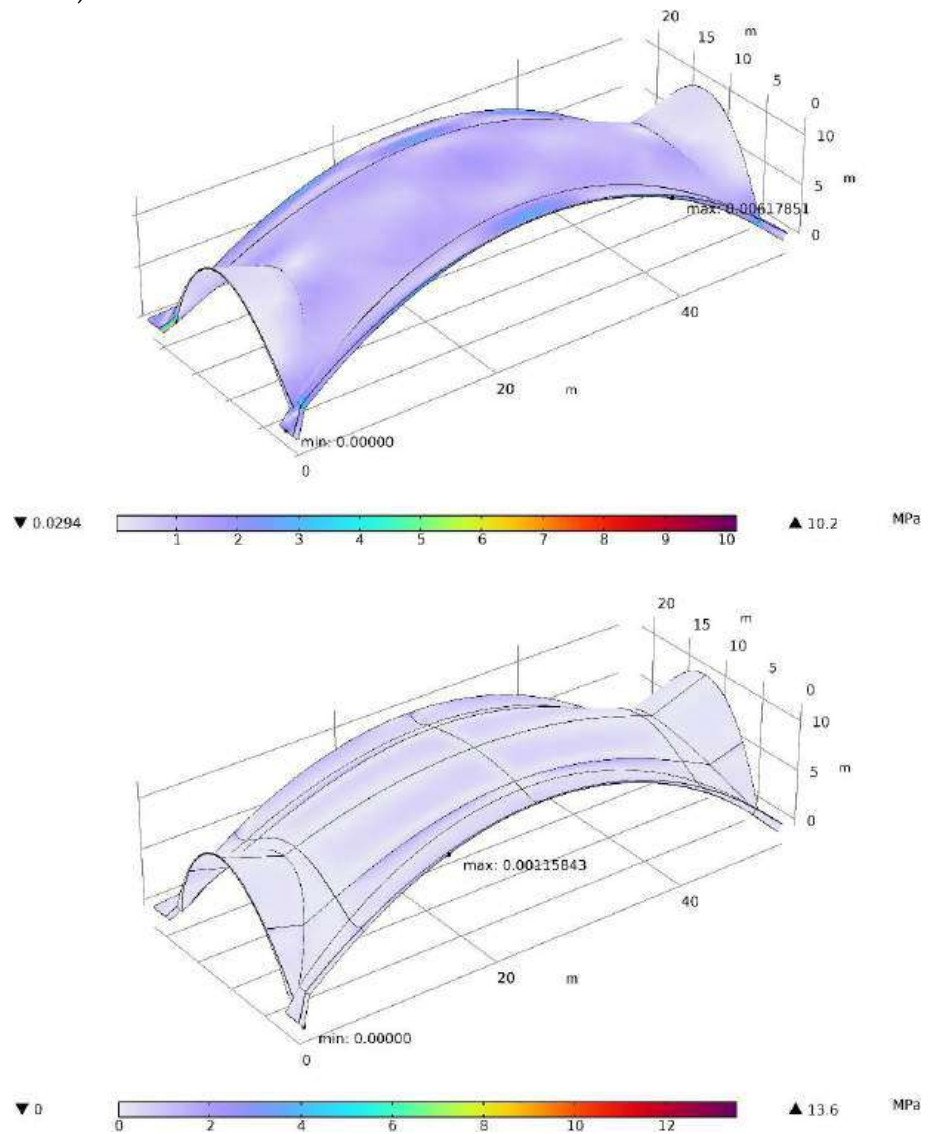


Figura V.11. Deformazione del guscio nei due casi.

I due modelli di seguito riportati (Figura V.12) mostrano il differente andamento degli spostamenti dei gusci sottoposti alle me-

desime condizioni di carico; in particolare, nel guscio parzializzato si nota come tali spostamenti siano concentrati soprattutto nei costoloni laterali, mentre gli altri elementi siano scarichi, a differenza del primo caso in cui anche l'area centrale era soggetta a spostamenti.

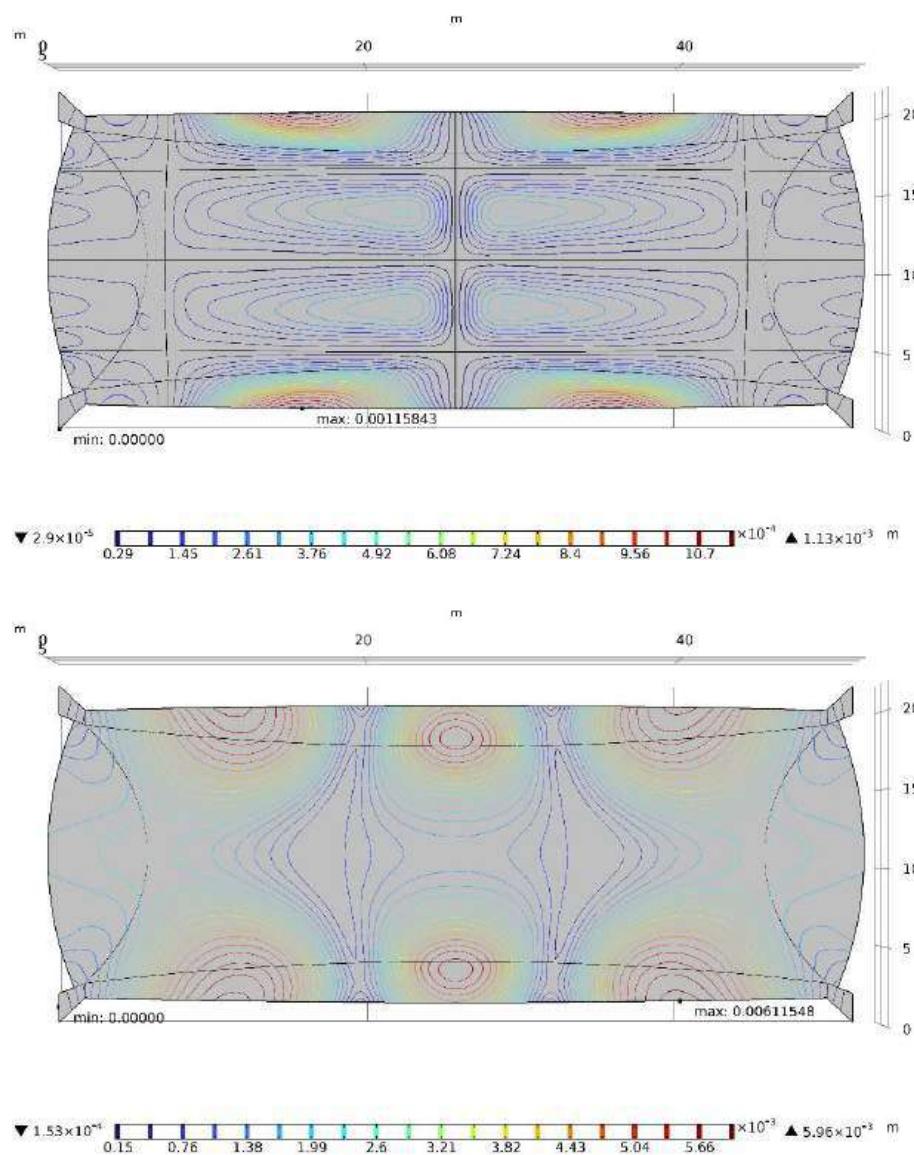


Figura V.12. Spostamenti del guscio nei due casi.

Le sollecitazioni a cui il guscio è soggetto rendono evidente, anche in questo caso, un miglioramento a seguito della parzializzazione (Figura V.13): si nota infatti dal confronto con il guscio non sezionato come le sollecitazioni di trazione siano di molto inferiori se paragonate a quelle di compressione preponderanti; inoltre, le quattro parti che formano i due lati minori del guscio sono quasi del tutto scariche.

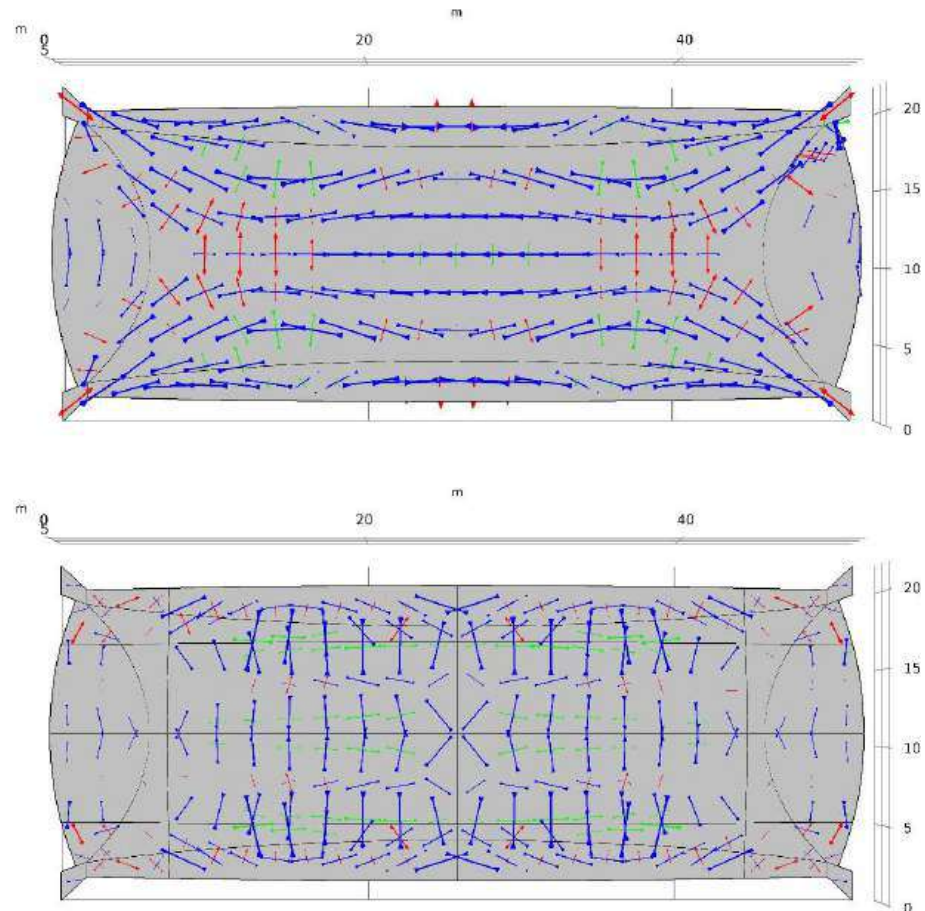


Figura V.13. Andamento delle tensioni nei due casi.

V.2.3.3 Guscio di Lugano

Data la sua forma perfettamente simmetrica, il guscio di Lugano, una volta parzializzato, risulta scomposto in (Figura V.14): quattro parti (quelle che lo collegano alla base con vincoli ad incastro) uguali, e dunque vantaggiose per la prefabbricazione, e collegate tra loro con vincoli cerniera; e la parte centrale circolare che vincolata a quelle laterali da cerniere interne, a simulare le selle Gerber.

Per quanto riguarda la *skewness* si può notare come alcune aree del guscio siano interessate da una *mesh* meno regolare rispetto al resto del guscio, in particolare l'elemento centrale e la zona degli altri elementi parallela al perimetro circolare dello stesso (Figura V.15). In questo caso, data la regolarità della forma e a differenza degli altri due gusci parzializzati, non è stato necessario correggere la *mesh* per evitare la formazione di interstizi tra le diverse parti.

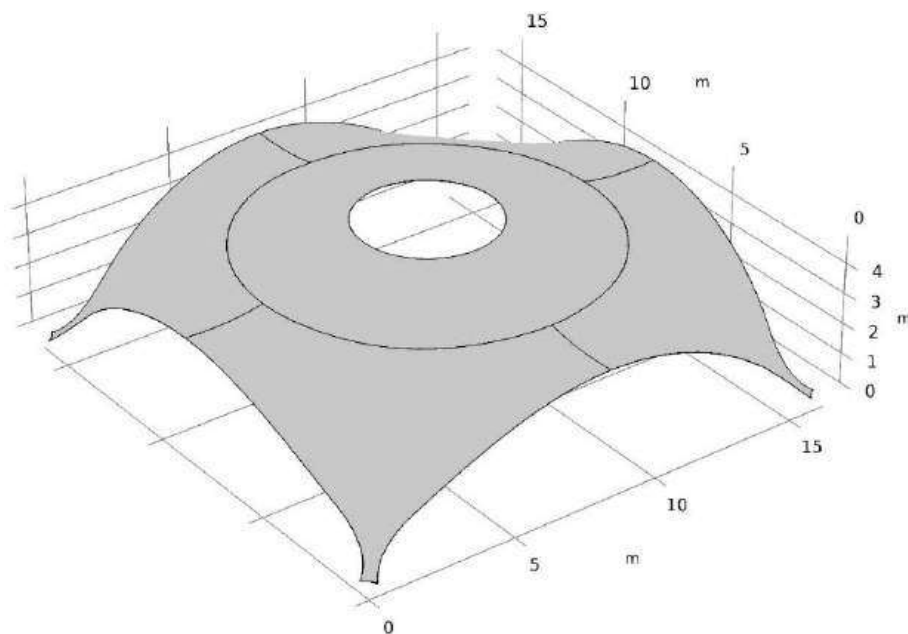


Figura V.14. Guscio di Lugano parzializzato.

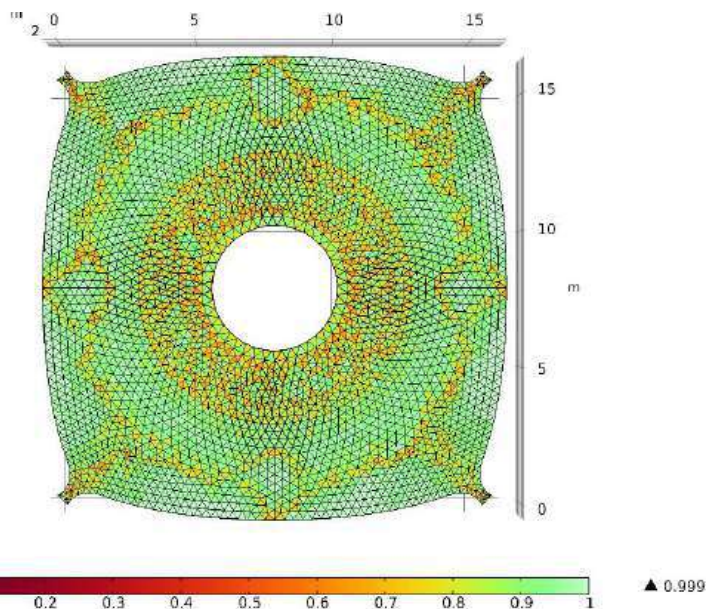


Figura V.15. Skewness del guscio parzializzato.

Dall'esame del grafico delle deformazioni (Figura V.16) si evince come si abbiano degli spostamenti di 0,6 mm; dunque, circa 1/6 rispetto a quelle ricavate nel guscio intero pari a 4 mm.

Anche dall'andamento degli spostamenti (Figura V.17) si nota come vi sia una sostanziale differenza, potendosi intuire come nel guscio parzializzato l'elemento centrale circolare sia sostanzialmente scarico e gli spostamenti maggiori si hanno in corrispondenza degli appoggi.

Tra i risultati ottenuti, probabilmente quello riguardante l'entità e l'andamento delle tensioni agenti è il più interessante. Come si può vedere (Figura V.18), infatti, rispetto alla configurazione del guscio non sezionato - in cui le sollecitazioni di trazione sono concentrate in corrispondenza dei quattro lati e le sollecitazioni di compressione occupano l'area attorno all'oculo centrale - il guscio parzializzato risulta scarico, con delle forze di compressione

minime agenti unicamente sull'elemento centrale e in corrispondenza degli appoggi.

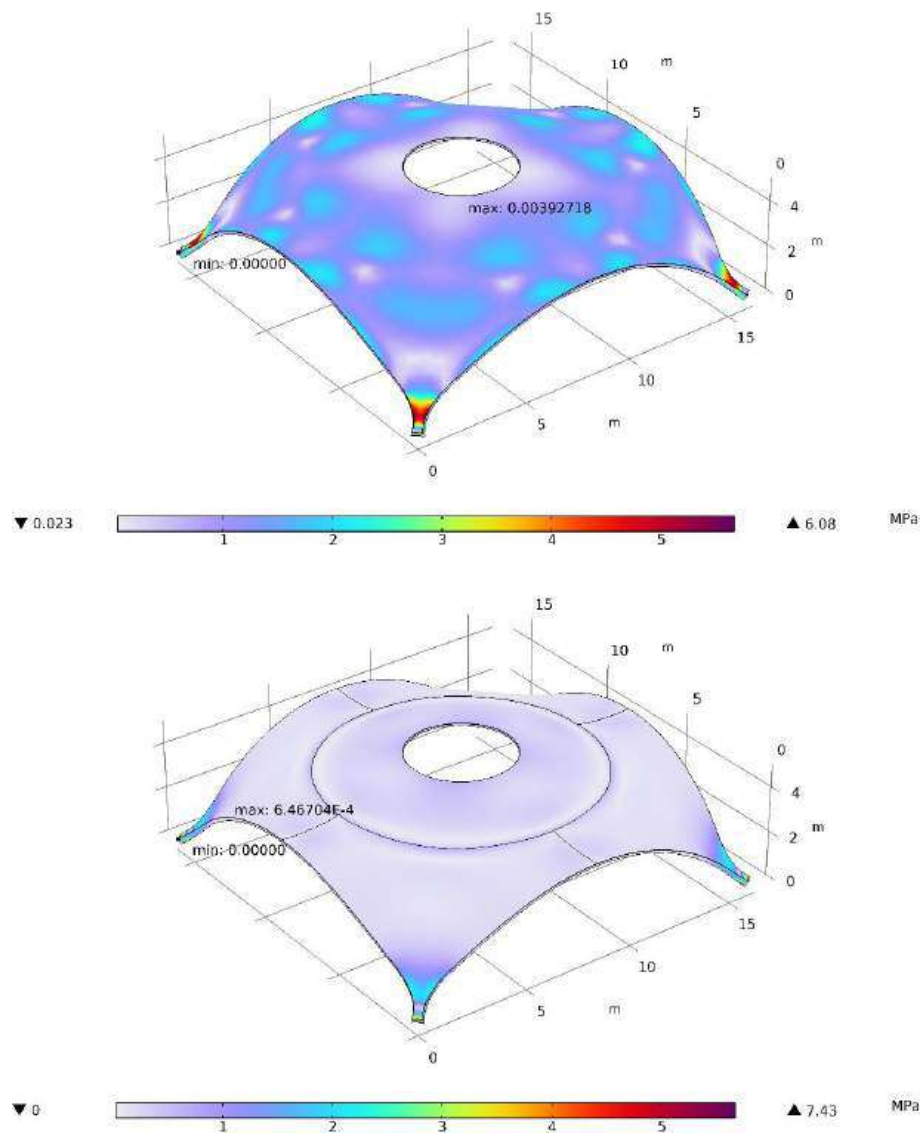


Figura V.16. Deformazioni del guscio nei due casi.

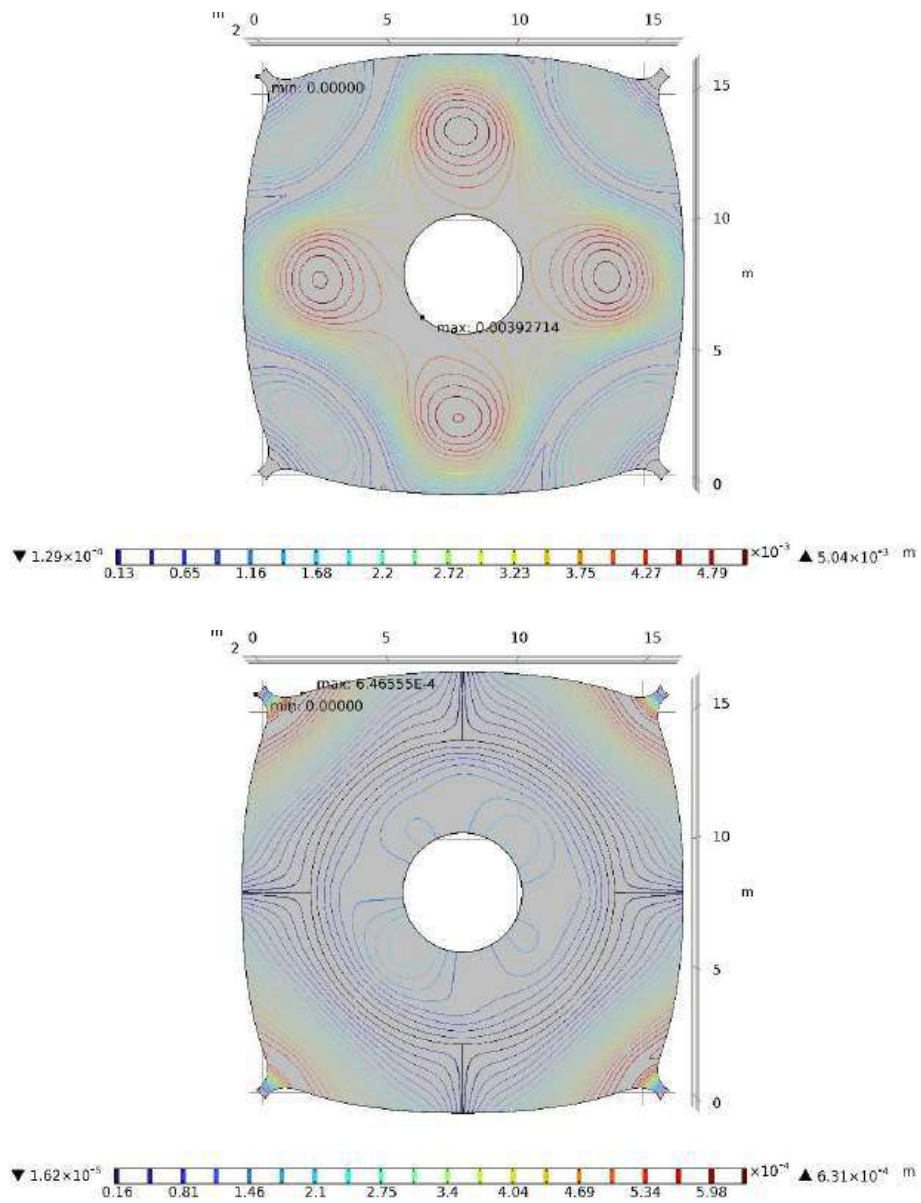


Figura V.17. Andamento degli spostamenti nei due casi.

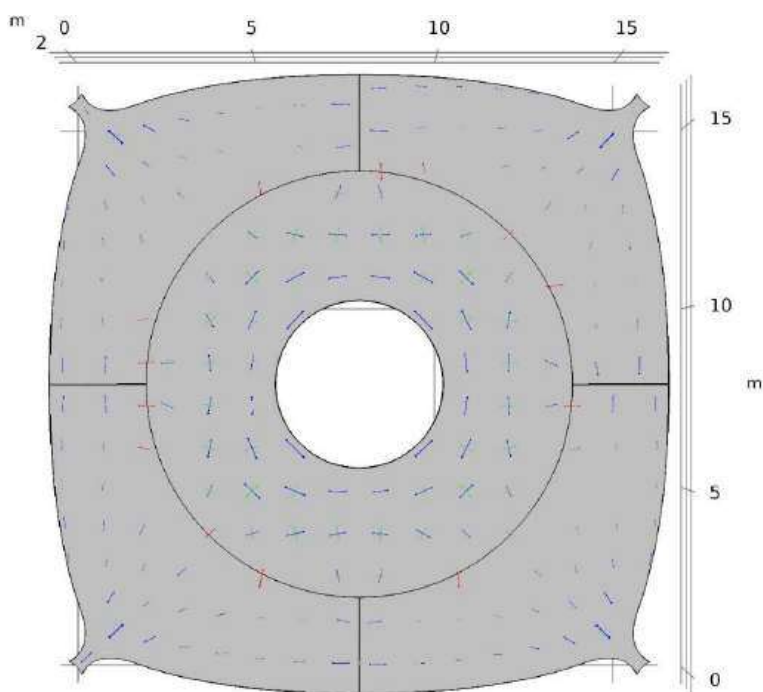
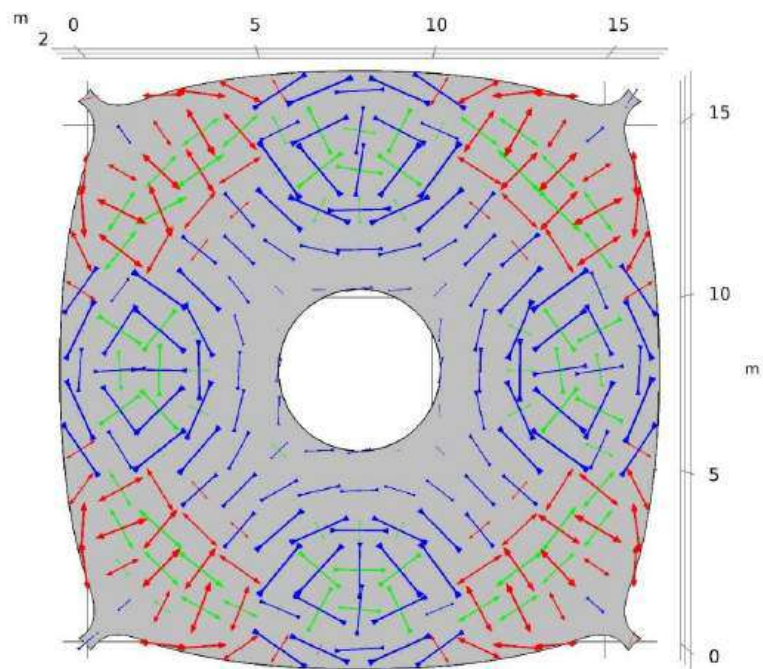


Figura V.18. Andamento delle tensioni nei due casi.

I risultati derivati dalla parzializzazione dei tre gusci considerati dimostrano come i criteri adottati per una simile operazione siano da ritenersi attendibili ed estendibili anche ad altri casi.

V.3 GUSCI PARAMETRICI

Dopo avere appurato che i gusci di Isler, una volta parzializzati, continuano ad avere una buona risposta strutturale (persino migliore dei gusci non parzializzati), per rendere il sistema che si sta cercando di definire ancora più generale e adattabile a tutti i casi di gusci *hängeform* si è proceduto alla modellazione parametrica di un guscio-modello.

V.3.1 GUSCIO-MODELLO PARAMETRICO

Il guscio-modello è stato realizzato tramite Grasshopper e Kangaroo, entrambi *plugin* di Rhinoceros. I parametri che si è deciso di rendere suscettibili di variazione, mantenendo sempre la conformazione di membrana sospesa e ribaltata, sono essenzialmente:

- le condizioni di carico;
- le dimensioni in pianta;
- il numero di appoggi;
- le coordinate spaziali degli appoggi alla base;
- l'altezza complessiva del guscio.

Il modello ricavato (Figura V.19) permette di ottenere, al variare dei parametri, delle *mesh* o superfici che, visualizzabili e editabili su Rhinoceros, rappresentano proprio i diversi possibili gusci *hängeform*.

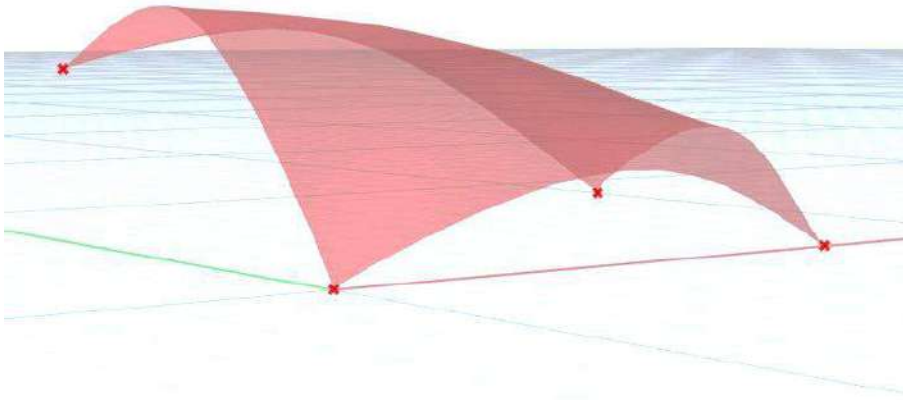
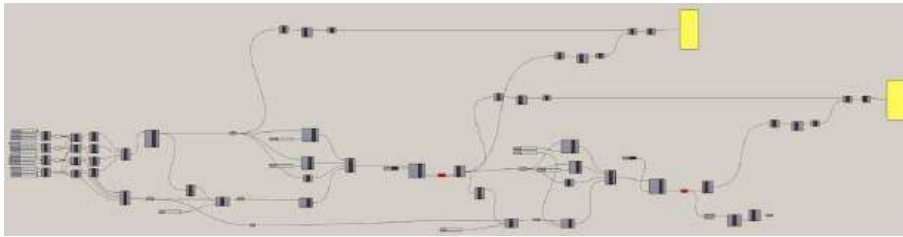


Figura V.19. Modello di Grasshopper e visualizzazione in Rhinoceros.

V.3.2 MODELLAZIONE DEI GUSCI PARAMETRICI DA ANALIZZARE

Le forme dei gusci da analizzare ricavate attraverso il modello parametrico sono state scelte, oltre che considerando i parametri da seguire in prospettiva della successiva parzializzazione, anche sulla base di alcune altre osservazioni, riconducibili in particolare a due aspetti:

- il primo aspetto è la simmetria che i gusci dovranno possedere almeno rispetto ad uno degli assi, in modo da favorire la realizzazione di più componenti uguali con conseguente risparmio in termini di costi e di tempo;

- il secondo aspetto, più operativo, è legato al trasporto; dunque, realizzando dei componenti che siano trasportabili dallo stabilimento di produzione al cantiere senza che vi sia la necessità di trasporti eccezionali.

Dal momento che secondo il Codice della strada (art.61) si considerano eccezionali i trasporti effettuati con veicoli che non superano una larghezza di 2,55 m e una lunghezza di 12 m per veicoli isolati, o 18,75 m per autoarticolati, nella scelta dei gusci parametrici si è tenuto conto proprio di queste limitazioni dimensionali.

Fatte queste premesse, i due gusci ricavati dal modello parametrico scelti per la modellazione, lo studio strutturale e la parzializzazione hanno le seguenti caratteristiche:

- il primo guscio si estende su uno spazio di 6x12 m e ha altezza di 4,80 m; data la sua conformazione, simile a quella del guscio di Dübendorf, si potrebbe pensare ad un suo impiego accostandolo ad altri moduli uguali per la copertura di grandi spazi;
- il secondo guscio ha forma di pentagono regolare di lato 12 m e si eleva in altezza per circa 4,50 m; la sua conformazione potrebbe essere adatta per impianti sportivi o mercati coperti.

I passaggi intermedi che hanno portato alla loro definizione sono stati: l'assegnazione su Grasshopper dei parametri e l'automatica modellazione nell'interfaccia di Rhinoceros; la creazione della *mesh*; mantenendosi su Rhinoceros, l'estrapolazione dei nodi e dei bordi della *mesh* e da questi, attraverso il comando Patch, la definizione della superficie dei due gusci (Figura V.20).

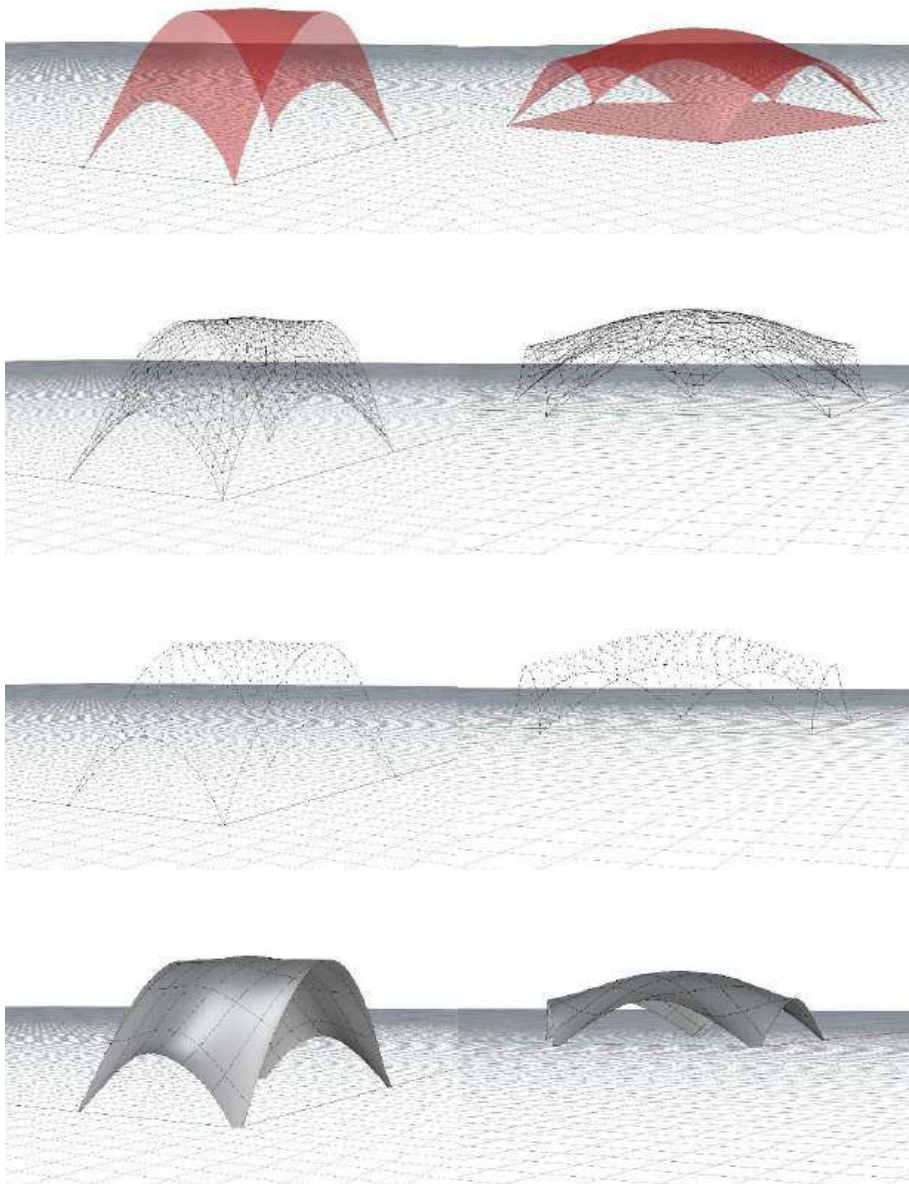


Figura V.20. Passaggi intermedi per la realizzazione dei gusci parametrici e risultato ottenuto.

V.3.3 ANALISI STRUTTURALE DEI GUSCI PARAMETRICI

L'analisi del comportamento strutturale dei gusci parametrici ricavati (effettuata con il *software* COMSOL Multiphysics®) ha restituito dei risultati che dimostrano, ancora una volta, quanto il metodo di determinazione della forma tramite *hängeform* sia efficace per ottenere delle strutture soggette a sola compressione.

I dati di partenza comuni ad entrambi i gusci sono:

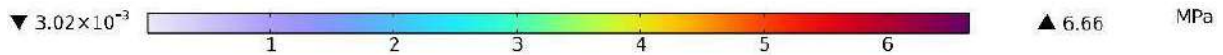
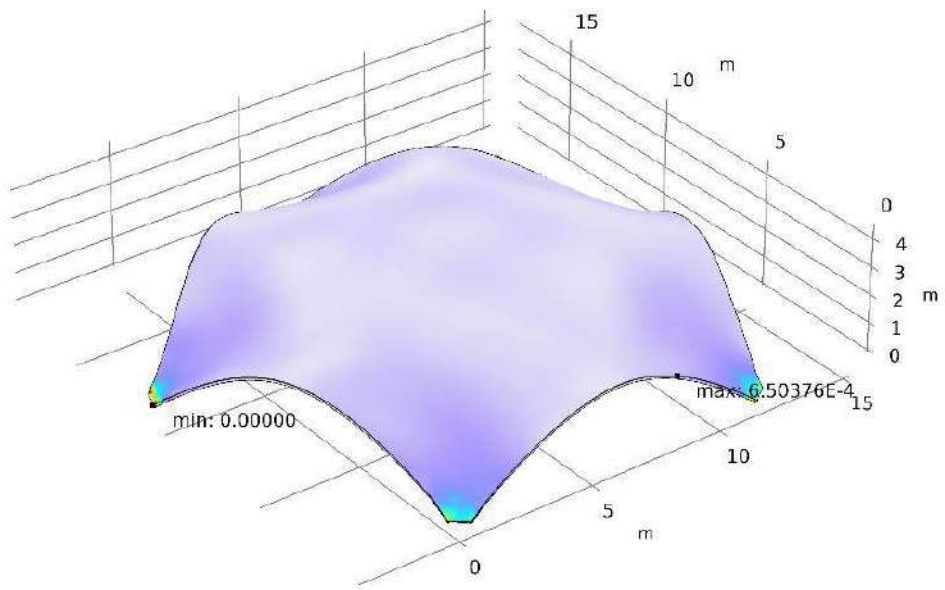
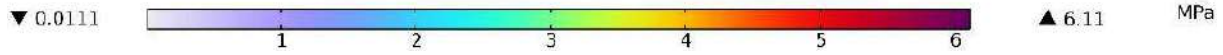
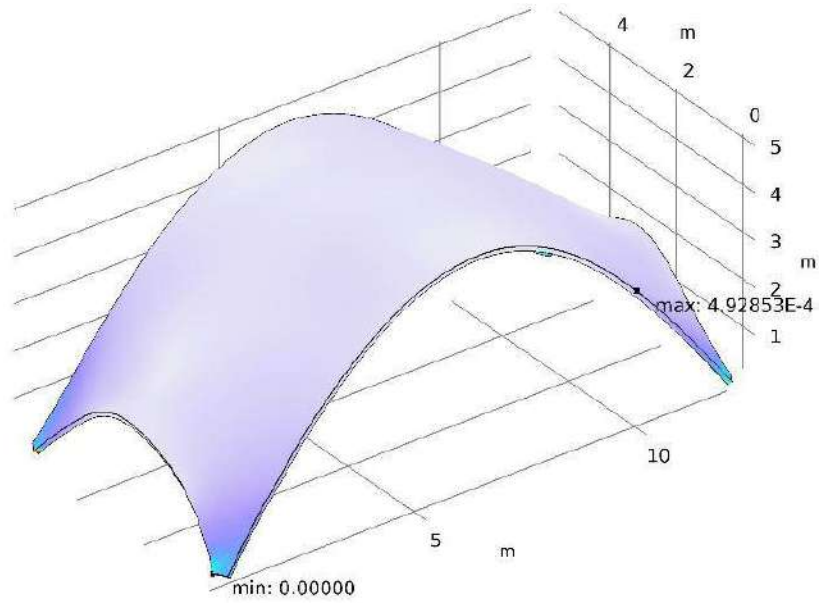
- spessore, derivato da molti dei casi di gusci *hängeform* in precedenza studiati e assunto costante, pari a 9 cm;
- materiale, calcestruzzo fibrorinforzato per stampa 3D con fibre di polipropilene caratterizzato da densità pari a 2500 kg/m^3 , modulo di Young di 30 GPa e coefficiente di Poisson di 0,20. La stampa 3D e l'assenza di armatura permettono di semplificare il processo di prefabbricazione in stabilimento e di ridurre tempi e costi, considerata anche l'assenza di casseforme;
- vincoli, incastri posti alle basi; cerniere e, nel solo caso del guscio pentagonale, cerniere interne a simulare il comportamento di selle Gerber;
- forze applicate, forza di gravità e un carico accidentale di 1 kN/m^2 uniformemente distribuito sull'intera superficie.

Come si vede dalle immagini (Figura V.21 e Figura V.22) la simulazione restituisce, in entrambi i casi, dei gusci in cui lo spostamento massimo è pari a 0,5 mm nel guscio rettangolare e a 0,6 mm nel guscio pentagonale. Considerate le dimensioni complessive dei gusci, lo spessore e le forze su di essi applicate, si possono ritenere tali spostamenti del tutto trascurabili.

Nella pagina seguente

Figura V.21. Deformata del guscio rettangolare e valore massimo di spostamento.

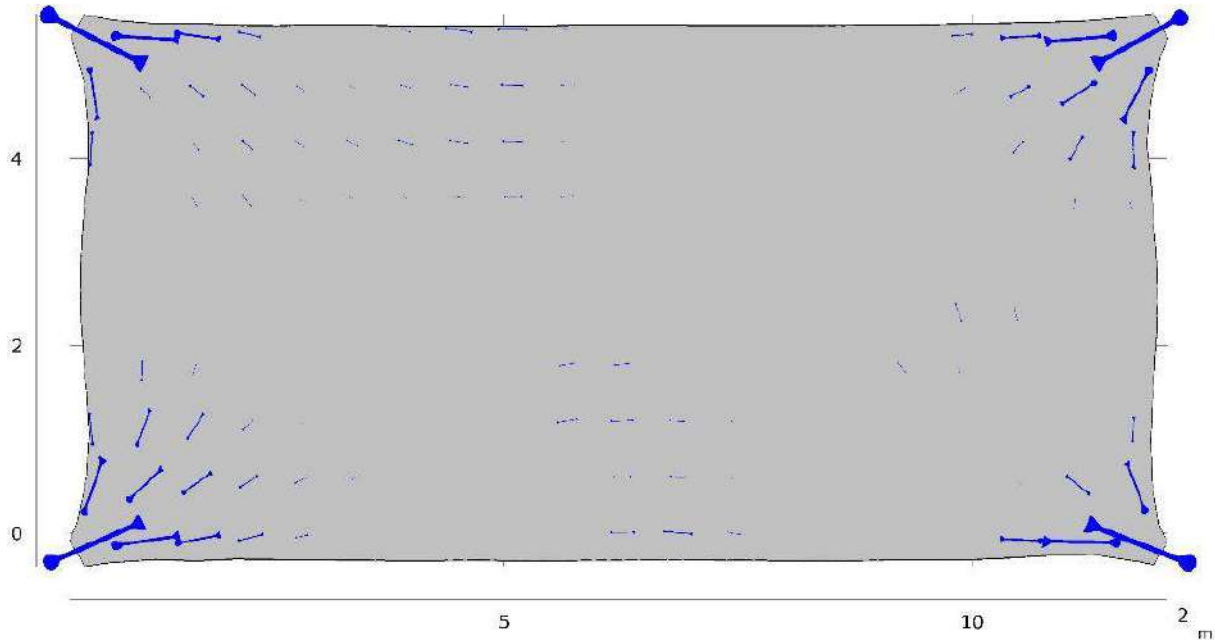
Figura V.22. Deformata del guscio pentagonale e valore massimo di spostamento.



350

L'efficacia dei modelli *hängeform* si rende esplicita ancora di più attraverso la rappresentazione degli sforzi principali agenti sulle superfici dei gusci. Come si può vedere (Figura V.23 e Figura V.24), infatti, gli sforzi di trazione sono in entrambi i casi del tutto assenti mentre quelli di compressione si concentrano soprattutto alle basi, facendo in modo che le strutture siano praticamente scariche.

Figura V.23. Sforzi principali sul guscio rettangolare.



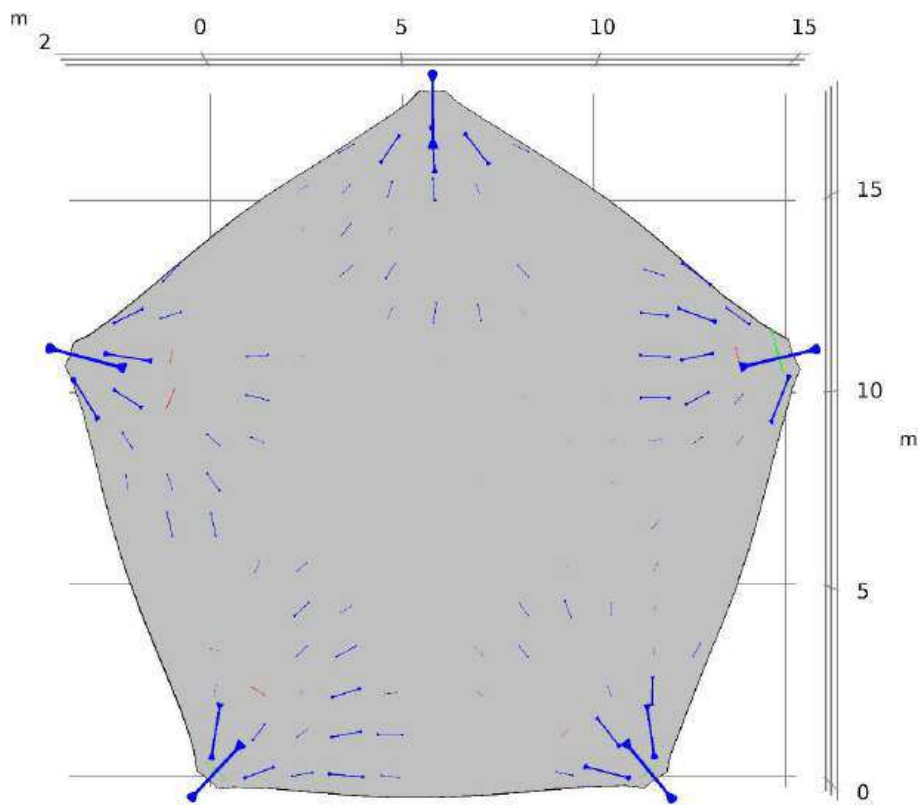


Figura V.24. Sforzi principali sul guscio pentagonale.

Una verifica, semplice quanto efficace, della bontà dei risultati ottenuti consiste nel ricavare il valore delle reazioni vincolari agenti lungo la direzione z e confrontarlo con l'azione combinata di peso della struttura + carico accidentale.

I valori noti sono quelli riguardanti l'area (A), il volume (V), la densità (ρ), la somma delle reazioni lungo z (F_{zTOT}) e il carico uniformemente distribuito (F_A)⁵. I valori da determinare sono il peso della struttura (P_s) e il peso del carico applicato (P_C).

⁵ A , V e F_{zTOT} sono stati ricavati su COMSOL tramite "Surface Integration".

per il guscio rettangolare:

$$A = 82,33 \text{ m}^2$$

$$F_{zTOT} = 262,55 \text{ kN}$$

$$V = 7,41 \text{ m}^3$$

$$F_A = 1 \text{ kN/m}^2$$

$$q = 2500 \text{ kg/m}^3$$

$$P_S = 7,41 \times 2500 = 18525 \text{ kg} = 181,73 \text{ kN}$$

$$P_C = 82,33 \times 1 = 82,33 \text{ kN}$$

$$P_S + P_C = F_{zTOT} \Rightarrow 181,73 + 82,33 = 262,55 \Rightarrow \mathbf{264,06 \approx 262,55}$$

per il guscio pentagonale:

$$A = 266,84 \text{ m}^2$$

$$F_{zTOT} = 852,27 \text{ kN}$$

$$V = 24,02 \text{ m}^3$$

$$F_A = 1 \text{ kN/m}^2$$

$$q = 2500 \text{ kg/m}^3$$

$$P_S = 24,02 \times 2500 = 60025 \text{ kg} = 588,84 \text{ kN}$$

$$P_C = 266,84 \times 1 = 266,84 \text{ kN}$$

$$P_S + P_C = F_{zTOT} \Rightarrow 588,84 + 266,84 = 852,27 \Rightarrow \mathbf{855,68 \approx 852,27}$$

In entrambi i casi l'assunto di partenza ($P_S + P_C = F_{zTOT}$) è stato rispettato.

V.4 GUSCI PARAMETRICI PARZIALIZZATI PREFABBRICATI

La parzializzazione dei gusci, ricavati dalla modellazione parametrica e pensati per essere prefabbricati in stabilimento, costituisce un ulteriore passo per una più pratica e agevole progettazione e successiva messa in opera di strutture a guscio sottili utili per la copertura di ambienti di diverse forme e dimensioni. Per giungere a tale obiettivo è però necessario, oltre che applicare i

piani secanti in modo opportuno seguendo i criteri prestabiliti, anche una verifica dei gusci parzializzati in tal modo ottenuti.

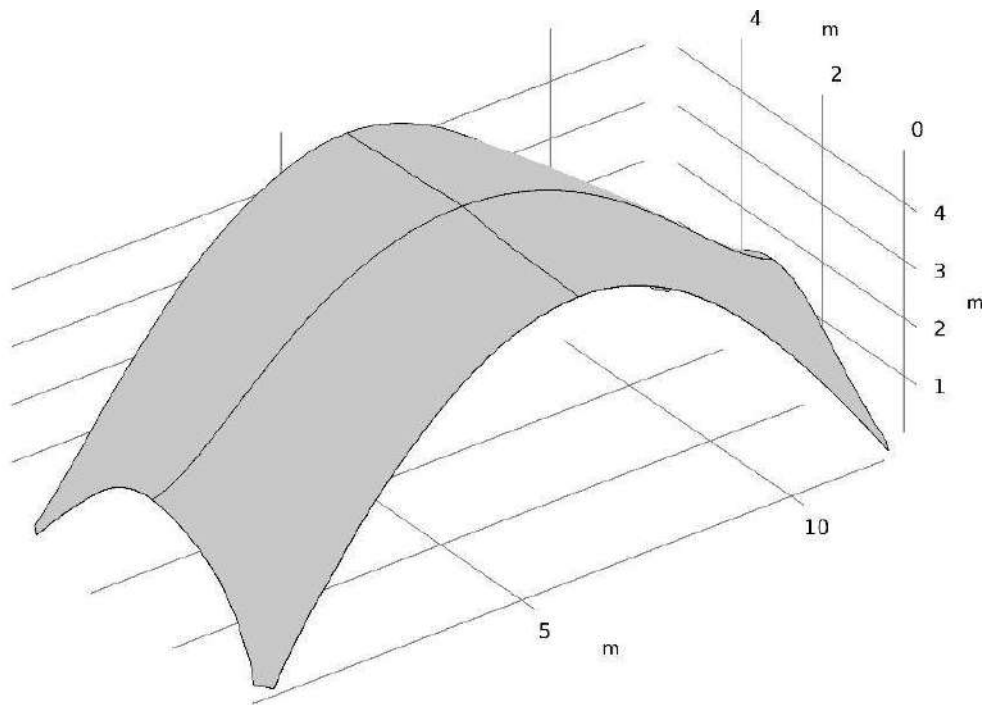
V.4.1 PARZIALIZZAZIONE DEI GUSCI PARAMETRICI

La risposta strutturale ottenuta dall'analisi effettuata permette di procedere alla parzializzazione dei due gusci parametrici potendo facilmente applicare i criteri stabiliti come già è stato fatto nel caso dei tre gusci di Isler. La presenza di sollecitazioni di compressione concentrate nelle aree vicino alle basi ha permesso inoltre una maggiore libertà, rispetto ai gusci precedentemente parzializzati, nell'assegnazione di forme e dimensioni alle parti in cui ognuno dei gusci è stato sezionato.

Per quanto riguarda il guscio rettangolare, le dimensioni modeste e la forma semplice e regolare hanno consentito una sua parzializzazione seguendo i due assi di simmetria e ottenendo, in tal modo, quattro parti a due a due uguali (Figura V.25). Le altre caratteristiche fisico-meccaniche coincidono con il guscio non parzializzato.



Figura V.25. Guscio parametrico rettangolare parzializzato.



La parzializzazione del guscio pentagonale è stata ottenuta suddividendo il guscio secondo quelli che potrebbero considerarsi (considerando la superficie come una figura geometrica piana) gli apotemi⁶ del pentagono, arrivando così alla definizione di cinque “spicchi” di uguali forma e dimensioni. Onde evitare l’insorgere di difetti legati alle terminazioni a cuspide, similmente a quanto precedentemente fatto nel caso del guscio di Lugano, centralmente si è ricavata una ulteriore porzione, la sesta, circolare (Figura V.26).

⁶ Nei poligoni regolari, di cui il pentagono fa parte, con “apotema” si indica il raggio della circonferenza in essi inscritta.

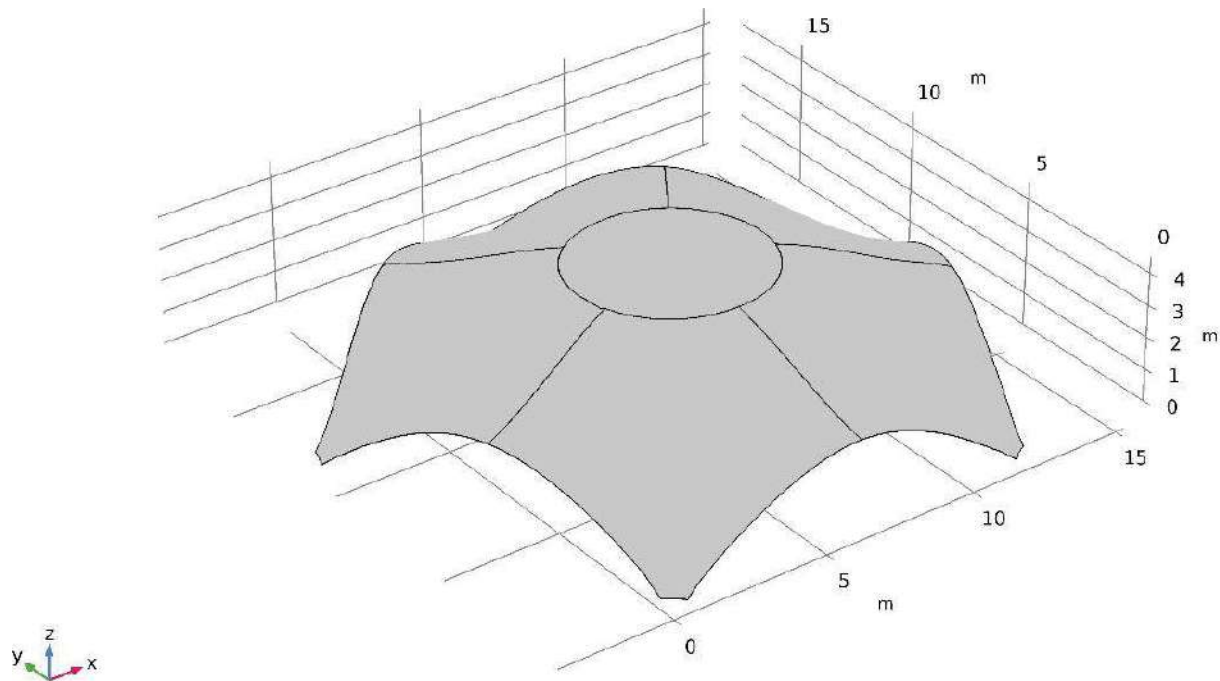


Figura V.26. Guscio parametrico pentagonale parzializzato.

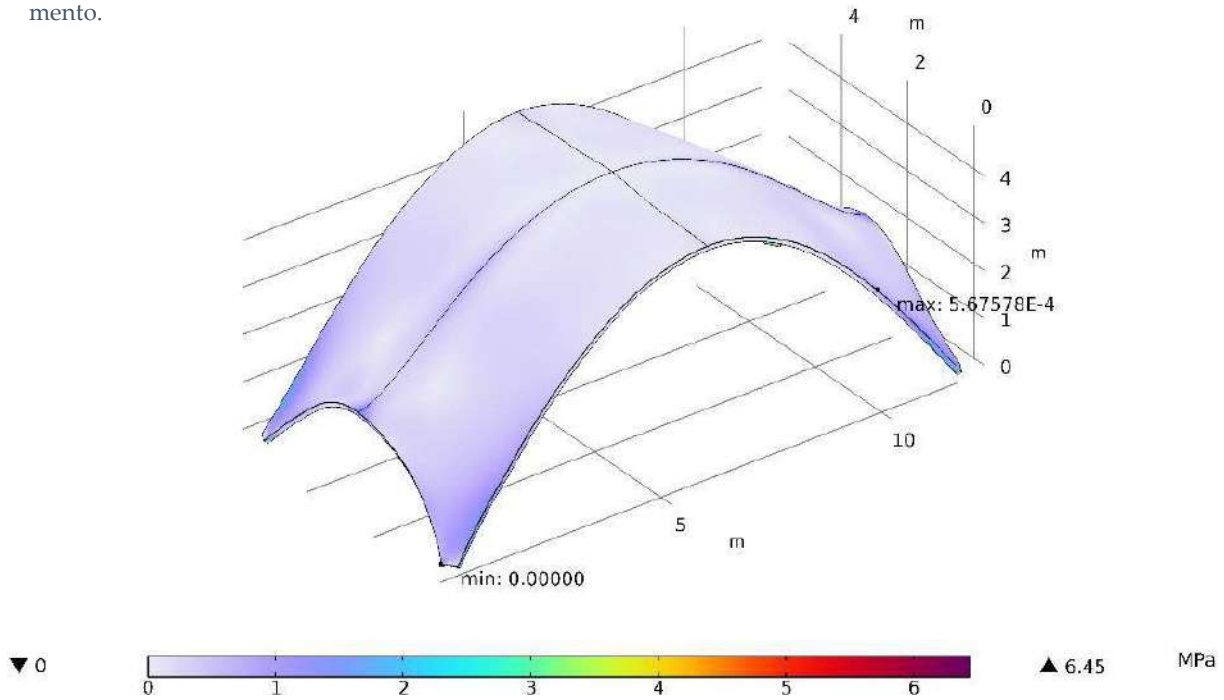
V.4.2 ANALISI DEI GUSCI PARAMETRICI PARZIALIZZATI

L'analisi dei due gusci parametrici conferma, anche a seguito della parzializzazione, l'efficacia della soluzione proposta per la realizzazione e successiva messa in opera di strutture di questo tipo.

Dai risultati ottenuti, infatti, si evince come l'operazione di parzializzazione e la successiva applicazione dei vincoli atti a simulare le connessioni tra le diverse parti non abbia sostanzialmente modificato la risposta strutturale di entrambi i casi considerati. Considerando, ad esempio, i valori massimi di spostamento, si vede come questi, se rapportati ai valori ottenuti nel caso dei gusci non sezionati, rimangano nell'ordine del decimo di mm: per

Figura V.27. Deformata del guscio rettangolare parzializzato e valore massimo di spostamento.

il guscio rettangolare si ha un valore assoluto del modulo di spostamento pari a circa 0,5 mm, mentre nel guscio pentagonale tale valore si attesta attorno a 0,9 mm (Figura V.27 e Figura V.28).



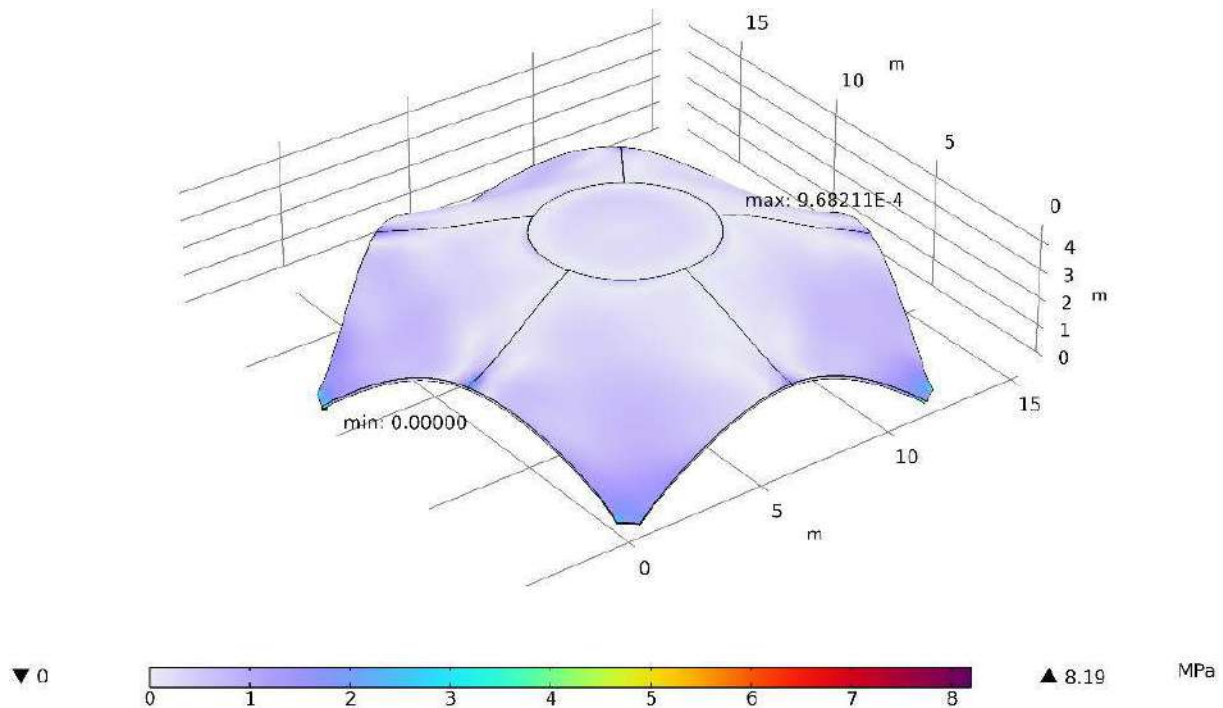


Figura V.28. Deformata del guscio pentagonale parzializzato e valore massimo di spostamento.

La distribuzione delle isoipse degli spostamenti si ha, nel caso del guscio rettangolare, simmetricamente rispetto ai due assi di simmetria del guscio ottenuto e in particolare i picchi si hanno esternamente nelle aree vicine alle basi, lasciando la parte centrale del guscio inalterata (Figura V.29).

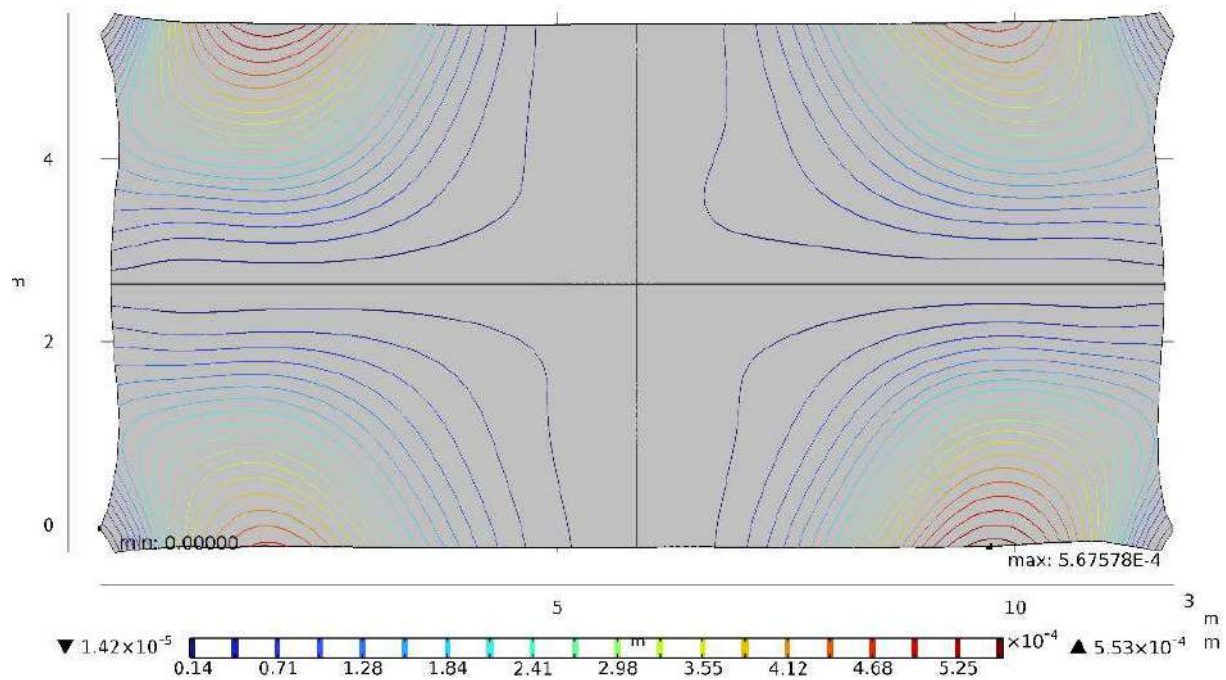


Figura V.29. Andamento degli spostamenti nel guscio rettangolare parzializzato.

Una simile situazione si verifica nell'altro guscio parzializzato, quello pentagonale, in cui gli spostamenti massimi - comunque non eccedenti mai i decimi di mm - sono concentrati nelle zone vicine alle basi, diminuendo man mano ci si avvicina alla calotta centrale, che risulta completamente scarica (Figura V.30).

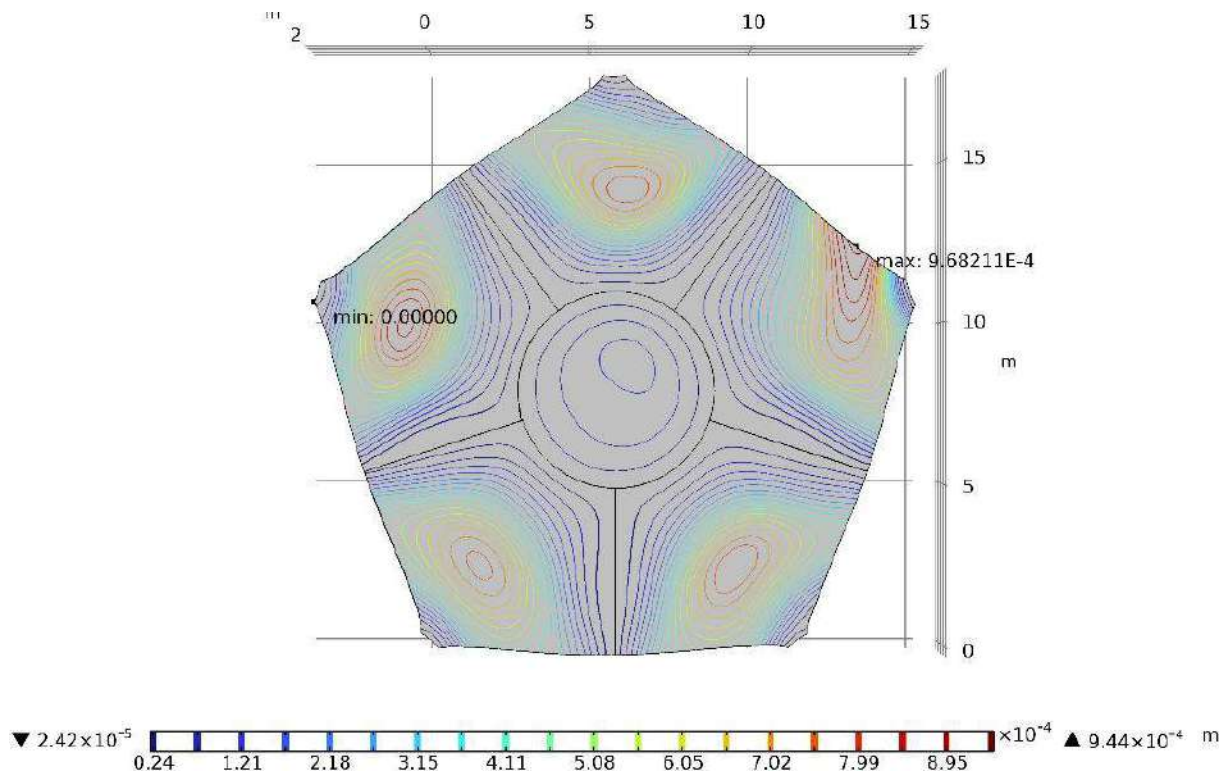


Figura V.30. Andamento degli spostamenti nel guscio pentagonale parzializzato.

Ancora una volta, come è stato nei casi di studi fin qui studiati, a fornire un dato di grande interesse ai fini del presente studio è l'andamento degli sforzi principali. In entrambi i casi (Figura V.31 e Figura V.32), infatti, si osserva che, sebbene questi risultino distribuiti più uniformemente rispetto ai gusci non parzializzati, tuttavia le uniche sollecitazioni rilevate sono quelle di compressione, essendo quasi del tutto nulle quelle di trazione e avallando in tal modo quanto teoricamente affermato.

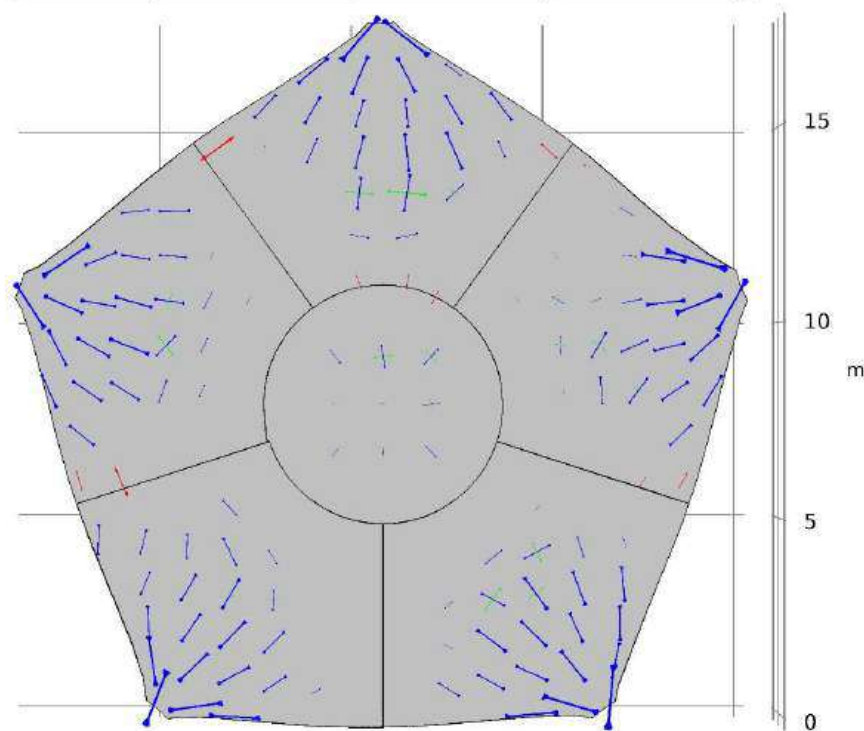
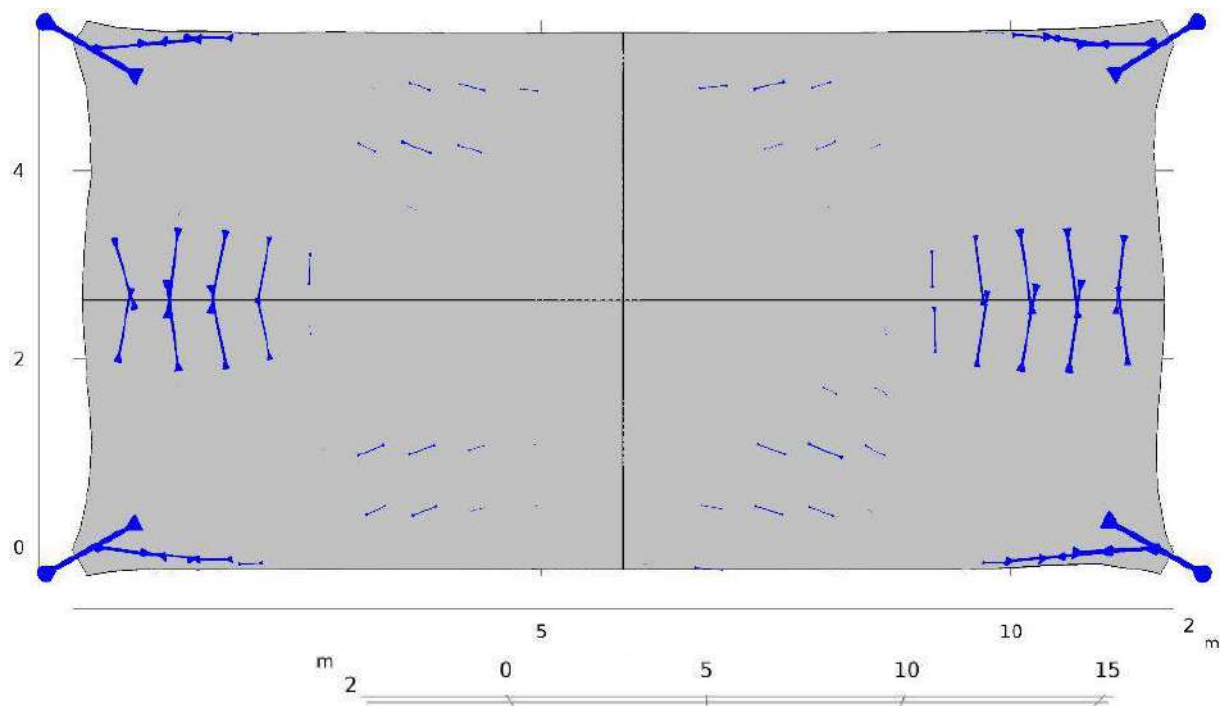


Figura V.31. Sforzi principali del guscio rettangolare parzializzato.

Figura V.32. Sforzi principali del guscio pentagonale parzializzato.

CONCLUSIONI

Attraverso l'*excursus* presentato sui diversi aspetti riguardanti i gusci sottili - le caratteristiche che li contraddistinguono, la loro origine e sviluppo, la descrizione delle modalità di determinazione della forma, fino alla loro progettazione e messa in opera - è possibile arrivare ad alcune considerazioni di sintesi.

L'analisi condotta ha infatti permesso di delineare un quadro organico e articolato dei gusci sottili, evidenziando come esse rappresentino una soluzione costruttiva estremamente versatile, capace di coniugare efficienza strutturale, economia di materiale e una notevole libertà formale.

Ciò che è emerso in maniera ricorrente, e che si è più volte cercato di sottolineare, è la possibilità offerta dai gusci sottili, siano essi elementi tecnici (dunque, le volte sottili) o le strutture a guscio, di potere coprire ambienti di diverse forme e dimensioni differenti tra loro. Si passa infatti dal vano di una semplice abitazione ai grandi impianti sportivi, dagli edifici religiosi alle coperture per stabilimenti industriali, fino ad arrivare ad infrastrutture di ampio respiro. Tutto ciò avviene con spessori che, anche nei casi dei gusci di maggiori dimensioni trattati in letteratura - con riferimento alle opere di Isler, Dieste o Candela, tra i più rappresentativi progettisti del settore - non superano quasi mai i 10 cm.

Tale caratteristica conferma l'elevata efficienza dei gusci, capaci di ottimizzare le proprie prestazioni grazie alla loro resistenza per forma.

L'indagine sul comportamento strutturale svolta sulle due diverse tipologie di gusci (le *volte realine* appartenenti alla tradizione costruttiva siciliana e i gusci *hängeform* progettati dallo svizzero Heinz Isler) ha consentito di appurarne il comportamento coesivo e le capacità di risposta alle sollecitazioni su di esse applicate.

I gusci *hängeform* (così come, implicitamente, le altre categorie di gusci indagate nel corso della tesi) hanno costituito il punto di partenza per l'elaborazione della proposta qui presentata, relativa alla progettazione di gusci parametrici, parzializzati e prefabbricati.

La parametrizzazione è uno strumento fondamentale per individuare forme che seguano il principio dell'*hängeform*: per tale motivo, si è cercato di definire, all'interno dell'apposito *software*, dei criteri generali per la selezione dei parametri geometrici e meccanici utili alla generazione di superfici coerenti con tale logica. L'obiettivo è ottenere, in modo relativamente agevole, gusci soggetti quasi esclusivamente a sollecitazioni di compressione, esattamente come avviene nei modelli fisici di Isler.

La successiva parzializzazione, effettuata sui due gusci parametrici ottenuti, offre diversi vantaggi sia di carattere strutturale che di carattere logistico. Da un lato, infatti, modifica e redistribuisce le sollecitazioni agenti sul guscio; dall'altro, consente una movimentazione più pratica e un trasporto facilitato dei componenti. La suddivisione è stata condotta sulla base del grafico delle tensioni del guscio intero, in modo da ricavare elementi che risultassero quanto più possibile omogenei per forma e dimensioni e

che, al contempo, non presentassero ingombri tali da richiedere mezzi di trasporto eccezionali o procedure operative particolarmente onerose.

La prefabbricazione, tramite stampa 3D, rappresenta poi l'aspetto attraverso il quale è possibile ottenere i maggiori benefici in termini di efficienza del processo costruttivo. Essa permette: l'ottimizzazione dei tempi di realizzazione dei singoli componenti, la rapidità di posa in opera, la possibilità di replicare più volte gli stessi moduli mediante le medesime casseforme o, nel caso della fabbricazione digitale, riutilizzando i medesimi *input* parametrici e modelli computazionali. In questo senso, la stampa 3D applicata all'architettura dei gusci sottili non si configura unicamente come una tecnica produttiva, ma come uno strumento progettuale capace di incidere sulle scelte strutturali, geometriche e costruttive del sistema.

Pertanto, il metodo qui proposto vuole rappresentare un primo passo verso la definizione di un sistema costruttivo più articolato per la realizzazione di gusci sottili, in cui possano entrare in gioco ulteriori fattori e variabili qui non ancora considerati. In futuro si potrebbe quindi pervenire alla realizzazione di gusci parametrici parzializzati e prefabbricati a partire da componenti di dimensioni ulteriormente ridotte rispetto a quelle ipotizzate in questo lavoro: ciò al fine di permettere non solo una movimentazione e un trasporto più agevoli dei pezzi, ma anche una maggiore adattabilità del metodo a contesti logistici complessi, oltre a favorire una più accurata gestione delle tolleranze geometriche e delle connessioni strutturali, confermando come l'impiego di strumenti di progettazione parametrica e di analisi integrata risulti fondamentale per mantenere la coerenza tra forma, struttura e processo produttivo.

L'uso di materiali *bio-based* (o di altra natura, purché sostenibili dal punto di vista economico e ambientale e capaci di offrire prestazioni strutturali adeguate al tipo di strutture considerate) con tecniche di fabbricazione digitale implica una ridefinizione profonda del progetto, in cui le caratteristiche del materiale, le modalità di deposizione e il comportamento strutturale sono strettamente tra loro dipendenti. Pertanto, il progetto dei gusci sottili diventa un campo di sperimentazione interdisciplinare in cui architettura, ingegneria strutturale e tecnologia della fabbricazione digitale concorrono in modo sinergico alla definizione della forma costruita.

BIBLIOGRAFIA

- A Practical Guide to Climate-resilient Buildings and Communities United Nations Environment Programme.* (2021). United Nations Environment Programme (UNEP).
- Adam J.P. (1994). *L'arte di costruire presso i Romani* (traduzione a cura di M. P. Guidobaldi, Ed.). Longanesi & C..
- Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D., & Williams, C. (Eds.). (2014). *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge.
- Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».* (2018). 42.
- Agnetti, S. (2017, October 11). *Consolidamento di volte a botte all'estradosso. Metodo classico o tecniche innovative?* www.kimia.it.
- Akbarzadeh, M. (Ed.). (2025). *ARCHITECTED STRUCTURES*. DETAIL Architecture GmbH.
- Al Asali, M. W. (2021). *Craft-inclusive Construction - Design Strategies for Thin-tile Vaulting*. University of Cambridge.
- Albarcan, D. J. (1885, February 15). *BÓVEDAS DE LADRILLO QUE SE EJECUTAN SIN CIMBRA. MEMORIAL DE INGENIEROS DEL EJÉRCITO*, 41–44.
- Allenspach, C., & Isler, H. (2000). Schalenformen nach den Gesetzen der Natur. *Baudoc Bulletin*, 12, 7–18.
- Almagro, A. (2001). Un aspecto constructivo de las bovedas en al-Andalus. *Al-Qantara - Revista de Estudios Arabes*, XXII (1), 147–170.

- Almagro, A. (2021). On the origin of certain vaults without formwork: Iranian timber vaults. In *History of Construction Cultures* (pp. 134–140). CRC Press/Balkema.
- Amico G. B. (1726). *L'architetto pratico, Libro Primo*. Stamperia Aiccardo.
- Amico, G. B. (1750). *L'Architetto pratico, Libro Secondo*. Stamperia Felicella.
- Anderson, S., & Dieste, E. (2004). *Eladio Dieste: innovation in structural art*. Princeton Architectural Press.
- Angelillo, M., Fortunato, A., Gesualdo, A., & Iannuzzo, A. (n.d.). *Parametric design of purely compressed shells*.
- Angerer, F. (1967). *VOLTE SOTTILI Struttura e Forma*. Edizioni CELI.
- Araguas, P. (1998). L'acte de naissance de la Boveda Tabicada ou le certificat de naturalisation de la «voûte catalane». *Bulletin Monumental*, 156(2), 129–136.
- Arnaldos Montaner, A. (2014). Antonio Bonet Castellana, Le Corbusier y la bóveda catalana: forma y orden. *DEARQ - Revista de Arquitectura / Journal of Architecture*, 14, 122–135.
- Arslan, S., & Sorguc, A. G. (2004). Similarities between “structures in nature” and “man-made structures”: biomimesis in architecture. *Design and Nature*, 2, 45–54.
- Atamturktur, S., & Sevim, B. (2012). Seismic Performance Assessment of Masonry Tile Domes through Nonlinear Finite-Element Analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(4), 410–423.
- Baghdadi, A., Heristchian, M., & Kloft, H. (n.d.). *Application of energy method to investigate the stability of structural shells and arches with the threshold capacity*.
- Baghdadi, A., Heristchian, M., & Kloft, H. (2019). Structural assessment of remodelled shells of Heinz Isler. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11(4), 491–502.
- Bak, A., Horswill, D., Vejrum, P., Nielsen, T., Jensen, S. A., Frederiksborggade, S., & anb, D. (2015). *Computational design of a temporary lightweight shell with minimal thickness*.

- Barazzetta, G. M., Poggi, C., & Simoncelli, M. (2020). The airplane hangars of Pier Luigi Nervi: Digital and scaled models. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 61(3), 187–200.
- Bares, M. M., & Nobile, M. R. (2011). Volte tabicadas nelle grandi isole del Mediterraneo: Sicilia e Sardegna (XV-XVIII secolo). In A. Zaragozà, R. Soler, & R. Marin (Eds.), *Simpósio Internacional sobre bóvedas tabicadas*. (pp. 119–131). Universitat Politècnica de València.
- Bassegoda Nonell, J. (1990). LA CONSTRUCCIÓN TRADICIONAL EN LA ARQUITECTURA DE GAUDÍ. *Informes de La Construcción*, 42(408), 9–14.
- Beckh, M., Dechau, W., Derleth, K., Kurz, P., & Schützeichel, R. (2022). *Heinz Isler. Schalen*. WÜSTENROT STIFTUNG.
- Beckh, M., Del Cueto Ruiz-Funes, J. I., Ludwig, M., Schätzke, A., & Schützeichel, R. (Eds.). (2020). *Candela Isler Mütther. Positions on Shell Construction*. Birkhäuser.
- Behnejad, S. A., Parke, G. A. R., Samavati, O. A., Baghdadi, A., Heristchian, M., & Kloft, H. (n.d.). *Displacement-based seismic assessment of Heinz Isler's shell structures*.
- Benfratello, S., Caffarelli, A., & Palizzolo, L. (2008). Analisi numerica e sperimentale sul comportamento meccanico delle volte catalane. *GIMC 2008 - XVII CONvegno Nazionale Di Meccanica Computazionale*.
- Benfratello, S., Caffarelli, A., Palizzolo, L., Giambanco, F., & Urso, R. (2008a). ANALISI NUMERICA E SPERIMENTALE SUL COMPORTAMENTO MECCANICO DELLE VOLTE CATALANE. *GIMC 2008 - XVII CONvegno Nazionale Di Meccanica Computazionale*.
- Benfratello, S., Caffarelli, A., Palizzolo, L., Giambanco, F., & Urso, R. (2008b). On the Modern Use of the Bòvedas Tabicadas. In B. H. V. Topping & M. Papadrakakis (Eds.), *Proceedings of the Ninth International Conference on Computational Structures Technology*. Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland.
- Benfratello, S., Caiozzo, G., D'avenia, M., & Palizzolo, L. (2012). TRADITION AND MODERNITY OF CATALAN VAULTS: HISTORICAL AND STRUCTURAL ANALYSIS. *Meccanica Dei Materiali e Delle Strutture*, 3(5), 44–54.

- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Morrow.
- Billington, D. P. (1965). *THIN SHELL CONCRETE STRUCTURES*. McGraw-Hill Book Company.
- Billington, D. P. (1985). *The TOWER and the BRIDGE - The New Art of Structural Engineering*. Princeton University Press.
- Billington, D. P. (2003). *The art of structural design. A Swiss legacy*. Princeton University.
- Binda Mayer L., & Baronio G. (1986). Indagine sull'aderenza tra legante e laterizio in malte ed intonaci di "cocciopesto", in *Intonaci colore e coloriture nell'edilizia storica. Atti Del Convegno Di Studi, Roma 1984*.
- Blank, S. (2008). Zuchwil, Gartenstrasse 32, GartenHaus Wyss AG. *Archäologie Und Denkmalpflege Im Kanton Solothurn*, 13.
- Block, P. (2009). *Thrust Network Analysis. Exploring Three-dimensional Equilibrium, Dissertation Thesis for Degree of Doctor of Philosophy in Architecture: Building Technology*. Massachusetts Institute of Technology.
- Block, P., Boller, G., Dewolf, C., Pauli, J., Kaufmann, W., Eigenraam, P., Li, Q., Chilton, J., Borgart, A., & Ni, P. E. (2024). *3D Scanning and structural analysis of Heinz Isler's shell for swimming pools*.
- Block, P., De Jong, M., Davis, L., & Ochsendorf, J. (2010). Tile vaulted systems for low-cost construction in Africa. *ATDF JOURNAL*, 7(1/2), 4–13.
- Block, P., Dejong, M., & Ochsendorf, J. (2006). As hangs the flexible line: Equilibrium of masonry arches. *Nexus Network Journal*, 8(2), 13–24.
- Block, P., & Ochsendorf, J. (2007). THRUST NETWORK ANALYSIS: A NEW METHODOLOGY FOR THREE-DIMENSIONAL EQUILIBRIUM. *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES*, 48(3).
- Blondel, J.-F. (1771). *Cours d'architecture, ou Traité de la décoration, distribution et construction des bâtiments* (Vol. 6). Desaint Libraire.

- Boller, G., Block, P., & Schwartz, J. (2024). Heinz Isler's form-finding models for his "HIB" shells: between experiment and design. In S. Gabriele, A. Manuello Bertetto, F. Marmo, & A. Micheletti (Eds.), *Shell and Spatial Structures. Proceedings of IWSS 2023*. Springer.
- Bonni, S. (1969). *Partinico nella storia*. SEGR Palermo.
- Borg, N. (2022). Form Follows Function. *AUD5222: Contemporary Architectural Discourse*.
- Borgart, A., & Eigenraam, P. (2012). *Scanning in 3D and analysing the models of Heinz Isler, the preliminary results*.
- Borri, A., Castori, G., & Corradi, M. (2014). *Tecnica tabicada e FRCM per il rinforzo di volte in folio*.
- Borri, A., Castori, G., Corradi, M., Sisti, R., Di Marco, G., & Vetturini, R. (2017). La tecnica tabicada armata per il recupero di volte in folio. *Recupero e Conservazione*, 66–77.
- Bosch Reitg, I. (1949). LA BOVEDA VAIDA TABICADA. *Revista Nacional de Arquitectura*, 89, 185–199.
- Bösiger, H. (2011). THE BUILDING OF ISLER SHELLS. *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES: J. IASS*, 169(3), 161–172.
- Breymann, G. A. (1926). *Trattato generale di costruzioni civili con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose: Vol. Volume primo*.
- Brunetti, M., Vincenti, A., & Vidoli, S. (2016a). A class of morphing shell structures satisfying clamped boundary conditions. *International Journal of Solids and Structures*, 82, 47–55.
- Bühler, D. (2017). La constructora «Hermanos Rank» y la introducción de las bóvedas tabicadas en Munich a partir de 1947. In S. Huerta Fernández, P. Fuentes González, & I. J. Gil Crespo (Eds.), *Actas del Décimo Congreso Nacional y Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción* (pp. 215–224).

- Campione, G., Benfratello, S., & Palizzolo, L. (2015). Case Study of the Structural Behavior of a Catalan Bricks Masonry Vault. *Journal of Civil Engineering and Science*, 4(1), 45–54.
- Campisi, T., & Li Castri, M. (2019). Rebuilt the space using stone or brick vaulted systems: catching the contemporary challenge of construction tradition. *TEMA*, 5(1), 14–26.
- Cascone, P., Giglio, A., Galluccio, G., Galdi, F., Ciancio, E., Polito, I., & Fablab, U. (2015). *Performative shells: parametric design and digital fabrication for ecological architecture*.
- Cassinello, P. (2020). Historical design of cantilever shells of modernist architecture. *Architecture and Engineering*, 5(3), 3–13.
- Chaltiel, S., Bravo, M., & Net, S. C. (2017). *Digital fabrication phasing for monolithic shells*.
- Chassinat, J.-A. (1865). *Cours de constructions: première partie: notions pratiques sur les éléments, la forme, les dimensions et la construction des maçonneries*. École d'application del'artillerie & du génie.
- Chiarri, M. A. (2016). *UN MODELO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LAS BÓVEDAS TABICADAS - LÁS BÓVEDAS DE GUASTAVINO EN NORTEAMÉRICA*.
- Chilton, J. (2009). *39 etc...: Heinz Isler's infinite spectrum of new shapes for shells*.
- Chilton, J. (2011). Heinz Isler: Shells for Two Churches. *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES*, 52(3), 173–183.
- Chilton, J. (2012). Form-finding and fabric forming in the work of Heinz Isler. In J. Orr, M. Evernden, A. Darby, & T. Ibell (Eds.), *Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork*.
- Chilton, J. (2020). Heinz Isler and his use of physical models. In *PHYSICAL MODELS* (pp. 613–637). Wiley.
- Chilton, J., & Chuang, C. C. (2017). Rooted in Nature: Aesthetics, Geometry and Structure in the Shells of Heinz Isler. *Nexus Network Journal*, 19(3), 763–785.

- Chilton, J., & Isler, H. (2000). *The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture* (1st ed.). Thomas Telford Publishing.
- Choisy, A. (1873). *L'Art de bâtir chez les Romains* (Ducher et C. éditeurs, Ed.).
- Collins, G. R. (1963). Antonio Gaudi: Structure and Form. *Perspecta*, 8, 63–90.
- Collins, G. R. (1968). The Transfer of Thin Masonry Vaulting from Spain to America. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 27(3), 176–201.
- Collins, G. R. (2001). El paso de las cáscaras delgadas de fábrica desde España a América. In S. Huerta Fernández (Ed.), *Las bóvedas de Guastavino en América : libro publicado con ocasión de la exposición: Guastavino Co. (1885-1962), la reinención de la bóveda* (pp. 19–46).
- Como, M. (2016). *Statics of Historic Masonry Constructions* (Vol. 5). Springer International Publishing.
- Conejo da Pena, A. (2011). «Volta de rajola», «volta de maó pla» o «volta catalana»: reflexiones en torno a las bóvedas tabicadas en Cataluña durante los siglos del gótico. *Actas Del Simposio Internacional Sobre Bóvedas Tabicadas*, 109–125.
- Contestabile, M., & Iuorio, O. (2019). *A digital design process for shell structures*.
- Corradi, M., Castori, G., & Borri, A. (2013). Tecniche di Intervento per il Recupero di Volte in Folio. In F. Braga & C. Modena (Eds.), *XV Convegno ANIDIS - L'Ingegneria Sismica in Italia*.
- Cuesta, J. P. (2022). "Construcción de formas libres a partir de modelos: Análisis de los métodos experimentales de Heinz Isler, su eficiencia y sostenibilidad."
- Cunha, A. da. (1901). Les voûtes sans cintres. In *Les travaux de l'Exposition de 1900* (pp. 70–74).
- Currà, E., Giannetti, I., & Russo, M. (2024). Self-supporting thin Shells in Italy. Space and Structure of the Industrial Buildings (1930–1970). *Informes de La Construcción*, 76(575), 1–11.

- Davis, L., Rippmann, M., Pawlofsky, T., & Block, P. (2012). Innovative funicular tile vaulting: A prototype vault in Switzerland. *The Structural Engineer*, 46–56. www.the-structuralengineer.org
- de Bes, J. T., & Casariego, P. (2016). De la técnica a la tecnología: Construcción de forjados de cerámica abovedada mediante sistemas industrializados. *Informes de La Construcción*, 68(544), 17–18.
- de San Nicolás, F. L. (1639). *Arte y Uso de Arquitectura*.
- De Wolf, C., Ramage, M., & Ochsendorf, J. (2016). Low carbon vaulted masonry structures. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 57(4), 275–284.
- Deplazes, A. (Ed.). (2018). *Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures. A Handbook* (4th ed.). Birkhauser Verlag AG.
- d’Espie, F. F. (1754). *Manière de rendre toutes sortes d’édifices incombustibles ; ou Traité sur la Construction des Voutes, faites avec des briques et du plâtre*. Chez la veuve Duchesne.
- Di Bartolomeo, G. M. (2007). *Storia di Partinico, Manoscritto inedito del 1805* (trascrizione e commenti di G. Schirò e G. Nania, Ed.). Regione Siciliana, Assessorato BBCCAA e Pubblica Istruzione.
- Di Maggio, S., Fatta, G. (relatore), Vinci, C. (relatore), & Cucchiara, Calogero (correlatore). (2020). *Delle volte realine a Partinico* [Tesi di Laurea Magistrale]. Università degli Studi di Palermo.
- Dolce, C. (1823). *Sul tremuoto avvenuto in Palermo il giorno 5. Marzo 1823. Riflessioni di ****. dalla Tipografia del fu Francesco Abbate Q.mDom.
- Eigenraam, P., Borgart, A., Chilton, J., & Li, Q. (2020). Structural analysis of Heinz Isler’s bubble shell. *Engineering Structures*, 210.
- Eisenbach, P., & Grohmann, M. (2017). Structural implementation of slender concrete shells with prefabricated elements. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 58(1), 51–64.

- Emami, N. (2015). *Structure and daylighting performance comparisons of Heinz Isler's roof shell based on variations in parametrically derived multi opening topologies.*
- Emeckì, Ş. (2022). Using Nature in Architecture: A perspective from Antoni Gaudi. *European Journal of Science and Technology*, 34, 87–91.
- Espel, R., Gómez, J., Grima, R., & Aguado, A. (2009). La evolución de la construcción del Templo de la Sagrada Familia. *Informes de La Construcción*, 61(516), 5–20.
- Fatta, G., Campisi, T., Castri, M. L., & Vinci, C. (2007). LE VOLTE SOTTILI IN MATTONI IN FOGLIO IN AREA PALERMITANA. *International Conference and Exhibition Costruire in "Pietra" Fra Innovazione e Tradizione - CITTAM*, 545–553.
- Fatta, G., Campisi, T., & Vinci, C. (2007). VOLTE "REALINE" E SOLAI IN GESSO NELLA TRADIZIONE SICILIANA. *Costruire in "Pietra" Fra Innovazione e Tradizione, International Conference and Exhibition-CITTAM.*
- Fatta, G., Campisi, T., & Vinci, C. (2016a). INTERVENTI SU VOLTE SOTTILI DI MATTONI IN FOGLIO IN SICILIA. In A. Guida & A. Pagliuca (Eds.), *Colloqui.AT.e 2016 - MATER(1)A*. Gangemi Editore spa.
- Fatta, G., Campisi, T., & Vinci, C. (2016b). Timbrel vaults in Sicily: analysis of a little-known construction technique. *Construction History*, 31(2), 107–132.
- Fatta, G., Campisi, T., & Vinci, C. (2017). Timbrel vaults in Sicily. Constructive techniques and intervention methodologies. *TEMA: Technologies Engineering Materials Architecture*, 3(2), 24–36.
- Fayemi, P.-E., Maranzana, N., Aoussat, A., & Bersano, G. (2014). Bio-inspired design characterisation and its links with problem solving tools. In *Dubrovnik-Croatia*.
- Fernandez Alba, A. (1959). BOVEDAS TABICADAS DE SIMPLE Y DOBLE CURVATURA. *Edificación*, 29–48.
- Foce, F. (2000). Il contributo dell'École d'Artillerie et du Génie di Metz alla teoria delle volte in muratura. In A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, & M. Tabales (Eds.), *Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 309–315). I. Juan de Herrera, SEDHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada.

- Fornes y Gurrea, D. M. (1841). *Observaciones sobre la practica del arte de edificar*. Imprenta de Cabrerizo.
- Fortea Luna, M. (2008). *Origen de la bóveda tabicada*. Centro de Oficios de Zafra.
- Fortea Luna, M., & López Bernal, V. (1998). *Bóvedas extremeñas: proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista*. Colegio Oficial de Arquitectos de Extremadura.
- Fortea Luna, M., & López Bernal, V. (2000). Patología de bóvedas de doble curvatura. In A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, & M. Tabales (Eds.), *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 317–326). I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU.
- Fortea Luna, M., & López Bernal, V. (2003). The timbrel vault (Extremaduran vault). In S. Huerta (Ed.), *Proceedings of the First International Congress on Construction History* (pp. 909–913). I. Juan de Herrera, SEdHC, ETSAM, A. E. Benvenuto, COAM, F. Dragados.
- Fouad, A. S., Ezzeldin, M., & Assem, A. (2023). Applications of Parametric Design in Lightweight Shell Structures. In *ENGINEERING RESEARCH JOURNAL (ERJ)* (Issue 52).
- Frattaruolo, M. R. (2000). Las bóvedas in folio: tradición y continuidad. In A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, & M. Tabales (Eds.), *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 327–334). Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU.
- Fuentes González, P., Gil Crespo, I. J., Huerta Fernández, S., Martín Jiménez, C., & Redondo Martínez, E. (2014). *Bóvedas sin cimbra, la construcción tabicada: memoria académica del taller experimental de historia de la construcción del curso 2013-2014*. Instituto Juan de Herrera.
- Fuentes Gonzalez, P. W. I. (Ed.). (2021). *Brick vaults and beyond. The transformation of a historical structural system from 1750 to 1970*. Instituto Juan de Herrera.
- Fuentes, P., & Wouters, I. (2019). La construcción de bóvedas ligeras en Bélgica 1830-1940. *Actas Del XI Congreso Nacional de Historia de La Construcción*, 437–448.

- Galindo-Díaz, J., Escorcía Oyola, O., & Hernández Quiroga, J. (2022). Vacuum concrete in the construction of houses and industrial buildings in Colombia: the legacy of architect Álvaro Ortega (1950-1955). *CONSTRUCTION HISTORY. International Journal of the Construction History Society*, 37(2), 67–86.
- García, J., González, M., & Losada, J. C. (2012). Arquitectura y construcción tabicada en torno a Eduardo Sacriste. *Informes de La Construcción*, 64(525), 35–50.
- García, J., Medina, J. M., & Rodríguez, J. A. (2018). Modularidad y prefabricación abovedada. La experiencia bogotana y su influencia en Latinoamérica. *1er Coloquio Colombiano de Historia de La Construcción*.
- García Lammers, F. (2021). A Church, a Silo, and a Warehouse: Eladio Dieste's Gaussian Vaults and the Workers of the Encofrados. *RAIC-CCUSA ACADEMIC SUMMIT ON ARCHITECTURE*.
- García Lammers, F. (2025). Anarchist Struggles Beneath the Gaussian Vaults of the TEM Factory in Montevideo, Uruguay. In J. G. Oliva, J. I. del Cueto, & E. Drago (Eds.), *IASS Annual Symposium 2025: The Living Past as a Source of Innovation*.
- García Muñoz, J., & de los Ángeles Beltrán Fernández, M. (2014). La prefabricación de bóvedas de ladrillo. Una utopía latinoamericana. *Rita*, 2, 92–99.
- García-Gutiérrez Mosteiro, J. (2000). Las bóvedas tabicadas de Guastavino: forma y construcción. In A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, & M. Tabales (Eds.), *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 365–374). I. Juan de Herrera, SEDHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU.
- García-Gutiérrez Mosteiro, J. (2003). The adventure of the Guastavino vaults. In S. Huerta, A. E. Benvenuto, & F. Dragados (Eds.), *Proceedings of the First International Congress on Construction History* (pp. 957–964).
- Gengnagel, C., La Magna, R., Ramsgaard Thomsen, M., & Tamke, M. (2018). Shaping hybrids – Form finding of new material systems. *International Journal of Architectural Computing*, 16(2), 91–103.
- Gil Saura, Y. (2011). A uso y costumbre de buen oficial: sobre construcción y ruina de bóvedas tabicadas en la Valencia de los siglos XVII y XVIII. In A. Zaragoza & R. M.

- R. Soler (Eds.), *Construyendo bóvedas tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóveda Tabicadas* (pp. 249–262). Universitat Politècnica de València.
- Girón, J., & Huerta, S. (Eds.). (2009). *Auguste Choisy. L'architecture et l'art de bâtir*. Instituto Juan de Herrera.
- Gizem Yetkin, E. (2021). Effects of Biomimicry on Architecture. *European Journal of Natural Sciences and Medicine*, 4(2), 102–114.
- Gohnert, M., Fitchett, A., Bulovic, I., & Bhikhoo, N. (2013). Structurally efficient housing incorporating natural forms. *JOURNAL OF THE SOUTH AFRICAN INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERING*, 55(3), 96–102.
- Gonzalez, E., Di Marco, G., Gonzalez, C., & Galindo, J. (2021). PARAMETRIC ANALYSIS OF THE DOME OF THE SPORTS PALACE OF MEXICO CITY. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 62(1), 50–60.
- González Moreno-Navarro, J. L. (2000). Configuración constructiva y comportamiento mecánico de las bóvedas tabicadas. Estudio de dos edificios abovedados del siglo XIX en el Baix Llobregat (Barcelona). In A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, & M. Tabales (Eds.), *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 437–441). I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU.
- González Moreno-Navarro, J. L. (2005). La bóveda tabicada: entre la conservación y la destrucción. *Informes de La Construcción*, 56(496), 67–72.
- González Ortiz, H. (2001). *Carlos González Lobo. Caminos hacia lo alternativo dentro del ámbito conceptual, proyectual y contextual de la arquitectura*. UPC.
- González Ortiz, H. (2004). Arquitectura en precario. La propuesta de Carlos González Lobo. *Ciencia Ergo Sum*, 11(1), 117–124.
- Gozzi, V. (2024). Heinz Isler in Ticino. *Archi*, 4, 36–65.
- Guastavino, R. (1893). *Essay on the theory and history of cohesive construction, applied especially to the timber vault*. Ticknor and Company.
- Gucci, N., De Falco, A., & Cinotti, M. (2008). Volte di laterizio in folio: una tecnica di consolidamento. *Bollettino Ingegneri*, 12, 12–16.

- Gulli, R. (1994a). *La memoria delle tecniche, Le Corbusier e la volta catalana*. clua edizioni.
- Gulli, R. (1994b). *L'esperienza architettonica e costruttiva del Movimento Catalano (1880-1920)*. clua.
- Gulli, R. (1999). La huella de la construcción tabicada en la arquitectura de Le Corbusier. In *Las bóvedas de Guastavino en América* (pp. 73–85). Instituto Juan de Herrera.
- Gulli, R. (2001). Arte y técnica de la construcción tabicada. In S. Huerta Fernández (Ed.), *Las bóvedas de Guastavino en América : libro publicado con ocasión de la exposición : Guastavino Co. (1885-1962), la reinención de la bóveda* (pp. 59–72).
- Gulli, R. (2006). *La costruzione Coesiva. L'opera dei Guastavino nell'America di fine Ottocento*. Marsilio Editori.
- Gulli, R. (2012). Cupole e gusci sottili. In *Struttura e Costruzione Structure and Construction* (pp. 9–12). Firenze University Press.
- Gulli, R., & Mochi, G. (1995). *Bòvedas tabicadas. Architettura e costruzione*. CDP EDITRICE s.r.l.
- Gulli, R., & Mochi, G. (2001). Il recupero delle volte in folio attraverso la costruzione tabicada. *Costruire in Laterizio. Architetture Voltate*, 82, 66–73.
- Heyman, J. (2021). *El arco de fabrica*. INSTITUTO JUAN DE HERRERA.
- Huerta Fernández, S. (2006). La construcción tabicada y la teoría cohesiva de Rafael Guastavino. In S. Huerta Fernández (Ed.), *Escritos sobre la construcción cohesiva y su función en la arquitectura*. Instituto Juan de Herrera.
- Huerta Fernandez, S., & Aroca Hernandez-Ros, R. (tutor). (1990). *DISEÑO ESTRUCTURAL DE ARCOS, BÓVEDAS Y CÚPULAS EN ESPAÑA ca.1500~ca.1800*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Huerta, S. (2003a). El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí. *Revista Digital Del Cedex*, 130(121), 133–162.
- Huerta, S. (2003b). The Mechanics of Timbrel Vaults: A Historical Outline. In *Essays on the History of Mechanics* (pp. 89–134). Birkhäuser Basel.

- Huerta, S. (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas -Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera.
- Huerta, S. (2006). Structural design in the work of Gaudí. *Architectural Science Review*, 49(4), 324–339.
- Huerta, S. (2017). Las bóvedas tabicadas en Alemania: la larga migración de una técnica constructiva. *Actas Del Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano, Noveno Nacional, de Historia de La Construcción*, 2, 759–772.
- Huerta, S. (2019). Guastavino Tile Vaults - The Long Migration of a Building Technique. In Heiderose Kilper (Ed.), *Migration und Baukultur: Transformation des Bauens durch individuelle und kollektive Einwanderung* (pp. 183–202). Birkhäuser.
- Huerta, S. (2021). Tile Vaults in Post-War Germany. In P. Fuentes & I. Wouters (Eds.), *Brick vaults and beyond: the transformation of a historical structural system from 1750 to 1970* (pp. 289–369). Instituto Juan de Herrera.
- Ibarra-Sevilla, B. (2017). Las bóvedas tabicadas de Guastavino para el edificio municipal de Nueva York, soluciones de planta irregular y flecha limitada. *Actas Del Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano, Noveno Nacional, de Historia de La Construcción*, 2, 783–794.
- Imbornone, P., & Failla, A. (n.d.). *Le volte realine: caratteristiche costruttive e statiche*.
- Jiménez, A. (1996). *Eladio Dieste, 1943-1996*. Departamento de Publicaciones Junta de Andalucía.
- Jiménez Jiménez, J. F. (2015). Rafael Aburto y el Grupo José Antonio de Quintanar de la Orden. La utilización de la bóveda tabicada como alternativa constructiva. *Actas Del Noveno Congreso Nacional y Primer Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de La Construcción*, 863–873.
- Jipa, A., & Dillenburger, B. (2022). 3D Printed Formwork for Concrete: State-of-the-Art, Opportunities, Challenges, and Applications. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 9(2), 84–107.

- Kalemkerian, M., & Taroco, E. (1976). nuevas instalaciones para el arsenal de la Armada Nacional - República Argentina. *Informes de La Construcción*, 29(284), 89–95.
- Kawaguchi, K., Ohsaki, M., Takeuchi, T., Chuang, C.-C., & Chilton, J. (2016). *Design and Modelling of Heinz Isler's Sicli Shell*.
- Kawaguchi, K., Ohsaki, M., Takeuchi, T., Ozawa, Y., Wada, H., & Prof, A. (2016). *Study on Direct Construction Method utilizing Hanging Net for Small-scale Isler-type Shell Structures*.
- Kawaguchi, K., Ohsaki, M., Takeuchi, T., Souza, M. S. V, & Pauletti, R. M. O. (2016). *Spatial Structures in the 21st Century*.
- Khabazi, Z. (n.d.). *Customized Fabric-Formworks using Digital Fabrication for the construction of Free-from Architecture*.
- Kilian, A., & Ochsendorf, J. (2005). Particle-spring systems for structural form finding. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 46(147).
- Kloft, H. (n.d.). LOGIC AND FORM: FROM ISLER SHELLS TO NONSTANDARD STRUCTURES. In *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES: J. IASS*.
- Knippers, J., Schmid, U., & Speck, T. (Eds.). (2019). *Biomimetics for Architecture*. De Gruyter.
- Kotnik, T., & Schwartz, J. (n.d.). THE ARCHITECTURE OF HEINZ ISLER. In *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES: J. IASS*.
- Kumar Patidar, S., & Saxena, K. (2014). Stability Study of Arches Vaults and Domes Built by Compressed Stabilized Earth Blocks. *International Journal Of Innovative Research & Development*, 3(3), 447–454.
- La Magna, R., Waimer, F., & Knippers, J. (2012). Nature-inspired generation scheme for shell structures. *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*.

- Lammers, F. G. (n.d.). *Building the Resistance: Eladio Dieste's Digital Work in Cerámica Armada*.
- Lane, D. (2005). Rafael Guastavino e la razionalizzazione costruttiva del laterizio. *Costruire in Laterizio*, 107, 48–54.
- Lee, J., & Moreyra Garlock, M. E. (2009). Eladio Dieste and Félix Candela: a comparative analysis. In A. Domingo & C. Lazaro (Eds.), *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium* (pp. 1562–1573). Universidad Politécnica de Valencia.
- Lemma, M. (1996). *Dei tetti ammattonati. Nuova edizione critica del trattato scritto da Félix Francois d'Espie (1754)*. il Cardo Editore.
- Liuti, A., & Pugnale, A. (2015). Erection of post-formed gridshells by means of inflatable membrane technology. In R. H. Crawford & A. Stephan (Eds.), *Living and Learning: Research for a Better Built Environment: 49th International Conference of the Architectural Science Association 2015* (pp. 1–10).
- Liuti, A., Pugnale, A., & D'Amico, B. (2016). Building timber gridshells with air: Numerical simulations and technique challenges. *Proceedings of the Third International Conference on Structures and Architecture (ICSA2016)*, 251–258.
- Lluis i Ginovart, J., Lluís-Teruel, C., & Gómez-Val, R. (2023). De la voûte à la Roussillon a la voûte à la notre maniere. La fortuna de la bóveda tabicada en la Francia Ilustrada. *Informes de La Construcción*, 75(570).
- Lo Grasso P. Daniele. (1935). *Partenico ed il culto di Maria Ss.ma di Altofonte e del Ponte sua Celeste Patrona e del Ss.mo Crocifisso*. Tipografia Gaspare Puccio.
- López López, D., Bernat-Masó, E., Gil, L., & Roca, P. (2020). Experimental testing of tile vaults. In *Brick and Block Masonry - From Historical to Sustainable Masonry* (pp. 826–831). CRC Press.
- López López, D., & Domènech Rodríguez, M. (2012). Structural Analysis of Tile Vaulting: Method and Variables. *Construction History Society of America Biennial Meeting*, 1–18.

- López López, D., Garcia i Carrera, D. (tutor), & Payola i Lahoz, J. (tutor). (2012). *Análisis estructural de bóvedas tabicadas - Estudio histórico, analítico y experimental para la determinación de la influencia en la resistencia y estabilidad de bóvedas tabicadas de diferentes variables constructivas*. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.
- López López, D., Van Mele, T., & Block, P. (2016). Tile vaulting in the 21st century - La bóveda tabicada en el siglo XXI. *Informes de La Construcción*, 68(544), 33–41.
- López López, D., Van Mele, T., & Block, P. (2019). The combination of tile vaults with reinforcement and concrete. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(6), 782–798.
- Loukaides, E. G. (2020). Expanding the Build Plate: Functional Morphing 3D Printed Structures Through Anisotropy. *Frontiers in Materials*, 7.
- Loukaides, E. G., & Seffen, K. A. (2015). Multistable grid and honeycomb shells. *International Journal of Solids and Structures*, 59,
- L'USO DEI FRENELLI NEL CONSOLIDAMENTO DELLE VOLTE. (n.d.).
- Lykov, E. (2025). *Das »System Isler« - Der Schalenbau im Schweizer Mittelland, 1955-2000*. transcript Verlag.
- Marín, A. M., & Barluenga, G. (2014). Eladio Dieste y la cerámica armada: La forma de lo resistente. *Arquitecturas Del Sur*, XXXII(45), 90–103.
- Marín Palma, A. M., & Trallero Sanz, A. (2005). El nacimiento de la cerámica armada. In S. Huerta (Ed.), *Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 707–715). I. Juan de Herrera, SEdHC, Arquitectos de Cádiz, COAAT Cádiz.
- Marini, A., Belleri, A., Preti, M., Riva, P., & Giuriani, E. (2017). Lightweight extrados restraining elements for the anti-seismic retrofit of single leaf vaults. *Engineering Structures*, 141, 543–554.
- Marques dos Santos, J. M., Sousa Gago, A. (orientador), & Rei, J. (orientador). (2014). *Estudo Construtivo e Estrutural de Abóbadas Alentejanas*. Accademia militare.
- Martí Arís, C. (2001). Las bóvedas autoportantes. *DPA: Documents de Projectes d'Arquitectura*, 15, 26–31.

- Martín Jiménez, C. (2009). La cúpula tabicada de San Juan de la Penitencia. In S. Huerta, R. Marin, R. Soler, & A. Zaragoza (Eds.), *Proceedings of the Sixth National Congress on the History of Construction* (pp. 825–831). Instituto Juan de Herrera.
- Martorell, J. (1910). Estructuras de ladrillo y hierro atirantado en la Arquitectura catalana moderna. *Anuario de La Asociación de Arquitectos de Cataluña*, 119–146.
- Mazzamuto, A. (2003). *Giovanni Biagio Amico: architetto e trattatista del Settecento*. Flaccovio (Salvatore Fausto).
- Medina, J. M., García, J., & Rodríguez, J. A. (2019). Modularidad y prefabricación abovedada. Colombia como germen de una tradición moderna. La experiencia bogotana y su influencia en Latinoamérica. *Dearq*, 2019(25), 44–53.
- Menicali, U. (1992). *Menicali, Umberto. "I materiali dell'edilizia storica: tecnologia e impiego dei materiali tradizionali"*.
- Ministero di Agricoltura, I. e C. (1893). *Annali di Statistica. Statistica Industriale. Notizie sulle condizioni industriali della Provincia di Palermo*.
- Mochi, G. (2001). Elementos para una historia de la construcción tabicada. In S. Huerta Fernández (Ed.), *Las bóvedas de Guastavino en América* (pp. 113–146). Instituto Juan de Herrera.
- Moya Blanco, L. (1947). *BOVEDAS TABICADAS*. MINISTERIO DE LA GOBERNACION DIRECCION GENERAL DE ARQUITECTURA SERVICIO DE PUBLICACIONES.
- Moya Blanco, L. (1987). *ARQUITECTURAS CUPULIFORMES: EL ARCO, LA BOVEDA Y LA CUPULA*. In *Curso de mecánica y tecnología de los edificios antiguos* (pp. 97–119).
- Nadkova Petrova, M., & Zheleva-Martins Viana, D. (2022). Shells as a Universal Structural Type in Nature and Design. In *Structural Shells*. IntechOpen.
- Naldoni, L., Casarotto A, A., & Erioli, A. (n.d.). *Temporary shell systems based on robotic mud deposition*.
- Nilsson, K. R. (2014). *Getting the arch back into architecture*. Chalmers University of Technology.

- Nobile, M. R. (2020). NUOVI MAESTRI E NUOVI CANTIERI: L'ARCHITETTURA IN SICILIA NEL XV SECOLO. In G. D'Agostino, S. Fodale, M. Miglio, A. M. Oliva, D. Passerini, & F. Senatore (Eds.), *LA CORONA D'ARAGONA E L'ITALIA - Atti del XX Congresso di Storia della Corona d'Aragona* (pp. 1433–1444). Nella sede dell'Istituto Palazzo Borromini.
- Ochsendorf, J. (2014). *Las bóvedas de Guastavino. El arte de la rasilla estructural*. papersdoc y Ajuntament de Barcelona.
- Ochsendorf, J. A. (2005). Los Guastavino y la bóveda tabicada en Norteamérica. *Informes de La Construcción*, 57(496), 57–66.
- O'Dwyer, D. (1999). Funicular analysis of masonry vaults. *Computers and Structures*, 73, 187–197.
- Otto, F., & Rasch, B. (1995). *Finding Form - Towards an Architecture of the Minimal*. Deutscher Werkbund.
- Pallarés Marzá, J., Martínez Rodrigo, M. D. (tutor), & Esteve, A. M. A. (2015). *ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO RESISTENTE DE BÓVEDAS TABICADAS A ESCALA EN LABORATORIO. EVALUACIÓN DE POSIBILIDADES DE REFUERZOS*. Universitat Jaume I de Castelló.
- Paradiso, M., Galassi, S., Garuglieri, S., & Zecchin, C. (2020). STUDIO SULLA STABILITÀ DELLE VOLTE CATALANE DELLE SCUOLE D'ARTE DE LA HABANA (CUBA): UN SINGOLARE CASO DI APPROSSIMAZIONE COSTRUTTIVA? *Revista M*, 17, 10–25.
- Paris, V. (2021). *EQUILIBRIUM OF SELF-BALANCED SHELLS - Cross-herringbone technology* [Università degli Studi di Bergamo].
- Paris, V., Lepore, N., Bruun, E. P. G., Ruscica, G., Piccioni, M. D., Beghini, A., Parascho, S., & Adriaenssens, S. (2021). Robotic construction of a self-balancing glass masonry vault: DEM study of stability during the construction stages. In A. Behnejad, G. Parke, & O. Samavati (Eds.), *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7th International Conference on Spatial Structures* (Vol. 2020, Issue 3, pp. 314–325).

- Paris, V., & Pizzigoni, A. (supervisor). (2020). *On the equilibrium of self-balanced shells under construction Cross-herringbone technology*. Università di Bergamo.
- Pedreschi, R. (2006). The Structural Behaviour and Design of Free-Standing Barrel Vaults of Eladio Dieste. *Proceedings 2nd International Congress on Construction History*, 2451–2467.
- Pedreschi, R. (2008). Form, Force and Structure A Brief History. *Architectural Design*, 78(2), 12–19.
- Pedreschi, R., & Theodossopoulos, D. (2007). The double-curvature masonry vaults of Eladio Dieste. *Structures and Buildings*, 160(1), 3–11.
- Pedreschi, R., & Theodossopoulos, D. (2010). Eladio Dieste; ‘resistance through form.’ In P. J. S. . Cruz (Ed.), *Structures and architecture: proceeding of the First International Conference on Structures and Architecture* (pp. 779–787). CRC Press/Balkema.
- Pellegrino, M., Sardone, L., Rosso, M. M., Gozzi, V., & Chiaia, B. (2024). Algorithm-Aided Design and Analysis for the Comparative Models Study of Heinz Isler’s Shells. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 437, 512–521.
- Perez-Garcia, A., & Gómez-Martínez, F. (2009). Natural structures: Strategies for geometric and morphological optimization. In A. Domingo & C. Lazaro (Eds.), *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009* (pp. 893–906).
- Pillwein, S., Kübert, J., Rist, F., & Musialski, P. (2020, November 5). Design and Fabrication of Elastic Geodesic Grid Structures. *Proceedings - SCF 2020: ACM Symposium on Computational Fabrication*.
- Ponce Ortiz de Insagurbe, M. (2000). La bóveda tabicada como mejora higiénica y económica en la construcción militar de acuartelamientos. El Cuartel de la Puerta de la Carne (Sevilla). In A. Graciani García, S. Huerta, E. Rabasa, & M. Á. Tabales Rodríguez (Eds.), *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 853–857). Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Universidad de Sevilla.

- Ramage, M. H., Ochsendorf, J. A., Block, P., & Rich, P. (2008). Advanced Geometry, Rudimentary Construction: Structural form finding for unreinforced thin-shell masonry vaults. *Advances in Architectural Geometry*.
- Ramage, M., Ochsendorf, J., & Rich, P. (2009). Sustainable shells: New African vaults built with soil-cement tiles. In A. Domingo & C. Lazaro (Eds.), *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium* (pp. 1512–1520).
- Ramazzotti, L. (2001). La cúpula para San Juan del Divino de Nueva York de Rafael Guastavino. In S. Huerta Fernández (Ed.), *Las bóvedas de Guastavino en América : libro publicado con ocasión de la exposición: Guastavino Co. (1885-1962), la reinención de la bóveda* (pp. 187–200).
- Ramm, E. (n.d.). HEINZ ISLER SHELLS - THE PRIORITY OF FORM. In *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES: J. IASS*.
- Rei, J., & Sousa Gago, A. (2016a). Abobadilha Alentejana “Características e Processos Construtivos.” *2o Congresso Internacional de História Da Construção Luso-Brasileira*, 91–105.
- Rei, J., & Sousa Gago, A. (2017). TIMBREL VAULT - A TRADITIONAL CONSTRUCTIVE TECHNIQUE. *3rd International Conference on PROTECTION OF HISTORICAL CONSTRUCTIONS*.
- Rei, J., & Sousa Gago, A. (2018). Abobadilha Alentejana – Uma técnica construtiva tradicional. *RPEE–Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, 6, 27–40.
- Rei, J., & Sousa Gago, A. (2021). Estudo do comportamento estrutural de “abobadilhas” alentejanas através de ensaios de carga. *O Congresso Da Reabilitação, CONREA'21*, 35–41.
- Rei, J., Sousa Gago, A., & Fortea Luna, M. (2021). Portuguese timbrel vaults -description and constructive tests. In Mascarenhas-Mateus & Paula Pires (Eds.), *History of Construction Cultures* (pp. 402–410). CRC Press.

- Rei, J., Sousa Gago, A., & Santos, J. (2014). ABOBADILHA ALENTEJANA, UMA TÉCNICA DE CONSTRUÇÃO IMEMORIAL. In LNEC (Ed.), *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*.
- Rippmann, M., Lachauer, L., & Block, P. (2012). Interactive vault design. *International Journal of Space Structures*, 27(4), 219–230.
- Robertson, D. (1999). Seismic Considerations for Guastavino Ceiling, Vault, and Dome Construction. *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology*, 30(4), 51–58.
- Romano, L. (2021). *Volte leggere. Saperi e magisteri costruttivi tra Napoli e l'Europa*. Nardini editore.
- Rondelet G. (1831). *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare* (traduzione a cura di B. Soresina, Ed.).
- Sacriste, E., Kechichian, P., & Mackintosh, G. (1977). *Viviendas con bóvedas*.
- Salemi, E. (1872). *Sulle volte cementizie*.
- Sánchez Leal, J. (2000). Bóvedas extremeñas y alentejanas de rosca y sin cimbra. In A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, & M. Tabales (Eds.), *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 995–1003). I. Juan de Herrera, SEDHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU.
- Sardone, L. (2024). Progettazione architettonica e analisi assistita da algoritmi generativi. Un approccio comparativo alle opere di Heinz Isler. *Archi*, 4, 26–29.
- Sarrablo Moreno, V., & Roviras, J. (2019). Bóvedas cerámicas. Un viaje transatlántico de ida y vuelta. *Palimpsesto*, 19, 17–19.
- Scaduto, Fulvia., Antista, Armando., Garozzo, Alessia., & Scibilia, Federica. (2016). *Documenti per la storia dell'architettura*. Caracol.
- Scibilia, F. (2016). IL TERREMOTO DEL 1823 IN SICILIA SETTENTRIONALE: DANNI E RICOSTRUZIONI. In M. R. Nobile & F. Scibilia (Eds.), *TECNICHE COSTRUTTIVE NEL MEDITERRANEO* (pp. 171–185). Edizioni Caracol. www.edizionicaracol.it

- Seifert, S., & Wolff, M. (2010). Heinz Isler (1926-2009). Topografische Projektübersicht. *Www.Great-Engineers.de. Ein Internetlexikon Der Bauingenieure.* www.great-engineers.de.
- Siegel, C. (1962). *Structure and Form in Modern Architecture*. Reinhold Publishing Corporation.
- Singh Brar, T., Kamal, M. A., & Setya, A. (2020). Exploration of Catenary Based Ferrocement Shell Structures: Form, Design and Architectural Interventions. *Architecture Research, 10*(4), 93–101.
- Sommese, F. (2025). *Re-thinking the Building Envelope. Lessons from Nature in the Era of Climate Change*. Springer Nature Switzerland.
- Sommese, F., Badarnah, L., & Ausiello, G. (2022). A critical review of biomimetic building envelopes: towards a bio-adaptive model from nature to architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 169*.
- Tang, G., & Pedreschi, R. (2015). *Deployable Gridshells as Formwork for Concrete Shells*.
- Tomás, A., & Martí, P. (2010a). OPTIMALITY OF CANDELA'S CONCRETE SHELLS: A STUDY OF HIS POSTHUMOUS DESIGN. *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 51*(1), 67–78.
- Tomás, A., & Martí, P. (2010b). Shape and size optimisation of concrete shells. *Engineering Structures, 32*(6), 1650–1658.
- Truño, Á. (2004). *Construcción de bóvedas tabicadas* (S. Huerta & J. L. Gonzalez Moreno-Navarro, Eds.). INSTITUTO JUAN DE HERRERA.
- Vallone, F., Fatta, G. (relatore), Cucchiara, C. (correlatore), & Vinci, C. (correlatore). (2017). *Il casale Miccichè a Villalba. Analisi storico-costruttiva e progetto di recupero*. Università degli Studi di Palermo.
- Van Mele, T., & Block, P. (2011). A NOVEL FORM FINDING METHOD FOR FABRIC FORMWORK FOR CONCRETE SHELLS. *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 52*(4), 217–224.

- Van Mele, T., Mehrotra, A., Mendez Echenagucia, T., Frick, U., Ochsendorf, J., Dejong, M., Kawaguchi, K., Ohsaki, M., Takeuchi, T., & Block, P. (2016). Form finding and structural analysis of a freeform stone vault. In K. Kawaguchi, M. Ohsaki, & T. Takeuchi (Eds.), *Proceedings of the IASS Annual Symposium*.
- Veenendaal, D., & Block, P. (2014). Design process for prototype concrete shells using a hybrid cable-net and fabric formwork. *Engineering Structures*, 75, 39–50.
- Vekariya, M. S., & Makwana, A. H. (2021). A Review on Thin-shell Structures: Advances and Trends. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 2(12), 1593–1608.
- Ventsel, E., & Krauthammer, Theodor. (2001). *Thin plates and shells : theory, analysis, and applications*. Marcel Dekker.
- Vincent, J. F. V. (2001). Stealing Ideas from Nature. In *Deployable Structures* (Vol. 412, pp. 51–58). Springer Vienna.
- Vinci, C. (2009). TERREMOTI E PREGIUDIZI NELLA CULTURA COSTRUTTIVA DELLA SICILIA OCCIDENTALE DEL XIX SECOLO. In O. Fiandaca & R. Lione (Eds.), *IL SISMA -ricordare prevenire progettare* (pp. 187–196). Alinea editrice srl.
- Wester, T. (2002). Nature Teaching Structures. *International Journal of Space Structures*, 17(2–3), 135–147.
- Wolfe, W. S. (1921). *Graphical Analysis. A Text Book on Graphic Statics*. Mc Graw Hill Book Company.
- Zampa, C. (2017). VOLTA TABICADA: TRA TRADIZIONE E INNOVAZIONE - La Sagrada Familia di Antoni Gaudì a Barcellona. *Recupero e Conservazione*, 61–65.
- Zaragozá Catalán, A. (2011). Hacia una historia de las bóvedas tabicadas. In A. Zaragozá, R. Soler, & R. Marín (Eds.), *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas* (pp. 11–27). Universitat Politècnica de Valencia.

