

**Cm**

**LUG/AGO 2012**

**COSTRUZIONI METALLICHE 4**



RIVISTA BIMESTRALE  
PER LA DIFFUSIONE  
DELLA CULTURA DELL'ACCIAIO

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 LO/MI  
Prezzo a copia: € 11,50 In caso di mancato recapito inviare al CMP di Milano-Rosario per la restituzione al mittente previo pagamento reso - Contiene IP

Oggetto dell'articolo sono le strutture metalliche speciali realizzate nell'ambito del progetto di ampliamento del Centro Congressi Portello della Fiera di Milano, localizzata tra le vie Colleoni, Serra, Scarampo e Tranchedini.

Il nuovo centro congressi, progettato architettonicamente dallo Studio "Mario Bellini Architects" e per le parti interne dallo Studio dell'arch. Pierluigi Nicolini, offrirà 18mila posti a sedere, 1 auditorium da 1.500 persone, 1 sala plenaria da 4.500 posti totali, 73 sale modulari da 20 a 2mila posti, con 54.000 m<sup>2</sup> espositivi a supporto.

*The article deals with the special steel structures which were installed during the extension work on the Portello Congress Centre at the Milan Trade Fair complex, bounded by Colleoni, Serra, Scarampo and Tranchedini Streets.*

*The architectural design of the new congress centre was carried out by Mario Bellini Architects, with interiors by the Pierluigi Nicolini architectural practice. The complex has 18,000 seats, an auditorium with capacity of 1,500 persons, a meeting hall seating 4,500, 73 modular rooms seating from 20 to 2,000, and exhibition space of 54,000 m<sup>2</sup>.*

#### 1. DESCRIZIONE DELLE OPERE STRUTTURALI

I padiglioni 5 e 6 del Portello sono stati rifunzionalizzati e integrati con l'esistente Milano Convention Center (MIC) ad essi adiacente. Una struttura reticolare spaziale free form detta "cometa" sovrasta gli edifici come un velo appoggiato su di essi, accarezzando la solida superficie ellissoidale dell'auditorium che come un grosso "sasso" fa da contrasto alla forma frastagliata della cometa.

## Nuovo centro congressi Portello Fieramilanocity: le strutture della nuova sala plenaria, dell'auditorium e della copertura reticolare spaziale detta "cometa"

*The new Portello congress centre Fieramilanocity: the structures of the new meeting chamber, auditorium and the 'comet' spatial roof grid system.*

Massimo Majowiecki, Nicola Cosentino

Le opere strutturali realizzate si distinguono in tre elementi principali:

- La copertura reticolare spaziale della sala plenaria;
- La copertura reticolare spaziale free form detta "cometa"
- L'auditorium anch'esso realizzato con una struttura reticolare spaziale



Fig. 1 – Vista d'insieme del Nuovo Centro Congressi Portello Fieramilanocity

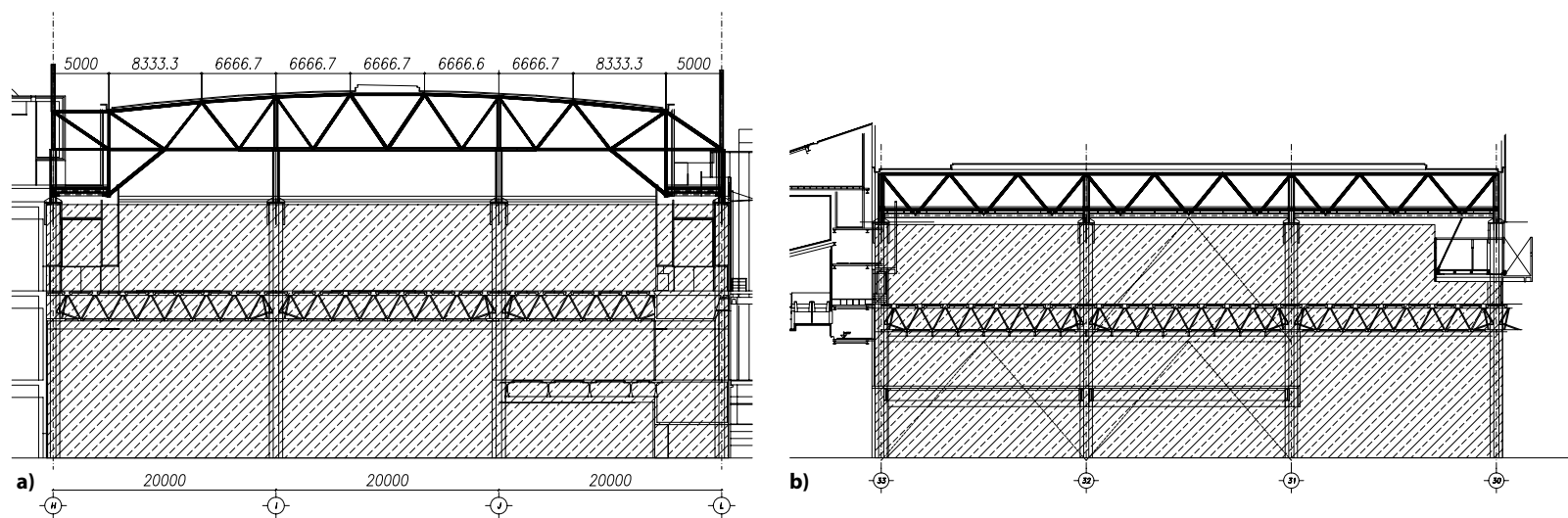


Fig. 2 - a) Sezione tipica della sala plenaria, b) Vista interna della sala plenaria

### 1.1 Copertura della sala plenaria

La copertura della sala plenaria è stata realizzata mediante una reticolare spaziale che si estende, in pianta, su un'impronta di 60x60 m ed in elevazione da quota 27,7 m a 32,7 m circa (figura 2). Essa è sostenuta da 12 colonne perimetrali in cemento armato esistenti che sono state prolungate da quota 23 m fino a quota 27,7 m, mediante appositi elementi metallici. La reticolare di copertura è controventata nel proprio piano su tutti i quattro lati: come mostrato in figura 3.a, a sud sono presenti due "chiavi a taglio" che collegano, nella direzione del bordo stesso, il corrente inferiore della reticolare con i vani ascensori dell'edificio "risalita city-life"; ad est, ovest e nord sono presenti tre controventi generali, di nuova realizzazione ma valutati nell'ambito del progetto di adeguamento delle strutture esistenti, che si estendono fino a quota 23 m, provvedendo con apposite aste diagonali al collegamento con l'intradosso della reticolare a quota 27,7 m (figura 3.b). I collegamenti delle aste di estradosso della reticolare spaziale sono realizzati con nodi sferici a cui, mediante un sistema di arcarecci, vengono trasferiti i carichi agenti sulla copertura (figura 4.a) compresi i sostegni intermedi della cometa. Le aste di intradosso invece, date le notevoli sollecitazioni di trazione che agiscono su di esse, sono state collegate mediante piastre imbullonate (figura 4.b).

Le regioni est ed ovest (assi "H" ed "L") della reticolare orizzontale sostengono due impalcati in cls che fungono da "via di fuga"

(figura 5.a). La regione nord (asse "30") sostiene, mediante pendini, un impalcato sottostante, a quota 18 m circa, che ospita la sala regia ed altri locali accessori alla sala plenaria (figura 5.b).

### 1.2 Copertura free form "cometa"

La Cometa è il frutto di una lunga ricerca morfologica della Mario Bellini Architect(s) che ha concepito la copertura come un assieme di raggi luminescenti (lungi fino a 200 metri) che si staccano, ondeggiando, da un nucleo più denso fino a formare una coda (figura 6). Ciascun "raggio" è formato da pannelli profilati in alluminio ultrasottile, anodizzato color argento, e microforato in

modo da rendere ulteriormente leggera e semitrasparente l'intera struttura. La cometa si estende per 200 metri di lunghezza e 140 metri di larghezza, con una superficie totale di 15.000 metri quadri, a un'altezza di 46 metri. La struttura è stata realizzata con una reticolare spaziale a doppio strato realizzata con tubi e nodi sferici in acciaio in modo da cercare di rimanere il più aderenti possibile alla geometria free form richiesta dal progetto architettonico (figura 7). Per ridurre le luci libere della struttura "cometa" si è deciso di appoggiarsi su alcuni dei nodi di estradosso della sala plenaria. In questo modo la struttura della sala plenaria deve coprire una luce di 60 m mentre la co-

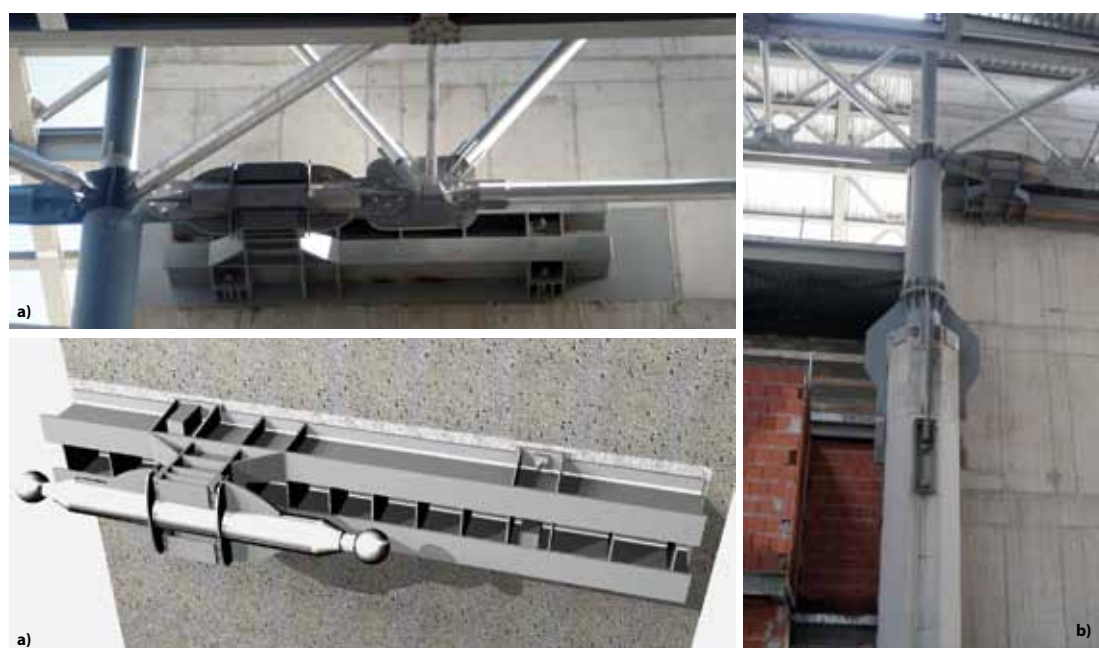


Fig. 3 - a) Chiave a taglio che collega la copertura della sala plenaria al sotto di calcestruzzo, b) Collegamento della copertura della sala plenaria con i pilastri esistenti

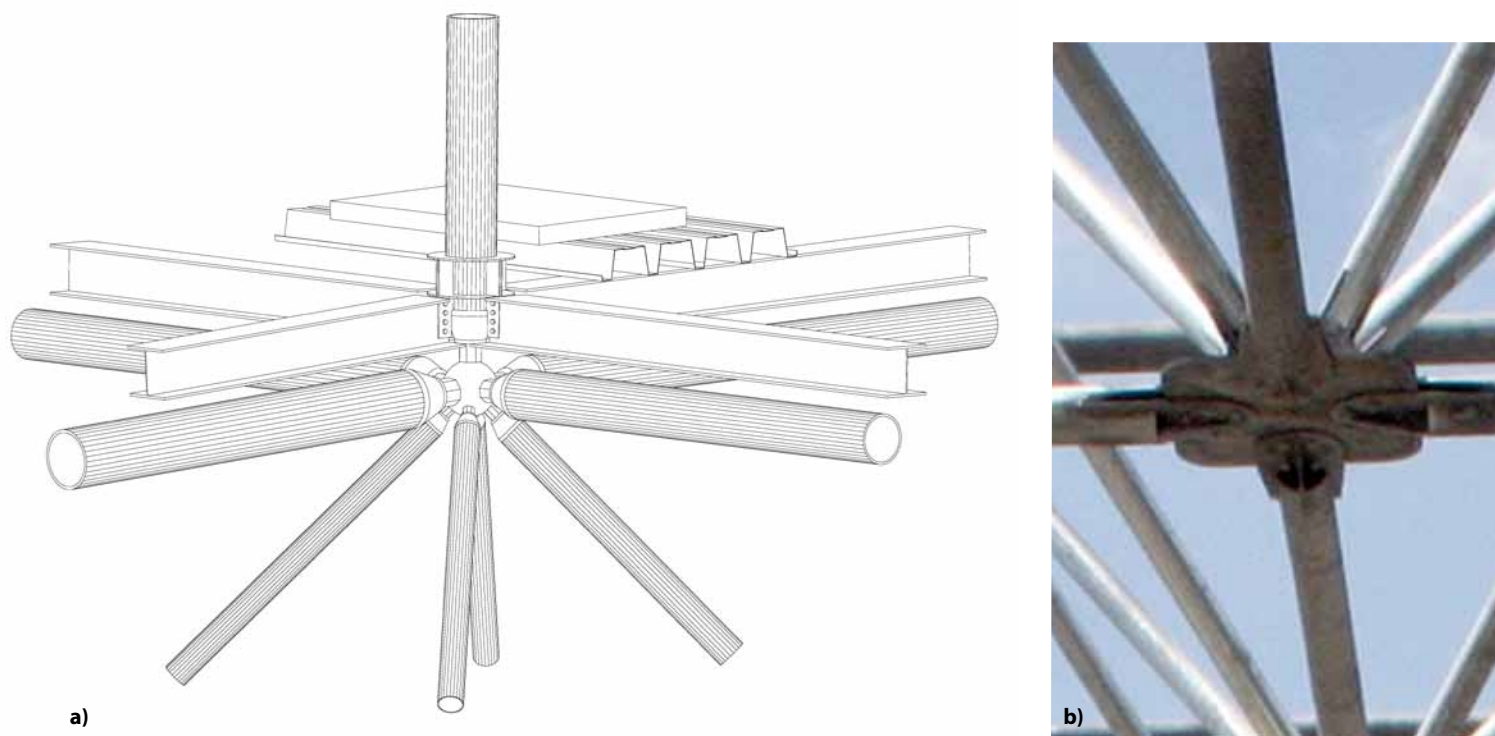


Fig. 4 - a) Nodo tipico di estradosso della sala plenaria in corrispondenza dell'appoggio della cometa, b) Nodo tipico di intradosso della sala plenaria

meta solo di 20 m, nel tratto in cui sovrasta la sala plenaria, il che porta ad una consistente ottimizzazione strutturale.

Altri punti di appoggio della cometa sono stati ricavati sui padiglioni esistenti (figura 8.a) e sulla piazza antistante la sala plenaria (figura 8.b).

### 1.3 Struttura dell'auditorium e del foyer

L'auditorium e il foyer sono stati realizzati con una struttura reticolare spaziale. La scelta di questa tipologia strutturale deriva dalla necessità di seguire la geometria ellissoidale dell'auditorium e di raccordare morfologi-

camente le strutture delle due coperture. Nella zona relativa al foyer, la reticolare spaziale è sostenuta da 11 colonne metalliche, incernierate alle estremità di colonne esistenti in cemento armato. Una ulteriore colonna risulta invece vincolata alla copertura dell'edificio denominato "Connettivo". La reticolare spaziale, alla quota 23 m circa, poggia sulla trave di bordo dell'impalcato dell'auditorium, in corrispondenza di 45 nodi di collegamento tra la reticolare e la trave stessa. Sulla prima coppia di travi principali, al confine tra foyer ed auditorium, risultano inoltre incernierate due ulteriori colonne me-

talliche che sorreggono la reticolare spaziale. La conformazione geometrica della reticolare spaziale stessa ne garantisce il controventamento in direzione longitudinale: la forma curva e chiusa dell'auditorium è in grado di contrastare le azioni agenti lungo la direttrice nord-sud. Il controventamento trasversale è realizzato, sul "fronte" auditorium dallo stesso tipo di comportamento appena descritto e, sul fronte opposto (prospetto nord della zona foyer-spogliatoi), da un controvento a "K" composto da un tirante inferiore e due puntoni inclinati confluenti sulla reticolare di copertura.



Fig. 5 - a) Vie di fuga esterne alla sala plenaria, b) Sala regia appesa all'intradosso della sala plenaria



Fig. 6 - Render della "cometa"

Quest'ultimo sistema di controvento è vincolato alle strutture del connettivo (corpo di fabbrica di nuova realizzazione posto tra l'auditorium e l'edificio esistente denominato MIC), alle quali trasferisce l'azione orizzontale alla quota di 24 m circa.

Al confine tra foyer ed auditorium è localizzata una reticolare di parete avente una duplice funzione: sostenere la reticolare spaziale di copertura, che in tale zona presenta ampie luci (48 m circa), e sospendere l'impalcato

della sala regia. Quest'ultimo, sul fronte opposto alla citata reticolare di parete, è sorretto da pendini collegati all'intradosso della copertura reticolare.

La sala regia risulta controventata in direzione est-ovest dalla reticolare di parete, mentre in direzione nord-sud da apposite bielle inclinate che collegano l'impalcato di calpestio all'intradosso della copertura.

Il piano di calpestio della sala regia, posto alla quota di 27 m circa, ed il suo sistema di

controventamento nel piano sono descritti separatamente; nel progetto/modello delle strutture principali qui esaminate, è trattato in modo schematico, al solo fine di considerarne gli effetti indotti sulle strutture principali.

L'impalcato dell'auditorium, alla quota 22 m circa, è costituito da 11 travi principali "radiali"; queste risultano incernierate al setto in c.c.a. della rampa esistente e sostenute ad una estremità da colonne metalliche pendolari, vincolate alle colonne esistenti in cemento armato.

Nella zona di confine tra auditorium e foyer è presente una ulteriore coppia di travi principali, anch'esse incernierate al nucleo in cemento armato della rampa ad un'estremità e sostenute dalle adiacenti strutture in cemento armato esistenti, mediante un apposito sistema di appensione, all'altra (riquadro di figura 12).

La trave di bordo delimita la superficie di calpestio dell'auditorium alla quota di 22 m circa, seguendone la geometria a "sasso" e funge da sostegno della reticolare spaziale di copertura a tale livello.



Fig. 7 - Vista laterale (a) e frontale (b) della reticolare spaziale "cometa"



Fig. 8 - a) Appoggi della cometa sui padiglioni esistenti e b) sulla piazza antistante la sala plenaria

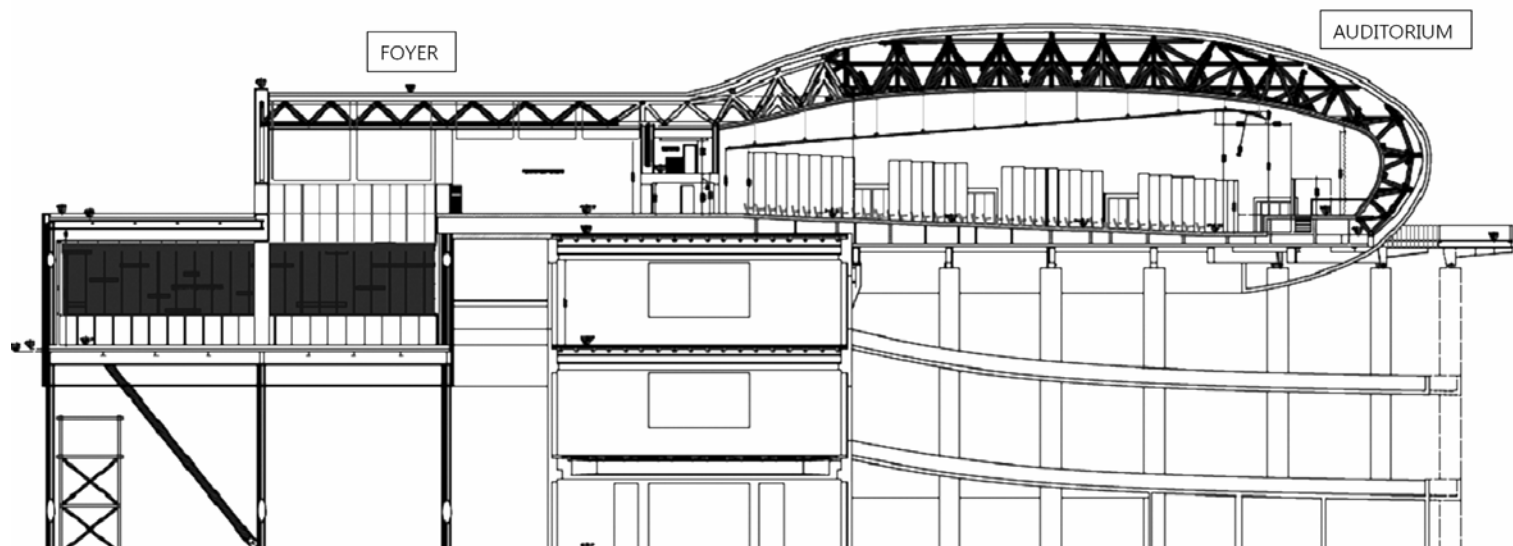


Fig. 9 - Sezione longitudinale delle reticolari spaziali di auditorium e foyer

Le travi secondarie a sezione scatolare ottenute mediante saldatura di piatti di altezza variabile, sostengono il solaio che si estende su una superficie di circa 1.300 m<sup>2</sup>. Il solaio dell'auditorium è realizzato con lastre predalles autoportanti in fase di getto. Le travi metalliche sono connesse al solaio predalles-clc mediante l'impiego di apposita piolatura; la piolatura, oltre a realizzare un sistema composto (acciaio-clc) per la resistenza ai carichi verticali, ha il compito di "trasferire" le azioni di piano dalle travi metalliche (su cui "gravano" le strutture reticolari spaziali e le vie di fuga) alle solette in cemento armato, che a loro volta le trasmettono al "nucleo" esistente in cemento armato.

Le vie di fuga formano un anello semi-circolare che corre dal fronte est al fronte ovest passando da sud, alla quota 22 m circa. Tale struttura è realizzata mediante dei prolun-

gamenti a sbalzo delle travi metalliche principali dell'impalcato dell'Auditorium, oltre il punto di appoggio/sospensione.

## 2. DESCRIZIONE DELLE ANALISI CONDOTTE

### 2.1 Modellazione numerica

Al fine di valutare lo stato di sollecitazione e di deformazione del sistema strutturale è stato messo a punto un modello numerico globale (figura 13) che comprende le strutture della sala plenaria, della cometa e informazioni "lumped" in corrispondenza dell'appoggio sull'auditorium.

Il modello è di tipo elastico-lineare e per rappresentarne la geometria ed il comportamento meccanico impiega elementi finiti del tipo:

- "truss", per la modellazione delle aste delle reticolari spaziali;

- "beam", per la modellazione delle travi soggette anche a flessione;

La cometa si estende su quasi tutto il complesso oggetto di intervento ed è stata considerata nel modello di calcolo insieme alla copertura della plenaria, in quanto quest'ultima costituisce il suo principale elemento di sostegno e controventamento. La cometa poggia sulla copertura, mediante bielle verticali, su 4 punti intermedi e sui 12 punti perimetrali corrispondenti alle colonne in c.c.a.. Sui 4 lati della plenaria sono inoltre presenti aste diagonali che collegano la copertura-plenaria con la stessa fungendo da controvento per quest'ultima.

Completano il sistema di vincolamento della cometa:

- 7 "piramidi rovesciate" che poggiano sulle colonne in c.c.a. esistenti;
- un sistema "piramide+controvento"



Fig. 10 - a) Vista esterna e b) interna dell'auditorium



Fig. 11 - Struttura dell'auditorium



Fig. 12 - Travi di sostegno dell'auditorium, nel riquadro il sistema di appensione delle travi che si trovano tra auditorium e foyer

- anch'esso vincolato alle colonne in c.c.a.;
- c) un appoggio fisso (cerniera sferica) sulla sommità dell'ascensore "Z";
- d) un appoggio scorrevole (collegato alla Cometa da una piramide rovescia "multi-strato") a quota 29,90 m sul portale metallico presente nell'edificio "risalita-city-life";
- e) un appoggio scorrevole a quota 33 m circa sul vano scala "A-B" presente nell'edificio "risalita-city-life";
- f) un appoggio scorrevole a quota 39,60 m circa sulla copertura (anch'essa reticolare spaziale) dell'auditorium previsto nel complesso (oggetto di altra relazione);
- g) due appoggi fissi (cerniera sferica) sull'impalcato-parcheggio (in corrispondenza di colonne - previsto nel complesso e oggetto di progettazione distinta) a quota 0 m e 6,7 m, rispettivamente.

Siccome la cometa è vincolata a diversi edifici (di cui alcuni esistenti e altri invece di nuova costruzione) in fase di progettazione è stato valutato con molta attenzione il sistema di

vincolamento da adottare per la struttura: in alcuni punti sono stati infatti inseriti appoggi mobili per consentire alla reticolare spaziale di risultare svincolata dai movimenti sismici degli edifici sottostanti. Nelle zone invece in cui gli appoggi dovevano essere fissi sono stati considerati spostamenti sismici differenziali imponendo dei cedimenti impressi alla struttura.

I possibili cedimenti differenziali delle fondazioni che sostengono le colonne su cui poggia la copertura della sala plenaria, la flessibilità delle strutture di copertura dell'auditorium (che sostengono la cometa) ed i movimenti relativi tra i controventi in fase sismica, sono messi in conto mediante appropriati "elementi boundary" (figura 14).

Di fatto, l'interazione tra le diverse strutture in caso di sisma è stato uno degli aspetti più articolati da affrontare in sede di progettazione dell'intervento strutturale, prima ancora che di modellazione. Le strutture di cometa, auditorium e sala plenaria, sono interconnes-

se tra loro ed hanno una estensione tale da "coprire e collegare" i diversi corpi di fabbrica del complesso edilizio esistente, oltre che i corpi "minori" realizzati nell'ambito del recupero funzionale del complesso fieristico.

La problematica è ulteriormente complicata dal fatto che le strutture esistenti furono concepite e realizzate in assenza di norme e criteri antisismici: conseguentemente, la distribuzione dei "giunti termici" e le condizioni di vincolo tra impalcati e colonne, erano tali da rendere dinamicamente indipendenti (o, per meglio dire, semi-indipendenti) anche le porzioni che costituivano gli ex-padiglioni fieristici, spesso singoli campi di solaio.

Sul piano progettuale-strutturale è stato quindi necessario cercare un delicato "equilibrio" tra la limitata possibilità di collegare tra loro alcune delle citate porzioni esistenti semi-indipendenti e la realizzazione di un articolato sistema di vincolamento tra le nuove e le vecchie strutture. Occorreva, infatti, evitare che i movimenti relativi tra i corpi di

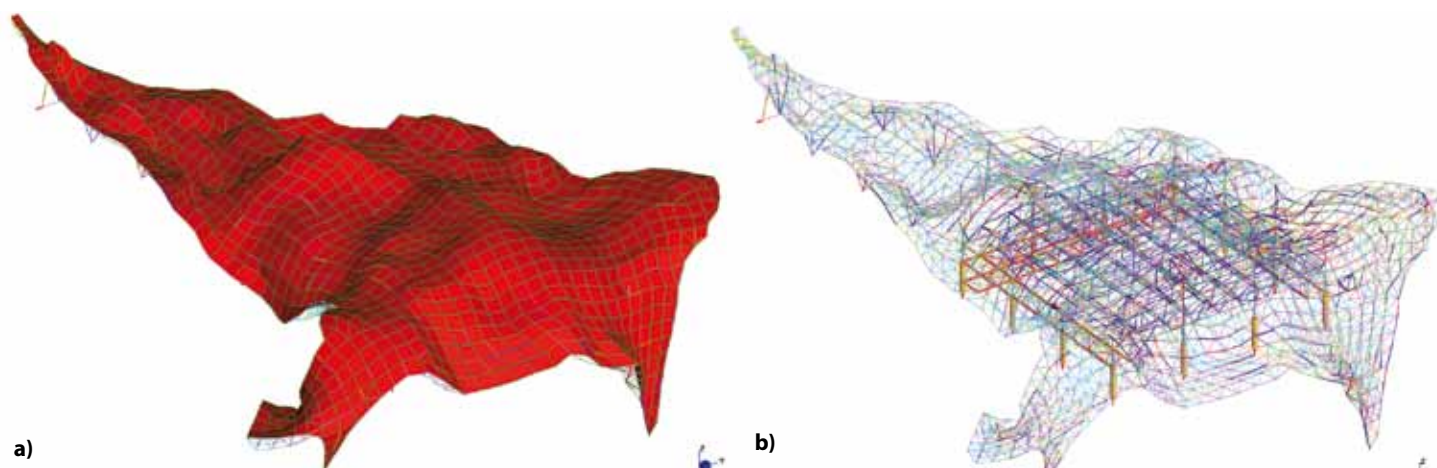


Fig. 13 - Modello globale di sala plenaria e cometa con a) aree di carico e b) senza aree di carico

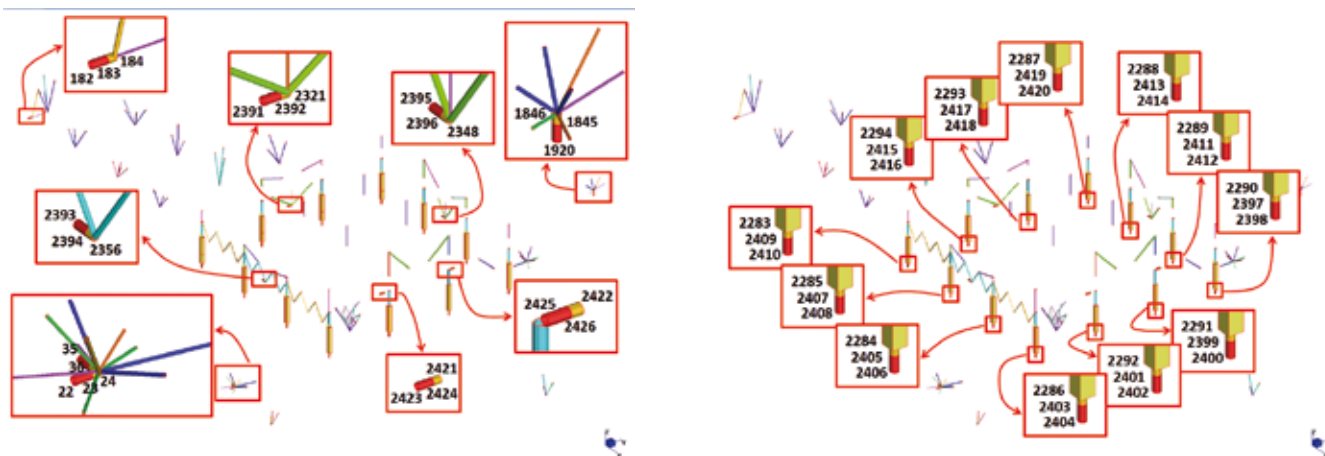


Fig. 14 - Nodi e elementi ausiliari per l'applicazione dei cedimenti

fabbrica esistenti venissero contrastati dalle strutture reticolari spaziali del complesso plenaria-auditorium-cometa, certamente non concepite per fungere da collegamento tra le unità strutturali esistenti. Sofisticati dettagli costruttivi, come quello mostrato in figura 15, sono stati progettati per minimizzare l'interferenza fra le varie sottostrutture. Dal punto di vista numerico-analitico, è stato necessario conciliare due contrapposte esigenze. Da un lato, infatti, vi era la necessità di non complicare ulteriormente i già ardui modelli numerici delle reticolari spaziali interconnesse, con la messa a punto di modelli globali dell'intero agglomerato di padiglioni, includendo sia le vecchie che le nuove strutture, con l'illusorio intento di cogliere le complesse interazioni sismiche ma, di fatto, perdendo ogni possibilità di controllo e di affidabilità dei modelli stessi. Dall'altro lato c'era comunque l'esigenza di tener conto dei numerosi movimenti indipendenti (o semi-indipendenti) tra le unità che sostengono le nuove strutture spaziali, al fine di dimensionare adeguatamente gli elementi resistenti e le dimensioni degli appoggi scorrevoli. A tal fine, si è optato per la separazione dei modelli numerici (strutture nuove ed esistenti) assegnando alle due classi di modelli "condizioni al contorno" che tenessero debitamente e conservativamente conto dei fenomeni appena descritti. L'elevato numero di condizioni al contorno indipendenti ha però richiesto la messa a punto di algoritmi di calcolo che gestissero in modo rapido e

senza perdita di informazioni la grande mole di combinazioni di carico che ne scaturiva, tenendo anche conto del fatto che le analisi di strutture reticolari spaziali richiedono processi iterativi per l'ottimizzazione delle stesse. Gli effetti di secondo ordine sono stati messi in conto in modo esplicito sui "prolungamenti" delle colonne in c.c.a, mediante coppie costituite da due forze di segno opposto applicate alle estremità delle colonne metalliche che costituiscono il prolungamento stesso; ciascuna forza è assunta pari a 200 kN, pari a circa il 2% della forza assiale massima sulle medesime aste. Gli effetti dell'attrito sugli appoggi scorrevoli possono incidere sul dimensionamento delle aste in prossimità degli stessi appoggi. Al fine di tener conto in modo appropriato di tali effetti, sono state messe in conto azioni orizzontali (i vincoli scorrevoli agendo nella direzione verticale) pari al 3% circa della reazione vincolare massima. La superficie della cometa è stata suddivisa in varie aree di carico in modo da poter applicare diversi coefficienti di pressione del vento e poter effettuare combinazioni di carico a scacchiera in modo da impegnare al massimo le varie porzioni di struttura (figura 16). Sulla superficie della cometa si distinguono 3 differenti valori del coefficiente di pressione interna, in funzione della posizione di ciascuna area cui esso risulta associato. Considerata la particolare conformazione della superficie della reticolare "free-form" (non definibile univocamente), tali coeffi-

cienti sono stati desunti, a favore di sicurezza, sulla base dei valori dettati dalla normativa sia nei confronti delle pensiline che delle coperture, integrati dalle informazioni ottenute dai risultati sperimentali in galleria del vento. Facendo riferimento alla numerazione delle aree della cometa mostrata in figura 16, la Tabella 1 riassume i coefficienti di pressione considerati nel modello matematico della cometa.

## 2.2 Analisi sperimentale in galleria del vento [1]

### 2.1.1 Descrizione dei modelli sperimentali

Come specificato al punto 3.3.1 della normativa italiana "Norme tecniche per le costruzioni" (DM 2008) data la particolare forma della struttura presa in considerazione e le sue notevoli dimensioni occorre studiare con prove sperimentali l'effetto dell'azione del vento sulla struttura.

Lo studio aerodinamico della copertura del nuovo centro congressi "cometa" è stato effettuato presso la Galleria del Vento del Politecnico di Milano su due tipi di modelli:

- un modulo in scala 1:1 di un pannello di copertura in alluminio (figura 17.a) indirizzato anche a fornire dati necessari alla verifica a fatica dei collegamenti;
- un modello rigido in scala 1:100 dell'intera copertura (figura 17.b).

Obiettivo del primo studio è determinare la distribuzione della differenza di pressione che si esercita sul pannello forato della copertura e delle forze che si scaricano sulla



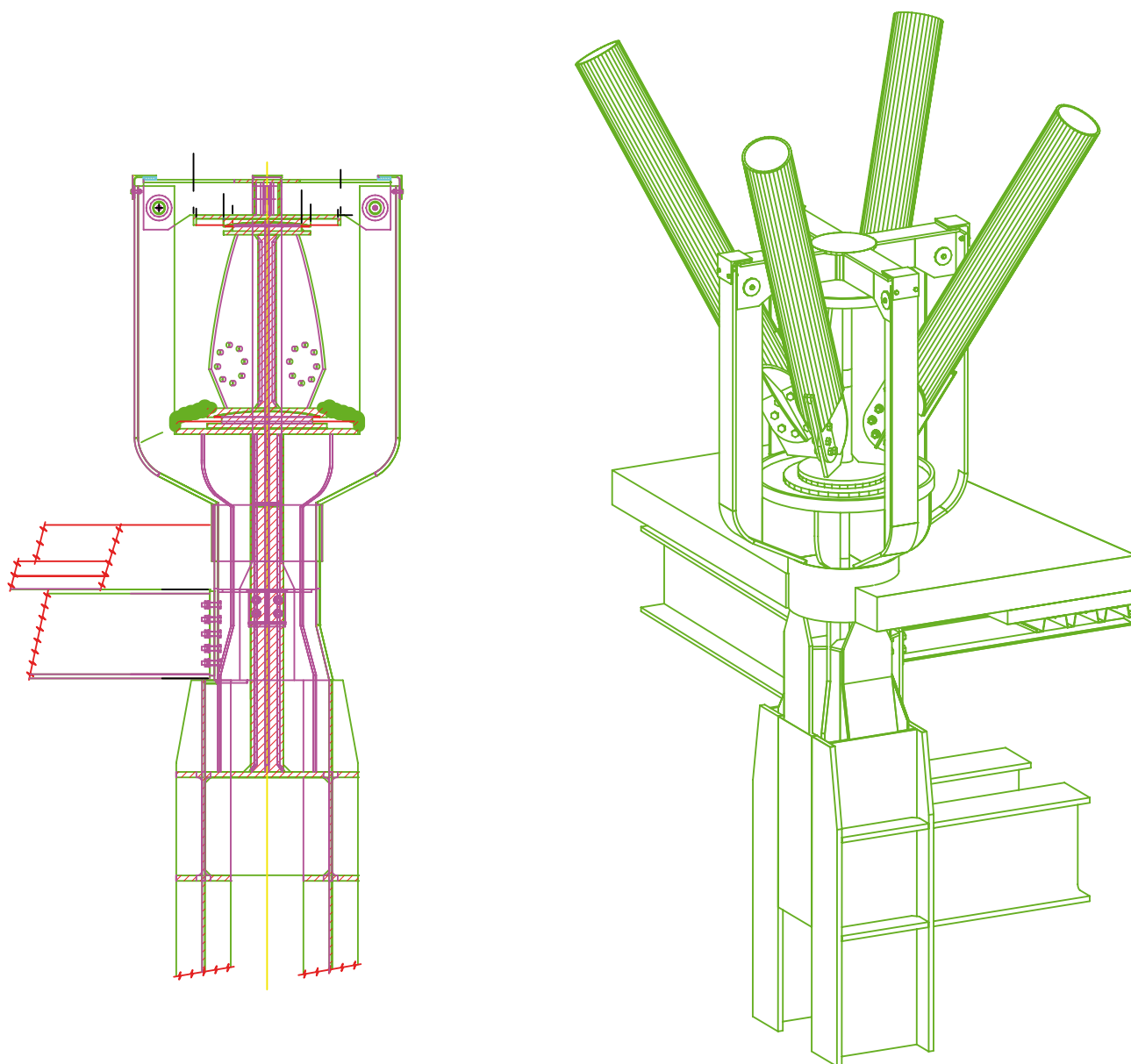


Fig. 15 - Dettaglio costruttivo che fornisce un vincolo bidirezionale verticale e permette spostamenti orizzontali e rotazioni

sottostruttura di supporto. A tale scopo un modulo della copertura delle dimensioni di 4x2 m, comprensivo di struttura di supporto e pannello forato di copertura, è stato installato nella sezione di prova a strato limite della galleria del vento su un supporto dinamometrico che garantisce di poter variare l'angolo di attacco al vento incidente. Il modulo è stato inoltre strumentato con 32 prese di pressione in grado di misurare la differenza di pressione in 16 punti distribuiti sul pannello forato.

Data la disposizione estremamente variabile che i diversi moduli possono assumere sulla copertura, sono state investigate due configurazioni che si distinguono per la disposizione dei pannelli forati rispetto alla struttura di supporto, ciascuna secondo 13 diversi an-

goli di attacco rispetto al vento. Nella configurazione 1 i correnti tubolari della lamiera in alluminio risultano perpendicolari al vento (figura 17. a), mentre nella configurazione 2: i correnti tubolari della lamiera in alluminio risultano longitudinali rispetto alla direzione del vento (figura 17. b).

I risultati di tale studio sono stati utilizzati per la progettazione del modello in scala 1:100 dell'intera copertura. Al fine di riprodurre in scala 1:100 la copertura comprensiva della struttura di supporto sottostante, non si è proceduto alla scalatura geometrica dello schema costruttivo proposto per la struttura al vero ma si sono effettuate scelte progettuali differenti. Il pannello forato è stato inizialmente caratterizzato aerodinamicamente in termini di perdita di carico che esso è in

grado di generare quando viene collocato all'interno di un mono condotto che obbliga il flusso ad attraversare lo schermo poroso. La lamiera forata utilizzata per il modello in scala 1:100 non ha la stessa porosità di quello reale ma realizza una perdita di carico analoga. Le nervature e i risvolti del pannello forato sono stati semplificati riducendoli in numero ed aumentandoli in altezza per ottenere un effetto aerodinamico equivalente.

Lo studio aerodinamico effettuato sull'intera copertura in scala 1:100 si propone di definire i carichi eolici che sollecitano le diverse parti della copertura in condizioni di vento caratteristiche dello strato limite terrestre presente nel sito dove verrà edificata la struttura, anch'esse riprodotte in scala modello.

Gli effetti aeroelastici non sono oggetto del

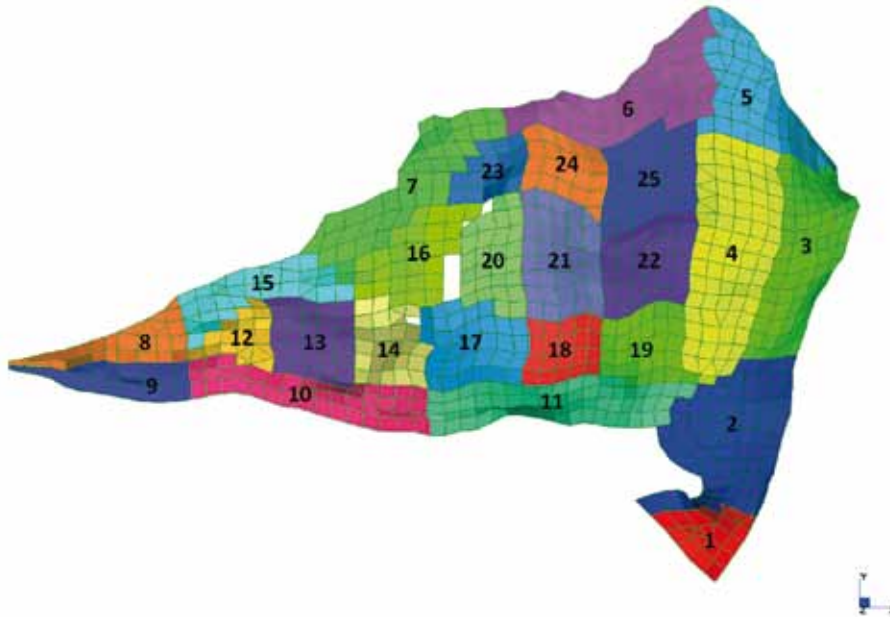


Fig. 16 - Suddivisione delle aree di carico della cometa

presente studio aerodinamico e le caratteristiche di rigidità del modello di copertura non rappresentano quelle della copertura al vero ma sono realizzate in modo da minimizzare la dinamica della struttura per non alterare il flusso.

Allo scopo di ricostruire lo strato limite atmosferico in scala modello, è stata identificata, mediante prove di caratterizzazione anemometrica del flusso, una configurazione di prova caratterizzata da 17 generatori passivi di turbolenza ("Spires") posti all'inizio della camera di prova, e da rugosità distribuita sul pavimento in grado di riprodurre il flusso in termini di contenuto armonico di turbolenza, lunghezza di scala integrale e profilo di velocità.

Le prove sul modello completo di copertura

in regime di flusso turbolento sono state realizzate posizionando la copertura all'interno della ricostruzione della orografia urbana per un'area circolare di 650 m di raggio full scale, centrata attorno alla copertura stessa.

Sono stati considerati 2 scenari di orografia circostante differenziati in base alla presenza delle 3 torri del progetto di CityLife che saranno costruite nella zona della copertura in tempi successivi.

Sono state considerate 17/19 differenti direzioni di esposizione al vento (6 per il caso di orografia in presenza delle torri CityLife per cui si sono indagate solo le esposizioni in cui tali palazzi si trovano sopravento alla copertura). Per ciascun angolo di provenienza del vento sono state misurate le 3 componenti di forza e i tre momenti aerodinamici indotti

dal vento su 6 diversi settori della copertura mediante bilance dinamometriche a 6 componenti. A tale scopo, la copertura è stata suddivisa in 6 settori, riportati in figura 19, tra di loro meccanicamente separati in modo da poter misurare in modo indipendente, mediante bilance dinamometriche a 6 componenti, le forze che si scaricano su ciascun settore.

### 2.2.2 Commento dei risultati ottenuti

I risultati sperimentali relativi alle forze aerodinamiche misurate sono forniti in termini di coefficienti adimensionali secondo le convenzioni riportate in figura 20.

$$C_x = \frac{F_x}{\bar{q}_H BL}$$

$$C_z = \frac{F_z}{\bar{q}_H BL}$$

$$C_{My} = \frac{\bar{M}_y}{\bar{q}_H BL}$$

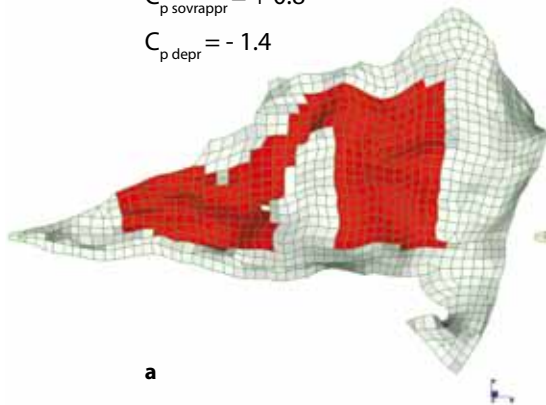
In cui  $\bar{q}_H = \frac{1}{2} \rho U_x^2$  è la pressione dinamica media valutata in corrispondenza di una quota di riferimento mentre B ed L rappresentano rispettivamente la larghezza e la lunghezza del modulo della copertura (per la definizione delle grandezze si veda la Tabella 2).

Nel modello in scala 1:1 sono state misurate le pressioni superficiali. Tali pressioni sono fornite in termini di coefficienti adimensionali:

$$C_{p,i}(t) = \frac{p_i(t) - \bar{p}_s}{\bar{q}_H}$$

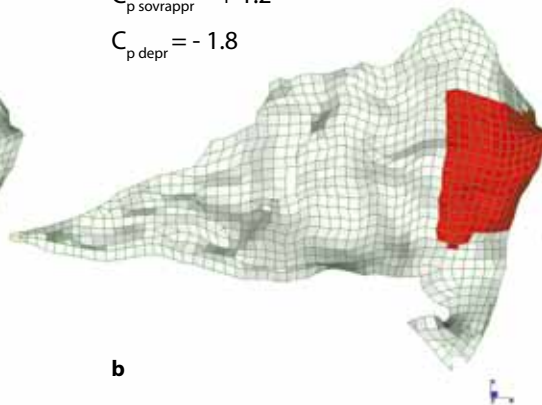
In cui  $p_i$  è la pressione misurata in corrispondenza della i-esima presa sulla superficie del modello e  $\bar{p}_s$  è il valor medio della pressione statica di riferimento in flusso indisturbato.

$C_{p \text{ sovrapp}} = + 0.8$   
 $C_{p \text{ depr}} = - 1.4$



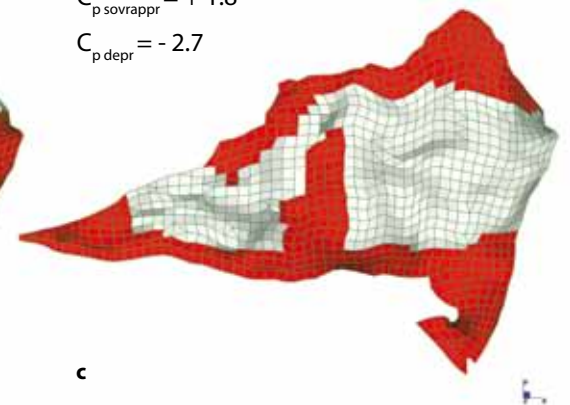
a

$C_{p \text{ sovrapp}} = + 1.2$   
 $C_{p \text{ depr}} = - 1.8$



b

$C_{p \text{ sovrapp}} = + 1.8$   
 $C_{p \text{ depr}} = - 2.7$



c

Tabella 1 - Valori dei coefficienti di pressione del vento nelle varie aree della "cometa"

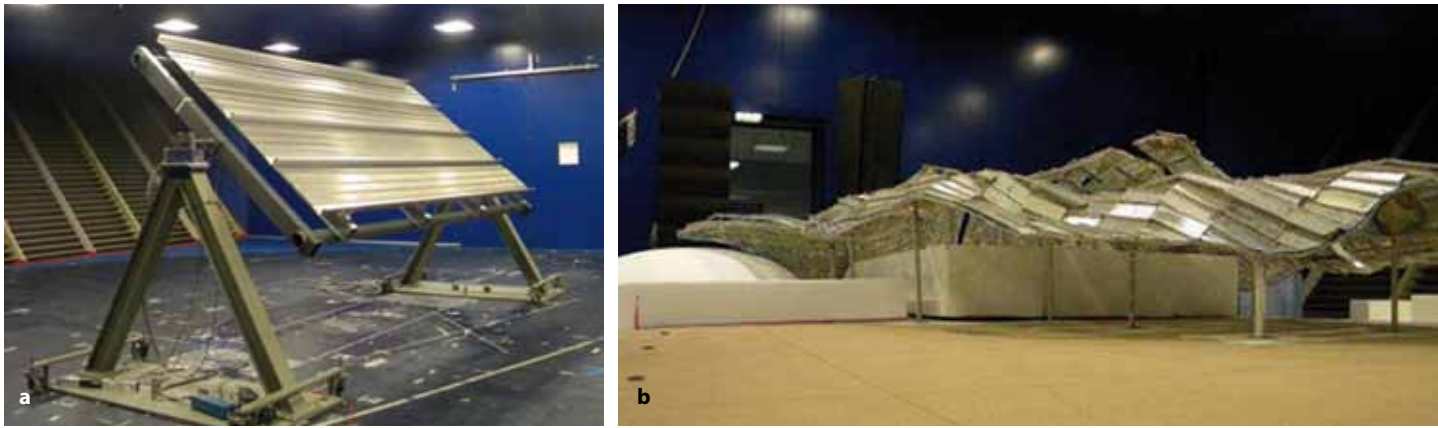


Fig. 17 - a) Modulo in scala 1:1 di un pannello di copertura in alluminio, b) Modello rigido in scala 1:100 dell'intera copertura

Per ciascuna esposizione è riportata la distribuzione di coefficienti di pressione relativa al lato superiore e a quello inferiore della copertura e la loro differenza.

Il modello in scala 1:1 è stato provato in flusso laminare per diversi angoli di attacco del vento con la finalità di misurare i valori di pressione sulle superfici sopravento e sottovento e le forze comunicate alla struttura portante sottostante.

Sono state considerate 2 tipologie di modulo che si differenziano in base alla disposizione dei pannelli forati, come descritto nel paragrafo precedente.

La differenza di pressione tra parte sopravento e parte sottovento raggiunge, in termini di coefficiente di pressione valori superiori

a 2 per angoli di attacco inferiori a -40 gradi e pari a -2 per angoli di attacco maggiori di 30 gradi per entrambe le configurazioni provate.

La distribuzione delle pressioni sulla superficie rimane pressoché uniforme per la configurazione 1 ad eccezione dell'angolo di attacco -20 gradi dove si nota una striscia caratterizzata da minor valori di pressione in prossimità del bordo di attacco (figura 20.a). La configurazione 2 mostra una maggiore variabilità della distribuzione della differenza di pressione e già a partire da angoli di attacco superiori a 10 gradi o minori di -10 gradi si notano gradienti di pressione in direzione dal bordo di attacco verso quello di uscita (figura 20.b).

Tale comportamento dipende dall'aver allineato al vento le nervature del pannello forato che consentono al vento stesso di incanalarsi tra le nervature e di generare gradienti di pressione lungo la direzione del vento.

L'andamento dei coefficienti delle forze trasmesse dal modulo di copertura alla struttura sottostante è molto simile per le due configurazioni di prova. Il coefficiente di resistenza  $C_x$  mostra un comportamento simmetrico attorno all'angolo di attacco  $0^\circ$  dove assume un valore pari a 0.2 (figura 21.a). Questo valore è principalmente legato alla presenza dell'intelaiatura di supporto come verificato da prove effettuate sulla sola struttura di supporto priva del pannello forato. Il coefficiente di portanza  $C_z$  mostra un andamento

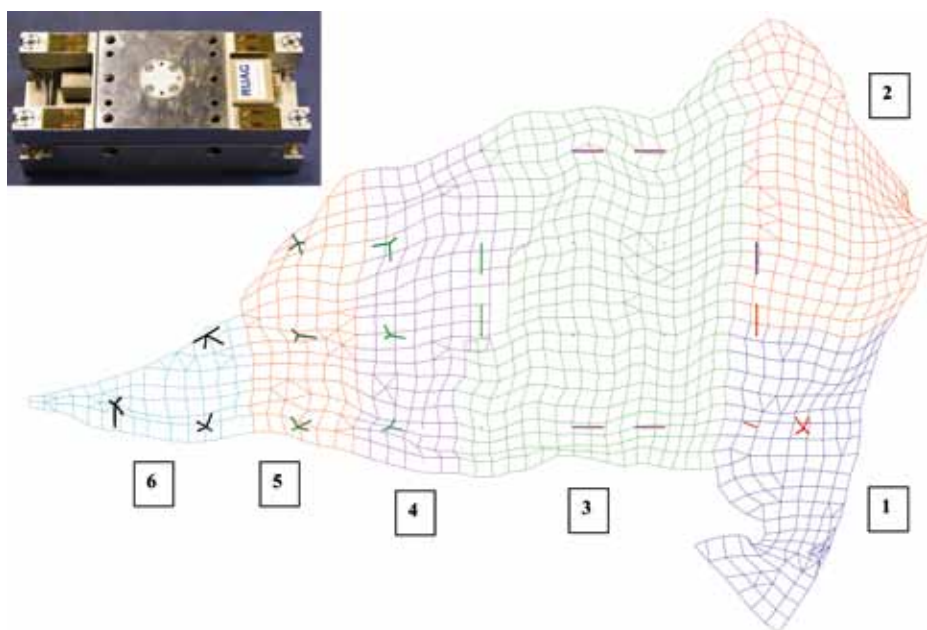


Fig. 18 - Rappresentazione grafica dei 6 settori in cui è stata divisa la copertura e particolare della bilancia a sei componenti

	MODELLO 1:1 Configurazione 1		MODELLO 1:100 Configurazione 2
B [m]	2	2	0.13
L [m]	4	3.5	0.25
$H_{ref}$	1.5	1.5	1

Tabella 2 - Grandezze caratteristiche per la definizione dei coefficienti aerodinamici

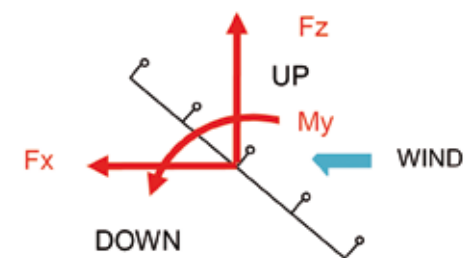


Fig. 19 - Convenzioni adottate per la definizione delle forze sul modulo della copertura

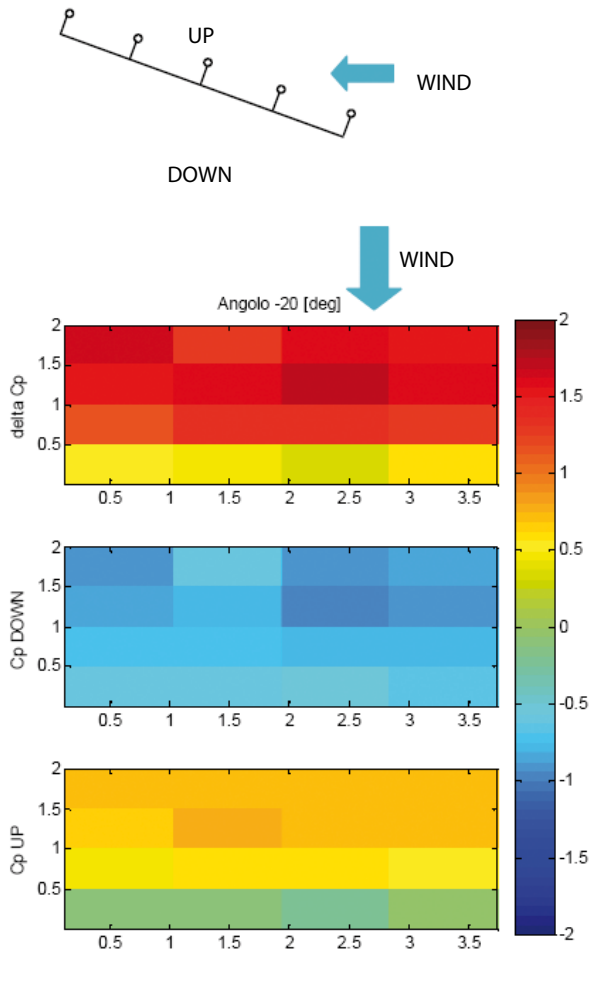


Figura 5.8 Distribuzione dei coefficienti di pressione superficiale per angolo di attacco pari a -20 deg

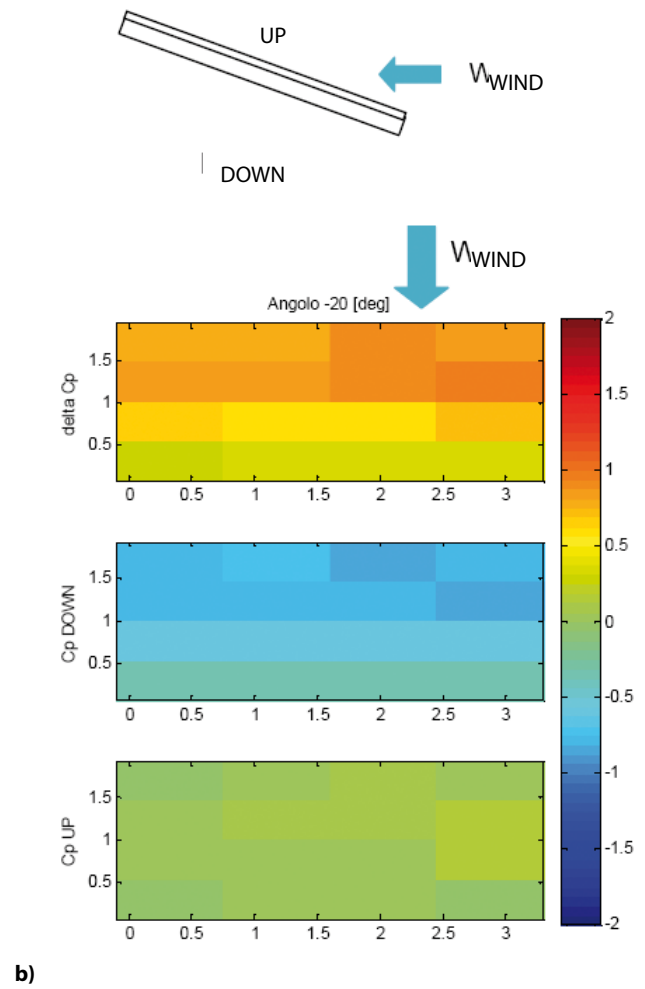


Figura 5.24 Distribuzione dei coefficienti di pressione superficiale per angolo di attacco pari a -20 deg

Fig. 20 - Distribuzione delle pressioni sulla superficie del pannello in scala 1:1 nella configurazione di prova 1 (a) e 2 (b). Sono stati riportati i risultati delle prove effettuate per un angolo di attacco di 20°.

pressappoco lineare con l'angolo di attacco con una pendenza media tra -20 gradi e 20 gradi pari a 1.4 (figura 21.b).

I valori del coefficiente di coppia aerodinamica  $C_My$  risultano essere sempre molto piccoli compresi tra un massimo di 0,03 e un minimo pari a -0,03.

Le prove effettuate su modello completo di

copertura in scala 1:100 sono state effettuate riproducendo in scala, mediante generatori passivi di turbolenza, le caratteristiche del vento tipiche della zona dove verrà costruita la copertura. In figura 22 è riportato il profilo verticale degli indici di turbolenza (a) e della scala integrale Lux (b).

I coefficienti aerodinamici definiti secondo

le convenzioni e le dimensioni di riferimento mostrano come la forza in direzione y assuma valori maggiori di quella in direzione x solo per i moduli 1 e 2 raggiungendo valori di -0,18 per angoli di esposizione attorno a 120 gradi dove il coefficiente manifesta anche la maggiore variabilità dinamica.

Valori positivi pari a 0,1 sono raggiunti solo

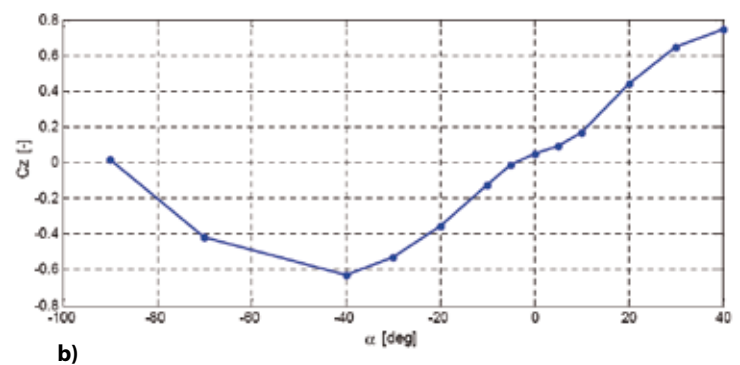
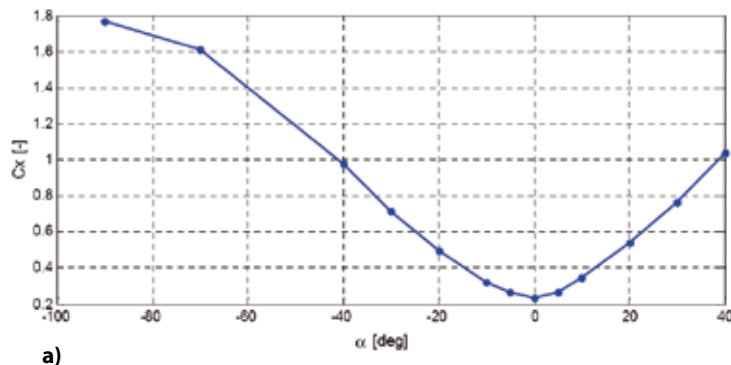


Fig. 21 - Andamento del coefficiente aerodinamico  $C_x$  (a) e  $C_z$  (b) in funzione dell'angolo di attacco

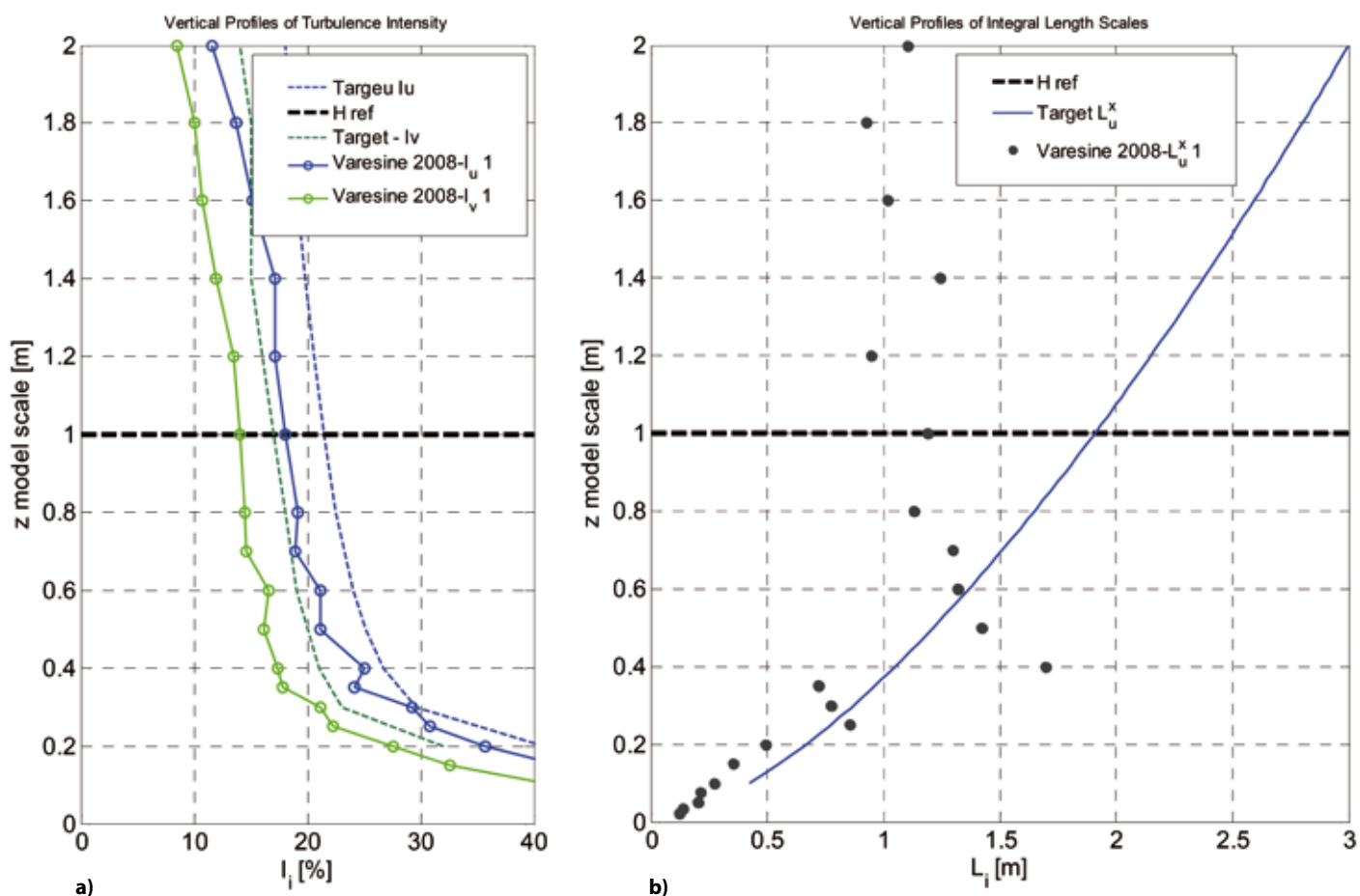


Fig. 22 - a) Profilo verticale degli indici di turbolenza, b) Profilo verticale della scala integrale  $L_x$

per il modulo 1 in prossimità dei 300 gradi anche se con fluttuazioni dinamiche più contenute.

Il coefficiente di forza in direzione x assume valori ed andamenti confrontabili per tutti i moduli con massimo positivo (circa 0,1) raggiunto attorno a 90 gradi per i moduli 1 e 2 e attorno a 20 gradi per gli altri moduli. Il valore minimo di tale coefficiente di forza, pari a circa -0,07, si manifesta attorno a 200 gradi per tutti i moduli (figura 23.a).

La forza di portanza risulta essere inferiore alle altre due componenti di forza per tutti i moduli.

I coefficienti di momento aerodinamici assumono valori molto piccoli per i primi 4 moduli mentre  $CM_x$  e  $CM_y$  diventano più rilevanti sul modulo 5.

I valori di forza misurati dalle bilance sono rappresentativi della forza totale che i pilastri che sorreggono il settore considerato scaricano a terra.

È stata infine verificata la condizione di

esercizio in presenza delle torri del progetto CityLife per verificare eventuali effetti di scia. La presenza delle torri ha portato ad un maggior grado di schermatura del vento che agisce sulla copertura portando ad una riduzione del valore assoluto della forza media e della fluttuazione dinamica per i primi due moduli, per angoli compresi tra 90 e 150 gradi.

### 2.3 Analisi sperimentale a fatica dei collegamenti [2]

#### 2.3.1 Descrizione dei modelli sperimentali

Lo studio della resistenza a fatica di un modulo in scala 1:1 della Copertura del nuovo centro congressi "cometa" è stato effettuato presso i laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano.

Lo studio è stato condotto su di un modulo di  $4 \times 2$  m fornito dall'impresa costruttrice per verificare la resistenza a fatica di tre diversi tipi di collegamento fra la copertura in Kalzip ai suoi apposti sostegni.

Il montaggio del sistema è stato realizzato con la seguente procedura: il primo pannello è stato posizionato sulla struttura e vincolato con le viti solamente dal lato libero, successivamente il pannello adiacente è stato prima vincolato al precedente mediante crimpatura dei bordi, ed in un secondo momento fissato alla struttura mediante viti, lasciando sempre svincolato il lato libero. La procedura è stata via via ripetuta fino ad arrivare al fissaggio dell'ultimo pannello che è stato avvitato alla struttura sottostante da entrambi i lati.

La copertura correttamente assemblata con le travi verticali omega (struttura secondaria) è stata quindi vincolata ad omega H100 orizzontali (struttura primaria) con modalità analoga a quella realizzata in opera. L'assemblaggio così ottenuto (struttura primaria e secondaria) è stato quindi fissato a terra mediante delle travi rigide (figura 24.a). Questo ultimo collegamento può differire dalle condizioni di vincolo della struttura in opera

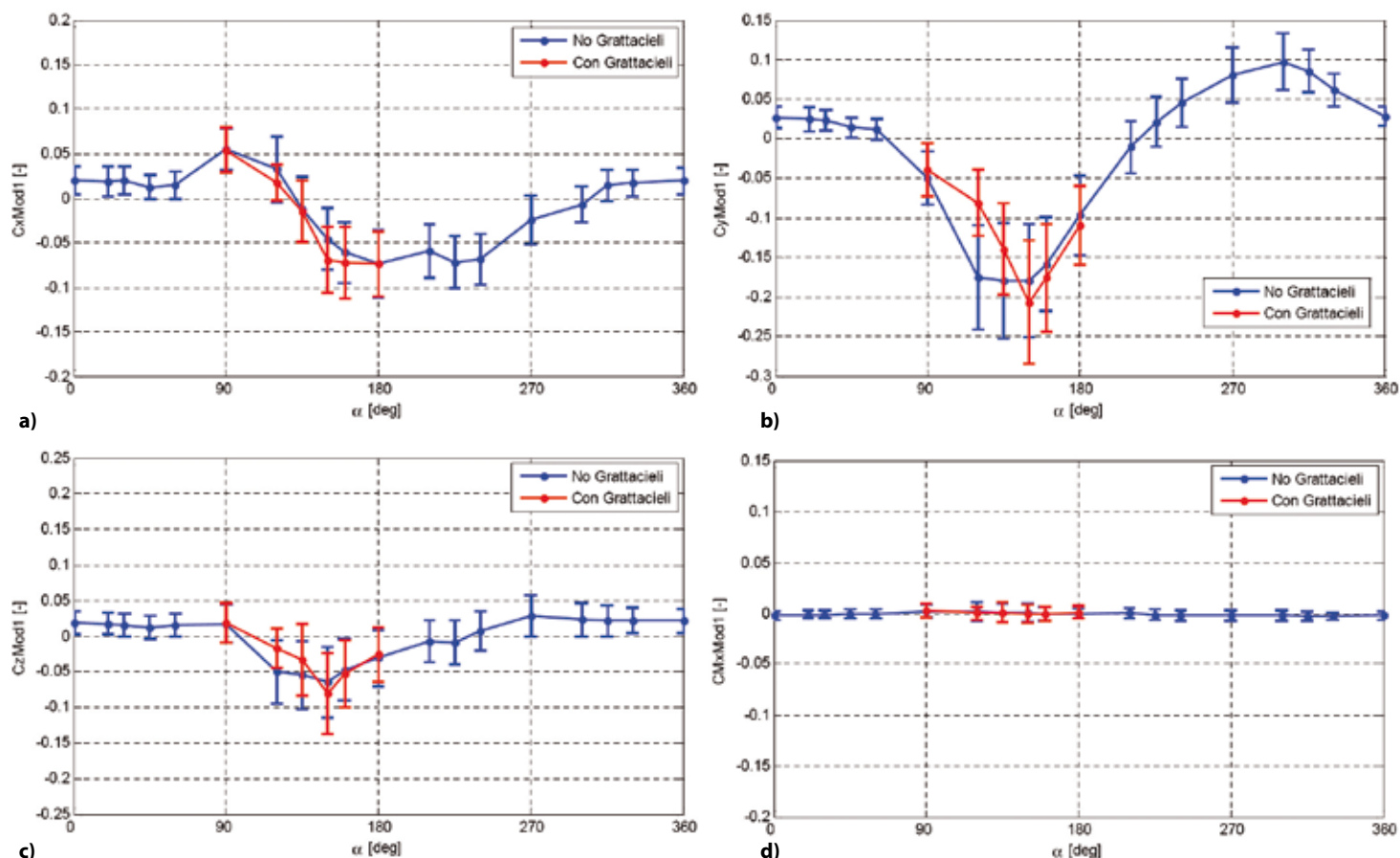


Fig. 23 - Andamento del coefficiente aerodinamico Cx (a), Cy (b), Cz (c) e CMx (d) per il Modulo 1 (valori medi e deviazione standard) al variare dell'angolo di attacco e in presenza/assenza dei grattacieli di CityLife

tuttavia non influisce nella valutazione del comportamento a fatica della copertura. Il pannello è stato sollecitato mediante un carico distribuito simulante l'effetto delle azioni eoliche agenti nelle reali condizioni operative. La stima del carico applicato è stata effettuata a partire dalle prove condotte in Galleria del Vento su una porzione di copertura analoga. Una porzione di modulo (4 m x 1 m) è stata sottoposta ad una sollecitazione distribuita trasmessa mediante 24 molle opportunamente dimensionate in modo da fornire un carico pari alla forza aerodinamica attesa nelle reali condizioni operative della struttura (figura 24.b). La copertura è stata verificata simulando un'azione del vento media che tendesse a spingere la copertura verso i suoi supporti ovvero simulando un angolo di attacco medio del vento negativo per 1000000 cicli.

### 2.3.2 Commento dei risultati ottenuti

Solo per una tipologia di collegamento a vite (che è poi stata impiegata) le prove con-

dotte sulla copertura sono state completate senza che si verificassero rotture del sistema di vincolo dopo 1.000.000 di cicli di carico. Tuttavia si è registrata la comparsa di crepe nella copertura a partire dai 150.000 cicli in prossimità della curvatura della trave ad omega dove la copertura si flette per effetto

dell'irrigidimento dovuto al vincolo con le travi (figura 25). In particolare la zona centrale della copertura risulta essere la più critica per questo tipo di sollecitazione perché la maggiore libertà di movimento delle zone agli estremi le rende meno sollecitate alla flessione.



Fig. 24 - a) Vincolo a terra della copertura e delle travi di appoggio durante la prova a fatica, b) Modulo di copertura e sistema di distribuzione della forza

### 3. TECNOLOGIA COSTRUTTIVA, MATERIALI E COMPUTO

#### 3.1 Produzione e test dei collegamenti sfera-bullone-cono

Le strutture principali della copertura della sala plenaria, dell'auditorium e della cometa (quest'ultima adattandosi il più possibile alla forma libera - "free form" - prevista per le superfici di finitura), sono state realizzate mediante un sistema reticolare spaziale con nodi tipicamente costituiti dall'assemblaggio sfera-bullone-cono (figura 26.a e b) e in alcuni casi da nodi in carpenteria metallica. Essendo la tecnologia di produzione dei

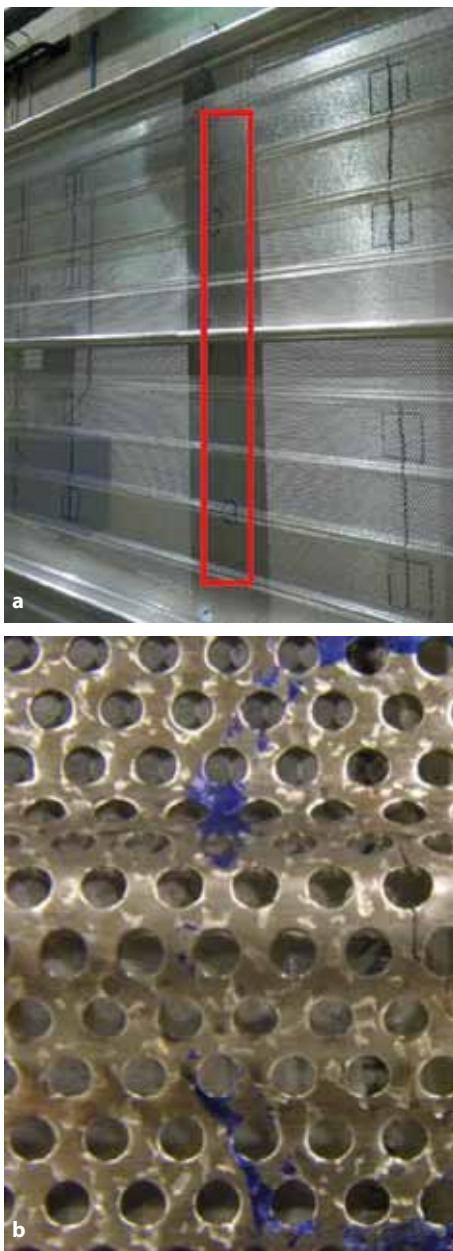


Fig. 25 - a) Zona della copertura interessata dalla comparsa di crepe, b) Esempi di crepe nella copertura

nodi a sfera definita dal produttore, il dimensionamento e la verifica di sicurezza dei nodi stessi sono stati eseguiti dallo stesso produttore, e sottoposti alla validazione della D.L. e del Collaudatore, sulla base delle azioni determinate secondo quanto riportato nella relazione di calcolo. I nodi sono stati prodotti mediante lavorazioni in officina con macchine a controllo numerico (figura 26.c) e d)).

I margini di sicurezza da rispettare nel dimensionamento dei nodi devono essere non inferiori a quelli adottati nella verifica delle aste che vi convergono. Per cui nel dimensionamento dei nodi sono state considerate non solo le combinazioni che massimizzano le azioni (di trazione e di compressione) sulle singole aste che convergono nel nodo stesso, ma anche le combinazioni che possono risultare sfavorevoli agli stati tensionali nella sfera.

La progettazione e la verifica della sicurezza dei nodi sono state effettuate secondo i criteri della "progettazione assistita da prove" delineati nella norma UNI EN 1990:2006 13/04/2006 "Eurocodice - Criteri generali di progettazione strutturale" (con particolare riguardo all'adozione di coefficienti di sicurezza coerenti con il numero ed il tipo di prove effettuate).

Lo stato tensionale dei nodi sferici e dei conici di estremità delle aste è stato quindi valutato mediante un'analisi statica lineare di modelli numerici solidi tridimensionali discretizzati in elementi finiti di tipo brick.

La risultante delle forze di progetto agente su un'asta è stata applicata come pressione distribuita uniformemente sull'effettiva area di contatto. Dalla modellazione numerica è emerso che le tensioni ricavate, valutate secondo il criterio di Von Mises, rientrano sempre entro la resistenza elastica di snervamento  $f_y$  del materiale ridotta del coefficiente di sicurezza  $\gamma=1,05$ .

Al fine di validare i risultati ottenuti dal modello numerico sono state effettuate una serie di prove sperimentali sulle aste e i nodi della struttura reticolare per verificare che il valore del carico di rottura sperimentale

coincidesse con quello teorico e che fosse rispettata la gerarchia delle resistenze.

#### 3.2 Procedura di montaggio della "cometa"

Il montaggio della struttura reticolare spaziale "cometa" è stato effettuato prima a terra partendo dalle aste e dalle sfere sfuse e assemblandole insieme per formare sottostrutture di struttura che sono stati successivamente sollevati da una gru e montati. Una volta completata la struttura reticolare spaziale è stato montato il manto di copertura costituito da pannelli di alluminio forati. I pannelli di alluminio sono alloggiati sopra appositi arcarecci che trasferiscono il carico sui nodi della struttura reticolare.

#### 3.3 Descrizione dell'acciaio impiegato

- Tubi circolari laminati a caldo secondo EN 10210-2
- Tubi circolari formati a freddo e saldati secondo EN 10219-2
- Profili aperti laminati a caldo secondo EN 10034

I tubi previsti per le reticolari spaziali devono essere tutti del tipo "laminati a caldo"

Per strutture interne:

- Acciaio da carpenteria secondo EN 10025S355J0 con valore caratteristico minimo della tensione a snervamento  $f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2$

Designazione europea: EN 10210-S 355 J0

Per strutture esterne o di copertura:

- Acciaio da carpenteria secondo EN 10025S355J2 con valore caratteristico minimo della tensione a snervamento  $f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2$

Designazione europea: EN 10210-S 355 J2

Acciaio adottato per la realizzazione dei nodi sferici:

Tipo di acciaio: C45

Densità:  $7.850 [\text{kg/m}^3]$

Resistenza allo snervamento: 496 (Mpa)

Resistenza massima a trazione: 700

(Mpa)



Fig. 26 - a) Nodo in opera viti e con viti e coni, b) Viti e coni c) e d) Lavorazione con macchine a controllo numerico del nodo sferico e del cono terminale delle aste

Modulo di Young: 210.000 (Mpa)

Coefficiente di espansione:

0,000012 (1/°C)

Solo ove espressamente indicato:

- Acciaio secondo EN 10025-2S450 con valore caratteristico minimo della tensione a snervamento  $f_{yk}$  440 N/mm<sup>2</sup>

Designazione europea: EN 10025-S 450

Solo ove espressamente indicato:

- Acciaio secondo EN 10113S460 M con valore caratteristico minimo della tensione a snervamento  $f_{yk}$  460 N/mm<sup>2</sup>
- valore caratteristico minimo della tensione di rottura  $f_{tk}$  610 N/mm<sup>2</sup>
- valore minimo dell'allungamento a rottura 19%

Designazione europea: EN 10113-S 460 M

#### 4. INFORMAZIONI SUI TRATTAMENTI ADOTTATI PER LA DURABILITA'

La protezione dalla corrosione dei profili metallici è stata effettuata mediante zincatura a caldo, secondo UNI 5744 o ciclo di verniciatura secondo specifiche di capitolato.

Le saldature dei profili chiusi a cassone de-

vono essere continue tali da impedire le infiltrazioni di acqua e quindi la formazione di un ambiente umido favorevole allo sviluppo di fenomeni corrosivi non controllabili. In alternativa è stata prevista la possibilità di accedere al loro interno per interventi di manutenzione con periodicità stabilita in funzione del trattamento protettivo iniziale e dell'aggressività dell'ambiente.

#### 5. COMPUTO DELLE STRUTTURE METALLICHE DI COPERTURA

Il peso degli elementi strutturali in acciaio è il seguente:

- Reticolare spaziale free form "cometa": 630 t
- Reticolare spaziale sala plenaria: 460 t
- Strutture auditorium: 190 t (reticolare spaziale)
- Altre strutture principali: 450 t

**Prof. dr. ing. Massimo Majowiecki,**

Università IUAV, Venezia

**Dr. ing. Nicola Cosentino,**

Studio Majowiecki, Bologna

#### CREDITS

##### Proprietario:

Fondazione "Ente autonomo fiera internazionale di Milano"

##### Progetto definitivo architettonico, sistemazioni esterne e Direzione artistica:

Mario Bellini Architect(s)

##### Progetto definitivo architettonico e

Direzione artistica opere interne: Studio Pierluigi Nicolini

##### Impresa Mandataria:

Gia.Fi Costruzioni S.p.a.

##### Impresa Mandante:

Costruzioni Giuseppe Montagna S.r.l.

**Impresa realizzatrice della struttura reticolare spaziale della cometa e della sala plenaria:** ECO SPACE SYSTEM S.r.l., Abano Terme (Padova)

**Impresa realizzatrice della struttura reticolare spaziale dell'auditorium:**

MERO Italiana S.p.a.

##### Coordinatore generale della progettazione:

Ing. Antonio Planchenstainer

##### Progettazione architettonica:

Arch. Luca Jop, arch. Domenico La Gioia

##### Progettazione strutturale:

Prof. ing. Massimo Majowiecki

##### Progettazione impianti termo-fluidici:

Ing. Gabriele Raffellini

##### Progettazione impianti elettrici:

Ing. Paolo Rocchi, ing. Fabio Ciani

##### Progettazione impianti speciali:

Ing. Paolo Rocchi, ing. Fabio Ciani

##### Direttore dei lavori:

Ing. Rocco Nino Sallustio

#### Bibliografia

[1] Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica: "Prove in Galleria del Vento sulla copertura del Nuovo Centro Congressi "Cometa"", del 20 aprile 2010

[2] Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica: "Relazione prova su commissione prove a fatica sulla copertura del nuovo Centro Congressi "Cometa""