

# Grid shells: ricerca morfologica ed ottimizzazione geometrica

## *Grid shells: morphological research and geometrical optimisation*

Niccolò Baldassini, Alberto Carlucci, Maurizio Froli

### 1. INTRODUZIONE ALLE GRID SHELLS

#### 1.1 Tipologia grid shells

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 in semplice strato su superfici a doppia curvatura mediante maglie quadrangolari o triangolari [1]. La struttura metallica è autoportante, indipendentemente dall'involucro il quale è sistematicamente costituito da lastre di vetro. La trasparenza e l'effetto di filigrana sono le caratteristiche peculiari di queste coperture [2] e la loro esaltazione presuppone necessariamente un sofisticato processo di ottimizzazione statica la quale, a sua volta, richiede una accurata, non arbitraria, definizione della forma (*form-finding*).

#### 1.2 Necessità di analisi geometricamente non lineari

La ricerca della leggerezza strutturale comporta quindi la progettazione di strutture deformabili e di norma sensibili agli effetti del secondo ordine. Il comportamento di queste strutture, prossimo a quello di membrana, è definito di tipo *softening*, ossia caratterizzato da una diminuzione di rigidità al crescere del carico: pur in regime di deformazioni prevalentemente estensionali molto ridotte, e quindi all'interno del campo di comportamento elastico-lineare del materiale, la variazione di configurazione geometrica, e la conseguente diminuzione di rigidità, sono tali da richiedere la messa in conto della configurazione deformata, e quindi l'analisi geometricamente non lineare.

Il moderno corso dell'Ingegneria ha mostrato come le *grid shells* rappresentino una affascinante, sofisticata ed efficiente categoria di strutture. La ricerca della leggerezza, sia strutturale che visuale, scaturisce dal processo di ricerca morfologica ma l'accoppiamento di forme efficienti con soluzioni costruttive e con sistemi vetrati caratterizzati da infissi minimali ha negli anni mostrato i suoi limiti dato che la geometria statica e la geometria dell'involucro spesso hanno esigenze contrastanti e non conciliabili. Agli inizi del 2000, RFR con la realizzazione della copertura vetrata della corte principale dell'Abbazia di Neumünster in Lussemburgo, aveva iniziato ad investigare strategie alternative allontanandosi dalle soluzioni canoniche e sperimentando uno schema strutturale ibrido che metteva in questione la usuale isotropia nel piano del guscio. A partire da questa esperienza RFR ha rielaborato il vecchio progetto usando le nuove conoscenze in termini di gestione e definizione geometrica nonché affinando la riflessione strutturale sul metodo di calcolo delle strutture a guscio per definire una struttura che coniuga le esigenze strutturali con quelle geometriche sulla base delle nuove conoscenze oggi disponibili.

*Current developments in Engineering have shown that grid shells represent a fascinating, sophisticated and efficient category of structures. The aim of achieving structural and visual lightness derives from the form-finding process. However, the coupling of efficient shapes with constructive solutions and glazed systems characterized by minimal fixtures has revealed its limits, as structural and envelope geometry often have conflicting and irreconcilable demands. At the start of 2000, RFR began investigating alternative strategies, when it built the glazed roof of the courtyard of Neumünster Abbey in Luxembourg, where a hybrid structural scheme called into question the usual isotropy in the shell plane. Starting from this experience, RFR has revisited the old project using the new knowledge of management and geometrical definition and with the adoption of a more in-depth approach towards the methods of calculating shell structures. As a result, the new structure combines structural and geometrical needs, based on the know-how available at the present time.*

#### 1.3 Dalla stabilità globale alla necessità della ricerca della forma: concetto di form-finding

Una ulteriore peculiarità dei gusci a griglia è che, per effetto della loro geometria, queste sopportano i carichi prevalentemente mediante azioni di compressione. Ecco che le problematiche di stabilità giocano un ruolo fondamentale nell'analisi di queste strutture



Fig. 1 – La copertura della corte principale dell'Abbazia di Neumünster, 2003 (Foto M. Bodson)

[3]. Accanto alle instabilità delle singole membrature, possono generarsi instabilità localizzate in zone circoscritte della superficie a causa di concentrazioni locali di carico che possono portare ad instabilità per scatto locale fino ad arrivare ad instabilità globali riguardanti la struttura nel suo complesso; possono anche inscenarsi modalità di collasso che derivano da una combinazione dei modi di cui sopra.

Il processo di *form-finding* ricerca forme le più possibili prossime al poligono funicolare minimizzando il comportamento flessionale a tutto vantaggio degli sforzi assiali che, quindi, data la forma a doppia curvatura, generano un comportamento a guscio. Il *form-finding* permette poi di ottimizzare i gusci a griglia nei confronti dei livelli di carico relativi alle diverse modalità di collasso e ciò significa che molteplici scenari di collasso possono avvenire allo stesso livello di carico. Il minimalismo strutturale, che rende queste particolari strutture tra le più ardite nel panorama odierno delle coperture, deve quindi prendere in conto, oltre alla definizione statica (della migliore configurazione di equilibrio per il carico dato), l'evidente sensibilità dei gusci a griglia ai fenomeni instabili. Diventa essenziale la definizione di uno schema strutturale che associ alla ottimizzazione statica delle sezioni, un appropriato margine nei confronti dei pericolosi, in quanto improvvisi, fenomeni di instabilità.



Fig. 2 – Stazione TGV di Strasburgo, 2007 (Foto M. Denancé)

## 2. NEUMÜNSTER I: LA PRIMA GRID SHELL ANISOTROPA

La copertura della corte principale dell'Abbazia di Neumünster in Lussemburgo (2003) progettata da RFR [4] presenta soluzioni tecniche che si discostano dalla tradizione delle *grid shells*.

Al fine di soddisfare le necessità 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 ad un innovativo schema strutturale che combina archi e cavi formando un guscio a graticcio ibrido (*hybrid grid shell*) caratterizzato da una anisotropia nei piani tangenti al guscio (figura 1).

L'anisotropia della struttura è stata presa in

conto nel processo di ricerca della forma che ha comportato una superficie di riferimento ben differente da quella ottenibile secondo il processo canonico che non privilegia l'orientazione della struttura.

L'anisotropia della struttura ha consentito il controllo delle forze e di privilegiare il trasferimento dei carichi secondo lo schema più rigido (quello degli archi) che corrisponde anche al percorso più breve verso gli appoggi e dunque più prestazionale dal punto di vista statico dato che i fenomeni di instabilità sono proporzionali al quadrato della portata. Da notare che la ricerca di una geometria funicolare a maglia isotropa avrebbe portato alla generazione di forme del tipo a cuscino (*pillow shaped*) che, sebbene ottimali dal punto di vista dell'equili-

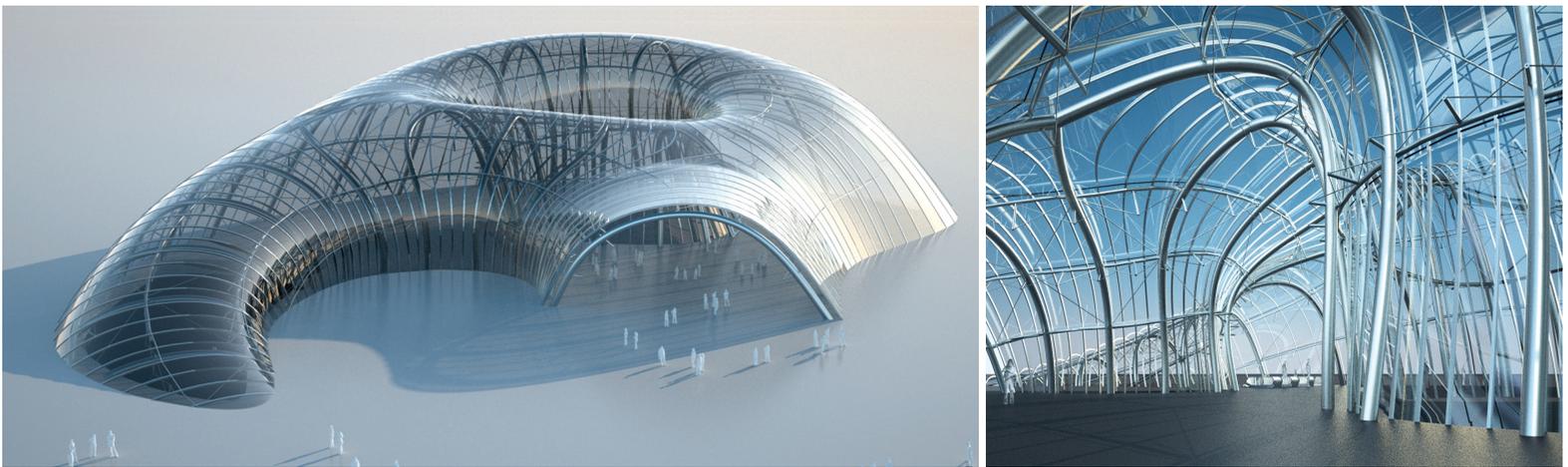


Fig. 3 – Progetto di ricerca del programma di geometria RFR, Evolute, TU Wien



Fig. 4 – Singolarità nella superficie vetrata

bricio statico in quanto vengono limitate le sollecitazioni flettenti, avrebbe mostrato un inestetico appiattimento agli angoli a cui corrispondono importanti problemi di instabilità locali che riducono la capacità portante globale.

La struttura della copertura della corte della Abbazia di Neumünster è costituita da archi di sezione circolare piena con diametro di 80 mm, che scavalcano trasversalmente la corte, inclinati in pianta di 30° rispetto al lato corto della stessa, con una luce effettiva di 19 m, una freccia di 3 m ed un interasse di circa 1 m. Due ordini di cavi pretesi 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 che dona continuità alla superficie. I cavi sono pretesi quindi sono

sempre attivi e permettono il trasferimento delle forze da arco ad arco creando l'effetto guscio. In termini ultimi, l'anisotropia della struttura permette di separare la funzione portante (archi) dalla continuità della superficie (cavi) che assicura il comportamento a guscio essendo la redistribuzione delle forze una funzione della rigidezza relativa nelle differenti direzioni.

### 3. LA GEOMETRIA COSTRUTTIVA

La definizione geometrica delle *grid shells* è sempre stata sviluppata a partire da un processo di ricerca della forma ed eventuale approssimazione secondo geometrie di traslazione, rivoluzione o omotetiche. In questo contesto, la superficie risulta quasi sempre sfaccettata, ben lontana dal desiderio architettonico di una superficie liscia, trasparente ed a doppia curvatura. Nuovi algoritmi matematici oggi disponibili permettono di decomporre una superficie qualsiasi secondo pannelli quadrangolari ma soprattutto di decomporre tale superficie utilizzando esclusivamente pannelli a singola curvatura. Quando l'orientazione della suddivisione corrisponde alla direzione di massima curvatura, il diedro fra pannelli adiacenti è minimo e la superficie viene percepita come continua, come nel caso della Stazione TGV di Strasburgo [5], con grande beneficio dell'immagine architettonica (figura 2).

Tale metodo di suddivisione è stato sviluppato all'interno del programma di indagini

teoriche intitolato "*Architectural freeform structures from single-curved panels*" (figura 3), promosso da RFR ed in collaborazione con Evolute e la Technische Universität Wien [7].

## 4. FORM-FINDING ED ANALISI STRUTTURALE DI NEUMÜNSTER II

### 4.1 Criteri architettonici

La riflessione sui gusci a griglia ibridi ed i nuovi metodi di suddivisione delle superfici a doppia curvatura sono confluiti nella ri-progettazione della copertura del cortile principale della Abbazia di Neumünster. Questo studio teorico ha avuto come fine la validazione delle nuove possibilità formali ed architettoniche offerte dai nuovi processi di suddivisione delle superfici a doppia curvatura. In particolare, lo studio mirava alla definizione di una superficie a doppia curvatura che, sebbene installata su perimetro rettangolare, permettesse di superare le singolarità geometriche nelle zone angolari della superficie originaria (figura 4); di migliorare l'interfaccia vetro-struttura nonché passare da una superficie sfaccettata ad una superficie a doppia curvatura continua (o comunque percepibile come tale).

Il ricorso ad una suddivisione della superficie in pannelli a singola curvatura permette l'adozione di pannelli in vetro a semplice curvatura formati a freddo mediante la nuova tecnologia della curvatura a freddo già adottata con successo da RFR nella Sta-



Fig. 5 – Stazione TGV, Lille, 1994

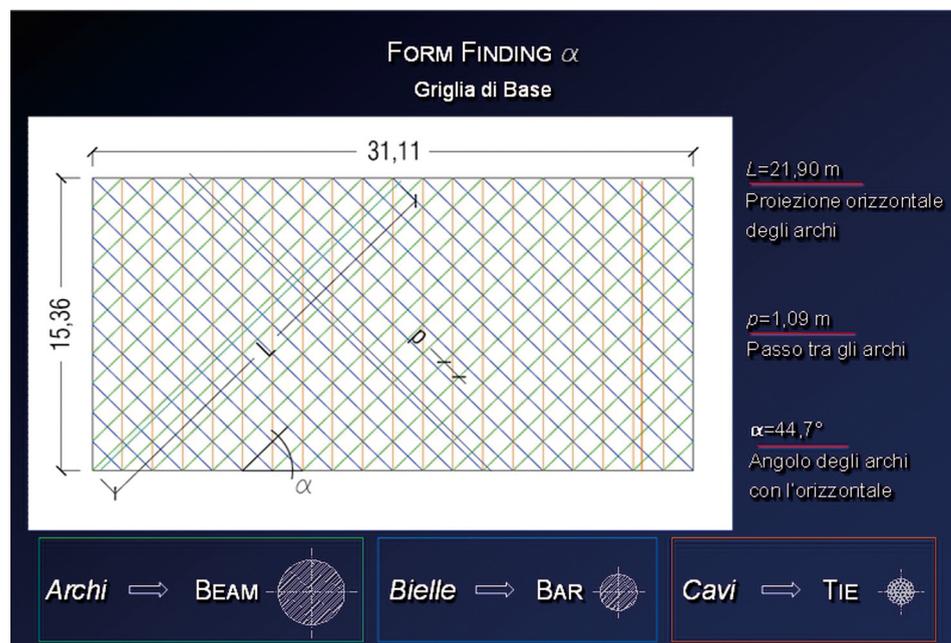


Fig. 6 – Griglia di base

zione TGV di Strasburgo del 2007 e sviluppata a partire dalle prime sperimentazioni iniziate con la Stazione TGV di Lille del 1994 (figura 5).

#### 4.2 Processo di ricerca della forma

Il processo evolutivo di sviluppo formale si è articolato in processi iterativi di *form-finding*, ottimizzazione strutturale ed elaborazione geometrica.

##### Ricerca della forma a griglia imposta

Una volta definita la trama evidentemente

anisotropa della griglia di base (figura 6), sono stati eseguiti due processi di ricerca della forma.

I modelli sono stati generati mediante processi di *form-finding* anisotropo e non equitensionale a griglia imposta, adottando, nello specifico, il metodo della Densità di Sforzo nella variante del metodo forza di presollecitazione [8].

Le prime due versioni,  $\alpha$  e  $\beta$  (figura 7), differiscono per l'inclinazione, in piano, degli archi con l'orizzontale, rispettivamente di  $45^\circ$  e  $51^\circ$  mentre sono accomunate dall'aver

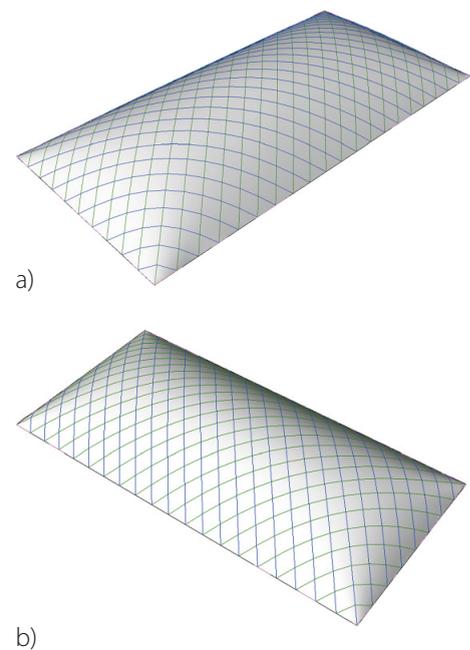


Fig. 7 – a) Neumünster II  $\alpha$ ; b) Neumünster II  $\beta$

un'area della superficie vetrata paragonabile a quella della copertura originale.

Per valutare preliminarmente il comportamento delle strutture, sono state eseguite analisi di stabilità globale incrementando proporzionalmente i carichi in un regime geometricamente non lineare sino al raggiungimento della configurazione di instabilità, adottando quindi come indice di valutazione dell'efficienza strutturale il moltiplicatore di collasso per instabilità globale  $r_{RCrE}$ .

Nel caso specifico, tali analisi di stabilità

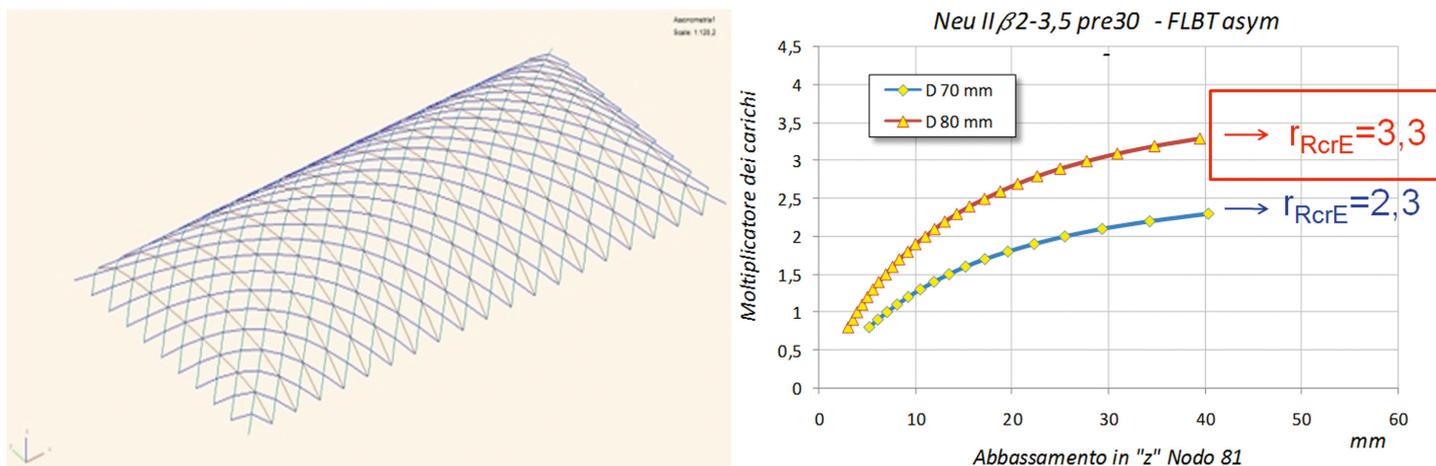


Fig. 8 – Analisi preliminari di stabilità globale di Neumünster II  $\beta$

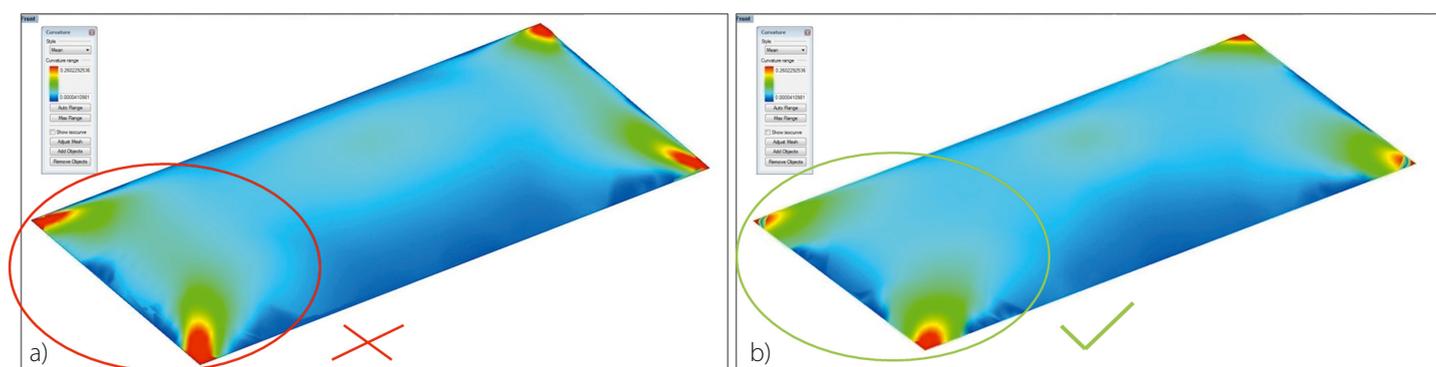


Fig. 9 – Distribuzioni di curvatura di Neumünster II  $\alpha$  (a) e di Neumünster II  $\beta$  (b)

globale, eseguite al variare della pretesione iniziale dei cavi e del diametro degli archi in sezione circolare piena, hanno evidenziato la bontà delle soluzioni  $\beta$  (figura 8) ma solo con archi di diametro 80 mm, lo stesso della struttura di Neumünster originaria.

#### Prima ottimizzazione geometrica

La volontà di realizzare una struttura più trasparente e al contempo più leggera ci ha spinto ad una elaborazione geometrica delle superfici di involuppo delle versioni  $\alpha$  e  $\beta$ , individuando nella prima quella ottimale (figura 9) in quanto presentava le variazioni di curvatura più graduali, soprattutto nelle zone critiche degli angoli.

Su tale superficie è stata realizzata l'ottimizzazione geometrica in collaborazione con la TU Wien ed Evolute, che è consistita nelle seguenti fasi:

- Elaborazione della superficie continua per arrivare ad una superficie discreta costituita

da maglie quadrangolari piane (figura 10a).

- Definizione della superficie levigata ricostruita sulla maglia precedente (figura 10b).
- Calcolo mediante i nuovi algoritmi matematici della discretizzazione della superficie in *D-strip* in modo da approssimare la superficie secondo pannelli a singola curvatura. Tali pannelli hanno l'ulteriore proprietà che i vettori del limite elastico definiscono una superficie anch'essa sviluppabile.

Sono state quindi determinate su quest'ultimo modello le linee principali di curvatura mediante le quali è stata generata la trama degli elementi compressi, archi e bielle, della versione  $\chi$  ricercando per quanto possibile una regolarità nella spaziatura tra le membrature (figura 11).

Nel caso specifico è chiaro che il processo di ricerca formale si è dovuto necessariamente adattare alle esigenze geometrico-tecnologiche poiché i desiderati requisiti formali possono concretizzarsi solo con

l'accoppiamento dello schema strutturale con una opportuna suddivisione della superficie vetrata in pannelli. Questi, seguendo l'andamento delle strisce coniche definite in fase di ottimizzazione geometrica, possono essere a semplice curvatura, quindi realizzati con la tecnologia della curvatura a freddo.

#### Ottimizzazione strutturale: ricerca della forma a struttura imposta

Si giunge alla versione  $\chi 1$  completando la maglia strutturale con i cavi e risolvendo l'eccessivo addensamento della trama delle bielle nella zona d'angolo con una triangolarizzazione che permette di avere una maglia più spaziata evitando al contempo interruzioni del flusso delle compressioni (figura 12). Già per la soluzione con archi aventi sezioni trasversali di diametro 70 mm, l'analisi parametrica ha evidenziato, al variare della pretesione, un notevole miglioramento statico rispetto alla soluzione

$\beta$  fornendo un moltiplicatore critico di 3,8 associato ad una struttura notevolmente più leggera della copertura originaria di Neumünster (171 contro 226 kN).

Una trama delle bielle più razionale sotto l'aspetto della fattibilità tecnologica ha portato alla generazione della versione  $\chi_2$  (figura 13) che manifesta una efficienza strutturale prevedibilmente inferiore rispetto alla versione  $\chi_1$  ma comunque soddisfacente ( $r_{RcrE} = 3,0$ ).

Tuttavia, entrambe le versioni  $\chi$  evidenziavano, accanto ad una buona efficienza strutturale, problematiche di instabilità per scatto locale che lasciavano margini per un ulteriore miglioramento strutturale (figura 14).

In questa ottica è stata eseguita una ricerca formale sulla struttura  $\chi_2$  ottenendo una nuova geometria  $\chi_{2opt}$  la quale, nonostante i valori delle coordinate nodali differiscano di quantità non superiori a 50 mm (figura 15), presenta una efficienza strutturale notevolmente incrementata e testimoniata da un valore del moltiplicatore critico passato da 3,0 a 5,4 e da una forma di instabilità priva dei precedenti punti di debolezza strutturale (figura 16).

#### Seconda ottimizzazione geometrica

Il processo di ottimizzazione strutturale ha portato alla generazione di una geometria che, seppur di poco, si discosta da quella ideale derivante dal primo processo di ottimizzazione geometrica. Da qui è discesa la necessità di eseguire un secondo processo di elaborazione geometrica (figura 17) dal quale è nata la versione  $\chi_3$ , le cui coordinate nodali non si discostano da quelle di  $\chi_{2opt}$  per più di 30 mm.

Tuttavia, quest'ultima elaborazione geometrica non ha di fatto compromesso l'ottimizzazione strutturale raggiunta, né in termini di moltiplicatore critico né di forma globale di instabilità.

Pertanto  $\chi_3$  si configura come il punto di incontro dell'ottimizzazione strutturale e geometrica ma anche dei requisiti formali con le necessità tecnologiche, divenendo

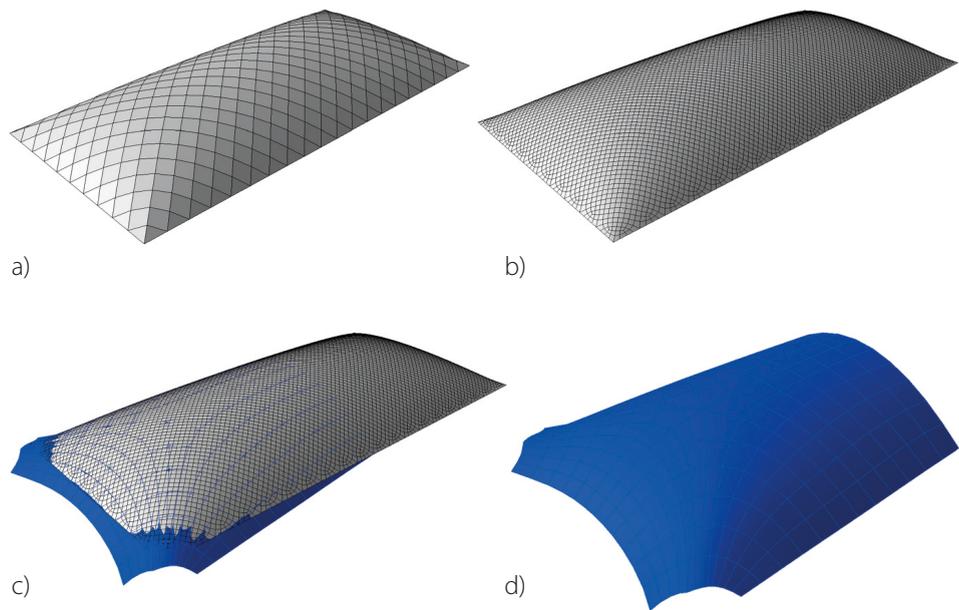


Fig. 10 – Prima ottimizzazione geometrica in collaborazione con la TU Wien

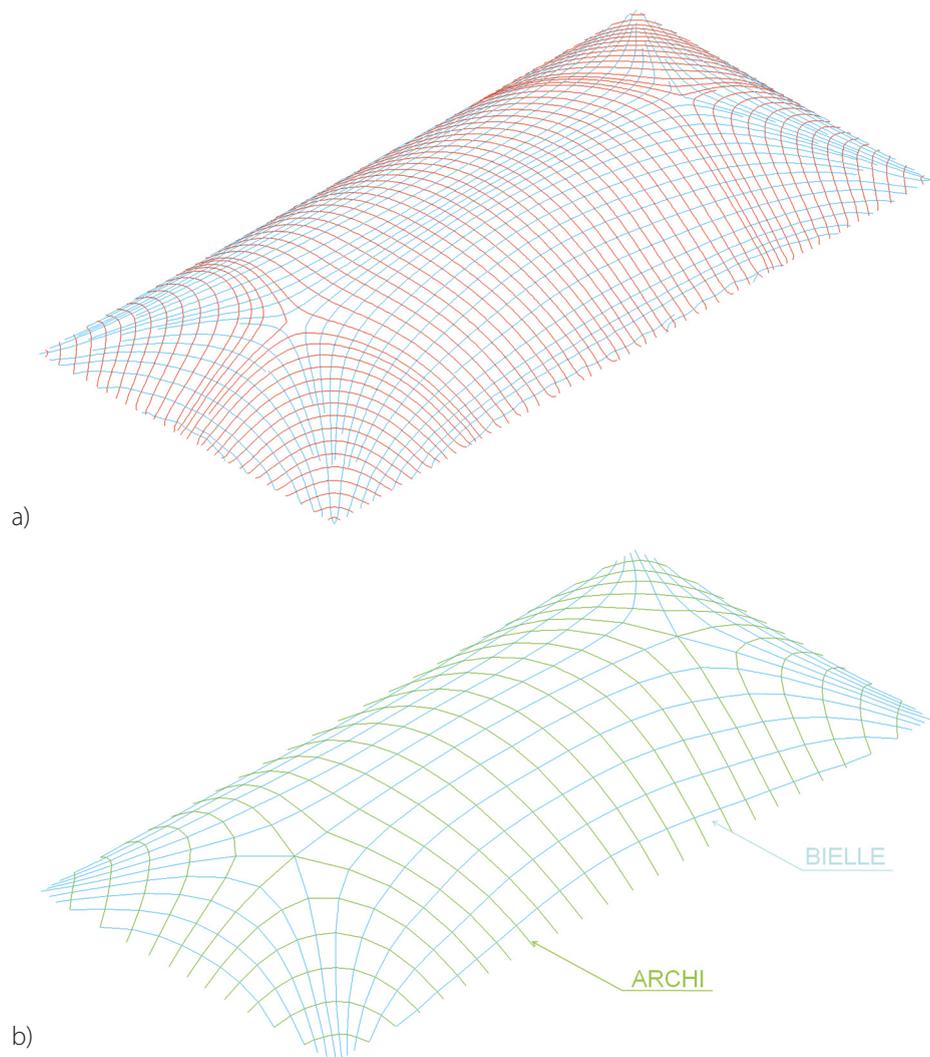


Fig. 11 – Definizione della trama degli elementi compressi (b) a partire dalle linee principali di curvatura (a)

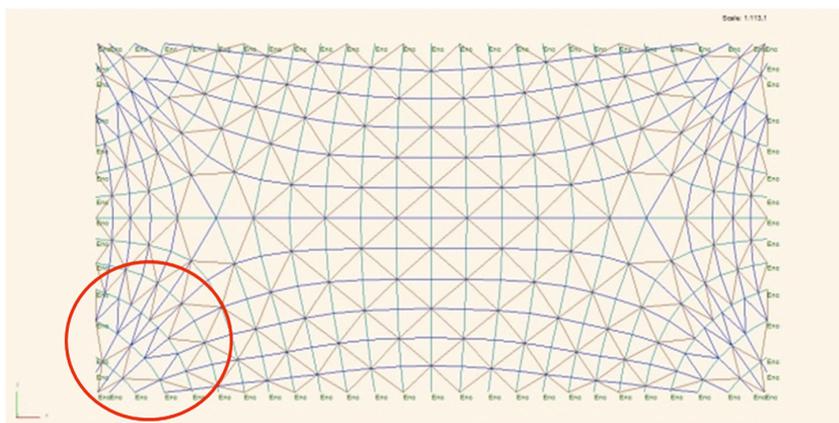


Fig. 12 – Neumünster II  $\chi_1$

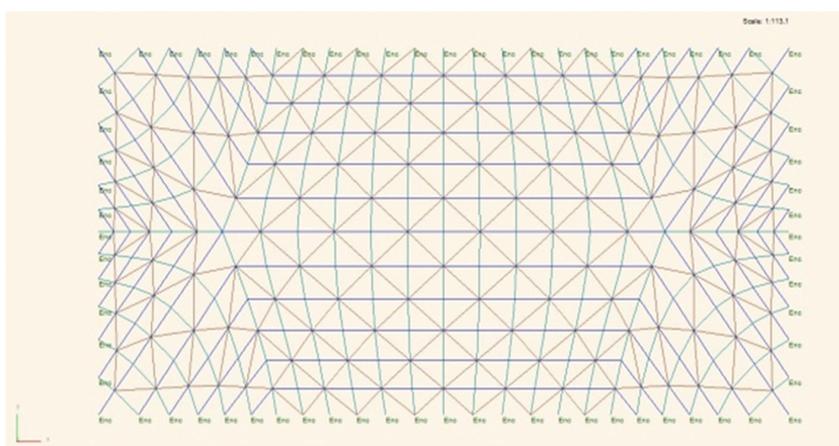
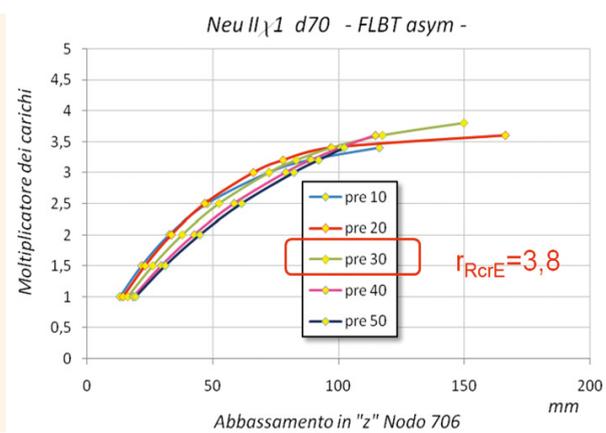


Fig. 13 – Neumünster II  $\chi_2$

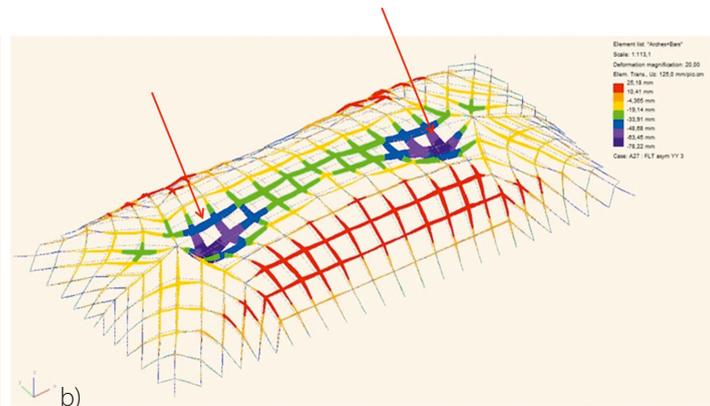
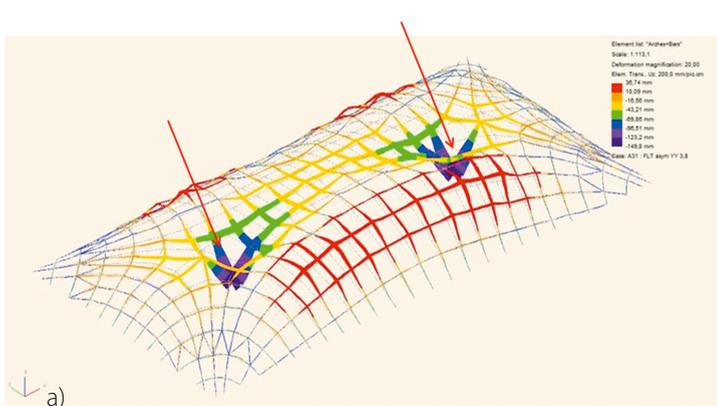
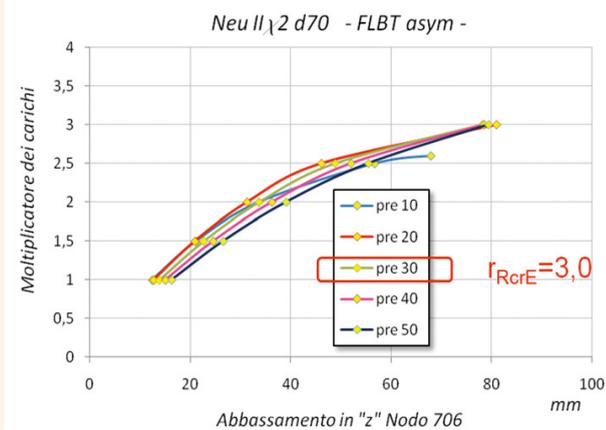


Fig. 14 – Fenomeni di instabilità per scatto locale: a) Neumünster II  $\alpha$ ; b) Neumünster II  $\beta$

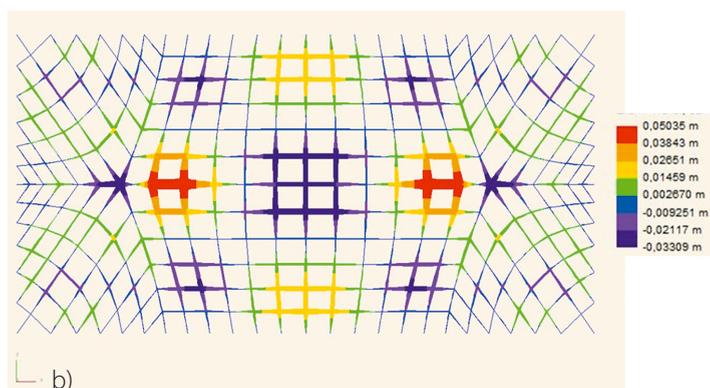
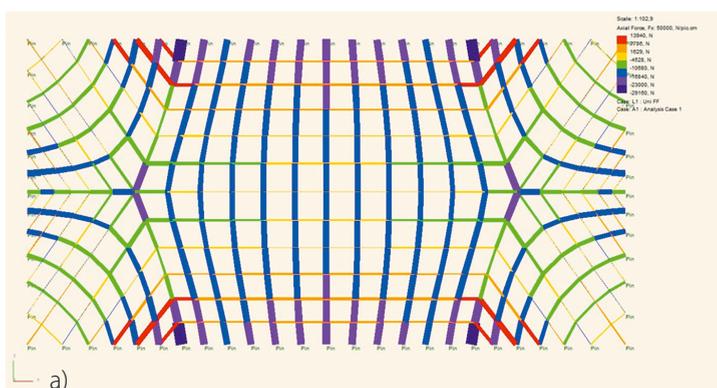


Fig. 15 – a) Valori della pretensione adottati nel *form-finding* a struttura imposta; b) Variazioni delle coordinate nodali tra la struttura ottimizzata  $\chi_{2opt}$  e  $\chi_2$

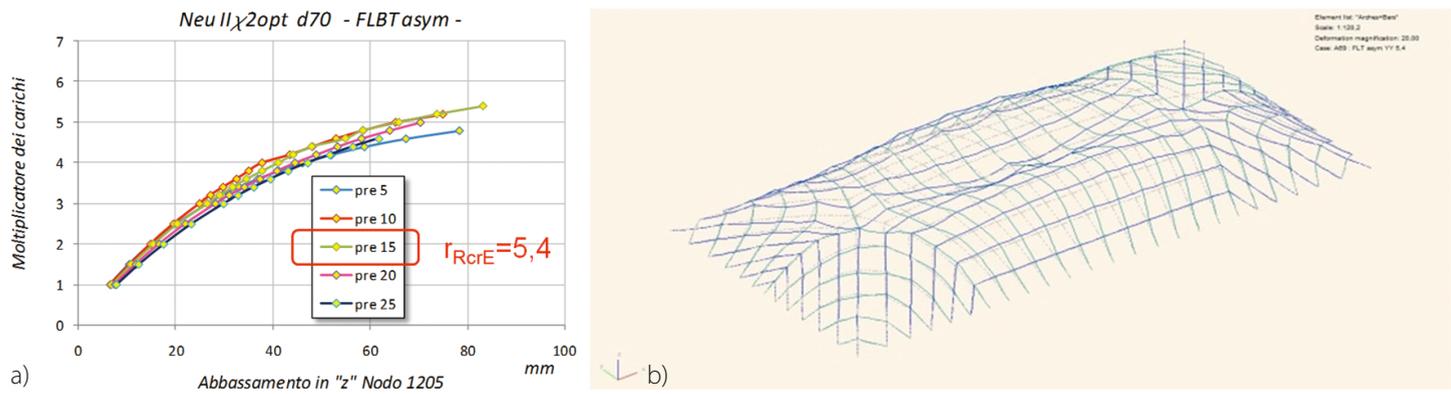


Fig. 16 – Neumünster IIχ2opt: (a) analisi parametrica al variare della pretensione iniziale dei cavi; (b) deformata di instabilità per pretensione di 15 kN

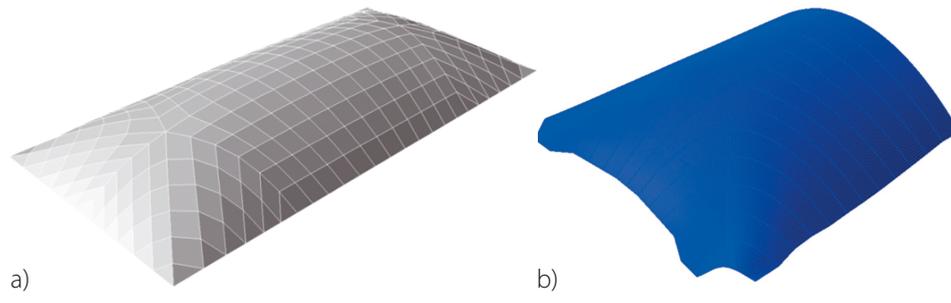


Fig. 17 – Seconda ottimizzazione geometrica (TU Wien)

la versione finale del processo di ricerca della forma.

### 4.3 Verifica di stabilità globale secondo EN 1993-1-6 e IASS WG8

La versione χ3, risultato del processo iterativo di ricerca morfologica, presentava, accanto a biele aventi sezione circolare piena di diametro 40 mm, un diametro della sezione circolare degli archi di 70 mm, per un peso totale della struttura in acciaio di 165 kN, contro i 226 kN della copertura costruita. Risulta evidente come il processo di ricerca della forma abbia già portato ad un alleggerimento e ad un affinamento della struttura.

In ultima analisi, ci si è prefissi di testare le possibilità statiche di questa struttura cercando di ottimizzare quanto più possibile la sezione degli archi. Nell'affrontare questa operazione è emerso un vuoto normativo, ma anche dello stato dell'arte delle strutture tipo *Grid Shells*, in quanto, né nella Normativa Europea di riferimento (Norma EN 1993 [9]) e neppure nella letteratura riguardante queste particolari opere, si trovano espliciti riferimenti ad un valore minimo del moltiplicatore di collasso per instabilità

globale  $r_{RcrE}$  da adottare in fase di verifica della struttura.

E' stata allora definita, nell'ambito del presente studio, una metodologia di calcolo che prende in considerazione sia gli effetti di non linearità geometrica che di non linearità materiale e della presenza di imperfezioni per arrivare alla valutazione di un valore minimo di  $r_{RcrE}$  da soddisfare.

Questa procedura di calcolo è stata eseguita seguendo le indicazioni proposte nell'Eurocodice EN 1993-1-6 "Resistenza e stabilità delle strutture a guscio" [10].

In tale norma si prevede che la verifica di stabilità globale possa essere condotta secondo una metodologia che permette di integrare le caratteristiche di non linearità del materiale con quelle geometriche combinando, rispettivamente, il valore della resistenza di riferimento plastica  $F_{Rpl} = r_{Rpl} \cdot F_{Ed}$  e della resistenza critica alla stabilità lineare  $F_{cr} = r_{Rcr} \cdot F_{Ed}$  per ottenere la resistenza caratteristica alla stabilità  $F_{Rk} = r_{Rk} \cdot F_{Ed}$  e tramite il fattore parziale  $\gamma_{M1} = 1,1$  il valore di calcolo  $F_{Rpl} = r_{Rpl} \cdot F_{Ed}$ . I valori del moltiplicatore della resistenza plastica  $r_{Rpl}$  e del moltiplicatore della resistenza critica alla stabilità lineare  $r_{Rcr}$  portano alla valutazione della snellezza ge-

neralizzata  $\bar{\lambda}_{ov}$  in funzione della quale viene definito il fattore di riduzione della stabilità globale  $\chi_{ov}$ .

$$\bar{\lambda}_{ov} = \sqrt{F_{Rpl} / F_{Rcr}} = \sqrt{r_{Rpl} / r_{Rcr}} \quad (1)$$

$$\chi_{ov} = \begin{cases} 1 & \text{se } \bar{\lambda}_{ov} \leq \bar{\lambda}_{ov,0} \\ 1 - \beta_{ov} \left( \frac{\bar{\lambda}_{ov} - \bar{\lambda}_{ov,0}}{\bar{\lambda}_{ov,p} - \bar{\lambda}_{ov,0}} \right)^{\eta_{ov}} & \text{se } \bar{\lambda}_{ov,0} < \bar{\lambda}_{ov} < \bar{\lambda}_{ov,p} \\ \frac{\alpha_{ov}}{\bar{\lambda}_{ov}^2} & \text{se } \bar{\lambda}_{ov,p} \leq \bar{\lambda}_{ov} \end{cases}$$

Quest'ultimo dipende inoltre dai fattori  $\beta_{ov}$ ,  $\eta_{ov}$  e  $\bar{\lambda}_{ov,0}$ , definiti nell'Annesso D della Norma in base al regime tensionale prevalente sulla struttura oggetto di analisi, e dal fattore di riduzione  $\alpha_{ov}$ , pari al rapporto tra il carico di collasso per instabilità globale della struttura con imperfezione iniziale e il carico di collasso per instabilità globale della struttura perfetta.

$$\alpha_{ov} = \frac{r_{Rcr}}{r_{Rcr}} \quad (3)$$

Una volta determinati il moltiplicatore della resistenza caratteristica alla stabilità  $r_{Rk} = \chi_{ov} r_{Rpl}$  ed il moltiplicatore della resistenza di design di stabilità  $r_{Rd} = r_{Rk} \gamma_{M1}$ , la verifica di stabilità globale è pertanto soddisfatta se  $F_{Ed} \leq F_{Rd} = r_{Rd} \cdot F_{Ed}$  quindi  $r_{Rd} \geq 1$ .

Una metodologia analoga è stata elaborata in maniera indipendente dal Gruppo di Lavoro 8 "Metal Spatial Structures" della IASS (International Association for Shell and Spatial Structures). Tale gruppo di lavoro, ha studiato negli ultimi quindici anni soprattutto il comportamento dei gusci spaziali a forma di paraboloide ellittico e iperbolico, arrivan-

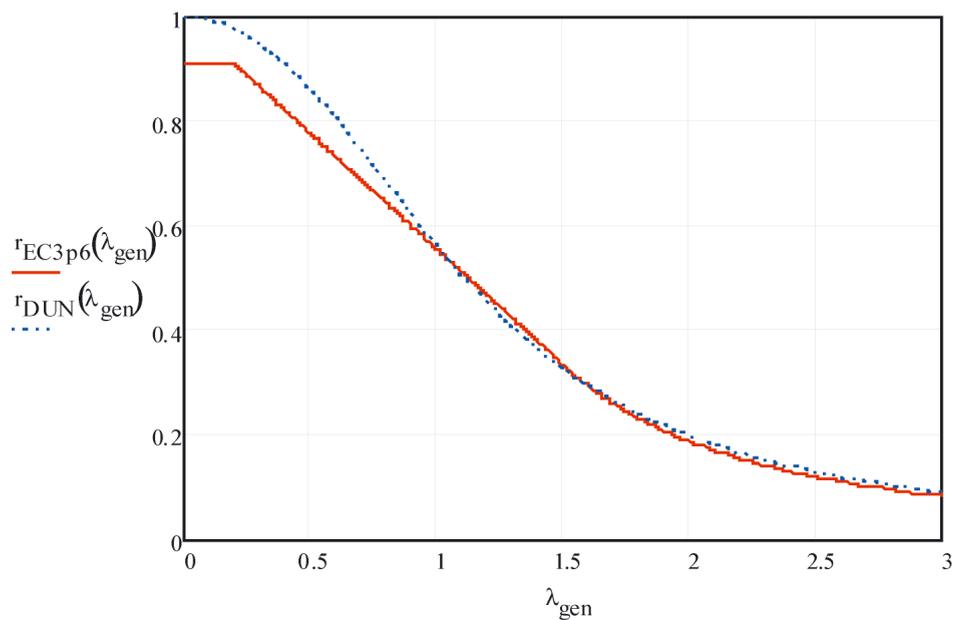


Fig. 18 – Confronto EN1993-1-6 / IASS WG8

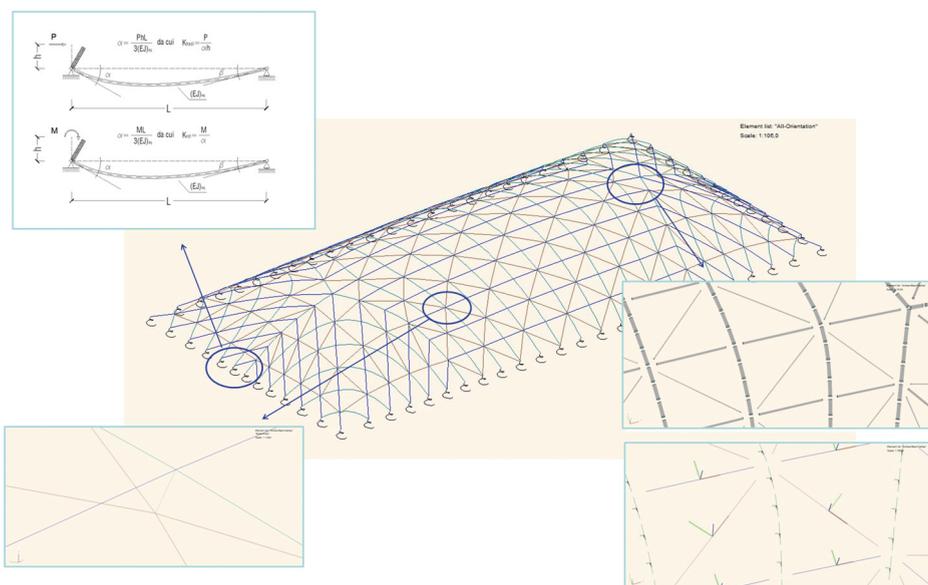


Fig. 19 – Neumünster II x4

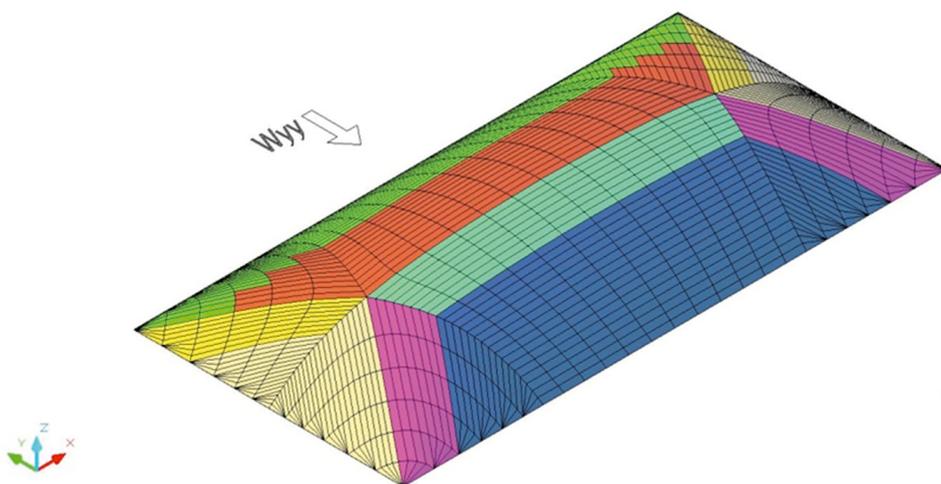


Fig. 20 – Coefficienti di pressione esterna del vento

do alla redazione di una relazione sullo stato dell'arte riguardante il carico di instabilità dei gusci a griglia a strato singolo [11].

I metodi EN 1993-1-6 e Rapporto IASS WG8, seppur siano applicate su strutture tipologicamente diverse (l'una sui gusci continui in acciaio, l'altra sui gusci spaziali di forma standard), hanno in comune la filosofia della verifica. In entrambi i metodi il moltiplicatore di collasso per instabilità globale è dato dal prodotto del moltiplicatore di collasso plastico della struttura per un fattore di riduzione  $\chi_{ov}$ . La differenza più netta riguarda l'espressione del fattore di riduzione  $\chi_{ov}$  in funzione della snellezza generalizzata:

$$\chi_{ov} = \frac{2}{\sqrt{\bar{\lambda}_{ov}^2 + 4} + \bar{\lambda}_{ov}} \quad (4)$$

Tuttavia, riportando in un diagramma (figura 18) i valori di tale fattore valutati rispettivamente secondo la formulazione dell'Eurocodice (linea rossa) e secondo il Rapporto IASS WG8 (linea blu), è evidente quanto le due curve siano paragonabili, soprattutto per valori della snellezza superiori a 1, intervallo nel quale si collocano i gusci a griglia. Accanto a questa metodologia (che definiremo metodo 1), l'Eurocodice EN 1993-1-6 propone anche un metodo (che chiameremo metodo 2) che si fonda su sole analisi numeriche e che prevede di determinare direttamente il moltiplicatore della resistenza caratteristica alla instabilità  $r_{Rk}$  assumendolo pari al moltiplicatore di collasso dei carichi ottenuto da analisi globale numerica di tipo GMNIA  $r_{R,GMNIA}$  ossia considerando nell'analisi numerica la non linearità geometrica, del materiale e l'imperfezione iniziale sulla struttura.

#### 4.4 Analisi strutturale con applicazione delle procedure di stabilità globale intrecciate con analisi materialmente non lineari

Il metodo 2 è una procedura di calcolo ancora oggi onerosa, soprattutto per quanto riguarda la corretta introduzione nell'analisi della non linearità del materiale. Perciò la fase di ottimizzazione della versione  $\chi_3$  di

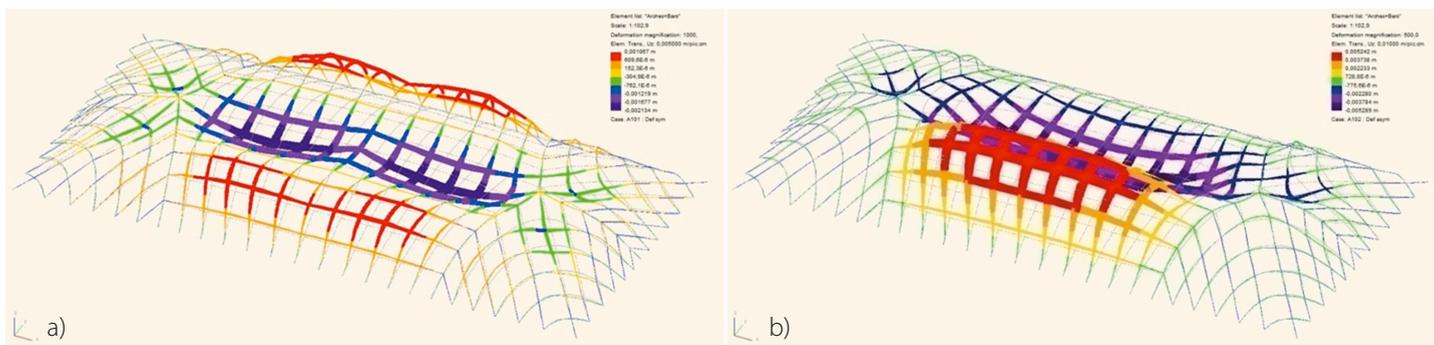


Fig. 21 – Forme di imperfezione simmetrica (a) e asimmetrica (b)

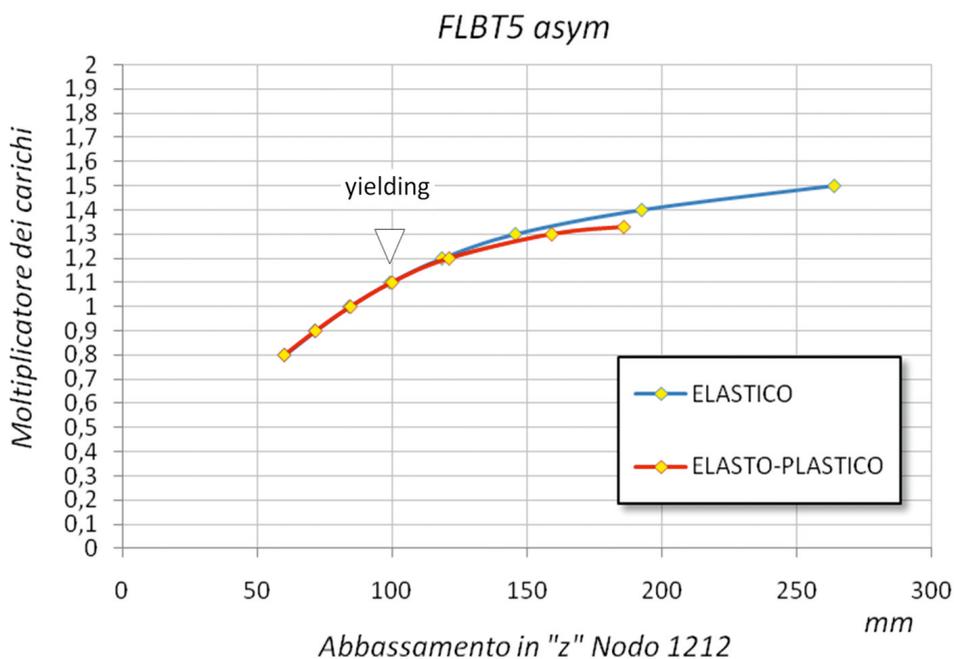


Fig. 22 – Grafici moltiplicatore dei carichi - spostamento: confronto tra analisi GNIA (elastico) e GMNIA (elasto-plastico)

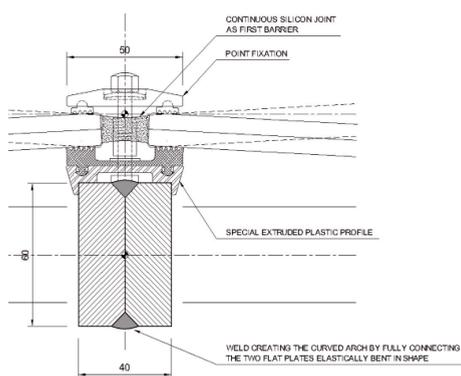


Fig. 23 – Sezione trasversale

Neumünster II è stata eseguita con esplicito riferimento al metodo 1.

A tal fine è stato innanzitutto aggiornato il modello strutturale (versione  $\chi_4$ ) introducendo eccentricità tra le membrature strutturali e le reali condizioni al contorno (figura 19), sono state valutate le condizioni di carico in accordo con l'Eurocodice 1 (figura 20)

e sono state stabilite le forme e le ampiezze delle imperfezioni iniziali secondo le indicazioni dell'Eurocodice 3.

Considerato che il comportamento instabile dei gusci a griglia è caratterizzato da un cedimento progressivo che porta, al crescere del carico, ad una configurazione sensibilmente discosta da quella di partenza, vengono generalmente adottate quali forme di imperfezione le deformate per effetto di un carico simmetrico e asimmetrico (figura 21). Questa tipologia di imperfezioni iniziali è conforme allo spirito delle analisi di stabilità non lineari, in quanto permette di "avvicinare" il processo di divergenza dell'equilibrio, abbattendo così il moltiplicatore di collasso per instabilità globale di queste strutture.

In ultima analisi il metodo 1 di verifica di

stabilità globale ha permesso di dimostrare che nel caso specifico la verifica di stabilità era soddisfatta con un calcolo al limite elastico delle sezioni trasversali parallelamente all'assunzione del moltiplicatore di collasso per instabilità globale  $r_{RcrE}$  non inferiore a 1,5. Sulla base di questi criteri, e senza dimenticare le prescrizioni dell'Eurocodice 3, è stata definita la sezione degli archi ottimale arrivando ad una soluzione circolare piena di 56 mm di diametro mentre le bielle circolari piene presentavano un diametro di 40 mm ed i cavi di 16 mm.

La bontà di questa soluzione è stata ulteriormente confermata verificando la stabilità globale della struttura anche con il metodo 2 (figura 22), ossia tramite un'analisi incrementale geometricamente e materialmente non lineare con imperfezioni iniziali che ha dato risultati conformi a quelli ottenuti con il metodo 1 con un delta massimo pari a 8%.

Infine la volontà di associare le necessità strutturali suddette a quelle di fattibilità tecnologica ha portato, mantenendo le medesime sezioni delle bielle e dei cavi, alla definizione di 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 e calandrati sino a raggiungere l'asse di progetto e quindi senza soluzione di continuità (figura 23).

Questa soluzione estremamente leggera (122 contro 226 kN di Neumünster) permetterebbe inoltre di appoggiare direttamente i pannelli vetrati sul lembo superiore della sezione mediante un profilo speciale

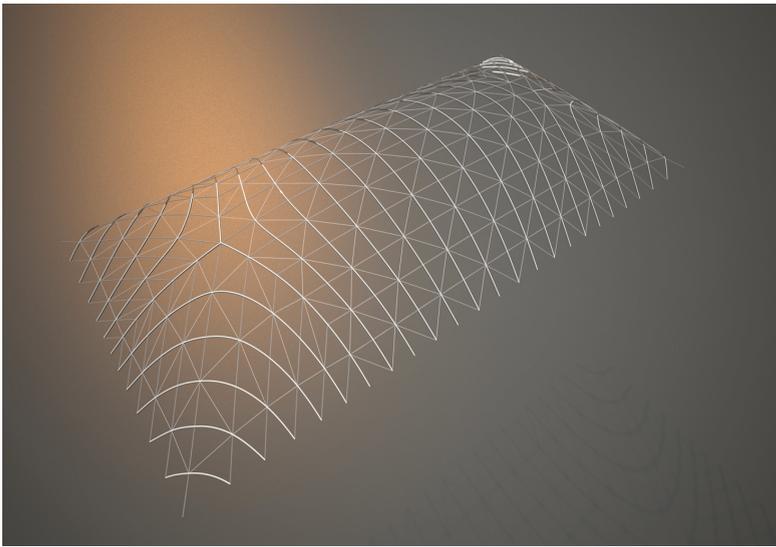


Fig. 24 – Layout strutturale

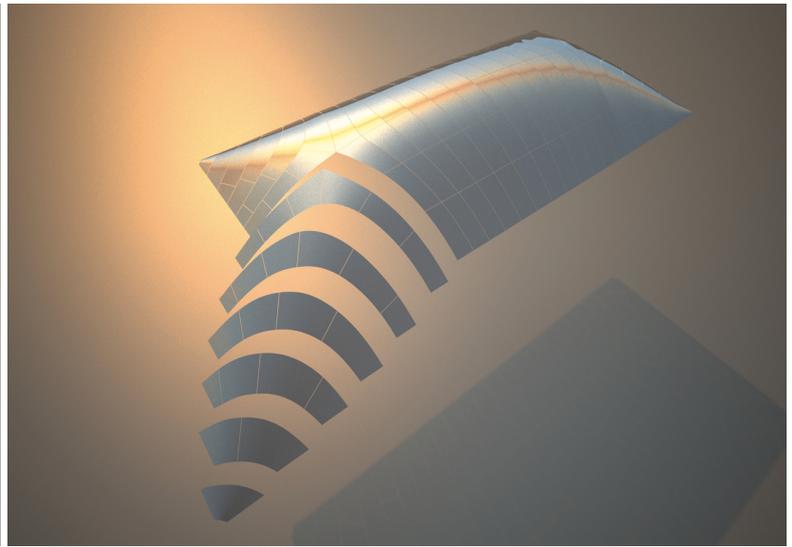


Fig. 25 – Scomposizione dell'involucro in pannelli a semplice curvatura

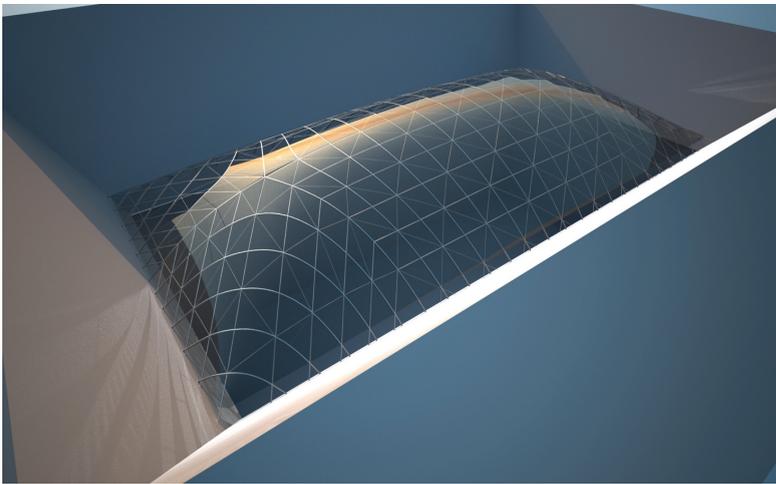


Fig. 26 – Neumünster II, rendering vista esterna

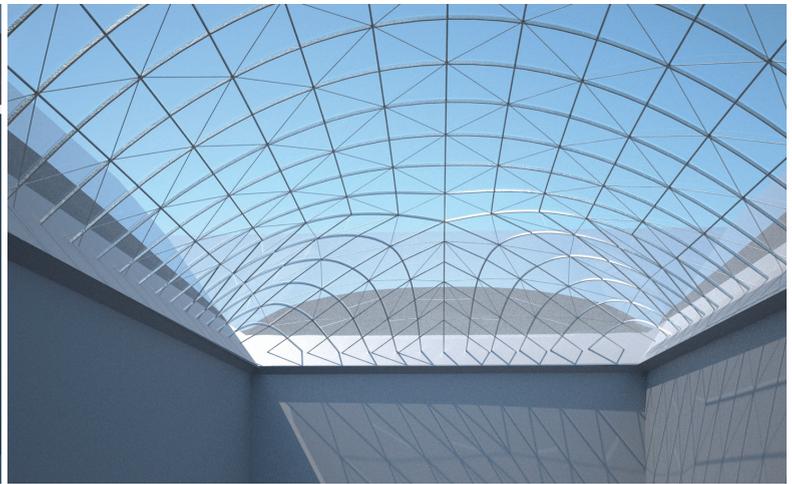


Fig. 27 – Neumünster II, rendering vista interna

in alluminio. La realizzabilità tecnologica si compendia infine nell'accoppiamento dello schema strutturale con la suddivisione della superficie vetrata in pannelli (figure dalla 24 alla 27) che, seguendo l'andamento delle strisce coniche definite in fase di concezione formale, risultano essere a semplice curvatura, quindi realizzabili con la tecnologia della curvatura a freddo.

**Dr. arch. ing. Nicolò Baldassini,**

*Direttore di RFR, Parigi*

**Dr. ing. Alberto Carlucci,**

*Ingegnere strutturista in RFR, Parigi (2008-2010)*

**Prof. dr. ing. Maurizio Froli,**

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Sede di Strutture, Università di Pisa*

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] M. Froli, L. Lani, L. Blandini: "Sviluppi recenti delle costruzioni in vetro strutturale e acciaio". *Costruzioni Metalliche*, n° 4/2006.

[2] J. Graf: "The development of grid shells in the past two centuries". Nota di conferenza a l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Parigi, 2003.

[3] T. Bulenda, J. Knippers: "Stability of grid shells". *Computers and Structures*, n° 79/ 2001.

[4] N. Baldassini: "Acciaio e vetro nel contesto storico dell'Abbazia di Neumünster". *Costruzioni Metalliche*, n° 6/2006.

[5] J.-F. Blassel, A. Pfadler: «La gare de Strasbourg». *Construction Métallique*, n° 1/ 2008.

[6] M. Edwards, J. Calloch: «La lentille de la cour de Rome, Paris». *Construction Métallique*, n° 3/2005.

[7] N. Baldassini, H. Pottmann, J. Raynaud, A. Schiffrer: "New strategies and developments in tran-

sparent free-form design: from faceted to nearly smooth envelopes". *International Journal of Space Structure*, Vol. 25, n° 3, pagg. 185-197, 2010.

[8] L. Gründig, E. Moncrieff, P. Singer, D. Ströbel: "A history of the principal developments and applications of the force density method in Germany 1970-1999". IASS-IACM 2000, Chania-Creta, Grecia, 2000.

[9] EN 1993-1-1: "Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings", CEN 2006.

[10] EN 1993-1-6: "Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-6: Strength and stability of shell structures". CEN 2007.

[11] T. Ogawa, S. Kato, M. Fujimoto: "Buckling load of elliptic and hyperbolic paraboloidal steel single-layer reticulated shells of rectangular plan". *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 49, n° 157/2008.