

ISSN n° 0010-9673 Poste Italiane SpA - Spedizione in abbonamento postale - D.L. 353/2003 (conv. in L. 27.02.04 n° 46) Art. 1, comma 10/MI Prezzo a copia: € 11,50 - In caso di mancato recapito inviare al CNIP di Milano-Rosario per la restituzione al mittente previo pagamento reso



LUG/AGO 2013



RIVISTA BIMESTRALE  
PER LA DIFFUSIONE  
DELLA CULTURA DELL'ACCIAIO

# COSTRUZIONI METALLICHE

La copertura reticolare spaziale doppio strato chiamata "Vela" è parte del più ampio progetto della torre UNIPOL e degli altri edifici ad essa connessi (albergo e edifici per vari servizi) costruiti nella zona nord est di Bologna vicino alla tangenziale.

*The Vela dual layer reticular spatial roof forms part of the overall design of the Unipol Tower and the other buildings connected to it (hotel and mixed service buildings), located in north eastern Bologna, near the ring road.*

## 1. INTRODUZIONE

La struttura della copertura è stata realizzata con profili tubolari circolari collegati mediante nodi sferici all'intradosso e profili tubolari a sezione rettangolare collegati da nodi rigidi flessionalmente all'estradosso. La maglia di estradosso della reticolare è di circa 4x4 m e la copertura è realizzata con cuscini di membrana ETFE in pressione collegati direttamente ai profili di estradosso della copertura. La superficie della copertura è di 3600 m<sup>2</sup> con una luce libera fra gli appoggi laterali di circa 50 m.

La progettazione architettonica è stata sviluppata da Open Project Office e la progettazione strutturale dal prof. Massimo Majowiecki e dal suo Studio Tecnico. Un team interdisciplinare presso la Delft University of Technology ha compiuto vari studi sulla copertura incentrati sull'utilizzo delle energie rinnovabili e sull'ottimizzazione del sistema di rivestimento in modo da garantire un adeguato comfort termico per chi si trova sotto la copertura (figura 1).

## 2. PROGETTAZIONE INTEGRALE DELLA COPERTURA

### 2.1 Concetto di progettazione integrale orientata alla performance

La progettazione integrale orientata alla performance determina il valore della forma in base ad un'ampia serie di valutazioni di diverse prestazioni, in contrasto con il formalismo e con altri approcci secondo cui la forma ha un valore fondato principalmente su puri aspetti estetici. Le ragioni principali della progettazione orientata alla performance risiedono nella convinzione che visualizzare la connessione tra forma e prestazione nella fase preliminare del progetto consenta al progettista di concentrare gli sforzi verso soluzioni progettuali più efficaci. La progettazione integrale pone invece enfasi sull'importanza dell'integrazione di discipline diverse durante il processo progettuale e mira all'integrazione simultanea di aspetti e idee progettuali interdisciplinari, favorendone l'integrazione nella fase iniziale del progetto. La ragione principale della progettazione integrale deriva dall'ampio insieme di ambiti disciplinari che l'idea di performance in architettura comprende e dalla densa rete di relazioni che interconnette i diversi aspetti progettuali attraverso le singole discipline. Il comportamento strutturale è una delle numerose performance che devono essere considerate per

# La copertura reticolare spaziale "Vela" sotto la Torre Unipol a Bologna

## The "Vela" reticular spatial roof beneath the Unipol Tower in Bologna

Massimo Majowiecki, Giovanni Berti



Fig. 1 - Alcune immagini della copertura detta "Vela" ai piedi della torre Unipol a Bologna

la progettazione di una copertura di grande luce. Il comfort climatico viene preso qui ad esempio per illustrare una esplorazione integrata di prestazioni multidisciplinari. La questione è esemplificata focalizzando sulla trasmittanza dell'energia solare della copertura e proposta attraverso l'integrazione ed esplorazione di soluzioni alternative di rivestimento. L'approccio di seguito illustrato può essere esteso ad altri tipi di performance, e in generale è consigliato ampliare la gamma di prestazioni considerate in modo da arrivare a un buon risultato progettuale.

## 2.2 Modellazione del sistema di rivestimento e della geometria strutturale

Il sistema di rivestimento della copertura può essere progettato come sistema modulare propagato su una tassellazione di riferimento. In tal modo diverse opzioni per i sistemi di rivestimento possono essere esplorate rispetto alle diverse tassellazioni; specificatamente diverse topologie dei moduli per ciascuna tassellazione e diverse configurazioni geometriche per ciascuna soluzione topologica. Ciascuna opzione può essere modellata utilizzando un poligono che agisce da interfaccia tra il modulo di rivestimento e la struttura. La geometria del rivestimento può essere definita per diversi poligoni di base al fine di

risultare appropriata per più di una tassellazione o quale soluzione specifica, definita in funzione di uno specifico poligono. L'algoritmo per la generazione dei moduli di rivestimento può essere salvato in un file separato, in grado di generare elementi replicabili e archiviabili in una libreria disponibile per future applicazioni su file diversi.

Potenzialmente, qualunque programma utilizzabile per valutazioni di performance può essere impiegato per studi di questo genere, nel caso della presente ricerca condotta dalla Delft University of Technology va specificato che è stato impiegato il programma ParaGen che include l'utilizzo del software Ecotect per la simulazione di performance termiche relative all'illuminazione naturale (figura 2).

### 2.2.1 Geometria strutturale

Nel modello parametrico, la forma complessiva della copertura è stata descritta utilizzando una superficie NURBS e controllando parametricamente la posizione dei punti di controllo in modo da ottenere diverse opzioni di curvatura. In una prima fase di modellazione per la struttura della reticolare spaziale è stata scelta una maglia triangolare di estradosso e una maglia d'intradosso composta da esagoni e triangoli orientati secondo la diagonale della copertura.

Questa geometria strutturale è stata parametrizzata e modellata utilizzando coordinate UV modificando ad hoc gli scripts al fine di soddisfare l'orientamento diagonale della tassellazione. Il problema è stato ricondotto a una griglia di punti strutturati in base a relazioni Pitagoriche (figura 3), e includendo il fattore radice quadrata di tre per regolare le proporzioni nel caso di poligoni esagonali. Il numero delle righe è stato definito come parametro indipendente, n, per regolare la densità della griglia (tavola 1).

I nodi dello strato di estradosso sono stati generati a una distanza parametrica d, modellando di conseguenza le aste d'intradosso, estradosso e diagonali. Il sistema reticolare spaziale a doppio strato così ottenuto è di densità variabile, per poter esplorare la tassellazione strutturale in funzione di diverse dimensioni dei moduli, ed è in grado di rimanere consistente al variare della configurazione della superficie NURBS (figura 4). La variazione di curvatura della copertura influenza gli angoli di convergenza delle aste ai nodi: questo si è dimostrato un aspetto critico, rendendo necessaria l'introduzione di un altro parametro indipendente al fine di deformare

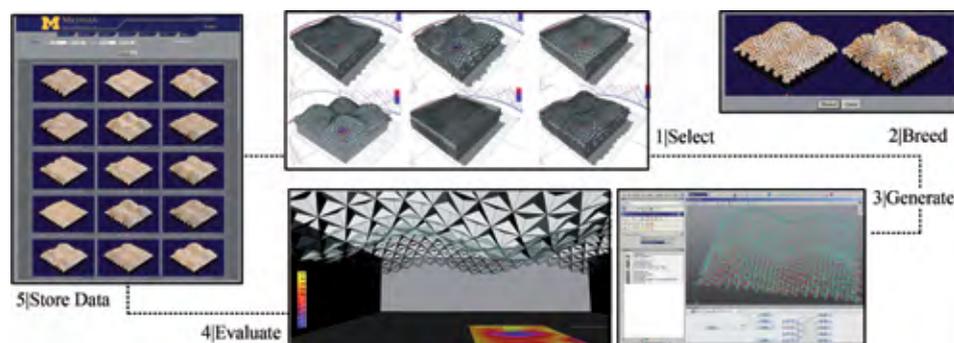


Fig. 2 - Il ciclo ParaGen illustrato con un esempio di ottimizzazione della trasmittanza dell'energia solare

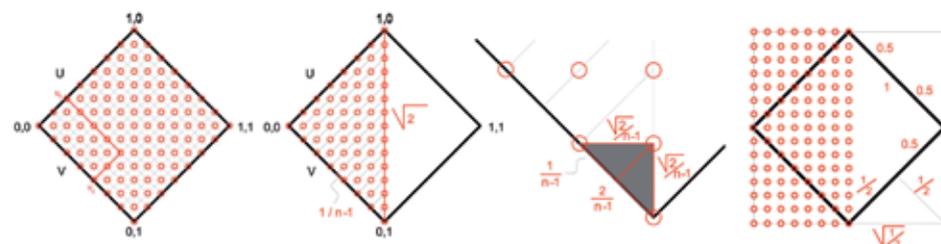


Fig. 3 - Parametrizzazione della griglia di punti orientata diagonalmente

Independent parameters	UV functions
n (density)	In a for Loop with counters i and j: $u = (((\text{Sqrt}(4)/(n-1))/2)*\text{Sqrt}(3))-0.5-1/(2*(n-1)) + ((\text{Sqrt}(4)/(n-1))/2)*j;$ $v = (1-((\text{Sqrt}(4)/(n-1))/2)*\text{Sqrt}(3))-0.5-1/(2*(n-1)) + ((\text{Sqrt}(4)/(n-1))/2)*j;$
n (density) sh (shift)	$u = \text{Sqrt}(0.5)*(\text{Sqrt}(2)/(n-1)*i*(\text{Sqrt}(3))-0.50-(0.5/n) + \text{Sqrt}(0.5)*\text{Sqrt}(2)/(row-1)*j);$ $v = sh-(\text{Sqrt}(0.5)*(\text{Sqrt}(2)/(row-1)*i*(\text{Sqrt}(3))))-(row*0.5)/(row-1) + \text{Sqrt}(0.5)*\text{Sqrt}(2)/(row-1)*j;$

Tav. 1 - Esempi di scripts per generare griglie di punti orientate diagonalmente, utilizzando coordinate UV

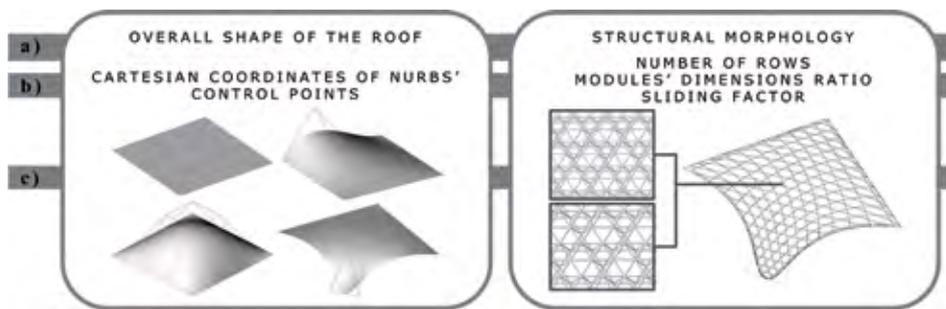


Fig. 4 - Diverse tipologie di rivestimento prese in esame

la tassellazione in una o entrambe le direzioni dei suoi assi principali. Infine, un secondo fattore parametrico ha consentito di slittare la tassellazione lungo la superficie per cercare un'appropriata configurazione ai bordi.

### 2.2.2 Ottimizzazione del sistema di rivestimento

Sono state condotte indagini anche sul sistema di rivestimento, in stretta relazione con la geometria strutturale (figura 5). Tra le diverse alternative valutate si è optato per un sistema pneumatico di cuscini di ETFE, con un pattern stampato, orientato secondo la direzione Nord-Sud e differenziato su ciascun modulo per ottimizzarne l'effetto schermante (e conseguente ombreggiamento). In tale sistema, l'orientamento del pattern di ciascun modulo pneumatico di ETFE è stato studiato per bloccare la radiazione solare diretta e consentire invece il passaggio della luce naturale; e la modellazione parametrica è stata impiegata per esplorare variazioni del sistema, minimizzandone il fattore solare (g-value) e massimizzandone la trasmissione della luce indiretta.

La modellazione parametrica ha riguardato in prima istanza un singolo modulo, modellato considerando la diretta relazione con la geometrie strutturali (in questa fase di progettazione si era già arrivati a una struttura reticolare spaziale a maglia quadrangolare), il suo orientamento rispetto alle direzioni cardinali e i fattori geometrici cruciali nell'influenzare la trasmissione dell'energia solare. Per garantire la corrispondenza con la tassellazione dell'estradosso strutturale, il modulo ETFE parametrico è stato modellato in base ad un poligono quadrilatero. A partire da tale

poligono, gli strati di ETFE sono stati definiti come superfici NURBS le cui parti stampate sono state modellate vincolando il modulo alla direzione Nord-Sud, assunta come referenza esterna alla geometria della copertura. Una serie di variazioni parametriche del modulo pneumatico sono state investigate

rispetto alla trasmissione dell'energia solare ed espresse in base ad un parametro indipendente per regolare l'angolo di apertura tra le parti stampate degli strati di membrana. Mentre la parte stampata sul layer superiore è stata vincolata per essere rivolta a Sud e quella inferiore a Nord, l'angolo di apertura controlla la loro rotazione reciproca attorno all'asse Est-Ovest. Variando tale angolo, vengono influenzati sia la trasmissione della radiazione solare diretta che della luce naturale indiretta. Incrementando l'angolo, queste diminuiscono entrambe. Il modulo così ottenuto è stato salvato come entità replicabile. Il modello parametrico finale ha consentito la generazione di alternative in base ai diversi angoli di apertura, valutabili sulla base di performance



Fig. 5 - Diverse tipologie di rivestimento prese in esame

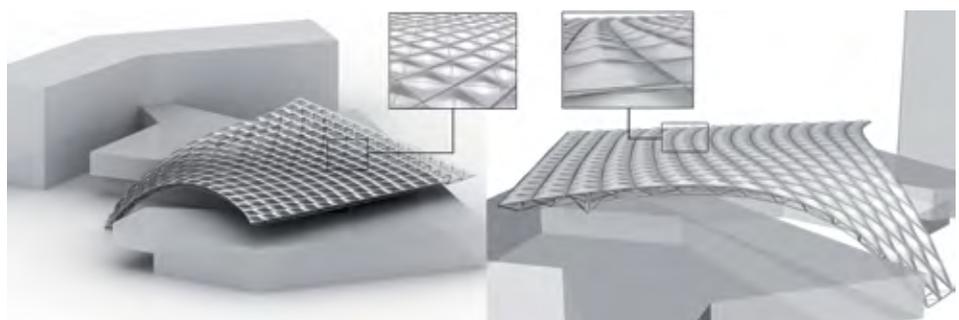


Fig. 6 - Il sistema di rivestimento della reticolare spaziale "Vela"

calcolate ricorrendo ad una combinazione di verifiche manuali e simulazioni digitali, in reciproca validazione. La figura 6 illustra il sistema finale per il rivestimento della copertura.

### 3. SINTESI DELLE OPERE STRUTTURALI

#### 3.1 Struttura reticolare spaziale doppio strato

##### 3.1.1 Geometria della copertura

La copertura è stata realizzata con una struttura reticolare spaziale doppio strato avente maglia di estradosso quadrangolare di dimensioni circa 4x4 m e maglia di intradosso di circa 5x5 m. La struttura ha uno spessore che varia da 1,5 m all'estremità a 3 m nella parte centrale (figura 7).

La maglia di intradosso è stata alleggerita in modo da eliminare i nodi superflui e ottenere così un miglioramento sia da un punto di vista economico che di resa estetica, inoltre sono state inserite in alcuni campi delle aste disposte a croce in modo da renderli indeformabili e fornire così un controvento di piano alla struttura. La disposizione delle aste diagonali è stata studiata in modo da alleggerire la percezione strutturale in quanto osservando la copertura da sotto le aste diagonali risultano essere sovrapposte a quelle di intradosso (figura 8).

##### 3.1.2 Nodo di estradosso

In figura 11 è illustrata una tipica connessione fra le aste di estradosso della reticolare su cui sono collegati i cuscini in ETFE. I profili delle aste sono a sezione rettangolare in modo da fornire una buona resistenza a flessione e sono collegati ai nodi con due bulloni in modo da trasferire il momento al nodo. Il nodo di estradosso è quindi rigido flessionalmente ed è realizzato con una estremità emisferica provvista di fori filettati in cui si collegano le aste diagonali.

##### 3.1.3 Nodo di intradosso

I nodi di intradosso sono stati realizzati mediante il tipico assemblaggio sfera-bullone come illustrato in figura 12. Questo tipo di collegamento permette di realizzare tra le aste che vi convergono dei vincoli a cerniera

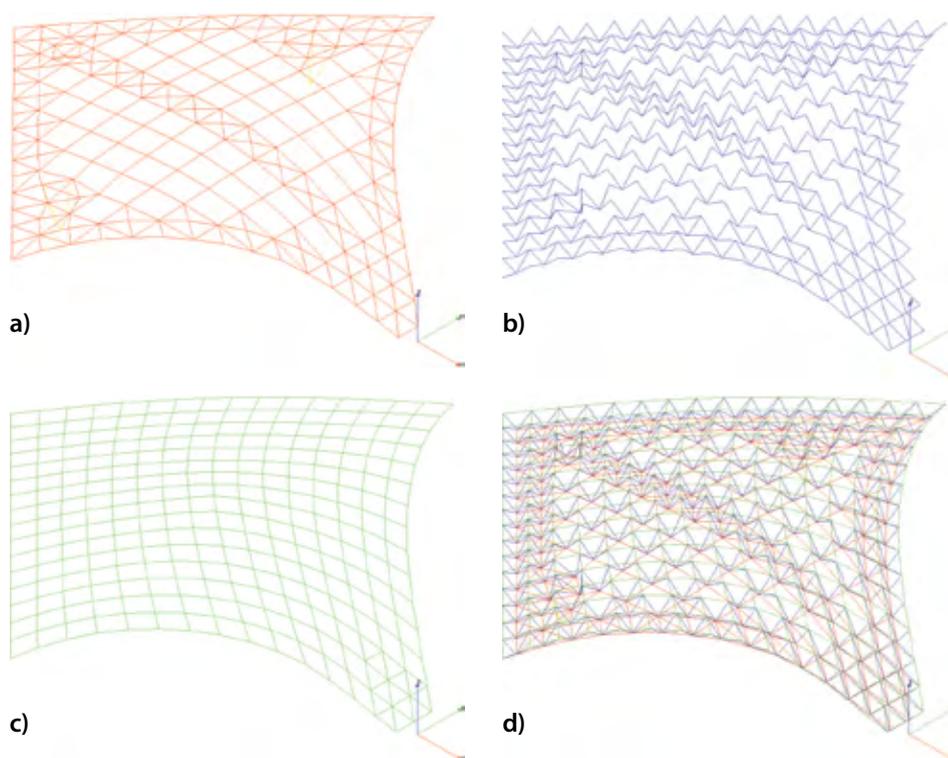


Fig. 7 - Configurazione geometrica della struttura di copertura a) intradosso, b) diagonali, c) estradosso, d) vista assonometrica della struttura

sferica perfetta limitando al minimo le flessioni nelle aste diagonali e di intradosso che saranno quindi soggette a momento flettente solo per causa dell'azione del peso proprio. Sia i nodi di intradosso che di estradosso della struttura sono stati realizzati con lavorazioni meccaniche di macchine utensili automatizzate che eseguono i fori e le filettature in base ai dati geometrici che provengono dal modello di calcolo con cui sono stati dimensionati i nodi e le aste (figura 13). Questa pro-

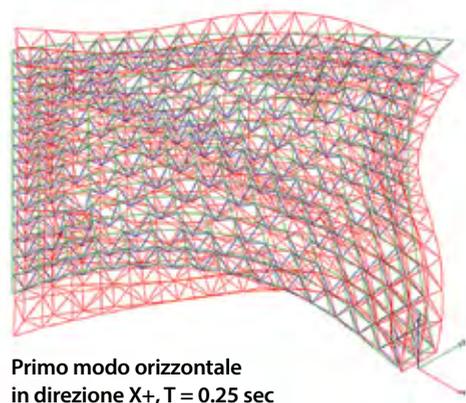
cedura automatica permette di ottimizzare il peso strutturale della copertura e di ridurre i tempi di costruzione con un notevole risparmio economico rispetto a una produzione non automatizzata dei pezzi.

#### 3.2 Particolari costruttivi dei vincoli

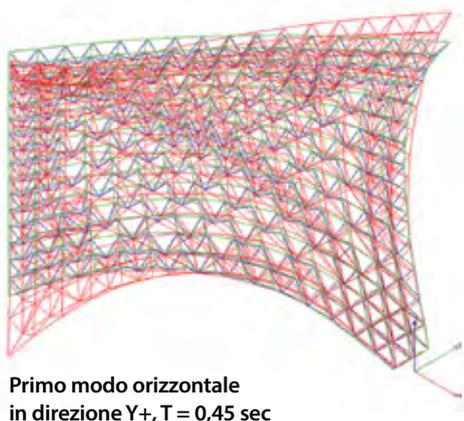
La struttura reticolare appoggia sopra gli edifici in tre punti, come illustrato in figura 14. Il nodo 8 è vincolato alla traslazione nella direzione z e nella direzione y. Al ter-



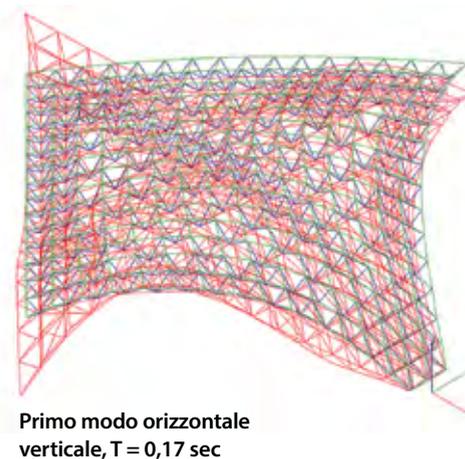
Fig. 8 - Vista dall'interno della reticolare spaziale



**Primo modo orizzontale  
in direzione X+, T = 0,25 sec**



**Primo modo orizzontale  
in direzione Y+, T = 0,45 sec**



**Primo modo orizzontale  
verticale, T = 0,17 sec**

**Fig. 9 - Principali modi di vibrare della struttura**

mine delle operazioni di montaggio della struttura il nodo 8 è stato lasciato libero di muoversi nella direzione x sotto l'azione del peso proprio della stessa. Una volta che la struttura si è assestata sotto il carico del peso proprio il nodo 8 è stato vincolato alla traslazione anche nella direzione x. Questa procedura è stata eseguita per ottenere un comportamento ad arco in direzione longitudinale della struttura una volta che essa è sottoposta ai carichi accidentali e contemporaneamente evitare che sotto l'azione del peso proprio i vincoli siano costantemente soggetti a una spinta orizzontale.

I nodi 6 e 7 sono invece vincolati solo alla traslazione verticale; questa tipologia di vincolo si è resa necessaria dato che questi appoggi si trovano su edifici diversi che in caso di sisma possono avere spostamenti differenziali quando vibrano in controfase. È importante quindi evitare che la struttura svolga un ruolo di unione strutturale fra questi due diversi edifici altrimenti occorrerebbe dimensionare la struttura considerando gli spostamenti differenziali impressi ai vincoli 6 e 7, con un notevole costo aggiuntivo. Al contrario essendo il vincolo 8 fisso in fase di esercizio e trovandosi in sommità di un edificio è stato necessario dimensionare la struttura perché fosse in grado di resistere all'azione di un cedimento impresso al vincolo 8 dall'azione del sisma. L'appoggio della reticolare sulla piazza vincola i nodi 2 e 4 nelle direzioni x, y e z fornendo un vincolo fisso alla base della struttura.

### 3.2.1 Particolare costruttivo dei nodi sulla piazza

I nodi 2 e 4 sono vincolati a un nucleo di calcestruzzo facente parte del vano scala che

conduce dal parcheggio interrato alla piazza. Le aste di intradosso della struttura reticolare sono collegate mediante filettatura alle sommità semisferiche di due blocchi cilin-



**Fig. 10 - Vista laterale della reticolare e della torre Unipol e modello in galleria del vento**



**Fig. 11 - Nodo tipico di estradosso**



**Fig. 12 - Nodo tipico di intradosso**

drici di acciaio resi solidali mediante piastre saldate alla struttura del dettaglio di attacco. I blocchi cilindrici proseguono oltre la piastra di base del dettaglio di connessione in modo da sporgere della misura necessaria a garantire la resistenza all'azione di taglio. La struttura del dettaglio di connessione è collegata alla fondazione in calcestruzzo mediante tirafondi filettati provvisti di rondelle alle estremità (figura 15).

### 3.2.2 Particolare costruttivo dei nodi mobili

In figura 16 è illustrato il dettaglio di appoggio mobile della copertura in corrispondenza dei nodi 6 e 7. In particolare in figura 16a si vede l'apparecchio che consente lo scorrimento nel piano orizzontale e il collegamento delle funi con il telaio metallico solidale alla struttura in calcestruzzo. Al telaio sono state saldate anche delle piastre che fungono da fine corsa per spostamenti del nodo mobile in modo da impedirne l'uscita dalla sede in condizioni eccezionali di carico.

In figura 16b si può vedere l'attacco delle funi al nodo di intradosso della struttura reticolare mediante piastre saldate alla sfera di acciaio con saldatura di testa a completa penetrazione. La funzione strutturale delle funi è quella di garantire un vincolo bilatero alla traslazione verticale della copertura (in quanto l'appoggio mobile può fornire solo una reazione verso l'alto) lasciando nello stesso tempo la struttura libera di muoversi nel piano orizzontale.

### 3.2.3 Particolare costruttivo del nodo sull'ascensore

Il particolare costruttivo che si trova sul vano ascensore (nodo 8) è costituito da una parte mobile libera di scorrere in direzione x durante la prima fase di carico e da un corpo solidale con la struttura in calcestruzzo. Lo scorrimento è facilitato dal posizionamento sulla piastra orizzontale di una lastra di acciaio inossidabile mentre due barre a sezione rettangolare piena fissate con tirafondi forniscono il vincolo alla traslazione verticale (figura 17 e figura 18). Trovandosi il dettaglio in prossimità del bordo esterno del vano ascensore è stato necessario

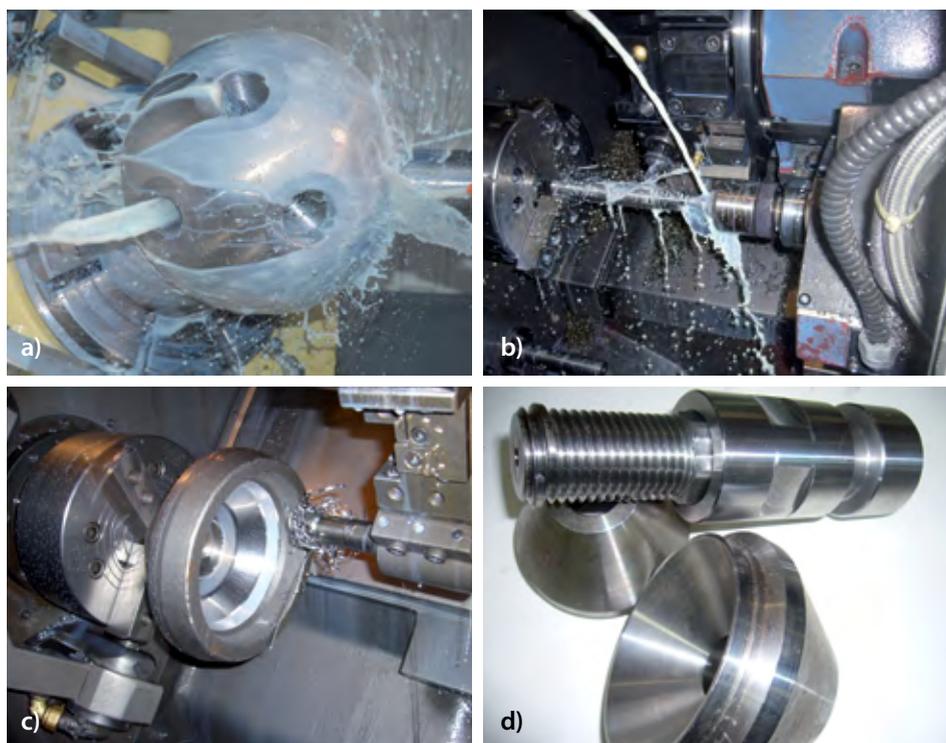


Fig. 13 - Produzione automatizzata delle aste della reticolare e dei nodi di connessione: a) lavorazione delle sfere con fori filettati, b) lavorazione dei bulloni, c) lavorazione dei coni, d) coni e bulloni al termine della lavorazione

ancorarlo alla struttura con due elementi di acciaio annegati nel calcestruzzo e collegati tra loro da due elementi piatti di acciaio. Nella seconda fase di carico quando il nodo sul vano ascensore deve essere fissato l'intercapedine tra la parte mobile e quella

fissa del dettaglio è stata riempita con un getto di emaco.

### 3.3 COPERTURA IN MEMBRANA ETFE

I cuscini di copertura sono costituiti da due fogli di ETFE mantenuti in pressione con aria

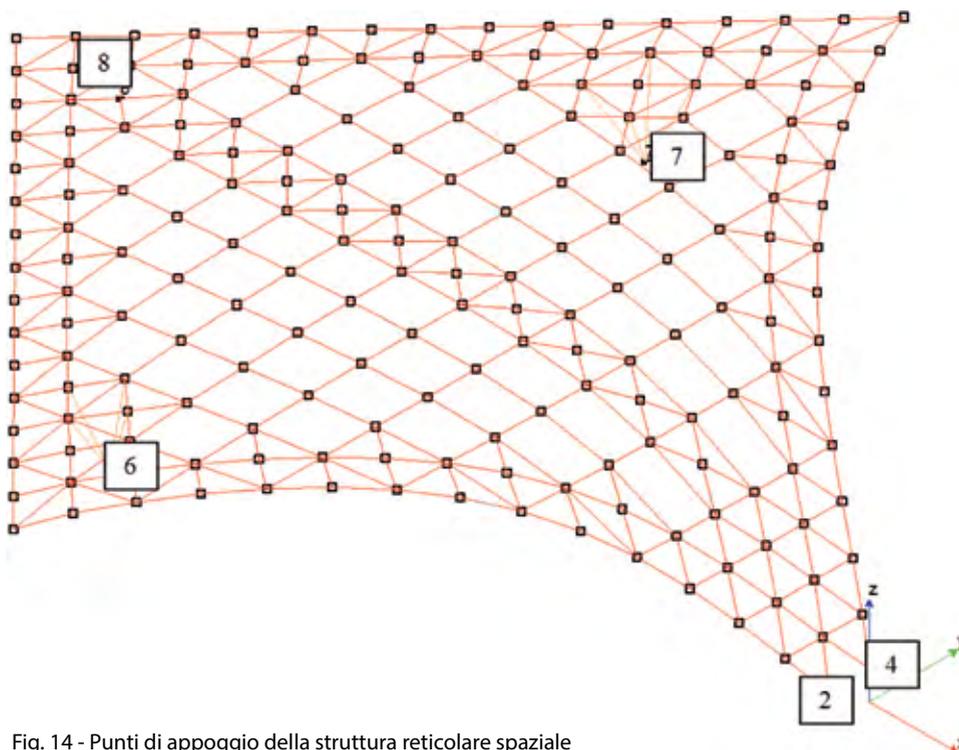


Fig. 14 - Punti di appoggio della struttura reticolare spaziale

deumidificata, a mezzo di un opportuno sistema di ventilatori e canali per l'aria come illustrato in figura 19. Come si può vedere dall'immagine di figura 20 i fogli di ETFE di intradosso e estradosso sono stati opportunamente stampati per garantire un adeguato ombreggiamento seguendo il criterio descritto di seguito nell'articolo.

### 3.3.1 Proprietà energetiche relative all'irraggiamento solare

Per questa tipologia di copertura è importante garantire il comfort termico al di sotto di essa nei mesi estivi, ciò richiede un sistema di rivestimento a basso coefficiente di trasmissione totale dell'energia solare (valore  $g$ ). Nello stesso tempo deve essere garantita l'illuminazione negli spazi sotto la copertura con un fattore di luce diurna adeguato, il che richiede un sistema di rivestimento con elevata trasmissione luminosa.

In base a questi requisiti è stato progettato un sistema di ombreggiatura dei cuscini nella direzione nord-sud con le seguenti caratteristiche:

- Ogni strato di ETFE che compone i cuscini è composto da una parte opaca (ottenuta con una stampa) e una parte trasparente: la parte opaca e quella trasparente sono sfalsate nel cuscino di estradosso e in quello di intradosso formando un angolo di 70 gradi come illustrato in figura 21.
- Il sistema di ombreggiatura è stato pensato in modo che fermi l'irraggiamento solare diretto ma che consenta allo stesso tempo la trasmissione della luce solare diffusa. In que-



Fig. 15 - Fotografia e disegno costruttivo del dettaglio di attacco della copertura sulla piazza sottostante

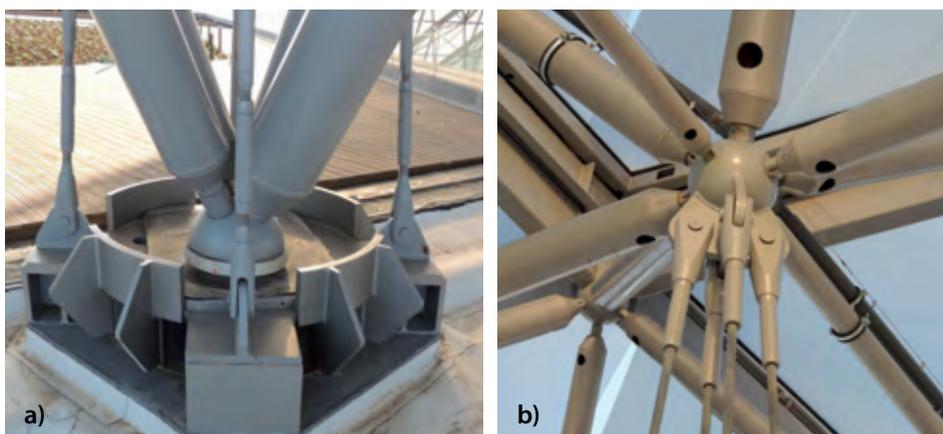
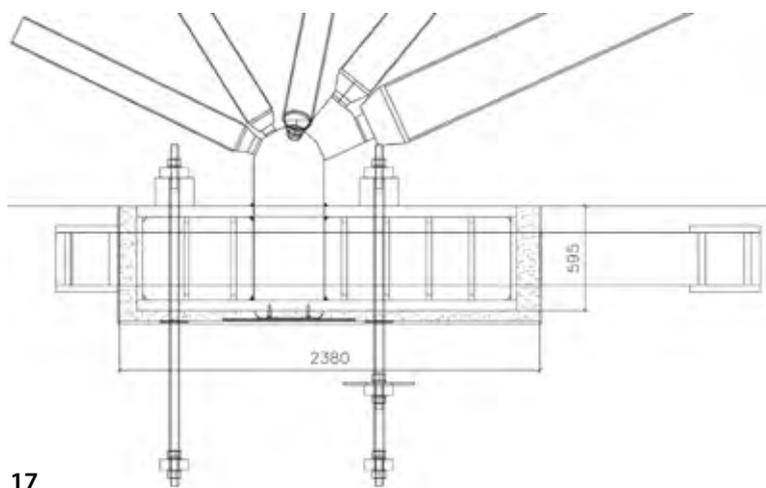


Fig. 16 - Dettaglio dell'appoggio mobile dei nodi 6 e 7: a) Apparecchio di appoggio mobile e attacco delle funi, b) Dettaglio della connessione delle funi con la sfera di intradosso della reticolare

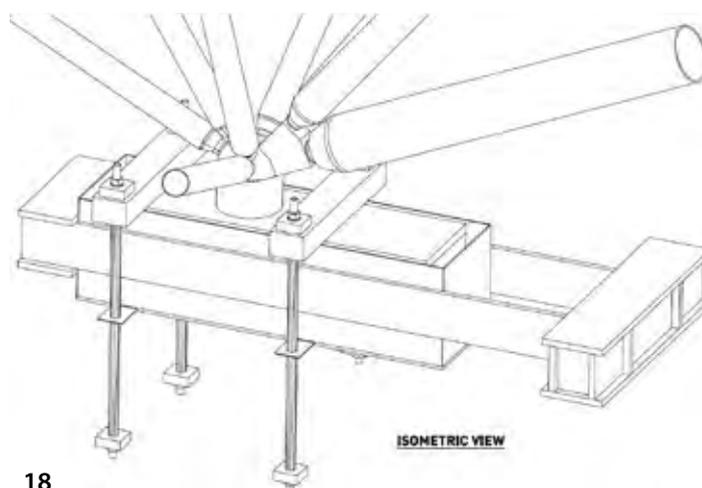
sto sistema il rapporto  $r$  fra la luce e lo spessore di ogni cuscino influenza la trasmissione della luce per cui è stato prescritto un valore del coefficiente  $r$  compreso tra 0,23 e 0,28. Nei cuscini in cui il valore del rapporto  $r$  si avvicina a 0,23 l'angolo fra la parte trasparente e quella opaca può essere portato a 60° in modo da aumentare la trasmissione della luce, bisogna tenere presente che questa operazione fa aumentare il coefficiente di trasmissione totale dell'energia solare  $g$  per cui occorrerà oppor-

tunamente aumentare l'opacità della parte ombreggiata di questi cuscini.

- Per limitare il valore del coefficiente  $g$  occorre che le parti opache dei cuscini abbiano un coefficiente medio di trasmissione dell'energia solare pari al 30% e un fattore di assorbimento medio pari a 0,2, specialmente per quanto riguarda i cuscini di intradosso.
- Per quanto riguarda l'illuminazione naturale è importante che la copertura consenta un'alta trasmissione della luce solare indiret-



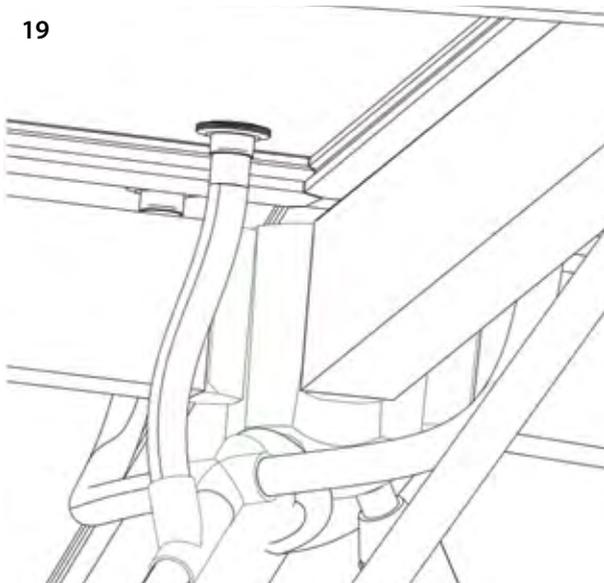
17



18

Fig. 17 - Disegno costruttivo in sezione del nodo vincolato sul vano ascensore. Fig. 18 - Disegno costruttivo in assonometria del nodo vincolato sul vano ascensore

19



20

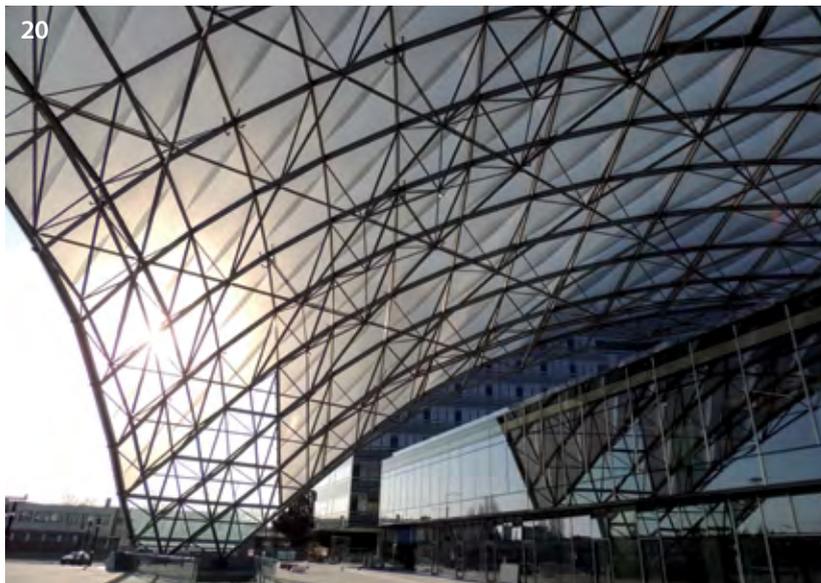


Fig. 19 - Particolare del sistema di immissione dell'aria all'interno dei cuscini in ETFE (redatto dalla Novum Structures GmbH). Fig. 20 - Vista controluce dei cuscini in ETFE che mette in risalto l'ombreggiatura

ta, per questo le parti trasparenti degli strati superiore e inferiore dei cuscini sono state costruite in modo che permettano la maggior trasmissione di luce possibile e in particolar modo garantiscano una trasmissione dell'85%.

### 3.3.2 Sistema di fissaggio e tenuta all'acqua

I cuscini sono stati fissati lungo il loro perimetro ai profili di estradosso della copertura per mezzo di estrusioni di alluminio e di un sistema di guarnizioni. Il sistema di fissaggio dei telai alla struttura comprende un profilo "di base" in alluminio sul quale sono stati fissati i telai mediante l'impiego di un profilo che funge da "pressore". Il profilo di base in alluminio è stato fissato al profilo di acciaio mediante opportuna bulloneria e appoggi in Neoprene, tale bulloneria consente la regolazione in pianta entro un campo di tolleranza di +/- 50 mm. Il sistema di copertura in cuscini ETFE è stato progettato, fabbricato e installato in modo da evitare ogni infiltrazione di acqua nel caso di condizioni meteoriche basate sull'evento più estremo in un periodo di ritorno di 50 anni, in particolare per quanto riguarda pioggia e neve. Il sistema di tenuta all'acqua non fa affidamento esclusivamente sull'uso di sigillanti, ma prevedere una opportuna combi-

nazione di guarnizioni. Gli elementi di telaio tra i cuscini ETFE sono stati dimensionati per formare un sistema di canali di gronda, in grado di convogliare le acque meteoriche verso i punti di raccolta.

## 4. MODELLI MATEMATICI E ANALISI CONDOTTE

La struttura è stata modellata con il software di calcolo WinStrand eseguendo un'analisi statica lineare e dinamica modale senza condensazione di piano. Come normativa di riferimento per il calcolo delle azioni e le verifiche è stato adottato il DM 2008 con relativa circolare esplicativa e gli Eurocodici.

### 4.1 Analisi statica lineare

Nel modello elastico lineare sono state considerate 2 fasi di carico per simulare le due diverse condizioni di vincolamento in cui si viene a trovare la struttura:

- Fase di carico 1: il nodo numero 8 posizio-

nato sul vano ascensore è libero di traslare nella direzione x e la struttura è soggetta al carico del peso proprio. In questa configurazione la struttura non provoca spinte sul vano ascensore.

- Fase di carico 2: il nodo numero 8 posizionato sul vano ascensore è vincolato alla traslazione anche in direzione x e la struttura è soggetta ai carichi accidentali. In questa configurazione la struttura assume un comportamento ad arco in direzione x provocando una spinta sul vano ascensore. Per determinare lo stato finale di tensioni e deformazioni presenti negli elementi strutturali della Vela è stata eseguita una operazione di merge fra i modelli delle due fasi di carico considerando l'azione del peso proprio agente nella prima fase di carico e i restanti carichi accidentali nella seconda.

### 4.2 Analisi dinamica modale

Si riportano in figura 9 le deformate modali

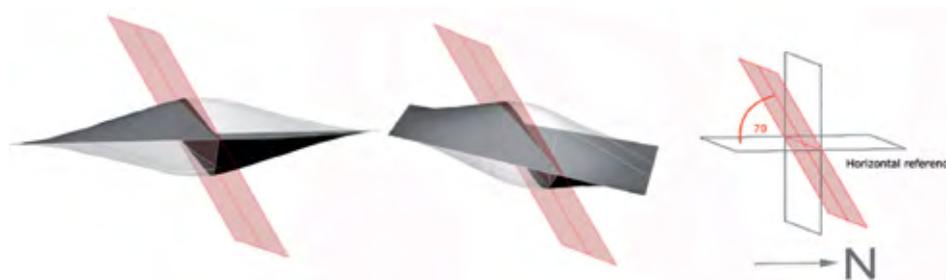


Fig. 21 - Disposizione della parte trasparente e opaca nei cuscini di ETFE

dei primi modi di vibrare ottenuti a seguito dell'analisi dinamica modale della struttura. Sono illustrate le deformate modali e i periodi di vibrazioni dei primi modi di vibrare per il sisma che agisce in direzione orizzontale X+, orizzontale Y+ e verticale.

## 5. PROCEDURA DI MONTAGGIO, COLLAUDO, MATERIALI IMPIEGATI E COMPUTO

### 5.1 Procedura di montaggio

La struttura e il rivestimento della copertura reticolare spaziale sono stati assemblati in 8 mesi, dal marzo 2012 fino al novembre 2012. La porzione frontale di struttura è stata assemblata a terra, successivamente portata in posizione da due gru e posizionata su castelli di appoggio provvisori (figura 22a e figura 22b). La restante parte di struttura è stata assemblata facendo base sul piano rialzato e mediante apparecchi di sollevamento leggeri,

portando le aste e i nodi in posizione, in modo da comporre progressivamente l'intera struttura come illustrato in figura 22c. Una volta ultimata la struttura reticolare sono stati posizionati sui profili di estradosso i cuscini in ETFE e nella parte anteriore le lastre di vetro.

È importante specificare che una volta terminata la costruzione della struttura metallica, è stato vincolato alla traslazione orizzontale in direzione longitudinale, il vincolo posto sul vano ascensore, dopo essersi assicurati che la struttura avesse effettuato lo spostamento orizzontale elastico dovuto all'azione del peso proprio strutturale.

Prima della posa dei cuscini di ETFE sono state eseguite anche le prove di collaudo statico e dinamico della struttura metallica in modo da riuscire ad applicare in modo più agevole i carichi di collaudo ai nodi di estradosso della copertura (figura 22d).

## 5.2 Procedure di collaudo

### 5.2.1 Collaudo statico

Scopo delle prove di collaudo statico è quello di verificare che gli spostamenti della struttura soggetta a determinati carichi statici siano gli stessi previsti dal modello di calcolo.

I carichi di prova di 35 kN sono stati applicati a 22 nodi di intradosso della struttura mediante martinetti idraulici fissati con tasselli chimici alla fondazione sottostante (figura 23). I collegamenti fra i martinetti e i nodi di estradosso sono stati realizzati mediante barre di acciaio filettate o catene. La pressione trasmessa ai martinetti è stata controllata durante la prova grazie ad una pompa elettrica dotata di manometro, la misura della deformazione verticale è avvenuta attraverso 9 comparatori centesimali fissati alla struttura in esame tramite filo invar. Gli spostamenti orizzontali in direzione x e y dei due appoggi mobili sono stati misurati tramite laser elettronici.

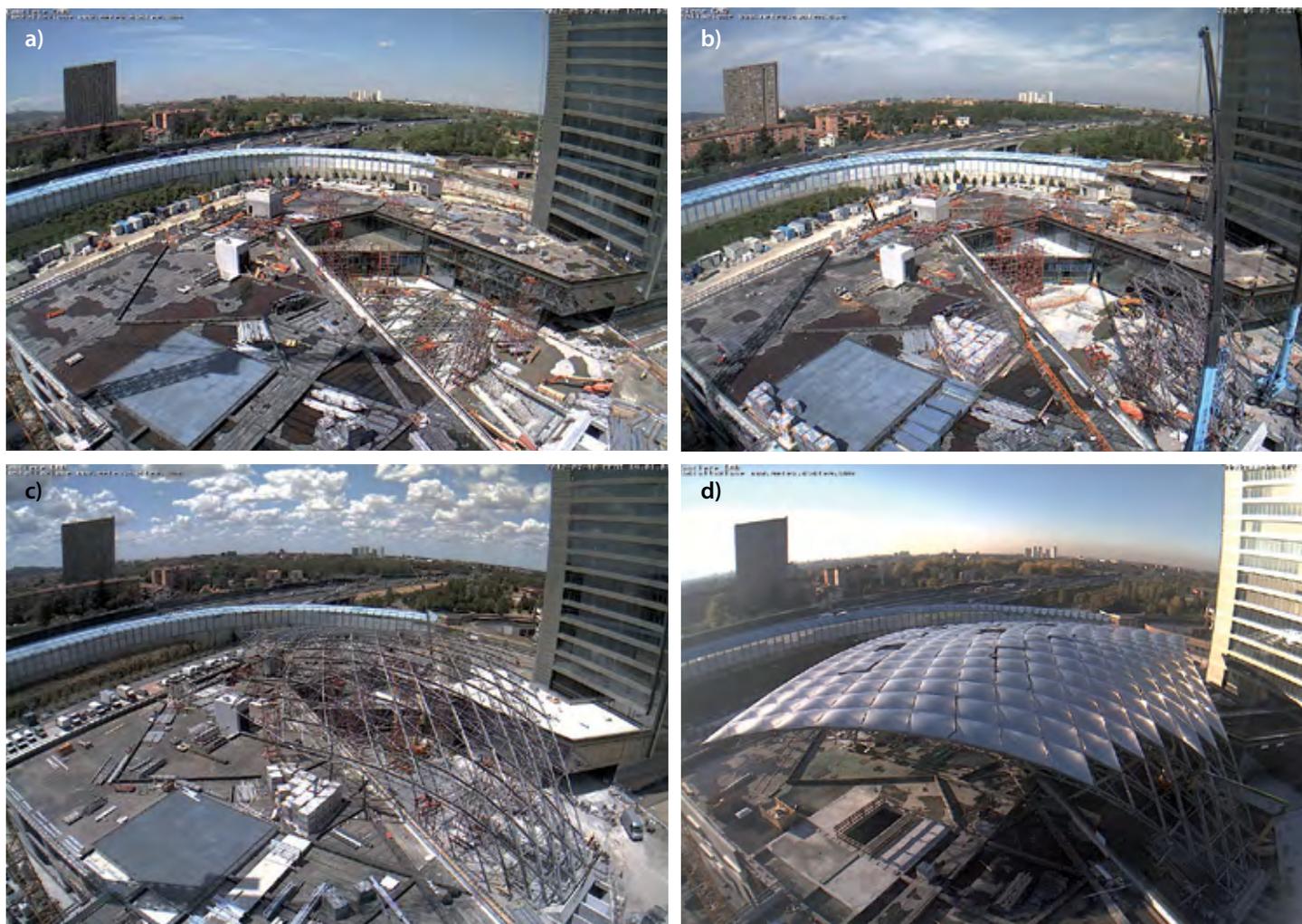


Fig. 22 - Sequenza di montaggio della struttura reticolare spaziale: a) montaggio della parte frontale della struttura a terra, b) posizionamento della parte pre assemblata a terra, c) completamento del montaggio della struttura sul piano rialzato, d) Posizionamento della copertura in cuscini di ETFE

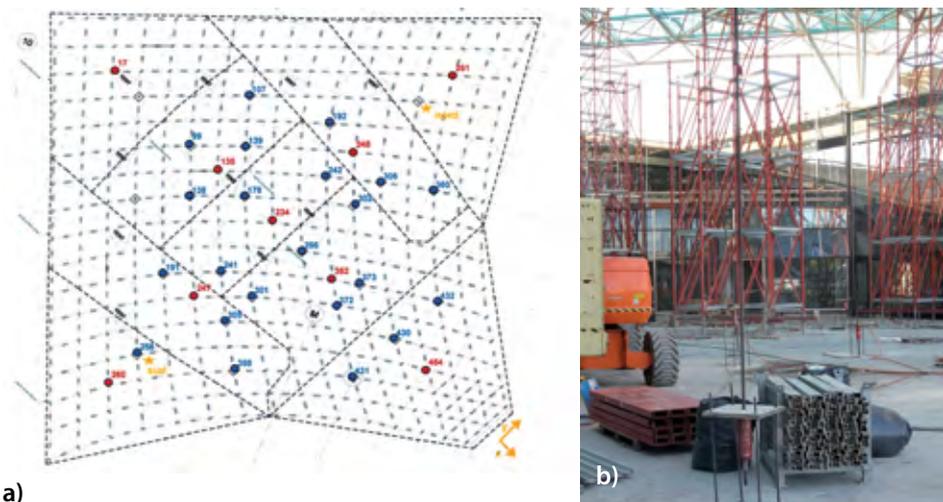


Fig. 23 - a) Disposizione in pianta dei punti di applicazione del carico sull'estradosso della struttura, b)

La scelta degli elementi strutturali da sottoporre a verifica, la determinazione e la disposizione dei carichi, le modalità di rilevazione ed i punti di misura sono stati preventivamente concordati con la direzione lavori, il progettista strutturale e la committenza. Prima di effettuare le misurazioni della prova di carico sono stati effettuati due cicli di carico e scarico in modo da verificare che le deformazioni anelastiche dovute ai giochi fra i collegamenti degli elementi strutturali fossero state eliminate. Confrontando i dati sperimentali degli spostamenti ottenuti dalle prove di carico (figura

24) risulta che sono equivalenti a quelli indicati dal modello di calcolo per cui si considera positivo l'esito della prova di collaudo statica.

### 5.2.2 Caratterizzazione dinamica

Scopo delle prove di caratterizzazione dinamica è quello di individuare sperimentalmente le frequenze naturali di vibrazione e lo smorzamento della struttura in modo da poterli confrontare con quelli teorici. È da tenere presente che i valori sperimentali ricavati, essendo legati a tutti i parametri geometrici e meccanici della struttura, rappresentano un utile strumento di monitoraggio

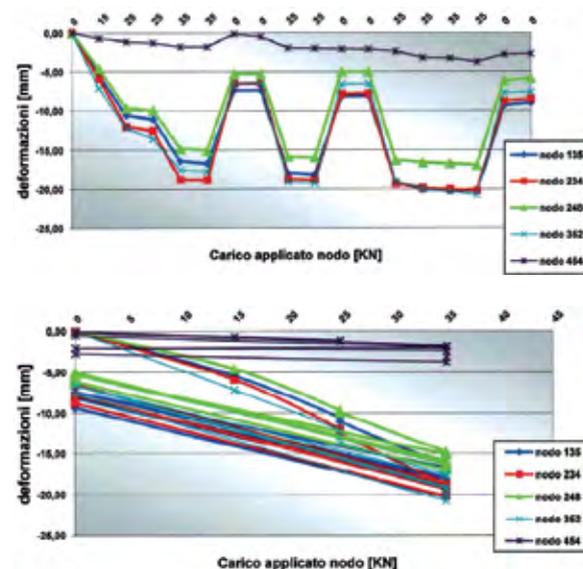


Fig. 24 - Risultati della prova di carico per alcuni nodi della struttura: a) Diagramma carico - deformazioni, b) Diagramma di isteresi carico - deformazioni

nel tempo delle eventuali variazioni di capacità portante e di degrado degli elementi strutturali.

La procedura operativa di prova si è basata sul rilevamento delle oscillazioni indotte dallo strappo di 3 fusibili (barre di diametro calibrato) poste in corrispondenza del nodo

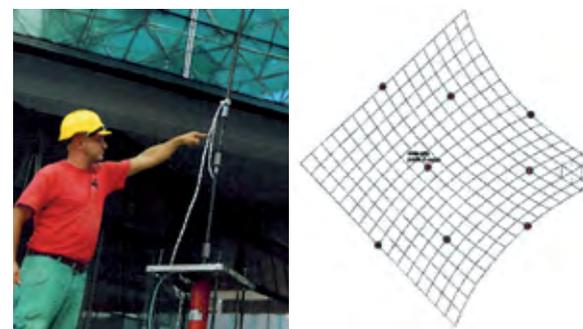


Fig. 25 a) Posizionamento del fusibile che determina la forza di strappo; 25 b) Posizionamento degli accelerometri e del punto in cui viene applicato il carico

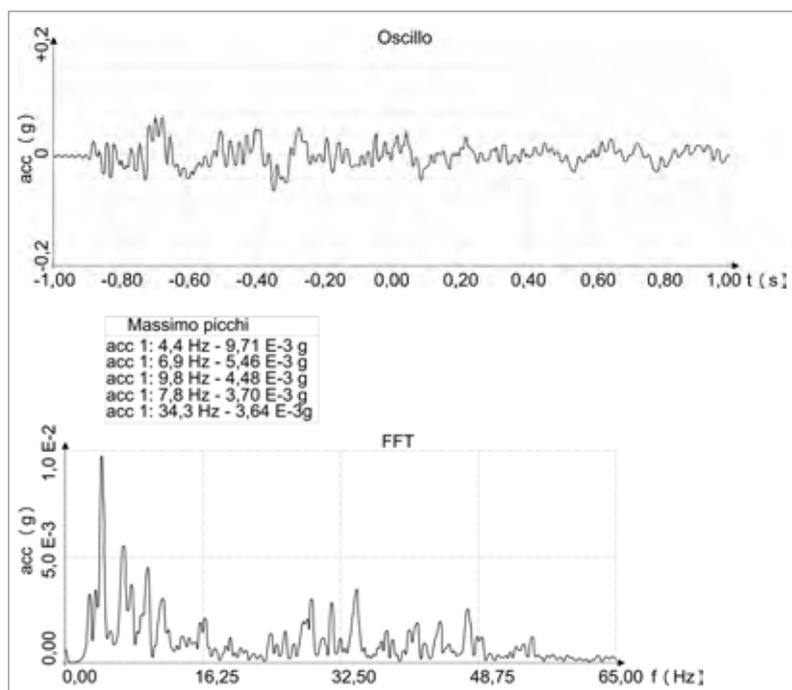


Fig. 26 - Accelerogramma e contenuto in frequenza di uno dei nodi monitorati durante la prova. Fig. 27 - Coefficiente di smorzamento per uno dei nodi monitorato dagli accelerometri

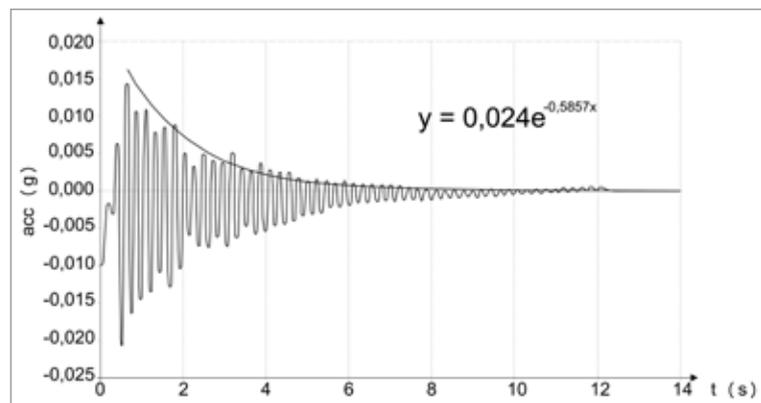




Fig. 28 - Apparecchiatura di prova per il test dinamico di penetrazione dell'acqua sul cuscino ETFE



Fig. 29 - Esecuzione della prova di trazione su un nodo in laboratorio

centrale della struttura: il primo fusibile è stato predisposto per rompersi sotto un carico di 20 kN mentre le altre due sotto un carico di 50 kN (figura 25a). I segnali sono stati campionati a una frequenza di 5 kHz, disponendo 8 accelerometri su altrettanti nodi di estradosso della struttura (figura 25b).

I valori delle frequenze naturali ottenute dalla prova di collaudo sono stati confrontati con quelli delle frequenze naturali dei primi modi di vibrare in direzione verticale ottenuti dall'analisi dinamica modale del modello di calco-

lo. Dal raffronto di questi valori si osserva che i dati sperimentali confermano con buona approssimazione i risultati teorici, infatti il valore sperimentale della prima frequenza naturale è di circa 5,4 Hz mentre quello teorico è di 5,88 Hz (figura 26).

Analizzando i valori dello smorzamento strutturale ottenuti dai dati sperimentali risulta che esso è pari a circa il 2% coerentemente con quanto ipotizzato nel modello di calcolo (figura 27).

### 5.2.3 Prove sui cuscini in ETFE

Per testare le proprietà dei cuscini ETFE di copertura sono state effettuate le seguenti prove sperimentali:

- Prova statica di infiltrazione dell'aria: il cuscino ETFE è stato sottoposto a una pressione dell'aria pari a 0,3 kN/m<sup>2</sup> misurando la quantità d'aria che si infiltra attraverso il cuscino.

- Prova statica di penetrazione dell'acqua: è stato effettuato un test della durata di 15 min con acqua in pressione a 0,72 kN/m<sup>2</sup> misurando la quantità d'acqua penetrata dentro il cuscino. Il cuscino di ETFE durante la prova è stato posizionato con una inclinazione di 12 gradi.

- Prova dinamica di penetrazione dell'acqua: è stato effettuato un test della durata di 15 min con un getto d'acqua che esercita un'azione equivalente a una pressione statica di 0,72 kN/m<sup>2</sup> misurando la quantità d'acqua penetrata dentro il cuscino. Il cuscino di ETFE durante la prova è stato posizionato con una inclinazione di 12 gradi.

- Prova di carico uniforme: è stato applicato un carico uniforme seguendo successivi step di carico 1,2[kN/m<sup>2</sup>], 2,4[kN/m<sup>2</sup>],

4,8[kN/m<sup>2</sup>] e 7,2[kN/m<sup>2</sup>]. Ogni step di carico è stato mantenuto per 10 sec misurando gli spostamenti del sistema (figura 28).

- Prova di impatto e pressione ciclica: in fase di costruzione è stata testata la resistenza della copertura ad un'azione di impatto e quando soggetta a un carico ciclico.

### 5.2.4 Prove sui materiali e sugli elementi costruttivi

Su campioni di acciaio della struttura reticolare sono state eseguite prove di resistenza meccanica e analisi per determinare la composizione chimica del materiale. Sono state eseguite prove di resistenza meccanica anche su un campione di nodi della struttura reticolare spaziale. Inoltre sono state eseguite una serie di prove di impatto su di un campione di bulloni per confermare le proprietà del materiale.

I campioni di due aste collegate a un nodo sono stati posti nell'apparecchio di prova mediante l'impiego di apposite piastre a cui sono state saldate le estremità dei profili tubolari. Una volta inserite le piastre nell'apparecchio di prova sono state messe in trazione per portare a contatto i filetti, poi è iniziata la prova di carico aumentando gradualmente la forza agente sul collegamento fino a portarlo a rottura (figura 29). Al termine della prova sono stati registrati il percorso di carico, la tensione massima raggiunta e il tipo di rottura del provino (figura 30).

Sono state effettuate anche prove di resistenza sulle connessioni delle aste di estradosso valutando l'interazione fra sforzo normale e momento flettente (figura 31b). I dati sperimentali ottenuti dalle prove di rottura in laboratorio sono stati confrontati con le



Fig. 30 - Differenti tipi di rottura delle aste testate: a) rottura del tubo, b) rottura della saldatura che collega il cono al tubo, c) rotture del bullone che collega l'asta tubolare al nodo sferico

resistenze di progetto delle connessioni e i valori teorici risultanti dall'analisi numerica delle connessioni (figura 31a).

### 5.3 Descrizione dell'acciaio impiegato

#### 5.3.1 Acciaio da carpenteria

- Acciaio da carpenteria per profili tubolari della reticolare spaziale:
  - Tubi circolari finiti a caldo secondo EN 10210-2
  - Acciaio da carpenteria con designazione europea secondo EN 10025:
    - S 355 J2H (n. materiale 1.0116) con valore caratteristico minimo della tensione a snervamento  $f_{yk} 355 \text{ N/mm}^2$
  - Coni
    - Acciaio da carpenteria con designazione europea secondo EN 10025:
      - S 355 J0 (n. materiale 1.0553) con valore caratteristico minimo della tensione a snervamento  $f_{yk} 355 \text{ N/mm}^2$
    - Acciaio per sfere dei nodi della reticolare spaziale
      - Acciaio secondo EN 10083-1: C45E/Ck 45 (n. materiale 1.1191)
      - Acciaio saldabile EN 10025: S355J0 (n. materiale 1.0553)
      - Acciaio per collegamenti aste-nodi della reticolare spaziale
        - Bulloni: classe 10.9
        - Perni: Acciaio 102Cr6 (n. materiale 1.2067) secondo EN 10132-4

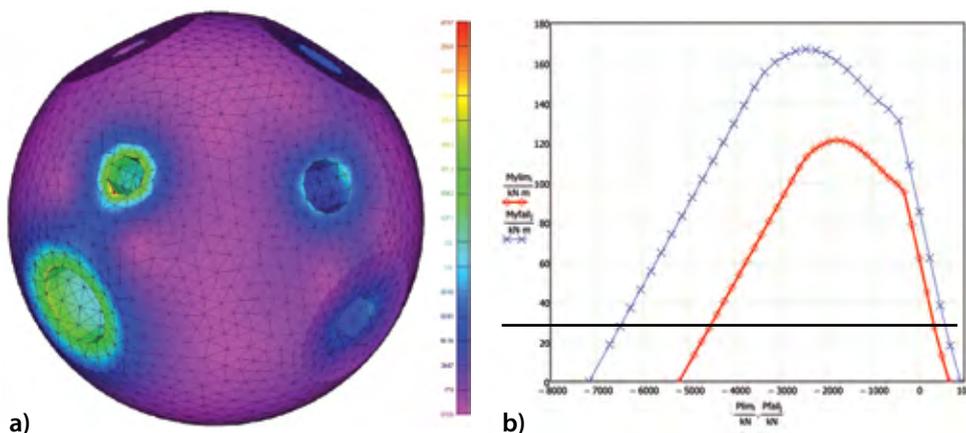


Fig. 31 - a) Modello matematico di un nodo sferico, b) Dominio di resistenza di progetto e sperimentale considerando l'interazione fra momento e sforzo normale per un nodo di intradosso

- Dadi di regolazione (Spanner sleeves): Acciaio 25CrMo4 (n. materiale 1.7218) secondo EN 10083-1.

#### 5.3.2 Saldature e processi di saldatura

Si veda D.M. 14/01/2008 p.to 11.3.4.5 Collegamenti saldati secondo D.M. 14/01/2008, D.M. 09/01/1996, UNI 10011 e specifiche I.I.S.

#### 5.3.3 Funi

- Funi di tipo chiuse in acciaio ad alta resistenza composte da 2 o 3 strati esterni di fili sagomati a Z, con nucleo interno in fili rotondi, tutti zincati a caldo. I fili hanno le seguenti caratteristiche:
- Resistenza nominale a rottura = 1570 MPa min.
  - Proof stress  $R_{p0,2} = 1180 \text{ MPa min.}$
  - Allungamento a rottura: 4% min. su base

- di 250 mm
- Zincatura: EN-10264-3 classe A, 300 g/m<sup>2</sup> min. sui fili sagomati
- Modulo di elasticità nominale  $E = 163000 \text{ MPa.}$

### 5.4 Computo delle strutture metalliche di copertura

Il peso dei profili della reticolare spaziale comprese le unioni è pari a 1904 kN. Considerando anche il peso dei dettagli costruttivi di connessione tra la struttura metallica e quella in cemento armato il peso totale della struttura è pari a circa 2000 kN (200 t).

**prof. dr. ing. Massimo Majowiecki**

Università IUAV di Venezia,

**dr. ing. Giovanni Berti**

Studio Tecnico Majowiecki, Bologna

### CREDITS

**Proprietario:** UNIPOL Gruppo

**Progetto Architettonico:**

Studio Open Project

**Architettura strutturale e progettazione esecutiva delle strutture:**

Prof. Ing. Massimo Majowiecki

Collaboratore Ing. Giovanni Berti

**Direzione dei lavori:**

Studio Open Project

**Progetto impianti:**

Beta Progetti

**Impresa Appaltatrice delle opere**

**General Contractor:** NUOVA AGORA'-

C.M.B. Società Cooperativa Muratori

e Braccianti di Carpi (MO)

Coopcostruzioni (BO) - Cesi, Imola (BO)

Unieco (RE) - Cefla-CEIF, Imola (BO)

**Realizzazione della struttura metallica:**

Novum Structures LLC

**Direzione di commessa:**

Geom. Claudio Camellini (C.M.B.)

**Direttore tecnico di cantiere:**

Geom. Massimo Miconi (C.M.B.)

### Bibliografia

- [1] Turrin M., van den Ham E., Kilian A., Sariyildiz S., 2010a: "Integrated design of a large span roof: a parametric investigation on structural

morphology, thermal comfort and daylight."

In: Proceedings of ICCCBCE 2010 International Conference, Nottingham, United Kingdom, 30 June-2 July, 2010.

[2] Turrin, M., Stouffs, R., Sariyildiz, S., 2010b: "Parametric design of the Vela roof. A case study on performance oriented exploration of design alternatives". In: Proceedings of ASCAAD 2010, Fez, Morocco, 19-21 October 2010.

[3] Turrin M., von Buelow, P., Kilian A., Sariyildiz S., 2010c: "Performance-based design of SolSt; a roof system integrating structural morphology and solar energy transmittance". In: Proceedings of IASS 2010, Shanghai, China, 8-12 November 2010.