

Durante la progettazione della copertura dei percorsi pedonali nell'area espositiva di EXPO 2015 è stata seguita l'impostazione distributiva e funzionale proposta dall'ufficio di piano nel Masterplan EXPO 2015. L'indirizzo del Masterplan è quello di una impostazione "light" della soluzione progettuale, adottando una tipologia-morfologia che induce nell'immaginario collettivo una sensazione leggera, semplice, quasi arcaica: la tenda, in antitesi con il dominante "Megatrend" delle soluzioni Expo precedenti. Allo scopo di conservare il valore dell'idea progettuale nelle fasi successive di progettazione fino alla realizzazione si è deciso di impiegare una tensostruttura a doppio effetto con la copertura in membrana posta da un lato sui cavi di intradosso e dall'altro sui cavi di estradosso, garantendo così un gradevole effetto estetico di movimento e permettendo anche un agevole deflusso dell'aria calda al di fuori del volume coperto dalle tende. Nell'articolo sono descritte le principali scelte architettonico-strutturali prese durante le varie fasi progettuali.

The design of the roof of the pedestrian walkways for the EXPO 2015 exhibition structure adopted the distribution and functional methods proposed by the EXPO 2015 Masterplan Project. The Masterplan approach is to adopt a lightweight version of the design solution, using a typology/morphology which creates a slimline, simple, almost archaic sensation in the collective imagination, in the shape of a curtain, in antithesis with the dominant megatrend of the previous Expo solutions. With a view to retaining the value of the design idea in the later phases and up to the construction stage, the decision was taken to use a dual effect tensile structure, with the membrane roof laid on the intrados cables on the one side and on the extrados cables on the other, thus guaranteeing a pleasant aesthetic effect of movement and allowing warm air to flow outside the volume covered by the curtains. This article describes the main architectural and structural decisions taken during the various design phases.

Copertura del percorso pedonale dell'area espositiva di EXPO 2015 Milano

Roof of the pedestrian walkway for the Milan Expo 2015 exhibition complex

Massimo Majowiecki

1. INTRODUZIONE

1.1 Impostazione concettuale

Risulta evidente dall'esame dell'impostazione distributiva e funzionale del Masterplan EXPO 2015 (figura 1), definita dall'ufficio di Piano di EXPO 2015, che l'impostazione generale della progettazione sia stata indirizzata dalla consapevolezza di una necessaria tendenza dell'umanità verso la ricerca di soluzioni costruttive Eticamente Sostenibili, nell'ambito della responsabilità della civiltà tecnologica. Questa filosofia progettuale è coerente con il tema generale della manifestazione espositiva incentrata sull'alimentazione e la ricerca di innovazioni che garantiscano uno sviluppo sostenibile per il pianeta.

Le immagini grafiche del Masterplan evidenziano chiaramente l'indirizzo concettuale con l'impostazione "light" della soluzione



Fig. 1 - Masterplan dell'area espositiva EXPO



Fig. 2 - Impostazione concettuale del progetto preliminare

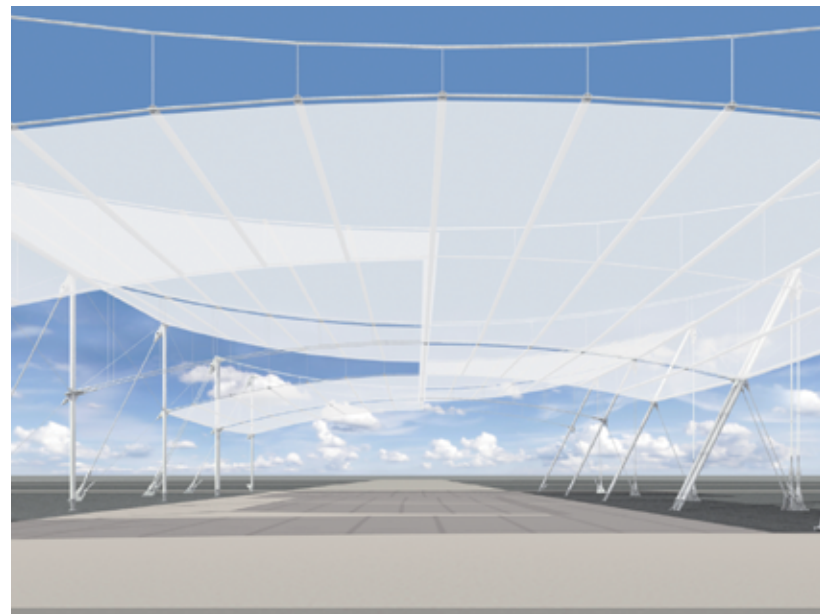
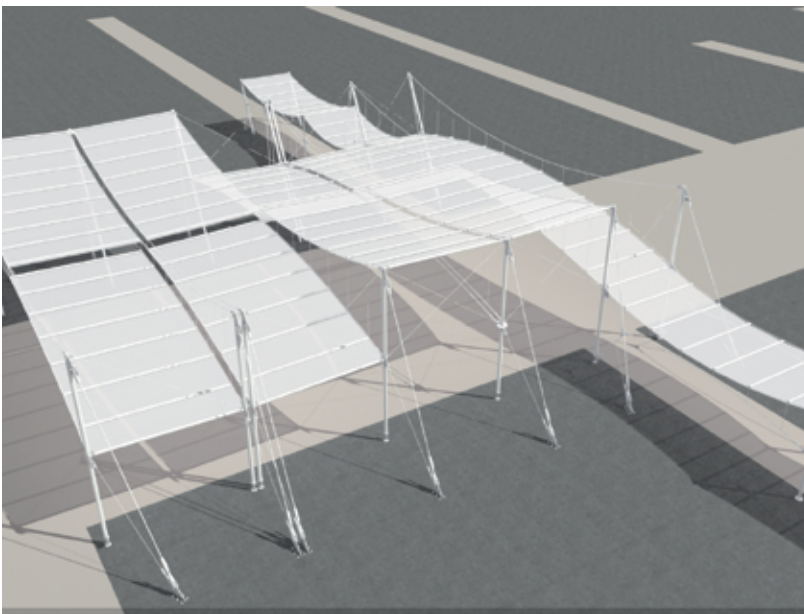
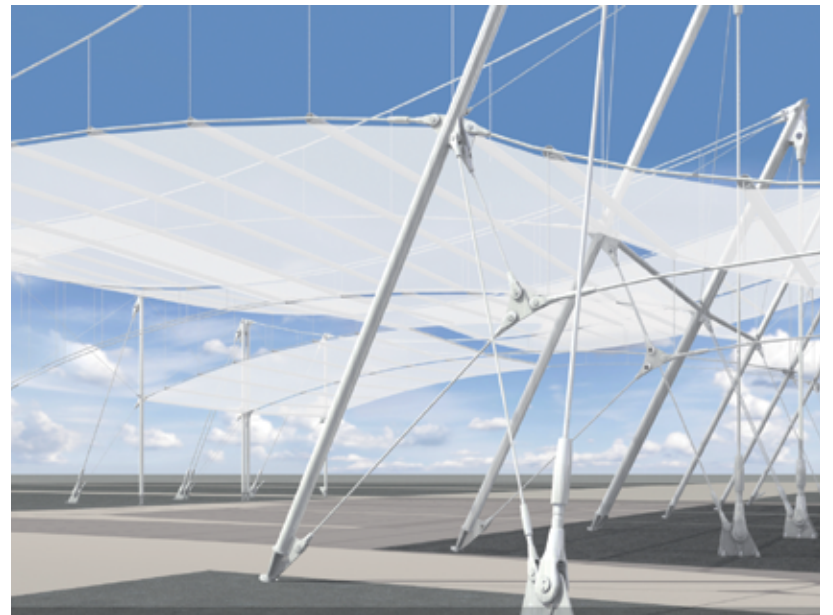
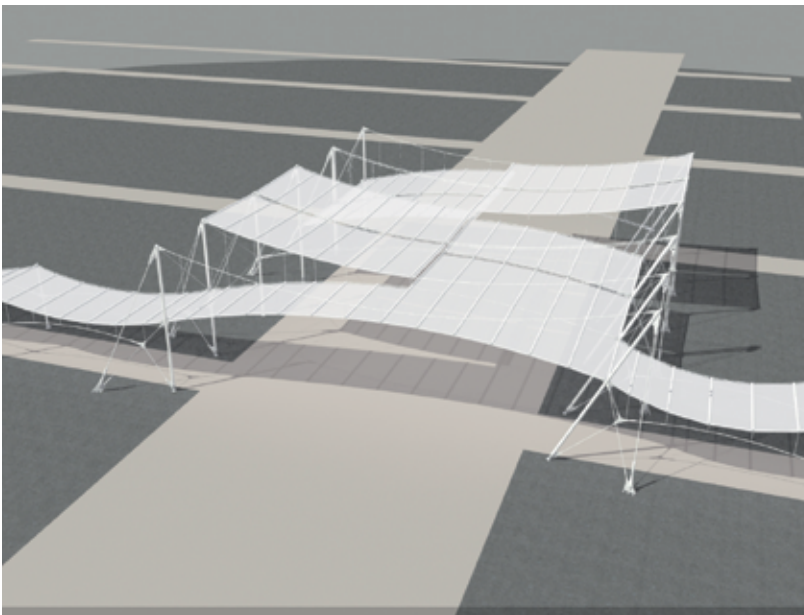


Fig. 3 - Soluzione strutturale adottata in sede di progettazione preliminare



Fig. 4 - Visualizzazioni composite generali

progettuale, adottando una tipologia-morfologia che induce nell'immaginario collettivo una sensazione leggera, semplice, quasi arcaica: la tenda, in antitesi con il dominante "Megatrend" delle soluzioni Expo precedenti (figura 2).

La struttura del percorso espositivo riprende quella antica del castrum, l'accampamento romano che si distingueva per la pianta ortogonale e le strade principali tra di loro perpendicolari chiamate Cardo e Decumano. Il Decumano, attraversa l'intero sito da est a ovest per un chilometro e mezzo e ospita su entrambi i lati i padiglioni nazionali dei paesi partecipanti unendo il luogo del consumo di cibo (la città) a quello della sua produzione (la campagna). L'asse del Decumano si incrocia con l'asse del Cardo, lungo 350 metri, che mette in relazione il nord e il sud del Sito Espositivo e accoglie la proposta espositiva del Paese ospitante, l'Italia. Nel punto in cui le due vie si incontrano, si trova la grande piazza centrale dell'Expo, Piazza Italia, il luogo in cui simbolicamente l'Italia incontra il mondo.

Nell'intendimento dell'ufficio di piano di procedere all'elaborazione di un progetto preliminare di base, con il quale indire una gara d'appalto, nasce quindi il problema di progettare la copertura dei camminamenti conservando nel campo fisico-reale-costruttivo la sensazione "light" dell'immagine "tenda"; altrimenti il passaggio dal virtuale al reale può equivalere al passaggio dal concetto "light" ad un profilo "poor": dall'Expo

all'effetto Bazaar.

Allo scopo di conservare il valore dell'idea progettuale nelle fasi successive di progettazione fino alla realizzazione, è stato necessario in fase di progetto preliminare, oltre che a produrre i contenuti regolamentari di legge, effettuare un esame comparativo tra varie alternative strutturali di intuibile affidabilità tecnica e congruità economica.

1.2 Scelta della tipologia strutturale

Dopo una serie di simulazioni con computer grafica si è deciso di impiegare una tensostruttura a doppio effetto con la copertura in membrana posta da un lato sui cavi di

intradosso e dall'altro sui cavi di estradosso (figura 3). Questa soluzione garantisce un gradevole effetto estetico di movimento, evita l'effetto "tunnel", e permette un agevole deflusso dell'aria calda al di fuori del volume coperto dalle tende. In sintesi la soluzione elaborata fa riferimento alle seguenti richieste progettuali:

- ricerca esaustiva delle caratteristiche formali, artistiche e fisico-chimiche dei materiali membranali;
- "conceptual design" architettonico-tecnologico-strutturale che rispetti l'impostazione "light" ma non permetta il degrado percettivo verso la soluzione "poor";

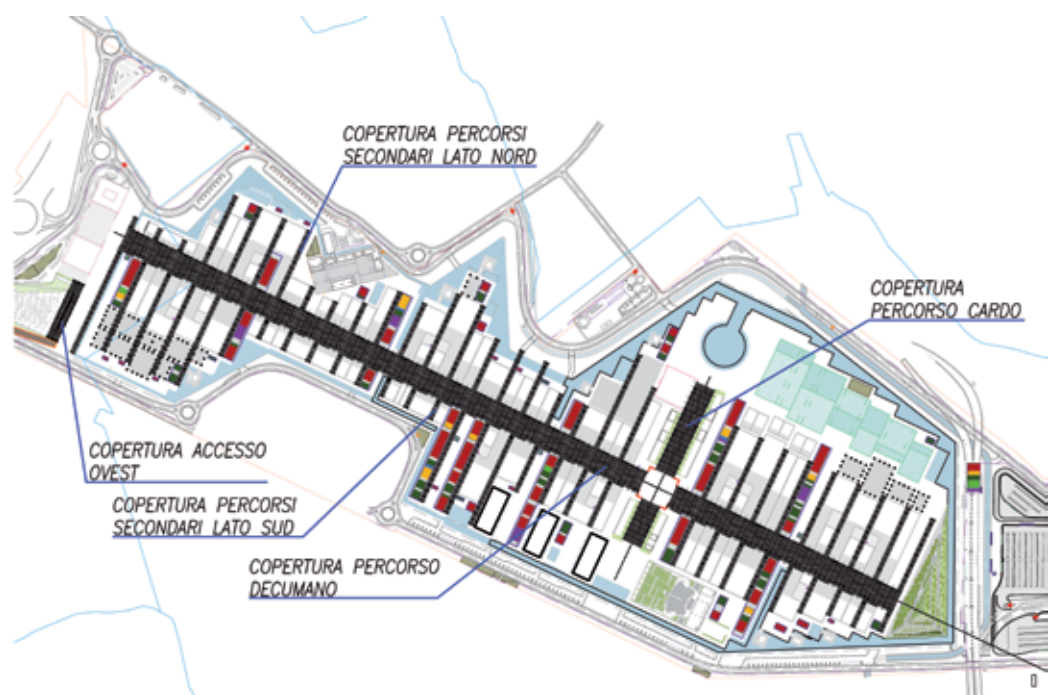


Fig.5 - Disposizione in pianta delle strutture di copertura ai camminamenti

- ricerca interattiva di confort ambientale (parametri di umidità, irradiazione solare, circolazione naturale dell'aria, ecc);
 - possibilità di realizzazione di un modulo tipico in scala reale in accordo con lo spirito del "Design assisted by Testing" dell'Eurocodice 1, da sottoporre ad un monitoraggio funzionale e parametrico in ordine a minimizzare le incertezze interpretative nelle fasi progettuali seguenti e incrementare l'affidabilità del processo progettuale e costruttivo.
- Il risultato compositivo generale dei percorsi sul layout EXPO è illustrato in figura 4.

2. DESCRIZIONE DELLE OPERE

STRUTTURALI METALLICHE

2.1 Le sottostrutture modulari

La tensostruttura a doppio effetto, scelta quale sistema strutturale principale, è stata adottata per le varie sottostrutture che compongono le coperture dei viali.

Per dimensione e configurazione geometrica si hanno le seguenti tipologie (figura 5):

- Coperture dei viali principali Decumano e Cardo;
- Coperture percorsi trasversali;
- Copertura accesso Ovest.

Per tutte le coperture sopra menzionate sono stati adottati moduli strutturali che sono formati da:

- una tensostruttura in funi in acciaio ad alta

resistenza con configurazione spiroidale aperta: le due funi, portante e stabilizzante, hanno curvatura contrapposta e sono presollecitate mediante un campo di forze di trazione verticalmente auto equilibrate; la presollecitazione è applicata mediante martinetti idraulici agenti sui capicorda regolabili posti alle estremità della fune stabilizzante;

- due cavalletti piani d'ancoraggio d'estremità formati da una colonna in tubo d'acciaio e 2 tiranti in fune spiroidale aperta in acciaio ad alta resistenza, con capocorda regolabile, che si collegano a metà altezza della colonna e in sommità; a questi cavalletti compete la funzione di portare alle fondazioni il carico verticale ed il tiro orizzontale trasmesso dalla tensostruttura;
- manto di copertura in membrana ordita tra arcarecci disposti trasversalmente tra le tensostrutture, fatta eccezione per la copertura dell'accesso Ovest realizzata mediante cuscini pneumatici in ETFE.

La fondazione di ciascun cavalletto d'ancoraggio è costituita da un palo trivellato ad elica continua posto sotto la colonna compressa e da 4 tiranti geotecnici (tesi) collocati nel punto di ancoraggio a terra degli stralli del cavalletto. Per i tiranti geotecnici è stata prevista una inclinazione "risultante" di circa 32° e una sfioccatura di circa 30°.

Le teste di colonna e tiranti sono collegate da un cordolo in cemento armato e da un elemento piatto di acciaio che ha la funzione di trasferire, al dettaglio di ancoraggio dei tiranti, l'eventuale componente orizzontale dello sforzo trasmesso a terra dalla colonna.

2.2 Layout del viale principale

Decumano

Il percorso principale "Decumano" rappresenta la colonna vertebrale di EXPO 2015 estendendosi su tutta la lunghezza di circa 1500 m. Il layout planimetrico del Decumano mostra una successione di macro-moduli di 40 m x 35 m in pianta (tra le colonne, lunghezza x larghezza) al termine di ciascuno dei quali si realizza l'incrocio con

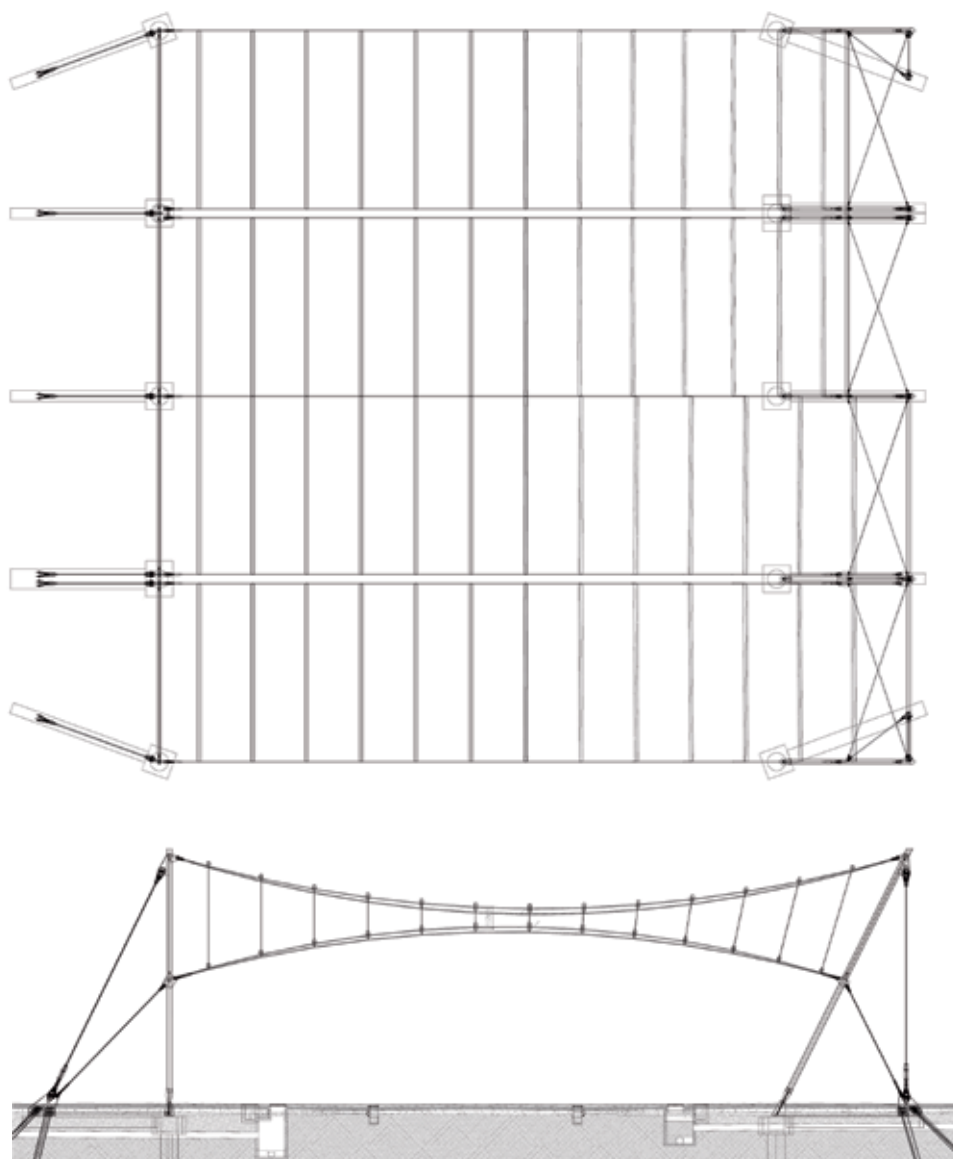


Fig. 6 - Pianta e sezione del modulo tipico del Decumano

il percorso trasversale minore.

Ogni macro-modulo è suddiviso longitudinalmente in 4 moduli di 10 m x 35 m in pianta (tra le colonne, lunghezza x larghezza).

Il generico modulo è delimitato da due tensostrutture sostenute alle estremità da cavalletti piani in acciaio. L'altezza complessiva è di 14 m mentre la distanza alla base tra colonna e punto di ancoraggio dei tiranti è di 7 m (figura 6).

I cavalletti disposti lungo il bordo Nord del percorso hanno la colonna verticale e i due tiranti/stralli inclinati, quelli disposti lungo il bordo Sud hanno invece la colonna inclinata e, dei due tiranti, il più lungo ha giacitura verticale. I cavalletti delle tensostrutture che si raccordano con quelle dei percorsi trasversali hanno il tirante inferiore realizzato in tubo circolare e la strallatura è deviata fuori dal piano verticale della tensostruttura. I dati geometrici delle tensostrutture sono alla tabella 1

Su ciascun modulo la copertura in membrana si sviluppa, per metà luce a livello della fune portante (copertura "alta") e per metà luce a livello della fune stabilizzante (copertura "bassa").

Questo determina nella copertura un andamento trasversale (rispetto all'asse del percorso) delle pendenze che fa sì che l'acqua meteorica si muova dalla porzione superiore della copertura verso quella inferiore. In corrispondenza della mezzera (in cui si passa con discontinuità dalla copertura superiore a quella inferiore) sono previsti sistemi per la regimentazione dell'acqua e la necessaria sovrapposizione della copertura. In corrispondenza degli allineamenti i cui entrambi moduli adiacenti sono caratterizzati dall'aver la copertura "bassa" il sistema tensostrutturale è raddoppiato (funi portanti stabilizzanti, pendini e cavalletti) con distanza asse-asse di 500 mm e con geometria ribassata in modo da realizzare tra la coppia di funi stabilizzanti un compluvio in cui è collocata la gronda per la raccolta trasversale dell'acqua.

Il sistema longitudinale di controventamen-

| | | Luce [m] | Freccia [m] | Quota d'imposta [m] |
|---------------|--------------------|----------|-------------|---------------------|
| Tenso singola | Fune portante | 41.50 | 3.00 | 14.00 |
| | Fune stabilizzante | 38.00 | 3.00 | 7.00 |
| Tenso doppia | Fune portante | 41.50 | 3.30 | 14.00 |
| | Fune stabilizzante | 38.00 | 2.70 | 7.00 |

Tabella 1 - Dati geometrici delle tensostrutture del Decumano

| | DECUMANO Struttura singola | DECUMANO Struttura doppia |
|--|-------------------------------|--|
| Struttura doppia | Tubo $\phi 298.5 \times 28$ | Tubo $2 \times \phi 298.5 \times 14.2$ |
| Fune portante | OSS $\phi 44$ | $2 \times$ OSS $\phi 32$ |
| Fune stabilizzante | OSS $\phi 40$ | $2 \times$ OSS $\phi 28$ |
| Pendini | OSS $\phi 12$ | $2 \times$ OSS $\phi 8$ |
| Strallo lungo cavalletto con colonna verticale | OSS $\phi 64$ | $2 \times$ OSS $\phi 44$ |
| Strallo corto cavalletto con colonna verticale | OSS $\phi 44$ | $2 \times$ OSS $\phi 32$ |
| Strallo lungo cavalletto con colonna inclinata | OSS $\phi 56$ | $2 \times$ OSS $\phi 40$ |
| Strallo corto cavalletto con colonna inclinata | OSS $\phi 44$ | $2 \times$ OSS $\phi 32$ |
| Arcaecio tipico | Tubo $\phi 193.7 \times 8$ | Tubo $\phi 193.7 \times 8$ |

Tabella 2 - Dati dimensionali degli elementi componenti del Decumano

| | | Luce [m] | Freccia [m] | Quota d'imposta [m] |
|----------|--------------------|----------|-------------|---------------------|
| Modulo A | Fune portante | 22.10 | 1.42 | 7.00 |
| | Fune stabilizzante | 22.10 | 1.40 | 3.55 |
| Modulo B | Fune portante | 20.00 | 1.16 | 7.00 |
| | Fune stabilizzante | 20.00 | 1.15 | 3.55 |
| Modulo C | Fune portante | 18.80 | 1.02 | 7.00 |
| | Fune stabilizzante | 18.80 | 1.01 | 3.55 |

Tabella 3 - Dati geometrici delle tensostrutture dei percorsi trasversali

to e dei giunti strutturali prevede che:

- 1) i giunti strutturali siano collocati in corrispondenza dei sistemi tensostrutturali doppi;
- 2) un sistema di controventi in funi a croce di S.Andrea colleghi il nodo di sommità di ciascuna colonna con il nodo intermedio delle due colonne adiacenti;
- 3) i tiranti inferiori in tubo circolare dei sistemi tensostrutturali che fiancheggiano

l'incrocio con i percorsi trasversali minori controventino i nodi intermedi delle colonne corrispondenti e indirettamente, attraverso gli arcaecci terminali della copertura, i nodi intermedi delle altre colonne.

Nella tabella 2 sono riassunti i dati dimensionali degli elementi componenti.

La composizione strutturale tipica, con i dettagli costruttivi, è illustrata in figura 7 mentre

in figura 8 e figura 9 si possono osservare i telai tensostrutturali durante il montaggio e la configurazione finale delle strutture.

Il layout planimetrico del percorso principale Cardo è analogo a quello del Decumano con le seguenti differenze:

- 1) non vi sono gli incroci con percorsi trasversali che si intercalano tra i macro-moduli 40 m x 35 m;
- 2) tutti i cavalletti hanno colonna verticale e stralli inclinati;
- 3) il controvento del livello inferiore (tra i nodi intermedi delle colonne e le fondazioni) è formato da due stralli (giacenti

nel piano delle colonne) che interessano le colonne con copertura "alta".

2.3 Layout dei percorsi trasversali

I percorsi trasversali intersecano il viale Decumano ogni 48 m.

Il layout planimetrico mostra una successione di campi aventi larghezza 7,5 m e lunghezze modulari riconducibili a tre tipologie: 22,10 m, 20,00 m e 18,80 m. La lunghezza complessiva di ciascun percorso trasversale è variabile ed è ottenuta dalla composizione di uno o più campi.

Ciascun campo è formato da una coppia di

tensostrutture, che sostengono gli arcarecci trasversali e la membrana. Quest'ultima è disposta in corrispondenza della fune portante delle tensostrutture realizzando così un compluvio in mezzera di ogni campo: in tale punto la membrana è interrotta per permettere la raccolta dell'acqua in una gronda trasversale. La struttura di sostegno intermedia tra un modulo ed il successivo è costituita da un telaio trasversale (rispetto al percorso) in tubo circolare. Il progetto prevede per ogni percorso trasversale la continuità delle funi portanti e stabilizzanti senza interruzioni intermedie. Le funi (sia portanti che stabilizzanti) saranno dotate di capocorda solo in corrispondenza degli attacchi al cavalletto terminale e al cavalletto principale del viale Decumano. A tal fine nei telai intermedi sono stati studiati particolari dettagli di fissaggio, deviazione e regolazione delle funi (figura 10).

I dati geometrici delle tensostrutture sono rappresentati nella tabella 3:

Nota: al variare della luce L del modulo, le frecce fp della fune portante e fs della fune stabilizzante sono state determinate mantenendo costante il valore dei rapporti fp/L2 e fs/L2 in modo da eguagliare in fase di "Stato 0" le differenze di tiro tra i campi.

Nella tabella 4 sono riassunti i dati dimensionali degli elementi componenti:

| | Tutti i moduli |
|--|-------------------------------|
| Colonna cavalletto terminale | Tubo $\phi 219.1 \times 25$ |
| Colonna telaio intermedio | Tubo $\phi 219.1 \times 8$ |
| Fune portante | OSS $\phi 24$ |
| Fune stabilizzante | OSS $\phi 20$ |
| Pendini | OSS $\phi 8$ |
| Strallo lungo cavalletto | OSS $\phi 32$ |
| Strallo corto cavalletto | OSS $\phi 20$ |
| Funi di raccordo ai cavalletti principali | OSS $\phi 20$ |
| Funi di regolazione fune stabilizzante nei telai intermedi | OSS $\phi 12$ |
| Arcareccio tipico | Tubo $\phi 193.7 \times 7.1$ |
| Arcareccio terminale | Tubo $\phi 219.1 \times 12.5$ |
| Traverso telaio intermedio | Tubo $\phi 219.1 \times 8$ |

Tabella 4 - Dati dimensionali degli elementi componenti: ki percorsi trasversali

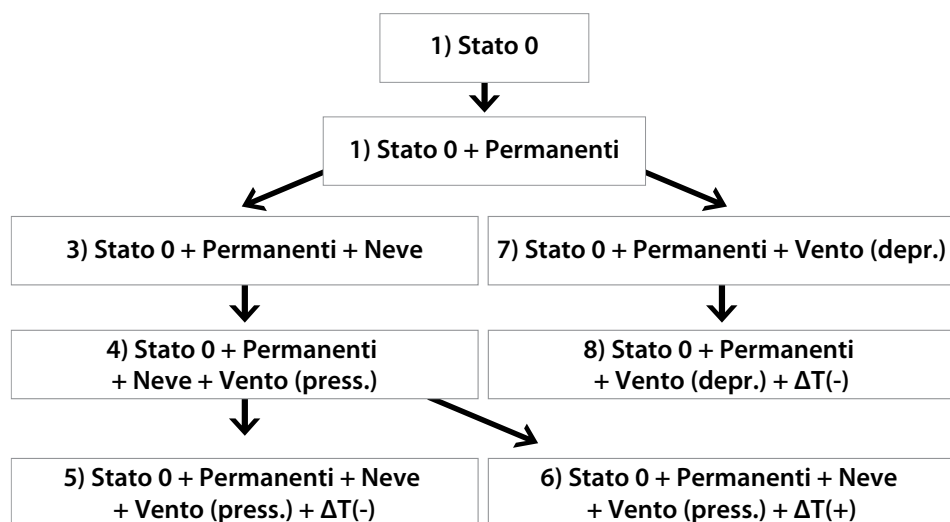


Tabella 5 - Schema logico seguito dall'analisi incrementale

2.4 Layout della copertura dell'accesso Ovest

La copertura dell'accesso Ovest è formata da due moduli tensostrutturali con caratteristiche analoghe a quelli utilizzati per i percorsi trasversali al Decumano: larghezza 10 m ciascuno, luci intermedie di 18,50 m, luce terminali di 17,50 m e 21,30 m, con colonne intermedie e cavalletti terminali in tubi circolari con altezza 7,00 m.

A differenza dei percorsi terminali il sistema di arcarecciatura trasversale sostiene una copertura formata da elementi pneumatici in ETFE preassemblati in officina su telai in alluminio e successivamente fissati su carpenteria metallica mediante l'impiego di appositi profili in alluminio (figura 11). I cuscini

sono composti da un layer superiore e uno inferiore, serigrafati per garantire adeguato ombreggiamento (figura 12).

3. MODELLAZIONE NUMERICA

3.1 Modello strutturale

3.1.1 Analisi delle tensostrutture

Lo stato di configurazione equilibrata della tensostruttura soggetta allo stato di presollecitazione (Stato "0") è determinata mediante un programma di calcolo automatico interattivo grafico RETE di Enexsys indirizzato all'analisi geometrico tensionale delle reti di funi.

La ricerca di questo stato iniziale viene fatta usufruendo delle condizioni di equilibrio scritte per ogni nodo della tensostruttura:

$$\sum (S_{ki}^o + P_k^o) = 0$$

S_{ki}^o = sforzo dell'asta k_i generica in stato "0";
 P_k^o = carico applicato al nodo k in stato "0"

La sommatoria è estesa a tutte le aste concorrenti del nodo k .

L'analisi dello stato di sollecitazione nella tensostruttura nelle varie fasi di carico considerate è stata effettuata mediante il programma TENSO di Enexsys, che risolve la maglia nodi-aste equivalenti mediante il metodo dell'equilibrio seguendo quanto espresso in forma sintetica dalla:

$$[k]\{\delta_k\}^r = \{P_k\} + \{P_k^x\}^{r-1}$$

dove:

$[k]$ = matrice di rigidità globale

$$[k] = [k_G] + [k_E]$$

$\{\delta_k\}^r$ = vettori degli spostamenti ottenuti alla r -esima iterazione

$\{P_k\}$ = carico applicato al nodo k

$\{P_k^x\}^{r-1}$ = carico fittizio dei termini non lineari.

Il procedimento numerico di risoluzione adottato per il sistema di equazioni non lineari che deriva dall'assemblaggio delle matrici elementari è di tipo semi-incrementale per quanto riguarda i carichi e la non linearità materiale, mentre è di tipo iterativo per quanto attiene alla non linearità geometrica. L'elemento finito tipo "cable" per definizione non ammette stato di sollecitazione di compressione ($S < 0$). Ad ogni incremento di carico il programma controlla le sollecitazioni

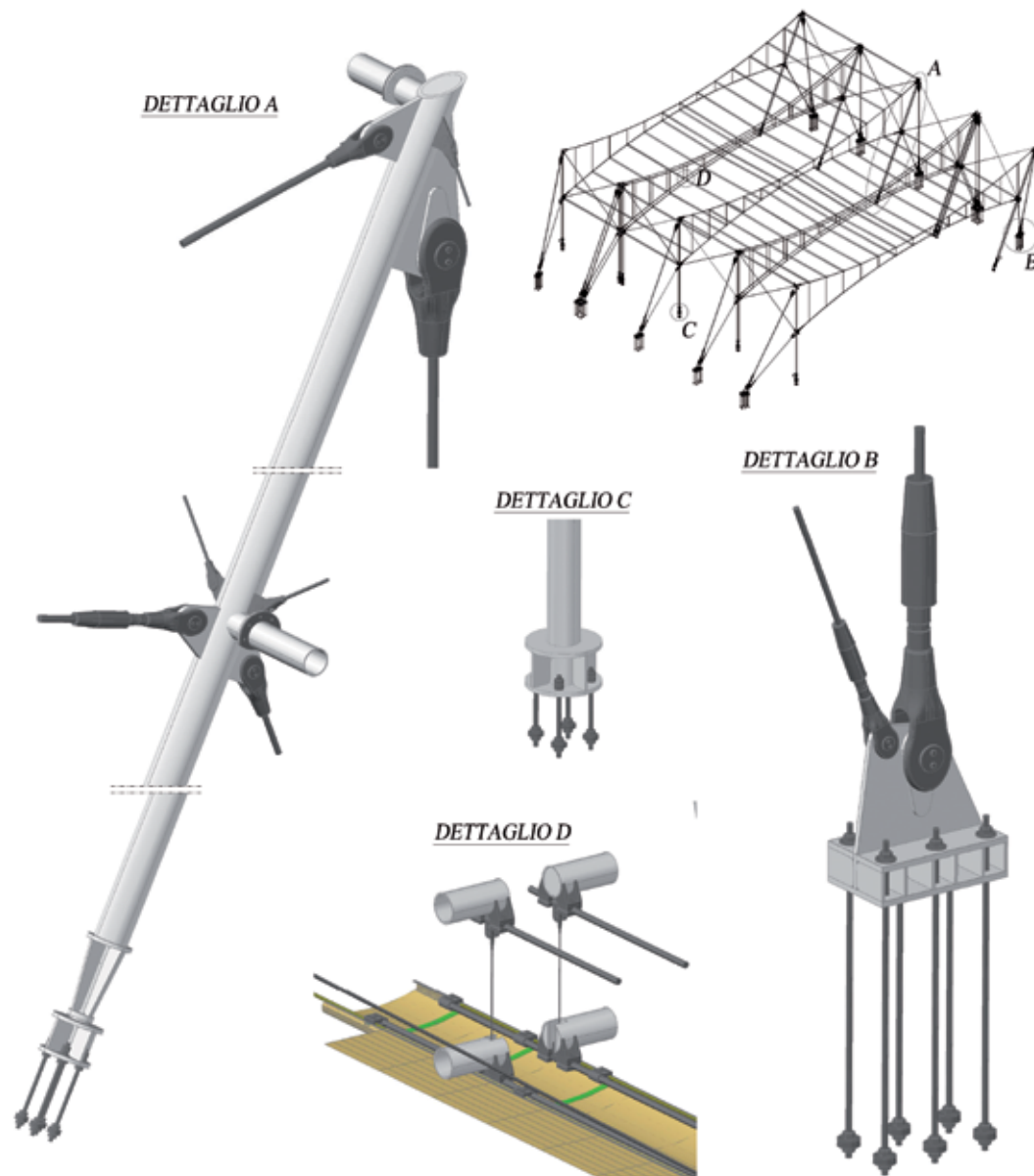


Fig. 7 - Assonometria e dettagli costruttivi della copertura del Decumano

| | | Luce [m] | Freccia [m] | Quota d'imposta [m] |
|----------|--------------------|----------|-------------|---------------------|
| Modulo A | Fune portante | 21.30 | 1.52 | 7.00 |
| | Fune stabilizzante | 21.30 | 1.51 | 3.55 |
| Modulo B | Fune portante | 18.50 | 1.51 | 7.00 |
| | Fune stabilizzante | 18.50 | 1.31 | 3.55 |
| Modulo C | Fune portante | 17.50 | 1.18 | 7.00 |
| | Fune stabilizzante | 17.50 | 1.17 | 3.55 |

Tabella 6 - I dati geometrici delle tensostrutture dall'ingresso Ovest

per ogni asta e, in caso di $S_{kj} < 0$, l'elemento viene tolto con opportuna modifica della matrice locale di rigidità tangente. Il programma di calcolo perciò è strutturato

in modo da eseguire l'andamento carichi-deformazioni in regime unilaterale di sforzi. L'analisi incrementale ha seguito lo schema logico alla tabella 5.



Fig. 8 - Vista delle strutture in acciaio durante il montaggio



Fig. 9 - Operazioni di verniciatura della struttura in acciaio in opera, b) e c) vista aerea e da dentro i camminamenti delle strutture metalliche e della membrana di copertura del Decumano

3.1.2 Verifiche di deformabilità

Le verifiche di Stato Limite di Esercizio in termini di deformabilità degli elementi strutturali principali e secondari consistono normalmente in un confronto tra gli

spostamenti indotti dai carichi di progetto e valori limite che, riportati in normativa, si riferiscono alle tipologie "tradizionali" di strutture, mentre per la struttura in esame, valgono le seguenti considerazioni:

- il sistema strutturale della copertura presenta un comportamento ipostatico con andamento in "hardening"; è quindi in grado di tollerare e contrastare spostamenti di entità che sarebbero inconsueti per strutture ordinarie;
- il grado di comfort richiesto corrisponde a quello di una copertura di un viale aperto: non è quindi necessario il rispetto di limiti di deformabilità pensati per strutture calpestabili o per coperture di strutture tipiche;
- la membrana costituisce contemporaneamente la struttura e la "finitura" della copertura: non vi sono quindi elementi portati nei confronti dei quali verificare la compatibilità degli spostamenti e delle deformazioni;
- l'intensità delle azioni, in particolare il valore di progetto del carico della neve, e quindi le deformazioni ad esse corrispondenti, sono da intendersi, per la collocazione temporale dell'opera in oggetto, come valori eccezionali;
- dalla deformabilità della struttura potrebbe derivare come unico inconveniente la non corretta regimentazione delle acque meteoriche con conseguente default di smaltimento e fenomeni di accumulo ("ponding").

3.1.3 Verifiche al "ponding"

La configurazione geometrica e la dettagliata adottata per la membrana di copertura

si pone come obiettivo principale lo smaltimento delle acque meteoriche secondo le direttrici individuate dai previsti dispositivi di raccolta (scossaline, battenti, canali di gronda). È peraltro necessario riconoscere che il sistema delle pendenze individuato dalla configurazione adottata e quindi la sua efficacia (soprattutto nelle zone a minor pendenza) sono influenzati da fattori difficilmente verificabili analiticamente:

- 1) stato effettivo della pretensione nella membrana all'atto del montaggio e sua evoluzione nel tempo;
- 2) intensità della precipitazione correlata alle reali capacità di smaltimento del sistema di gronde;
- 3) presenza contemporanea di fenomeni ventosi che possono momentaneamente, anche solo localmente, modificare la configurazione geometrica della copertura.

Alla luce di queste considerazioni, al fine di verificare "al vero" l'efficacia delle soluzioni adottate è stato prescritto di realizzare un campione in scala 1:1 di un modulo di copertura sul quale simulare la caduta dell'acqua e la sua raccolta. Le prove sul modello reale sono state inquadrate nelle procedure di "design assisted by test" previste nella EN1990 e finalizzate al controllo di:

- 1) la qualità architettonica di dettaglio;
- 2) la procedura di montaggio e pretensionamento;
- 3) la geometria membranale;
- 4) i parametri in scala reale dell'analisi del Microclima.

3.2 Modelli in galleria del vento e determinazione del carico da neve

Le analisi per la determinazione della pressione del vento e del carico di neve di progetto sono state svolte dal CRIACIV - Centro di Ricerca Interuniversitario di Aerodinamica delle Costruzioni e Ingegneria del Vento, maggiori informazioni sono riportate in [1].

3.2.1 Determinazione delle pressioni nette da vento

Il profilo incidente del vento è stato generato con opportune caratteristiche di turbolenza,

| | Tutti i moduli |
|--|-------------------------------|
| Colonna cavalletto terminale | Tubo $\phi 219.1 \times 25$ |
| Colonna telaio intermedio | Tubo $\phi 219.1 \times 8$ |
| Fune portante | OSS $\phi 24$ |
| Fune stabilizzante | OSS $\phi 20$ |
| Pendini | OSS $\phi 8$ |
| Strallo lungo cavalletto | OSS $\phi 32$ |
| Strallo corto cavalletto | OSS $\phi 20$ |
| Funi di regolazione fune stabilizzante nei telai intermedi | OSS $\phi 12$ |
| Arcareccio tipico | Tubo $\phi 193.7 \times 7.1$ |
| Arcareccio terminale | Tubo $\phi 219.1 \times 12.5$ |
| Traverso telaio intermedio | Tubo $\phi 219.1 \times 8$ |
| Traverso telaio intermedio | Tubo $\phi 219.1 \times 8$ |

Tabella 7 - Dati dimensionali degli elementi componenti le tensostrutture

mediante la disposizione di rugosità superficiale e dispositivi all'imbocco della galleria, nella scala 1:100 utilizzata per la realizzazione del modello. Sono state misurate le principali caratteristiche del flusso ottenuto: profilo di velocità media, profilo di intensità di turbolenza longitudinale, caratteristiche spettrali e di scala integrale longitudinale in alcuni punti significativi (figura 14).

La pressione netta sulla copertura è stata misurata con 334 prese di pressione collocate sia all'estradosso che all'intradosso della copertura, le storie di pressione relative ai diversi punti di misura sono state acquisite con un doppio sistema di misurazione opportunamente sincronizzato, in modo da rendere simultanee tutte le storie temporali registrate.

Le prove sono state effettuate su due diverse configurazioni del modello: la prima consiste in un modulo isolato, mentre nella seconda sono stati affiancati due macro moduli standard in modo da valutare le azioni del vento sui moduli disposti "in scia". Le prove sono state condotte per 16 direzioni di incidenza di vento (da 0° a 360° con passo 22.5°). Il calcolo dei coefficienti di pressione è avvenuto facendo riferimento

alla velocità del flusso incidente alla quota di 10 m dalla pavimentazione. I risultati forniti sono in termini di pressione netta calcolata sottraendo dalla pressione registrata all'estradosso, quella all'intradosso e le registrazioni sono state filtrate con un filtro passa-basso a 100 Hz, dalle storie temporali così ottenute sono stati ricavati i valori sperimentali. La velocità di riferimento per le misurazioni è pari a 7.16 m/s alla quota di 10 m dal suolo.

Le registrazioni effettuate mostrano per quanto concerne la configurazione 1 un valore minimo del coefficiente di pressione netto pari a -2.84 mentre per la seconda configurazione un valore di -3.56.

3.2.2 Determinazione del carico da neve di progetto

Scopo dell'analisi statistica è stimare il carico da neve con vari periodi di ritorno, in particolare minori di 50 anni, attraverso l'analisi statica di estremo di serie temporali di letture relative alle precipitazioni nevose per il sito di Milano Linate.

È stata condotta un'analisi statistica di estremo per la stima dello spessore del manto nevoso con fissato periodo di ritorno. Dai

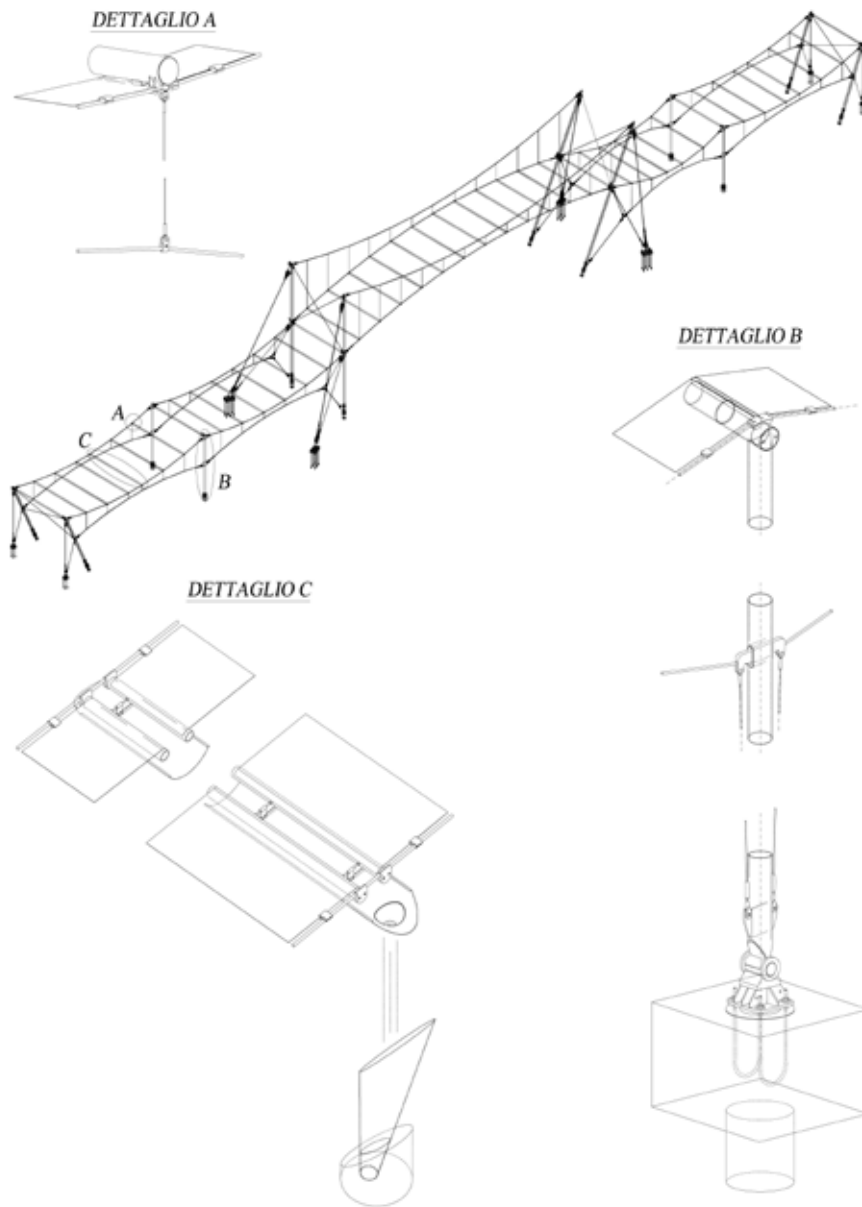


Fig. 10 - Assonometria e dettagli costruttivi della copertura dei percorsi trasversali

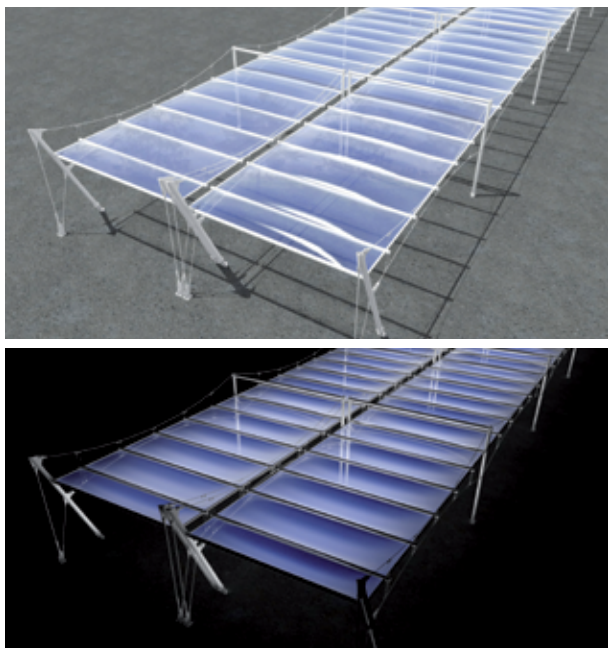


Fig. 11 - a) Render diurno della copertura dell'accesso Ovest, b) Render notturno della copertura dell'accesso Ovest

dati origine sono state estratte due serie di letture: i massimi annuali (serie 1, figura 15a) e i massimi raggiunti in tutte le precipitazioni nevose (serie 2). Relativamente alla serie 1 si è applicato il metodo dei massimi annuali mentre per la serie 2 si è utilizzato un modello di tipo Poisson.

Nel metodo dei massimi annuali i dati sono stati modellati con una distribuzione mista del tipo:

$$F_X(x) = (1-p)1(x \geq 0) + pF_X(x)$$

dove p è la probabilità che X non sia nulla e $F_X(x)$ è la funzione di distribuzione cumulativa (cdf) dei valori non nulli di X .

Per la stima della distribuzione di probabilità si sono utilizzati i seguenti modelli:

- a) distribuzione di Weibull (mod. stimato con il metodo dei momenti);

- b) distribuzione estremo di Gumbel, Tipo 1, (mod. stimato con il metodo momenti);
- c) modello di valori estremi generalizzato stimato con il metodo della massima verosimiglianza (G-EV);
- d) distribuzione di Pareto generalizzata, stimata con il metodo dei momenti (GP1 / G-Pareto 1);
- e) distribuzione di Pareto generalizzata, stimata con il metodo dei momenti pesati con la probabilità (GP2 / G-Pareto 2).

Il confronto con i dati dei massimi annuali (in numero di 20 avendo eliminato i valori con precipitazione nulla) evidenzia un accordo abbastanza limitato con i modelli utilizzati con particolare riferimento ai valori massimi. In tale contesto il migliore accordo sembra ottenersi utilizzando la distribuzione di Pareto generalizzata stimata con il metodo dei momenti pesati con la probabilità (GP2 / G-Pareto 2). Il risultato scadente può imputarsi al numero esiguo dei dati disponibili (N=20).

Le precedenti considerazioni sono confermate dal confronto in termini di funzione di distribuzione cumulativa come riportato in figura 15b. dove sono stati introdotti anche i dati con $h=0$ (N=10).

Utilizzando le precedenti cdf è possibile stimare lo spessore di neve con fissato periodo di ritorno (indicato con MRI) utilizzando l'espressione

$$h_{MRI} = F_X^{-1}\left(1 - \frac{1}{MRI}\right)$$

dove con si indica l'inversa della cdf.

Il carico da neve con fissato periodo di ritorno è stato determinato moltiplicando lo spessore del manto nevoso con egual periodo di ritorno per il parametro γ corrispondente al peso per unità d'area e per unità di altezza. Le stime dal carico da neve con fissato periodo di ritorno sono riportate nella figura 16.

3.3 Modellazione per il comfort termico

La modellazione termo fluido dinamica indirizzata all'identificazione del livello di comfort è stata eseguita dal Dipartimento di Scienza e Tecnologia dell'Ambiente Co-

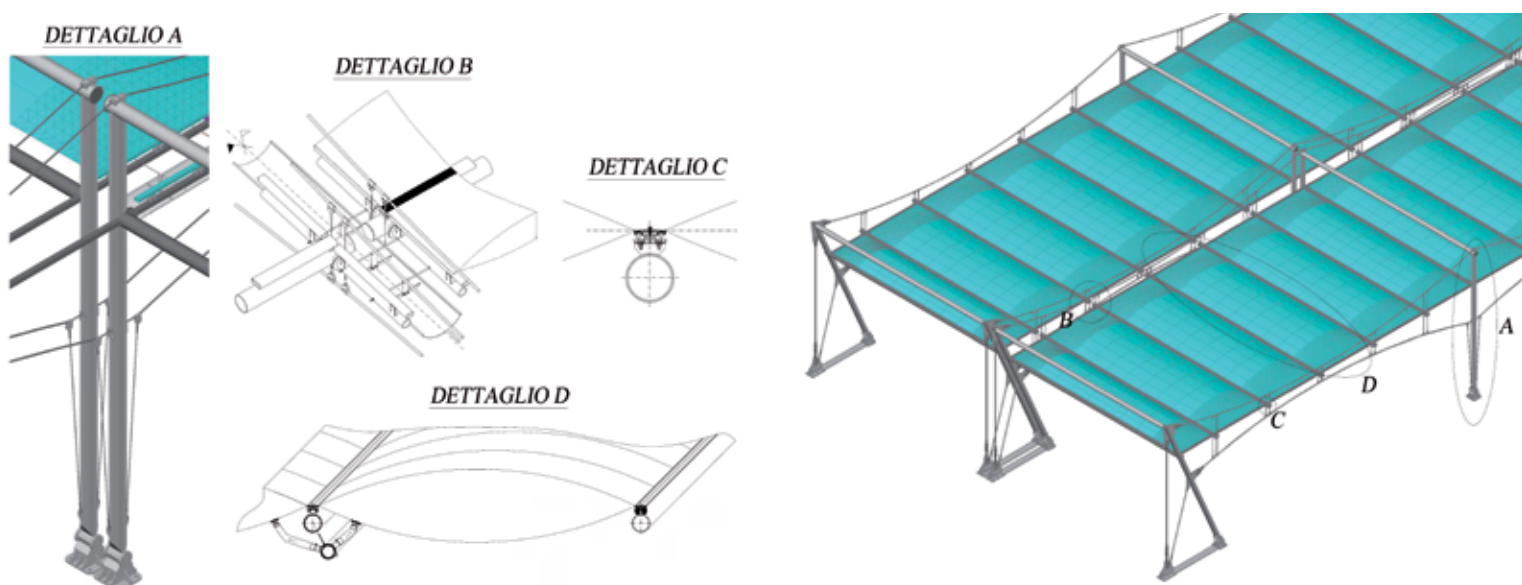


Fig. 12 - Assonometria e dettagli costruttivi delle strutture di copertura dell'accesso Ovest

struito del Politecnico di Milano, maggiori informazioni sono riportate in [2].

3.3.1 Criteri di modellazione

Il modello matematico implementato per l'ottimizzazione termo fluidodinamica del sistema di tendaggi utilizzati per la copertura dei camminamenti di Expo è stato costruito mediante l'utilizzo del software di simulazione numerica (Fluent release 6.3). Questo modello utilizza il metodo ai volumi finiti per la discretizzazione del dominio, e per la soluzione dei flussi d'aria un sistema di equazioni che governano i flussi in coordinate cartesiane.

È stata utilizzata una mesh strutturata bidimensionale (Quad Map) e l'algoritmo SIMPLE per risolvere le equazioni differenziali (Patankar, 1980). Particolare attenzione nella discretizzazione del dominio è stata posta nelle zone con forti gradienti di pressione.

La modellazione mediante strumenti di fluidodinamica ha una duplice funzione. La prima è quella di validazione dei modelli a parametri concentrati. La seconda quella di comprendere il peso della geometria e dell'inclinazione della copertura, della distanza della copertura dal suolo e della presenza del costruito, sull'incremento o mitigazione (considerando anche i moti convettivi) dello stress termico. In fase preliminare di analisi sono state sviluppate due tipologie di modellazioni su modello bidimensionale:

- Il primo set di modellazioni è servito per verificare in modo qualitativo la fenomenologia e la geometria del problema. Non sono stati assegnati i parametri termofisici delle strutture e materiali presenti nel modello e non si è considerato l'irraggiamento su piano orizzontale effettivo (input costante per tutte le modellazioni di

questo tipo). I risultati in uscita dalla fase di post-processing, devono essere quindi interpretati e valutati non dal punto di vista quantitativo ma dal punto di vista puramente qualitativo.

Il secondo set di modellazioni è servito per verificare in modo quantitativo-qualitativo il contributo delle proprietà fisiche e radiative dei materiali costituenti il sistema copertura-suolo.

3.3.2 Risultati della modellazione

I risultati del primo set di modellazioni in condizione di campo aperto mostrano il vantaggio nell'adozione di una superficie tessile discontinua costituita da due elementi tessili a quota differente. La distanza tra i due lembi delle superfici dovrebbe essere dimensionata per ottenere l'attivazione di un tiraggio d'aria (effetto camino) e nel contempo avere una dimensione tale

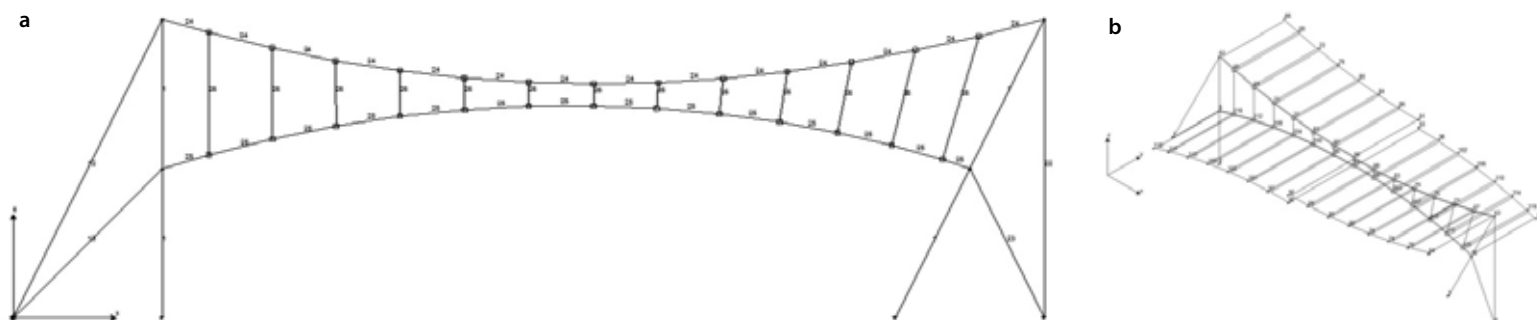


Fig. 13 - a) Vista in prospettiva del modello di calcolo, b) Vista assometrica del modello di calcolo

da evitare le infiltrazioni di acqua in caso di pioggia. Inoltre l'analisi condotta ha suggerito (per aspetti fluidodinamici e di deflusso dell'acqua meteorica) l'inversione del posizionamento delle curvature: due superfici, una concava (quella a quota inferiore) e una convessa (quella a quota superiore), ugualmente inclinate e sfalsate (figura 17).

Nel secondo set di modellazioni si è analizzata una geometria della tenda in cui esistono due teli, uno concavo e uno convesso, che si ripetono con la stessa forma ma con inclinazioni opposte alternate (speculari rispetto a un asse verticale posto in mezzzeria della copertura in corrispondenza della discontinuità). In particolare è stata fatta variare la distanza del costruito dell'intorno del Decumano e sono state inserite le persone.

In base ai risultati di questo set di simulazioni effettuate si può dire che le caratteristiche del tessuto della tenda sono fondamentali per valutare il microclima al di sotto della stessa. Essendo la tenda un ostacolo allo scambio con la volta celeste, le migliori prestazioni si ottengono ovviamente con una trasmittanza solare il più bassa possibile (superficie opaca). In particolare, la tenda dovrebbe essere caratterizzata da una parte superiore alto emissiva, e una parte inferiore con caratteristiche basso emissive.

4. MATERIALI IMPIEGATI E COMPUTO

4.1 Acciaio impiegato

4.1.1 Acciaio da carpenteria

Temperatura minima di servizio: $T_{md}(z=0\text{ m}) = -15^\circ$

Strutture non protette: $T_{md} = -15^\circ$ (rif. 4.2.4.1.5 D.M. 14/01/08).

Tubi circolari finiti a caldo secondo EN 10210-2

Tubi circolari formati a freddo e saldati secondo EN 10219-1 e EN 10219-2

Profili aperti laminati a caldo secondo EN 10034 e EN 10025

Acciaio da carpenteria secondo EN 10210-S 355 con i seguenti sub-grad:

- J0 per piatti aventi spessore fino a 35 mm
- J2 per piatti aventi spessore fino a 65 mm

4.1.2 Acciaio per perni

Acciaio 30 CrNiMo 8 secondo EN 10083:

- valore caratteristico minimo della tensione a snervamento $f_{yk} = 700 \text{ N/mm}^2$
- valore caratteristico minimo della tensione

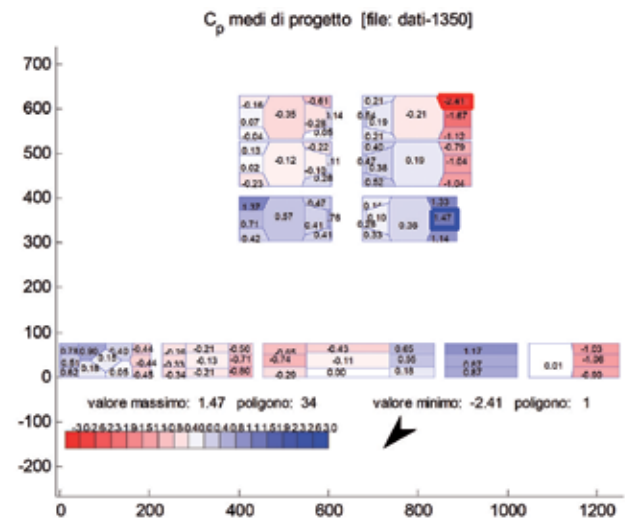
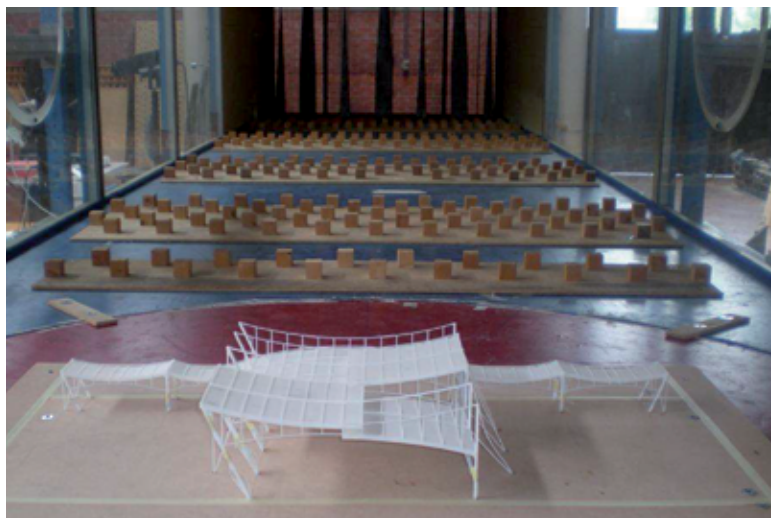


Fig. 14 - Modello in galleria del vento e grafico con i coefficienti di pressione di progetto

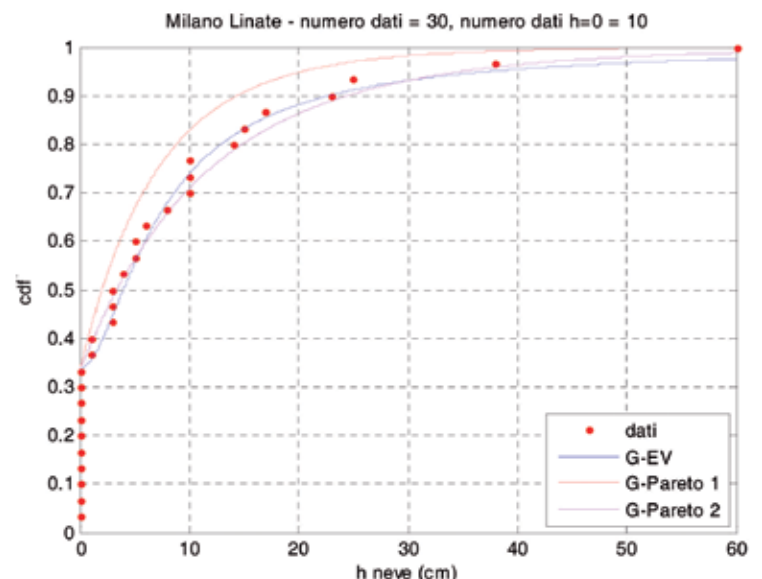
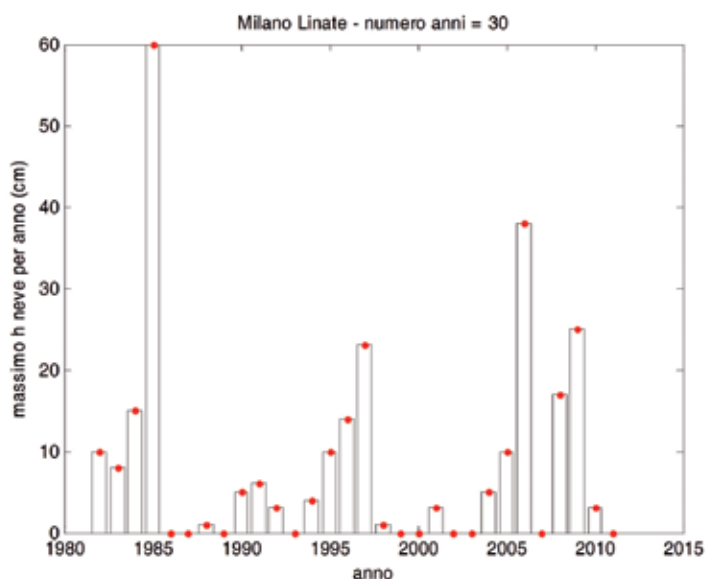


Fig. 15 - a) Serie dei massimi annuali, b) Modelli probabilistici dei massimi annuali G-EV, G-Pareto 1 e G-Pareto 2 e confronto con i dati disponibili

a rottura $f_{uk} = 900 \text{ N/mm}^2$

4.1.3 Acciaio funi

Funi spirroidali di tipo aperto (OSS = Open spiral strands) in acciaio ad alta resistenza

- Composizione: fili rotondi, tutti zincati a caldo
- 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/m² min. sui fili sagomati
- Modulo di elasticità nominale $E = 165000 \text{ MPa}$

4.1 Manto di copertura

4.1.1 Membrana di copertura

Per il materiale della membrana di copertura è stato prescritto un composito poliestere + PVDF tipo FLUOTOP T2 Ferrari pre-constraint 1002 classe 4/5.

4.1.2 Cuscini pneumatici

Elementi pneumatici in ETFE preassemblati (in officina) su telai in alluminio (anche mediante l'impiego di profili tipo "Keder" o altri profili commerciali in EPDM o in alluminio) e successivamente fissati su carpenteria metallica, mediante l'impiego di profili in alluminio a disegno. I cuscini sono composti di un layer superiore e di un layer inferiore, serigrafati per garantire adeguato ombreggiamento.

*prof. dr. ing. Massimo Majowiecki,
Studio Tecnico Majowiecki, Bologna*

| | modello 1) | | | | modello 2) | | |
|---------|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | MRI | GEV kN / mq | GP1 kN / mq | GP2 kN / mq | GEV kN / mq | GP1 kN / mq | GP2 kN / mq |
| 0.025 | 2 | 0.10 | 0.05 | 0.08 | 0.16 | 0.15 | 0.18 |
| kN / mq | 3 | 0.19 | 0.12 | 0.21 | 0.26 | 0.20 | 0.25 |
| per cm | 4 | 0.26 | 0.18 | 0.30 | 0.37 | 0.24 | 0.31 |
| | 5 | 0.32 | 0.22 | 0.37 | 0.48 | 0.28 | 0.36 |
| | 10 | 0.57 | 0.36 | 0.61 | 1.05 | 0.40 | 0.54 |
| | 15 | 0.76 | 0.45 | 0.76 | 1.65 | 0.49 | 0.67 |
| | 20 | 0.93 | 0.51 | 0.87 | 2.28 | 0.56 | 0.77 |
| | 25 | 1.09 | 0.56 | 0.96 | 2.93 | 0.62 | 0.86 |
| | 30 | 1.23 | 0.60 | 1.03 | 3.58 | 0.67 | 0.94 |
| | 50 | 1.72 | 0.72 | 1.25 | 6.32 | 0.82 | 1.19 |
| | 100 | 2.68 | 0.89 | 1.56 | 13.62 | 1.07 | 1.63 |
| | 200 | 4.14 | 1.08 | 1.90 | 29.33 | 1.39 | 2.19 |

Fig. 16 - Stime del carico da neve per fissato periodo di ritorno

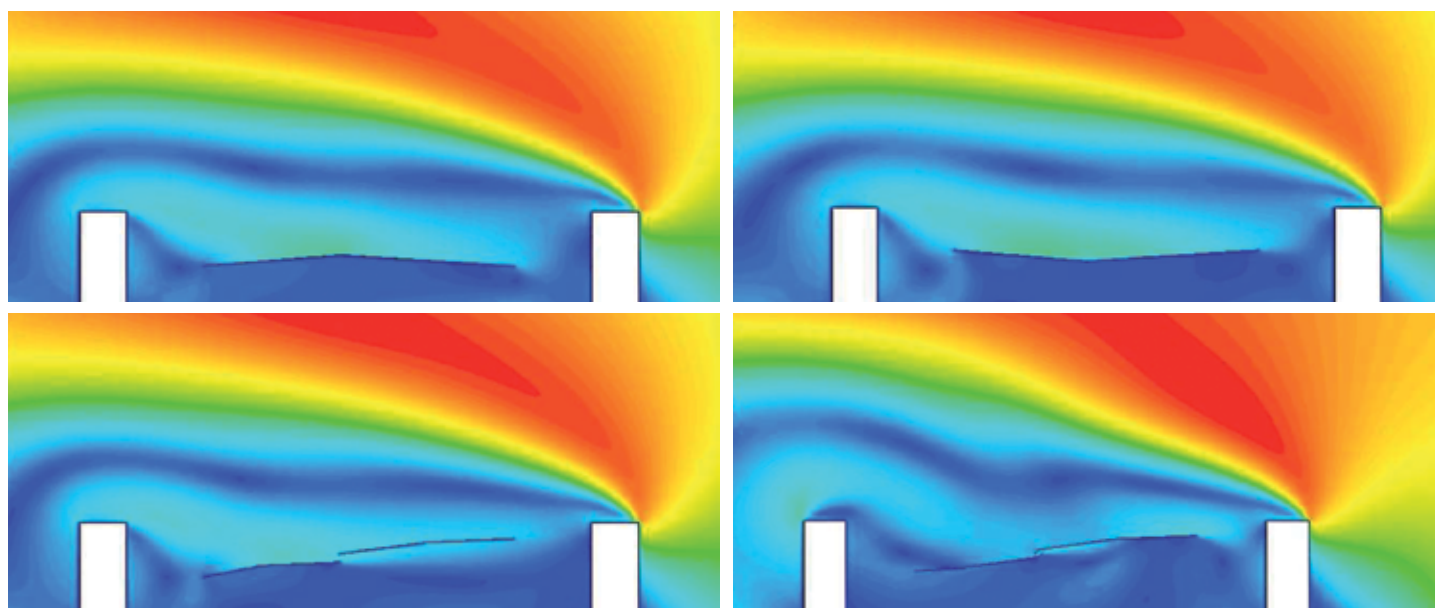


Fig. 17 - Simulazione dei moti convettivi dell'aria sotto le tende con diverse configurazioni geometriche bidimensionali: a) superfici concave senza aperture, b) superfici convesse senza aperture, c) due superfici concave separate da apertura, d) superfici concave e convesse separate da apertura

CREDITS

Stazione appaltante: EXPO 2015 S.p.A.

Progettazione generale preliminare della piastra: Ufficio di Piano EXPO 2015, responsabile arch. Matteo Gatto

Progettazione generale definitiva ed esecutiva della piastra: Metropolitana Milanese Spa, responsabile ing. Roberto Conta

Progettazione preliminare, definitiva ed esecutiva architettonica e strutturale dei percorsi coperti: Studio Tecnico Majowiecki: prof. ing. Massimo Majowiecki con la collaborazione dell'ing. Stefano Pinardi

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Report N° 2012-EXPO2015-01:

[1] "Determinazione del carico da neve di progetto e delle pressioni nette da vento sulle tensostrutture a copertura dei camminamenti esterni nell'area EXPO 2015 a Milano (simulazioni numeriche e prove in galleria del vento)" - CRIACIV - Centro di Ricerca Interuniversitario di Aerodinamica delle Costruzioni e Ingegneria del Vento

[2] "Analisi del microclima lungo il grande Boulevard e i percorsi secondari simbolo dell'EXPO 2015. Valutazione preliminare".

Milano, 24 giugno 2011 - TISCo Group - PoliMi