

Serra di Bicton Garden, Devon



British Museum, Londra



GRID SHELLS

Dalle forme organiche autogeneranti ai gusci trasparenti ed essenziali, fino al free form design, le ultime frontiere della sperimentazione fisica e ingegneristica

Maurizio Froli, Niccolò Baldassini, Alberto Carlucci

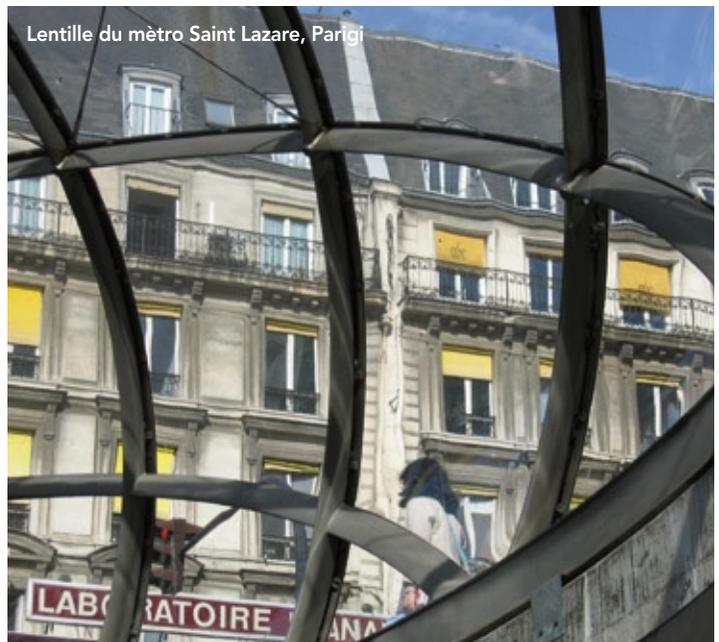
DC BANK, Berlino



Lentille du métro Saint Lazare, Parigi



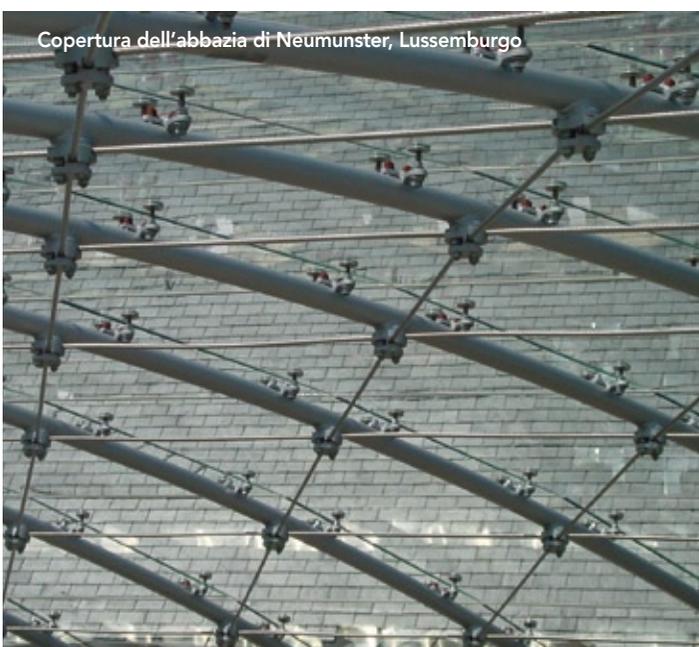
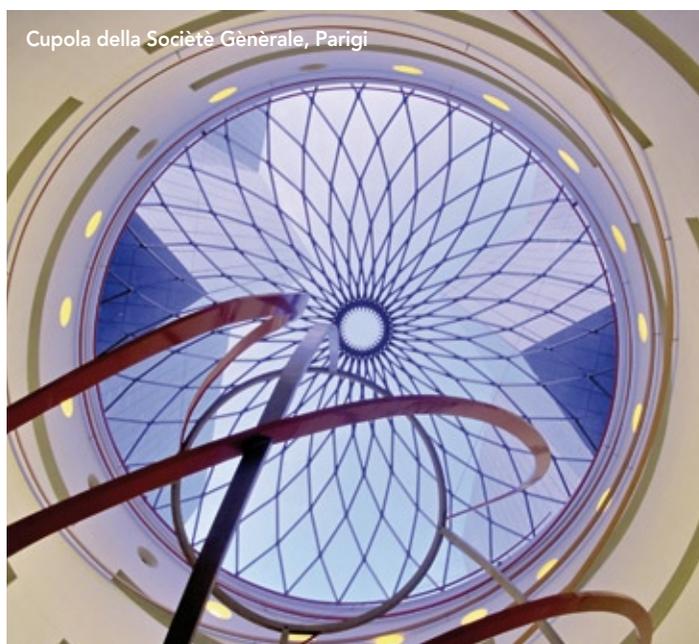
Lentille du métro Saint Lazare, Parigi



Con il termine di gusci a griglia (Grid Shells in inglese o Gitterschale in tedesco) si indicano quelle coperture costituite da una trama sottile di aste metalliche organizzate su superfici a doppia o semplice curvatura mediante maglie quadrangolari o triangolari. La struttura metallica è autoportante, indipendentemente dal manto di copertura il quale è sistematicamente costituito da lastre di vetro.

Carattere peculiare di questa nuova tipologia strutturale è il suo comportamento statico. La struttura metallica, stabile indipendentemente dal manto di copertura, è costituita da una griglia metallica, la cui forma e rigidità sono quelle di un guscio ma con superficie discreta anziché continua.

Gli elementi strutturali sono le aste, collegate tra di loro attraverso nodi. Esse possono essere curve per seguire fedelmente l'andamento della superficie, oppure più spesso approssimarla con delle spezzate. L'insieme più piccolo di aste, che connesse costituiscono una linea chiusa, forma una maglia. Questa può essere triangolare o quadrangolare. Da un punto di vista strutturale è evidente che una maglia triangolare permette alle forze membranali di scorrere nel piano della superficie senza flettere le barre. Ecco che le coperture a forma libera (freeform) vengono di norma discretizzate con maglie triangolari e coperte mediante pannelli piani triangolari. D'altro canto un pattern triangolare risulta economicamente meno vantaggioso di un'equivalente struttura avente la superficie costituita da facce quadrangolari poiché una maglia quadrangolare richiede meno barre, meno operazioni di giunzione e meno lavoro in officina e perché è evidentemente più agevole realizzare un nodo con quattro connessioni che uno con sei. Inoltre, la minore efficienza statica del pannello triangolare nei confronti di azioni fuori piano richiede l'impiego di profili più spessi raddoppiandone praticamente i costi rispetto a un pannello quadrangolare di eguale spessore. D'altra parte le maglie quadrangolari sarebbero labili se incernierate ai nodi. Pertanto questi devono essere rigidi nel piano oppure occorre dotare le maglie di diagonali, sovente a croce di Sant'Andrea. Inoltre, non tutte le superfici sono discretizzabili con maglie quadrangolari piane poiché i quattro vertici possono non giacere nello stesso piano. Questo impedisce l'adozione di pannelli piani decisamente più economici rispetto ai pannelli



incurvati a caldo. Consistenti vantaggi economici si hanno perseguendo la standardizzazione dei pezzi. Uno degli obiettivi progettuali quindi è quello di ottenere un numero quanto più ridotto possibile di pezzi differenti (in particolare le aste, i nodi, i pannelli), anche se oggi, con le tecniche C.A.D./C.A.M. e le macchine a controllo numerico, è più facile produrre molti pezzi complessi di variegata geometria.

Il ruolo dei cavi

I cavi pretesi assumono un ruolo fondamentale nella statica delle Grid Shells, svolgendo, in generale, tre funzioni principali:

Funzione di irrigidimento della volta nel suo piano medio

Le diagonali delle maglie quadrangolari possono essere efficacemente realizzate con cavi, passanti da maglia a maglia e opportunamente vincolati in corrispondenza dei nodi. Anche con nodi a cerniera, la presenza dei cavi disposti secondo le diagonali permette il trasferimento delle azioni di taglio. Grazie alla presollecitazione dei cavi, che mette in trazione gli stessi e precomprime le aste, entrambi i cavi collabo-

Le Grid Shells dal 1800 a oggi

Le coperture in vetro e metallo cominciano a svilupparsi nel XIX° secolo con l'infatuazione della nobiltà dell'Europa continentale per le serre tropicali. Divenne infatti un obbligo mondano disporre nel proprio parco di alberi tropicali, simbolo di potenza coloniale, i quali potevano crescere solo ricevendo luce e calore in quantità sufficiente. E' da questa esigenza funzionale che nascono le serre a volta che permettono ai raggi solari di attraversare perpendicolarmente la superficie, quindi con il massimo sfruttamento.

Nasce in questo contesto la famosa serra di Bicton Garden, costruita nel 1825 da John Claudius Loudon nel sud di Devon. Essa è costituita da una cupola centrale di 8,3 m di altezza e da due cupole laterali simmetriche, estese in totale per 200 m². Le nervature in ferro forgiato sono distanziate in media di 18 cm e ricoperte di pannelli di vetro che svolgono anche la funzione necessaria di controventamento di una struttura metallica altrimenti troppo deformabile se non addirittura labile.

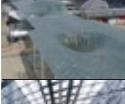
Nonostante le cupole geodetiche di luci sempre maggiori datino 1967 e l'invenzione del processo float di formazione del vetro risalga al 1959, solo nel 1989, a più di 150 anni dalla serra di Bicton Garden, nascono dalla mente di Jörg Schlaich le prime moderne coperture in acciaio e vetro (Glazed Grid Shells) realizzate in Germania, a Neckarsulm e ad Amburgo.

Olympic Park di Monaco di Baviera

Frei Otto ha ricercato quelle superfici che permettessero una ottimizzazione strutturale giungendo alla definizione di superfici minime. Queste superfici, che hanno la proprietà di essere equitensionali, sono le forme "naturali" a cui giungono le superfici membranali pretese con tensione uniforme. Caratterizzate dal raggiungimento della minore area compatibile con le condizioni al contorno e di carico, permettono la definizione di superfici costituite dalla minima quantità di materiale, qualunque esso sia.

Come dimostrato dalle esperienze del fisico belga Joseph A.F Plateau (1801-1883) in natura esempi di superfici minime si possono ottenere immergendo nell'acqua saponata un telaietto di ferro di una qualunque forma chiusa: alla sua estrazione, la lamina di sapone che rimane attaccata adesso rappresenta una superficie minima, con curvatura media nulla ovunque. Da queste considerazioni, risulta evidente perché Otto in fase di preliminare concezione formale delle sue opere abbia adottato modelli in pellicola saponata per la definizione di superfici minime. Questa metodologia è stata applicata sia nella realizzazione di membrane in tela che di tensostrutture come l'Olympic Park di Monaco di Baviera del 1972.



Anno	Luogo		Architetto	Strutturista	Luce Max	Freccia	Maglie	Aste	Cavi
1989	Swimming Arena, Neckarslurm		Kohlmeier und Bechler	SBP Schlaich Bergermann & P	25 m	5,75 m	quadr. L=1,0 m	60x40 mm	2 x ϕ 6
1989	Museum für Hamburgische Geschichte, Amburgo		von Gerkan Marg und Partner	SBP Schlaich Bergermann & P	18 m	5,2 m	quadr. L=1,2 m	60x40 mm	2 x ϕ 6
1995	Cupola della Société Générale, Parigi		Andraut et Parat	RFR Ingénieurs	29,5 m	4,175 m	losanga 2,5 x 4,3 m	profilo a "V" 300 mm	/
1996	Hippohouse Zoo di Berlino		J. Gribl	SBP Schlaich Bergermann & P	33 m	6,6 m	quadr. L=1,2 m	40÷ 80 x40 mm	ϕ 14
1998	DG Bank, Berlino		Frank O. Gehry & Associates Inc.	SBP Schlaich Bergermann & P	20 m	2,7 m ÷ 10 m	triang. L=1,55 m	40÷ 70 x40 mm	ϕ 14 e 20
2000	British Museum, Londra		Foster and Partners	Buro Happold	40 m ca	6,4 m	triang. L=1,5 m	80÷ 200 x40 mm	/
2002	German Historical Museum, Berlino		I. M. Pei	SBP Schlaich Bergermann & P	41 m	6 m	quadr. L=1,75 m	60 x140 mm	ϕ 14
2003	Lentille du Métro Saint Lazare, Parigi		A.R.T.E. J.M Charpentier & A.	RFR Ingénieurs	16 m	4,3 m	quadr. L=1,7 m	90x70 mm	ϕ 12
2003	Abbazia di Neumunster, Lussemburgo		RFR Ingénieurs	RFR Ingénieurs	16 m	3 m	triang. L=1,1 m	ϕ 80	ϕ 16
2005	Nuova Fiera, Milano		Massimiliano Fuksas	SBP Schlaich Bergermann & P	41 m	var.	quad./triang. L=1,8 m	sez. T mm 160÷350	/
2006	Main Train Station, Berlino		von Gerkan Marg und Partner	SBP Schlaich Bergermann & P	66 m	17 m	quadr. L=1,65 m	145÷ 175 x60 mm	ϕ 12

rano al trasferimento delle azioni taglianti, e le maglie costituenti la superficie della volta risultano così più rigide.

Funzione di precompressione radiale

La curvatura dei cavi disposti lungo la superficie della volta fa sì che, una volta tesi, essi impongano una precompressione di tipo radiale alla volta che tende a centrare la funicolare dei carichi.

Funzione di diaframma (irrigidimento della volta fuori dal piano/conservazione della forma)

Molto spesso le Grid Shells sono dotate di sistemi di cavi disposti a ventaglio in piani ortogonali alla superficie del guscio (spoked wheels) oppure spazialmente. Questi sistemi hanno il compito di assicurare la conservazione della forma della volta sotto l'azione dei carichi soprattutto asimmetrici ed anche di creare una zona più rigida verso la quale convergono le

azioni taglianti.

Lo stato dell'arte

Le sezioni delle aste sono generalmente piene per ridurre l'ingombro e aumentare l'effetto di trasparenza. Il materiale è di solito in acciaio zincato per le aste mentre i cavi sono in acciaio inossidabile. Le lastre di copertura sono in generale pannelli in vetro temperato costituiti spesso da due strati di spessore dipendente dalle dimensioni della maglia, ma comunque variabile dai 5 agli 8 mm. Per effetto della loro geometria, le Grid Shells sopportano i carichi prevalentemente mediante azioni di compressione. Ecco che le verifiche di stabilità giocano un ruolo fondamentale nell'analisi di queste strutture. La necessità di queste verifiche è aumentata dal fatto che queste particolari struttu-

Per capire

Struttura	Complesso di aste collegate tra loro attraverso nodi	
Maglia	L'insieme più piccolo di aste che costituiscono una linea chiusa	
Struttura	Vantaggi	Svantaggi
Maglia triangolare	Le forze membranali scorrono sul piano della superficie senza flettere le aste.	E' economicamente meno conveniente: richiede un maggior numero di aste e di giunzioni rispetto ad una maglia quadrangolare Ha una minore efficienza statica per le azioni fuori piano, per questo richiede profili di maggior spessore con conseguenti costi più alti, rispetto ai pannelli quadrangolari dello stesso spessore.
Maglia quadrangolare	Richiede meno aste, meno giunzioni, meno lavoro in officina, è più conveniente sotto il profilo dei costi.	Per essere rigida deve essere dotata di diagonali (a croce di S.Andrea). Le superfici che non sono di traslazione, rivoluzione o omotetiche sono difficilmente discretizzabili con maglie quadrangolari e richiedono l'uso di sofisticati algoritmi geometrici; qualcuna di queste strutture è stata già realizzata

re hanno delle modalità di collasso per perdita della stabilità che ricordano sia le modalità delle strutture reticolari che quelle dei gusci continui e addirittura combinazioni delle due. Inoltre accanto alle problematiche di instabilità locali delle singole aste, sono spesso più condizionanti le instabilità globali, sovente accompagnate da una sensibilità alle forme di imperfezione iniziali tanto più elevata quanto più la struttura si avvicina all'ottimo strutturale. Nonostante siano numerosi i caratteri, statici e tecnologici, che

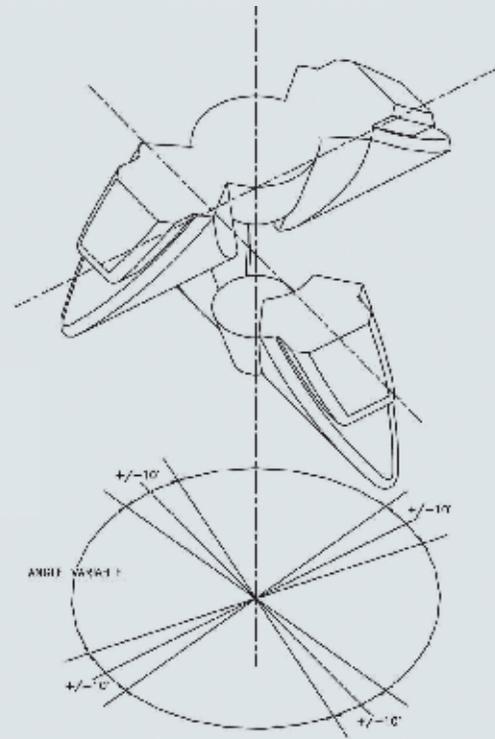
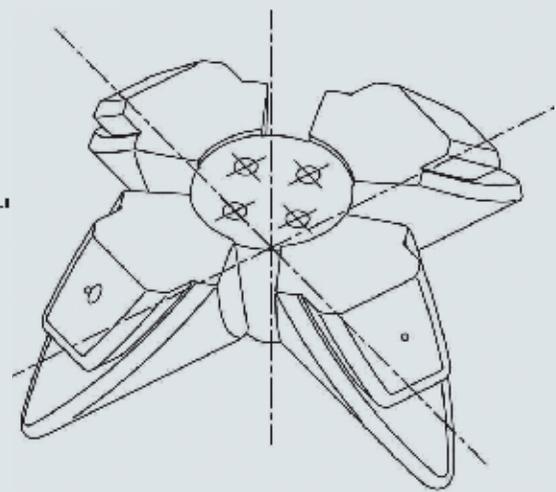
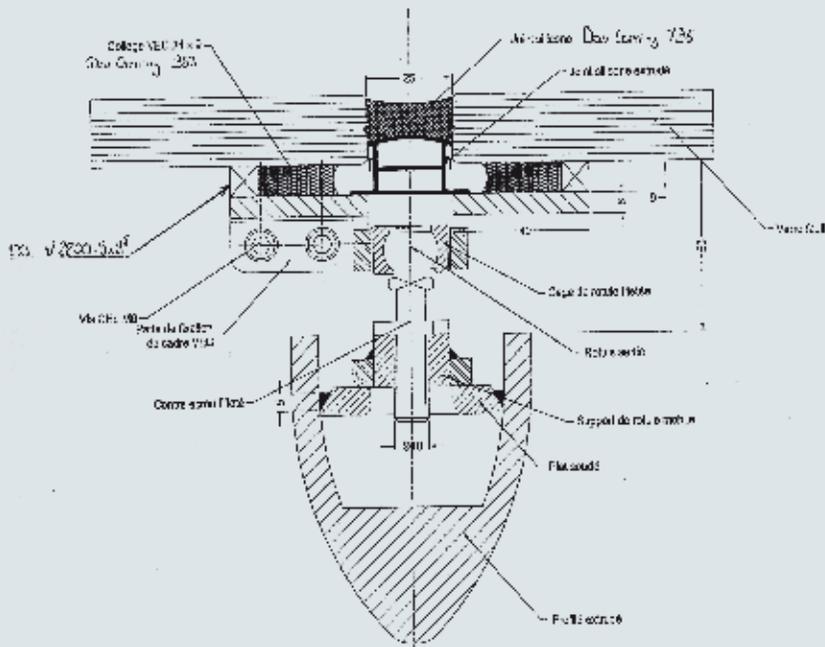
accomunano le coperture sino a oggi realizzate, non è così evidente definire caratteristiche geometriche comuni poiché queste sono strettamente dipendenti dalle sezioni adottate per le aste, dalla scelta della geometria della maglia strutturale e non ultimo dalle esigenze formali e architettoniche. Nella tabella della pagina precedente vengono riportate le informazioni ed i caratteri delle principali Glazed Grid Shells realizzate così da fornire un quadro panoramico sullo stato dell'arte.

Stazione di servizio di Deitingen in Svizzera

A partire dalla fine degli anni '50 l'ingegnere svizzero Heinz Isler (1926-) estende il concetto di funicolare agli elementi bidimensionali per la ricerca della forma di volte sottili in calcestruzzo, facendo sistematico ricorso inoltre a modelli fisici.

Isler ricerca la superficie funicolare mediante tessuti con bassa rigidezza a taglio caricati con acqua e gesso o con acqua gelata al fine di ottenere modelli solidi, il cui studio fotogrammetrico diviene la prima tappa della concezione morfologica del guscio, completata successivamente con una puntuale analisi strutturale. Questo processo di form finding che generava superfici di geometria non euclidea ma con ottimo comportamento strutturale, consentiva di affrancare i gusci dalle pesanti ed antiestetiche travi di riva diffuse fino ad allora nella progettazione dei gusci sottili in calcestruzzo, ottenendo così delle strutture di pochi centimetri di spessore, delle quali le volte della stazione di servizio di Deitingen in Svizzera (1968) rappresentano un limpido esempio.





Lentille du Métro Saint Lazare (2003), Parigi

Svincolata dalla soluzione a pannelli piani è la Lentille du Métro Saint Lazare (2003) realizzata a Parigi da RFR Ingénieurs che prevede l'utilizzo di pannelli in vetro a doppia curvatura formati a caldo.



Gusci in acciaio e vetro

Metodo	Sviluppo	Esempio
"delle superfici di traslazione (translational surfaces)" (Studio SBP)	Traslando una curva spaziale, generatrice, su di un'altra curva spaziale, direttrice, così da creare una superficie completamente scomponibile in maglie quadrangolari piane.	Copertura di Amburgo (1989); Copertura del Hippohouse di Berlino (1996);
"delle superfici omotetiche (scale-trans surfaces)" (Studio SBP)	Generazione di griglie mediante espansioni centrali, ma anche laterali, omotetiche combinate con opportune traslazioni.	Copertura della Main Train Station di Berlino (2006).
Pannelli in vetro a doppia curvatura formati a caldo (Studio RFR).	Concezione di coperture a doppia curvatura	Lentille du Métro Saint Lazare di Parigi (2003)
Pannelli in vetro a singola curvatura piegati a freddo (Studio RFR)	I pannelli seguono l'andamento delle strips a semplice curvatura che discretizzano la superficie	Gare TGV di Strasburgo (2007)

La copertura dell'abbazia di Neumunster

Un guscio a graticcio ibrido, la combinazione di archi e cavi

Le coperture sin qui analizzate sono caratterizzate da un comportamento meccanico d'insieme di tipo isotropico conseguenza di una precisa scelta formale. Una soluzione architettonico-strutturale assolutamente innovativa è invece offerta dalla copertura della corte principale dell'Abbazia di Neumunster in Lussemburgo (2003) progettata da RFR Ingénieurs Paris.

Al fine di soddisfare le necessità funzionali di illuminazione, isolamento termo-acustico e ventilazione della corte e la volontà di minimizzare, nell'ambito di un sito storico, la presenza e l'impatto visivo del nuovo manufatto, è stata ricercata la leggerezza e l'effetto di filigrana della struttura facendo ricorso a un innovativo schema strutturale che combina archi e cavi formando appunto un guscio a graticcio ibrido (hybrid grid shell).

Gli archi, di sezione circolare piena con diametro di 80 mm, superano trasversalmente la corte, inclinati di 30° rispetto al lato corto della stessa, con una luce di 19 m, una freccia di 3 m e un interasse di circa 1 m. Due ordini di cavi, in acciaio inossidabile di diametro 16 mm, sono disposti rispettivamente in direzione longitudinale e trasversale, quest'ultima inclinata di 60° rispetto alla direzione degli archi, così da creare una maglia triangolare equilatera. I cavi sono presollecitati per mezzo di un accorciamento degli elementi di connessione con gli archi, accorciamento che, avvenendo radialmente rispetto alla direzione dei cavi, induce uno stato di pretensione nei cavi e di precompressione negli archi.

Gli archi rappresentano gli elementi strutturali principali mentre i cavi trasferiscono gli sforzi di membrana tra archi adiacenti, assicurando la continuità della struttura che permette un

contemporaneo comportamento ad archi portanti e a guscio a graticcio. Adottando una geometria funicolare, è possibile introdurre elementi privi di rigidità flessionale quali i cavi, il cui potenziale detensionamento è impedito dal ricorso alla pretensione, in modo da raggiungere un effetto di filigrana di indubbia eleganza formale e ai limiti delle possibilità tecnologiche. Inoltre la distribuzione degli sforzi assiali è proporzionale alle differenze di rigidità e quindi le forze transitano, nel senso trasversale, secondo una direzione privilegiata, quella della maggiore rigidità, ossia principalmente lungo gli archi.

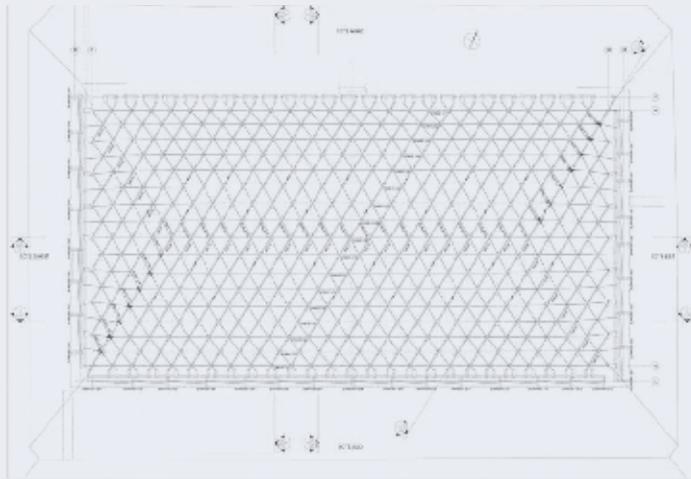
L'anisotropia della struttura ha consentito il raggiungimento di una leggerezza visuale mai vista prima. Infatti la ricerca di una geometria funicolare per un guscio a doppia curvatura su perimetro rettangolare porta, adottando una maglia isotropa, alla generazione di forme del tipo a cuscino (pillow shaped) che, sebbene ottimali dal punto di vista della resistenza in quanto vengono limitate le sollecitazioni flettenti, mostrano un indesiderabile appiattimento agli angoli che genera problemi di instabilità locali data l'inversione di curvatura a causa della riduzione del raggio di curvatura degli archi di bordo. Nel caso di form-finding anisotropo si individuano delle geometrie a raggi di curvatura



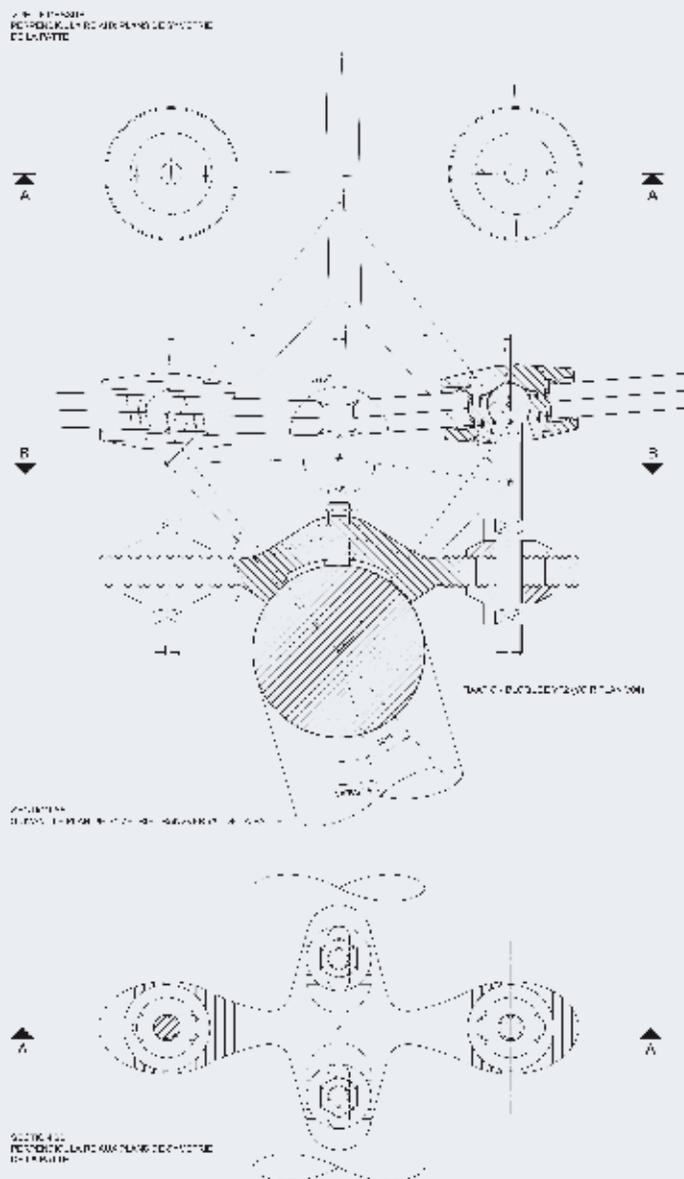
La copertura della corte principale dell'Abbazia di Neumunster, 2003 (Archivio RFR)
Continuità della linea degli archi (Archivio RFR)

variabili influenzate dall'orientamento della rigidità della struttura; la geometria ideale di un guscio reticolare anisotropo è quindi costituita da archi parabolici, sovente ben approssimabili con archi di cerchio, lungo la direzione più rigida, adattando la conseguente definizione formale nelle altre direzioni.

Sulla base di queste considerazioni, la struttura di Neumunster è stata generata come una serie di archi di raggio costante organizzati in una zona centrale, a forma di parallelogramma in pianta, che costituisce una superficie di traslazione e due zone di estremità, a forma di triangolo in pianta, dove gli archi sono omotetici nel diminuire progressivamente la lunghezza della corda al fine di entrare diagonalmente nell'angolo. Il raggio di curvatura costante permette una agevole calandratura degli archi, i quali, continui, non presentano le forature, tipiche dei reticoli usuali, che indeboliscono le sezioni prossime ai nodi. D'altro canto la curvatura continua dell'arco impedisce di appoggiare direttamente pannelli piani di vetro che, aventi forma a losanga nella zona centrale e triangolare in quelle di estremità, sono sorretti a mezzo di rotulle specificamente realizzate per questo progetto. Assieme al sistema di fissaggio, esse garantiscono l'isostaticità della parte vetrata nei confronti dei consistenti spostamenti differenziali che una struttura flessibile di questo tipo inevitabilmente compie.



Pianta della struttura (Archivio RFR)



Dettaglio di nodo (Archivio RFR)

E oltre: Neumunster II

Nell'ambito degli studi di free form design è stata recentemente ricercata la forma di una copertura in acciaio e vetro a doppia curvatura che costituisse l'evoluzione della hybrid grid shell di Neumunster e permettesse di superare le singolarità geometriche nelle zone angolari della superficie originaria grazie a un corretto accoppiamento della tecnologia vitrea di curvatura a freddo con i vincoli strutturali. Il processo di ricerca formale si è articolato in processi iterativi di form-finding, ottimizzazione strutturale ed elaborazione geometrica. Più in particolare, è stata inizialmente definita la trama della griglia di base, evidentemente anisotropa, costituita da archi, con rigidità flessionale oltre che assiale, bielle, aventi esclusivamente rigidità assiale, e cavi orditi trasversalmente. Quindi sono state generate le versioni α e β mediante processi di form-finding anisotropo e non equitensionale, a griglia imposta, in modo da evitare forme a cuscino e mantenere gli stessi requisiti formali di massima di Neumunster. Esse differiscono tra loro per l'inclinazione, in piano, degli archi con l'orizzontale, rispettivamente di 45° e 51° . L'elaborazione analitica delle superfici di involuppo di tali versioni e la successiva ottimizzazione geometrica svolta mediante algoritmi matematici sviluppati dalla stessa RFR insieme ai suoi partner di ricerca Evolute e TU-Wien, ha portato alla determinazione del modello a strisce sviluppabili a singola curvatura sulle cui linee principali di curvatura è stata generata la trama degli elementi compressi della versione χ . Nel caso specifico è chiaro che il processo di ricerca formale si deve necessariamente adattare alle esigenze geometrico-tecnologiche poiché i desiderati requisiti formali possono concretizzarsi solo con l'accoppiamento del layout strutturale con una opportuna suddivisione della superficie vetrata in pannelli. Questi, seguendo l'andamento delle strips definite in fase di ottimizzazione geometrica, possono essere a semplice curvatura, quindi realizzati con la tecnologia del cold bending. Un successivo processo di form-finding a struttura imposta ed un nuovo processo di ottimizzazione geometrica hanno portato alla definizione del layout strutturale finale che esprime in forma mediata il soddisfacimento dei requisiti architettonici e formali, l'ottimizzazione strutturale ed il rispetto delle necessità tecnologiche. In ultima analisi, assumendo le sezioni delle bielle circolari piene con diametro di 40 mm e i cavi di diametro 16mm, è stata così scelta una sezione trasversale degli archi composta da due piatti di 20x60 mm che possono essere agevolmente saldati a parziale penetrazione al lembo superiore e inferiore senza soluzione



di continuità e calandrati sino a raggiungere l'asse di progetto. Questa soluzione, dal peso strutturale estremamente ridotto (12,2 tonnellate di acciaio contro le 22,6 di Neumunster), permetterebbe inoltre di appoggiare direttamente i pannelli vetrati sul lembo superiore della sezione mediante un profilo speciale in alluminio. Il nuovo approccio basato sulla scomposizione di una forma libera in pannelli a singola curvatura cambia radicalmente il panorama di riferimento delle Grid Shells spostando l'interesse dalle superfici sfaccettate a quelle continue. Questo nuovo approccio, basato sull'esperienza della Gare TGV di Strasburgo e sperimentato e validato nel caso di Neumunster II, mostra chiaramente come la discretizzazione di una superficie a doppia curvatura secondo pannelli a singola curvatura generi superfici visivamente continue. Inoltre l'economia della curvatura a freddo dei pannelli di copertura, rispetto alla formazione a caldo (sia a singola che a doppia curvatura), permette di considerare il caso di Neumunster II come un primo passo verso una nuova generazione di forme e Grid Shells nel quale si fondono insieme le esigenze architettoniche e formali, necessità strutturali, tecnologiche ed economiche, per originare un Free-form Design perfettamente sostenibile.