

I ponti ad arco sulle autostrade A4 e A8, il viadotto EXPO e gli archi estetici, parte integrante degli interventi per l'accessibilità di EXPO 2015, realizzano un nuovo landmark nella città di Milano. Le singole opere sono unite da una continuità architettonica ma ciascuna presenta specifiche caratteristiche strutturali e di montaggio.

The arched bridges on the A4 and A8 motorways, the Expo viaduct, and the aesthetic arches which form an essential part of the access works for the Expo 2015 event have created new landmarks in Milan. All of these structures have common architectural strains, but each has its own specific structural and assembly features.

1. LE CARATTERISTICHE DEL PROGETTO

Le opere fanno parte degli interventi per la realizzazione della viabilità di accesso dell'EXPO 2015 a Milano e rappresentano l'ingresso sud all'area espositiva. I manufatti, compresi tra lo scavalco dell'RFI e lo scavalco dell'autostrada A8, sono strutturalmente diversi l'uno dall'altro ma uniti da una continuità visiva offerta dalla presenza degli archi disposti in serie e dal rivestimento metallico che caratterizza il profilo dell'impalcato. Le proprietà di leggerezza e trasparenza che contraddistinguono l'intervento permettono di mettere facilmente in relazione l'infrastruttura con l'area espositiva, gli accessi autostradali, la viabilità minore e il contesto urbanistico e architettonico (figura 1).

Il sistema di ponti ed archi all'ingresso sud di EXPO 2015 Milano

The bridge and arch system at the south entrance to Milan Expo 2015

Riccardo Formichi, Andrea Lucarelli,
Massimo Majowiecki,
Salvatore Giacomo Morano

Le opere principali sono i due ponti ad arco, che superano le due autostrade A4 e A8, uniti dal viadotto Expo, fiancheggiato dai due grandi archi estetici. Il sistema di archi allineati è enfatizzato dai raccordi al piede realizzati con un carter metallico, che danno maggiore continuità al ritmato susseguirsi delle arcate (figura 2). Il ponte ad arco sull'A4 è costituito da una campata sospesa da funi collegate a due archi isolati e sfalsati in pianta, posti all'esterno dell'impalcato, e completato con due campate di approccio che si protendono da



Fig. 1 - Vista generale - Viadotto EXPO e ponte ad arco su A8 (foto G. Albo)



Fig. 2 - Il sistema di ponti ed archi con l'autostrada A4 in primo piano - Rendering del progetto

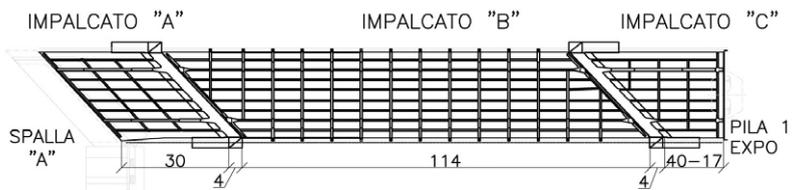


Fig. 3 - Ponte ad arco su A4 - Pianta dell'opera

un lato verso la spalla RFI e dall'altra verso il viadotto EXPO. La lunghezza complessiva del ponte è di circa 180 m. Il viadotto EXPO è una struttura a travata continua complessivamente lunga 265 m. Ai suoi lati sono posti due archi estetici, senza funzione di sostegno dell'impalcato, lunghi circa 200 m e raccordati visivamente alla base con gli altri archi. Infine, il ponte sull'A8 è costituito da un impalcato planimetricamente in curva, sospeso, sul solo lato esterno curva, da funi collegate ad un unico arco. La campata sospesa è complessivamente lunga circa 90 m. A collegare il viadotto EXPO e il ponte sulla A8, è presente una campata in semplice appoggio lunga circa 56 m.

Mentre il ponte ad arco sulla A4 e il viadotto EXPO sostengono una doppia carreggiata con due corsie per senso di marcia, il ponte ad arco sulla A8 sostiene la sola carreggiata che scavalca l'autostrada e vi si immette.

2. IL PONTE AD ARCO SULL'AUTOSTRADA A4

L'opera è costituita da una campata sospesa (figura 5), impalcato B, di 114 m di luce sostenuta con sospensione di tipo Langer e da due archi isolati e sfalsati longitudinalmente in pianta di 22,8 m. Completano l'opera gli impalcati A e C, due campate di approccio solidali con i traversoni che collegano gli archi (figura 3). Gli archi hanno una luce di 140 m e un'altezza, misurata dal piano campagna, di 35 m e sono posti esternamente all'impalcato distanziati trasversalmente tra loro di circa 27 m. Alla quota dell'impalcato i due archi sono collegati tra loro da due robusti traversi con sezione scatolare (figure 3, 4 e 6).

Il tipo di sospensione adottata, scelta anche

per motivi di carattere estetico, ha richiesto di dotare l'arco di una significativa rigidezza flessionale nel proprio piano per fronteggiare i momenti prodotti dai carichi viaggianti, a cui si sono aggiunti anche quelli prodotti dagli effetti aeroelastici del vento. Infatti, gli archi isolati e completamente liberi al di sopra dell'impalcato sono risultati sensibili, seppur per alte velocità del vento, a fenomeni di distacco di vortici che sono stati portati in conto quantificandone le relative azioni sulla base delle normative europee e delle istruzioni tecniche nazionali CNR DT-207/2008. Le azioni statiche del vento e la necessità di garantire la sicurezza all'instabilità globale degli archi hanno richiesto una

elevata rigidezza flessionale anche nel piano trasversale e hanno suggerito l'adozione di una sezione rettangolare cava. La larghezza della sezione è ovunque di 3000 mm, mentre l'altezza è pari a 2500 mm per quasi tutto lo sviluppo tranne che nelle parti terminali, al di sotto della quota dell'impalcato, in cui essa cresce progressivamente fino a raggiungere 4500 mm alla base. Gli spessori dei piatti componenti, in genere 25 mm, sono variabili nelle zone di base e raggiungono il massimo di 60 mm in corrispondenza del nodo con i traversoni (figura 7). Gli archi presentano diaframmi di irrigidimento ad interasse di circa 4,5 m che vengono sostituiti, in corrispondenza delle sospensioni, da

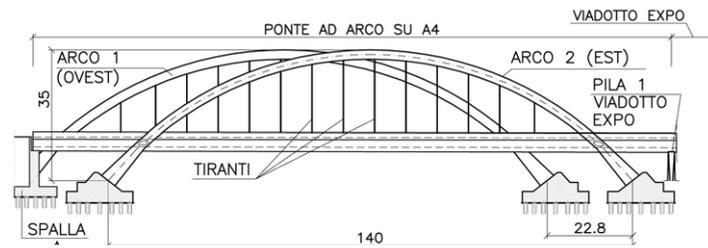


Fig. 4 - Ponte ad arco su A4 - Prospetto

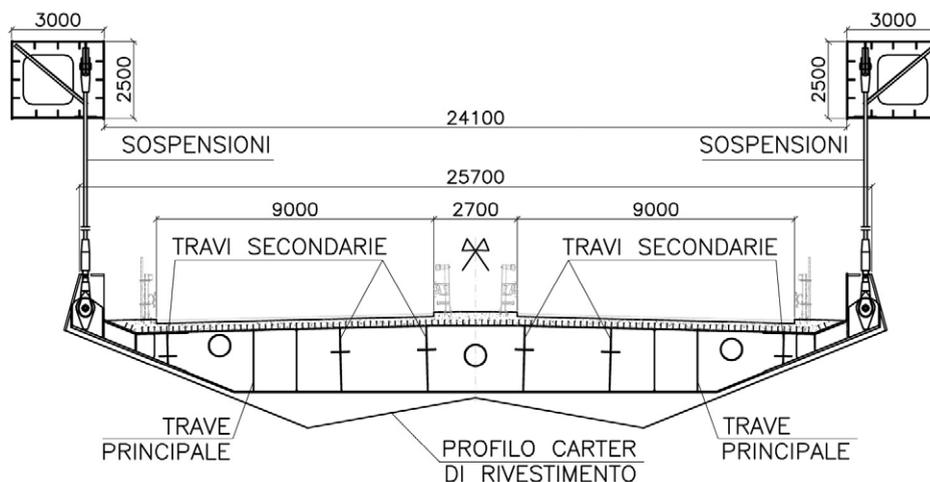


Fig. 5 - Ponte ad arco A4 - Sezione trasversale - Impalcato B

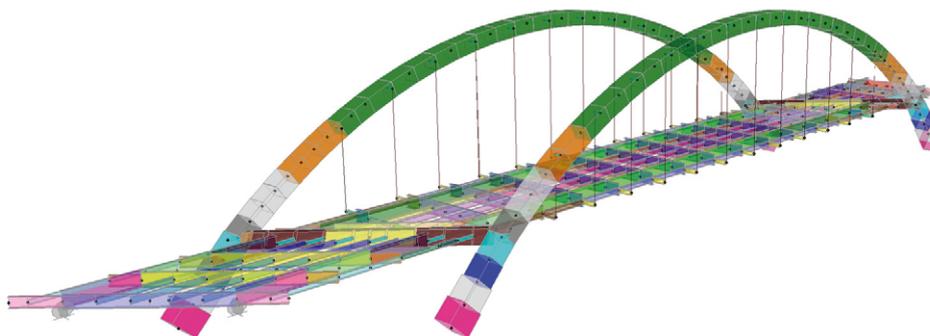


Fig. 6 - Ponte ad arco A4 - Modello agli elementi finiti

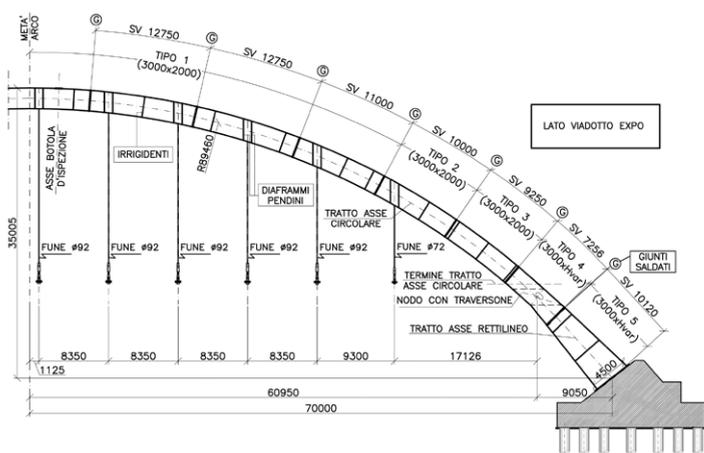


Fig. 7 - Ponte ad arco su A4 - Arco 2

diaframmi più robusti che ospitano i sistemi di attacco delle funi (figure 8 e 9). Le funi salgono verticalmente dall'impalcato e raggiungono la sezione degli archi in posizione trasversalmente eccentrica, spostata verso il centro del ponte. In questo modo si trasferisce una componente di torsione sull'arco, che la incassa facilmente in forza della sua sezione scatolare, ma si evitano impegnative flessioni trasversali che sarebbero insorte inclinando le funi per raggiungere il centro della sezione dell'arco.

L'impalcato "B" è costituito da un graticcio di travi e traversi metallici resi collaboranti tramite piolature con una soletta in c.a. gettata. Essa ha uno spessore complessivo di 28 cm, di cui 6 cm relativi alle predalles autoportanti. La pianta dell'impalcato, seguendo lo sfalsamento in pianta degli archi, ha la forma di un parallelogramma, ma i traversi, ad esclusione di quelli di estremità, sono ordinati perpendicolarmente all'asse del ponte e spazati di circa 8,35 m (figura 3).

Il sistema di sospensione è costituito da 22 funi spiriodali chiuse di diametro di 92 mm e da 2 di diametro 72 mm che sostengono, alle loro estremità, i traversi ortogonali. L'altezza massima dei traversi misura 2195 mm e ad essi sono collegate in continuità, per mezzo di unioni bullonate, le 2 travi principali di impalcato di analoga altezza e le 6 travi secondarie di altezza ridotta. L'interasse delle travi risulta variabile da 2800

a 3200 mm. In corrispondenza delle travi longitudinali principali l'impalcato sospeso è appoggiato ai traversoni di collegamento degli archi per mezzo di dispositivi a disco elastomerico confinato posti su specifiche selle metalliche. Il vincolo fisso, lato RFI, e quello unidirezionale, lato viadotto EXPO, sono posti sull'allineamento della trave principale lato ovest, mentre sull'altra trave principale sono utilizzati dispositivi multidirezionali. Il vincolamento isostatico nel piano orizzontale dell'impalcato "B" esclude un effetto di incatenamento degli archi alla quota di impalcato che avrebbe incrementato le flessioni in corrispondenza del concio di nodo con i traversoni, già molto sollecitato. Le selle metalliche sulle quali trovano spazio gli apparecchi di appoggio (figura 10) sono state concepite come un elemento a pi-greco, ispezionabile dal basso, che aggetta, con un'altezza ridotta, dal traversone che collega gli archi. L'elemento, interamente saldato, è giunto in cantiere come un concio unico del traversone poi saldato a piè d'opera. Per poter restare all'interno degli spazi delimitati dal carter di rivestimento dell'impalcato, anche le travi principali e il traverso inclinato terminale dell'impalcato "B" sono stati ridotti in altezza, ottenendo così gli spazi utili all'alloggiamento dei dispositivi di appoggio e di eventuali sistemi di sollevamento nonché per le operazioni di manutenzione e sostituzione. Ai lati dell'impalcato "B" sono poste

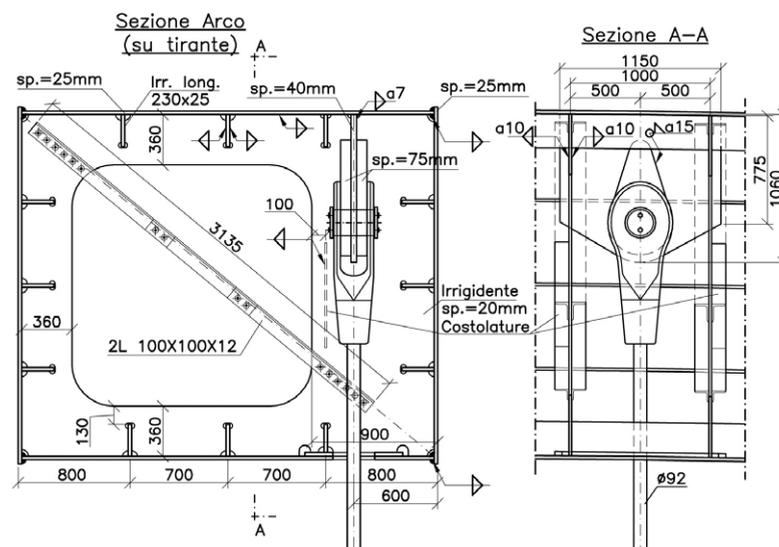


Fig. 8 - Ponte ad arco su A4 - Particolare attacco arco/sospensione

le due campatine di accesso, denominate impalcato "A" e "C", realizzate con graticcio metallico e soletta collaborante, e con forma in pianta rispettivamente di parallelogramma e trapezio. Esse sono integralmente solidali con i traversoni di collegamento degli archi e dotate di appoggi multidirezionali alle loro estremità. Questa scelta progettuale è stata preferita rispetto alla realizzazione di campate con vincolamento isostatico per privilegiare la durabilità e la semplicità di manutenzione ottenuta con l'eliminazione del giunto con il traversone e dei relativi dispositivi di appoggio. Per rendere più favorevole la distribuzione dei momenti sulle travi delle campatine, influenzata anche dalla deformabilità del traversone, è stato necessario prevedere cerniere provvisorie nei nodi di collegamento tra travi e traversoni che sono state bloccate dopo il getto della soletta. In entrambi gli impalcato sono presenti 2 travi principali e sei allineamenti di travi secondarie, tutte in asse con quelle dell'impalcato "B" (figura 3). Le due travi principali hanno entrambe luce di circa 30 m nell'impalcato "A" mentre nell'impalcato "C" misurano rispettivamente 21 m e 35 m. I nodi trave-traverso seguono una gerarchia complementare rispetto a quella adottata per l'impalcato "B", infatti nelle campatine le travi principali sono interamente saldate e i traversi sono collegati ad esse per mezzo di unioni bullonate. In conseguenza della diversa conformazione

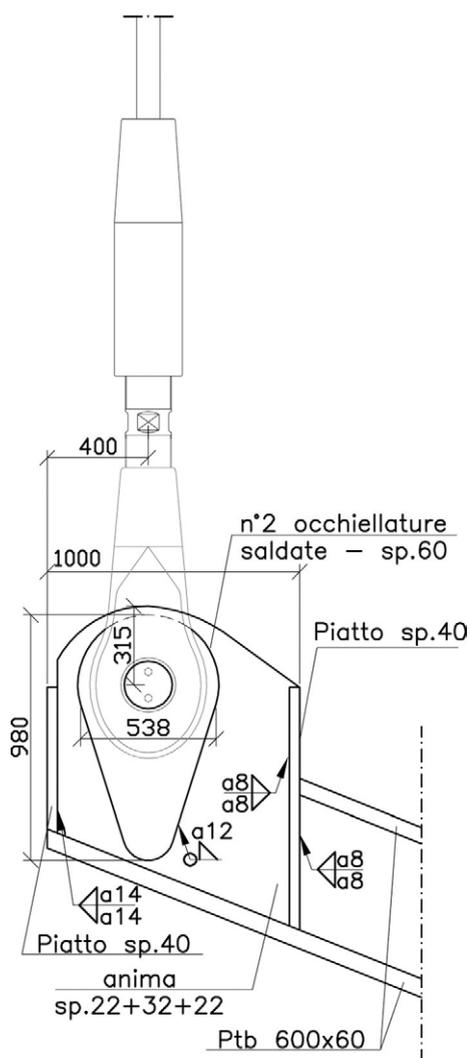


Fig. 9 - Ponte ad arco su A4 - Particolare attacco sospensione/traverso

planimetrica degli impalcati, i traversi sono orditi parallelamente al traversone nell'impalcato "A" e ortogonalmente all'asse longitudinale nel "C". Gli impalcati sono completamente rivestiti con pannelli di Alucobond che ne determinano la particolare forma di intradosso la cui geometria, in sezione tipica, è rappresentata in figura 5.

Si osserva infine che, oltre al sistema di passerelle che garantisce la possibilità di ispezione e manutenzione di tutti gli impalcati, le strutture scatolari degli archi e dei traversoni risultano totalmente ispezionabili. In particolare, grazie alle botole di accesso poste alle basi degli archi e ai fori di ispezione previsti nei nodi arco-traversone, è possibile percorrere interamente un arco all'interno, passare all'interno dei traversoni e ispezionare l'altro arco. Le fondazioni degli

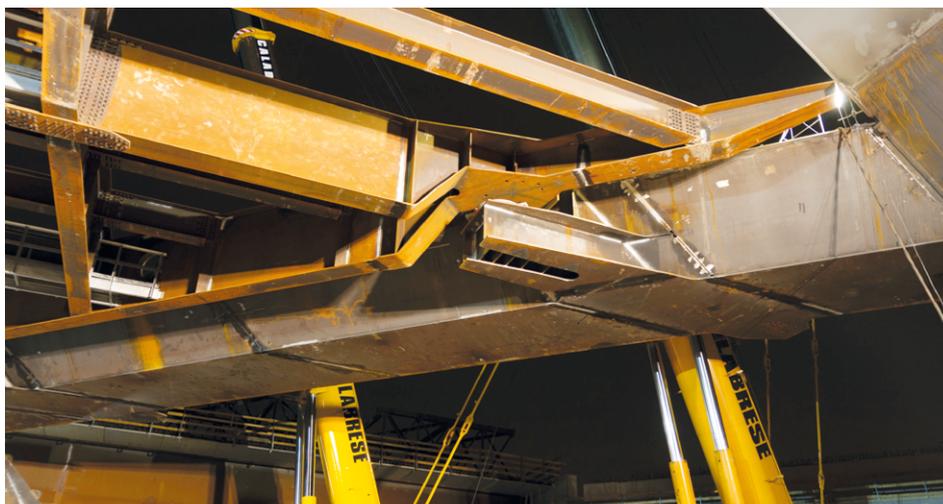


Fig. 10 - Ponte ad arco su A4 - Varo campana "B" - Particolare sella metallica per appoggio impalcato

archi sono costituite da 4 plinti circolari di spessore 3 m e diametro 17,8 m fondati su 57 pali Ø 1,20 m di lunghezza 18 m.

2.1 La procedura di montaggio

Il montaggio del ponte è stato reso più complesso dalla necessità di limitare al massimo le chiusure autostradali. La procedura seguita ha consentito di limitare a tre le chiusure notturne dell'autostrada A4: le prime due sono state necessarie per consentire il varo degli archi mentre la terza è stata prevista per permettere il montaggio del conco dell'impalcato sospeso sovrastante la sede autostradale.

2.1.1 Montaggio archi

Il montaggio degli archi è avvenuto mediante l'ausilio di 6 pile provvisorie per ciascun arco che hanno consentito la realizzazione di conchi di dimensioni ridotte. Ogni arco è stato suddiviso in 7 conchi le cui dimensioni sono state studiate in relazione agli spazi di cantiere disponibili e al peso degli elementi da mo-

vimentare per i tiri in quota. Le deformazioni flessionali dei conchi prodotte dai pesi propri in fase di assemblaggio sono state compensate con opportune distorsioni per ottenere un montaggio "in congruenza". Terminato il montaggio dei due archi si sono montati i due traversoni che li collegano tra loro.

2.1.2 Montaggio impalcati

Completati gli archi si è proceduto al montaggio degli impalcati secondo le fasi di seguito riportate.

Fase 0 - Allestimento delle pile provvisorie e appensione all'arco delle funi di sostegno dell'impalcato.

Fase 1 - Assemblaggio a terra del primo macroconco di impalcato lungo circa 45 m e completo anche del carter di rivestimento, da varare sopra l'autostrada A4. Traslazione sulla sede autostradale mediante carrelloni idraulici. Varo con l'ausilio di 4 autogrù e successiva sospensione del macroconco alle funi ad esso ad esso afferenti, appoggio sul traverso metallico di collegamento degli

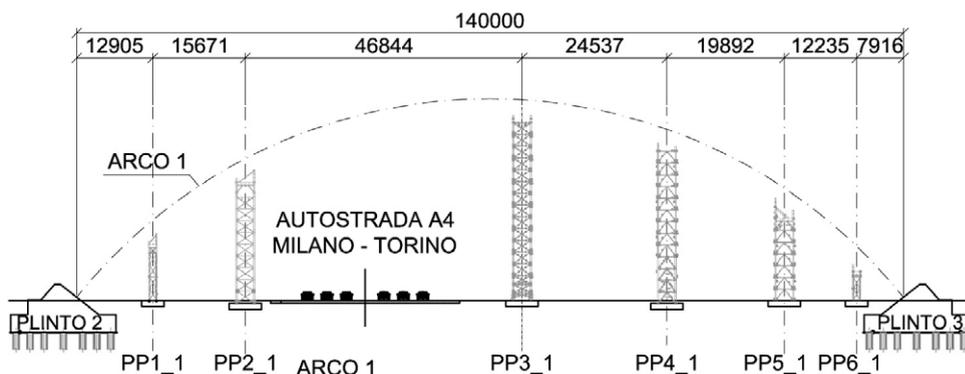


Fig. 11 - Ponte ad arco su A4 - Montaggio Arco 1 - Pile provvisorie



Fig. 12 - Vista degli archi A4 in fase di montaggio con in primo piano il traverso di collegamento



Fig. 13 - Varo del primo macroconco di impalcato sospeso sopra l'autostrada A4

archi e sua stabilizzazione orizzontale con due pile provvisorie. (figura 13)

Fase 2 – Completamento dell'impalcato sospeso mediante il varo di successivi macroconci sostenuti dalle funi di sospensione e stabilizzati orizzontalmente con pile provvisorie (figura 14).

Fase 3 – Montaggio degli impalcati "A" e "C" mediante varo dal basso.

Fase 4 – Completamento dei montaggi delle lastre predalles.

Fase 5 – Lettura dei carichi agenti sulle funi e successiva ricalibratura dei tiri in aderenza alle assunzioni progettuali.

Fase 6 – Getto della soletta collaborante.

Fase 7 – Serraggio finale dei giunti bullonati delle travi secondarie degli impalcati A e C al traversone di collegamento degli archi.

Fase 8 – Misurazione diretta dei carichi sugli

appoggi. Determinazione dei tiri su tutte le funi mediante analisi vibrazionale

Fase 9 – Regolazione finale dei tiri delle funi più corte per garantire il corretto carico sugli appoggi.

Fase 10 – Completamento delle finiture.

3. IL PONTE AD ARCO SULL'AUTOSTRADA A8

Il progetto dell'opera, inserita in prossimità di una rampa di svincolo, è risultato particolarmente complesso a causa della geometria della sede stradale che, in corrispondenza del ponte, è caratterizzata da uno sviluppo planimetrico con curvatura variabile e da una livelletta a pendenza crescente. A ciò va aggiunta anche la variabilità in larghezza dell'impalcato, necessaria per garantire la visibilità in curva. L'impalcato, procedendo

dal Viadotto EXPO verso la spalla B, passa da un tratto rettilineo di larghezza costante (ca. 12,70 m) e con pendenza longitudinale minima, ad un tratto con curvatura accentuata ($R = \text{ca. } 120 \text{ m}$) con allargamento di carreggiata (fino a 14,60 m) e sensibile pendenza longitudinale. Il ponte è costituito da un'unica campata sospesa, sostenuta da un sistema di tiranti fissati su un unico arco, con luce di 91 m e freccia di circa 28 m, posto sul solo lato esterno curva (figure 15 e 16). L'impalcato sospeso si sviluppa per circa 90 m ad una quota intermedia dell'arco e poggia alle estremità, da un lato sulla pila A e dall'altro sulla spalla B. La sospensione, di tipo Langer, è realizzata con 9 funi spirroidali chiuse $\varnothing 92 \text{ mm}$ poste ad interasse 7,5 m, che sostengono lateralmente l'impalcato in corrispondenza di traversi. Gli attacchi delle funi sull'arco sono eccentrici rispetto alla sua sezione, spostati verso l'interno curva. A causa della curvatura dell'impalcato le funi risultano inclinate ciascuna in modo diverso, potendo anche avere inclinazione opposta a seconda che l'attacco della fune sull'impalcato si trovi da un lato o dall'altro rispetto all'asse sul quale sono allineati gli attacchi delle funi all'arco. In fase di progetto è stata valutata anche la possibilità di adottare un sospensione doppia per ridurre gli effetti torsionali sull'impalcato (figura 18).

È stata preferita la sospensione unica perché è risultato molto più vantaggioso privilegiare l'abbattimento degli effetti trasver-

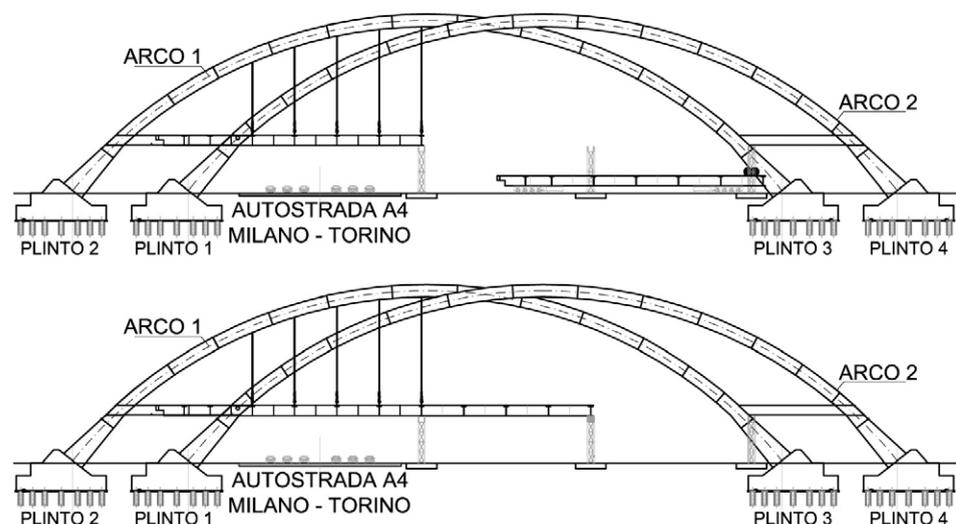


Fig. 14 - Fasi di varo dei macroconci dell'impalcato sospeso sopra l'autostrada A4

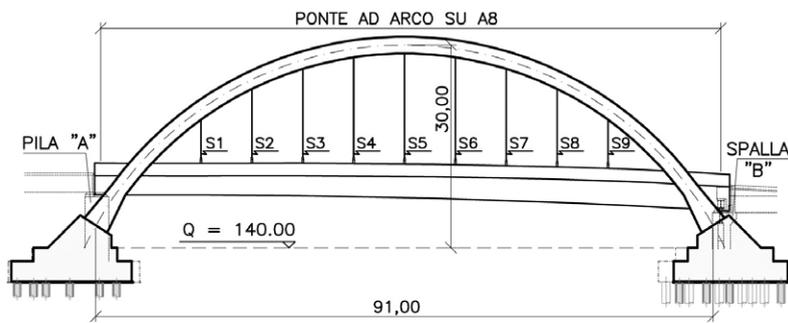


Fig. 15 – Ponte ad arco A8 – Prospetto longitudinale

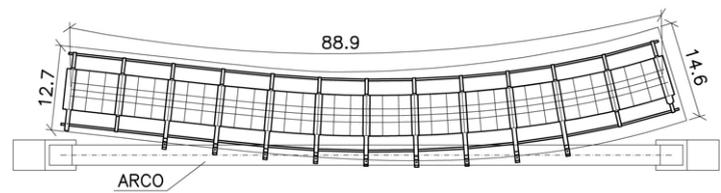


Fig. 16 – Ponte ad arco A8 – Pianta impalcato

sali sull'arco piuttosto che mitigare quelli torsionali sull'impalcato, al quale è stata conferita una elevata efficienza nell'assorbimento di tali sollecitazioni adottando una sezione a cassone monocellulare metallico interamente chiusa. Inoltre, la scelta di sospendere l'impalcato da un solo lato ha ridotto i problemi geometrici di interferenza tra le funi interno curva e la sagoma stradale, che avrebbero reso necessario un arco di altezza maggiore. L'arco ha sezione scatolare, larga ovunque 3000 mm e alta 2500 mm per quasi tutto lo sviluppo tranne che nelle parti terminali, al di sotto dell'impalcato, in cui essa cresce progressivamente fino a raggiungere 4000 mm alla base. Gli spessori dei piatti componenti risultano pressoché costanti, 20-25 mm, su tutto lo sviluppo dell'arco e si incrementano a 30 mm soltanto nella zona di base. Sono presenti diaframmi di irrigidimento ad interasse di circa 4,5 m che, in corrispondenza delle sospensioni, vengono localmente sostituiti dagli irrobustimenti per l'attacco delle funi. La rigidità dell'arco è risultata tale da

escludere la sensibilità della struttura agli effetti aeroelastici del vento.

L'impalcato è costituito da un cassone metallico monocellulare chiuso con dimensioni di 6,0 m x 2,5 m circa (figura 17). La soletta collaborante in c.a., di spessore di 20 cm ed ordita trasversalmente, poggia, oltre che sulle anime del cassone, su due travi secondarie laterali poste esternamente ad esso e collegate ai traversi e su due travi secondarie centrali che suddividono la larghezza del cassone in tre campi di 2,0 m. Queste ultime condividono la piattabanda superiore con il piatto metallico superiore del cassone che è interamente piolato. Il getto della soletta nelle zone esterne al cassone è stato effettuato su lastre metalliche tralicciate. I traversi con l'attacco della fune spiccano dal cassone a tutta altezza e si rastremano verso la loro estremità rimanendo sempre all'interno del carter di rivestimento esterno, costituito da pannelli di Alucobond, che caratterizza la particolare sagoma dell'impalcato. Tutti i traversi sul lato interno curva, oltre al secondo e il penultimo su entrambi i lati, non

presentano l'attacco delle funi e, avendo solo compito di sostenere le travi secondarie laterali, sono realizzati come mensole di altezza ridotta che fuoriescono dal cassone. Le travi secondarie esterne sono collegate con nodi bullonati di continuità ai traversi. Tutte le altre connessioni dell'impalcato, compreso quelle delle travi secondarie interne, sono saldate. Tutti gli elementi dell'impalcato, ossia la trave principale a cassone, i traversi e le travi secondarie, sono resi collaboranti con la soletta in calcestruzzo mediante piolature. L'accentuata curvatura planimetrica e la disposizione della pendinatura sul solo lato esterno curva inducono elevati effetti torcenti, prodotti dai carichi permanenti, che, essendo opposti in segno, parzialmente si elidono. Rimane comunque una componente significativa, dovuta alla prevalenza dell'effetto della sospensione, che mantiene in trazione gli appoggi lato esterno curva ad entrambe le estremità in tutte le condizioni di carico. Per garantire il funzionamento di questi appoggi sono stati presi provvedimenti differenti alle due estremità. Sulla pila A si è impiegato un dispositivo fisso a carico negativo in

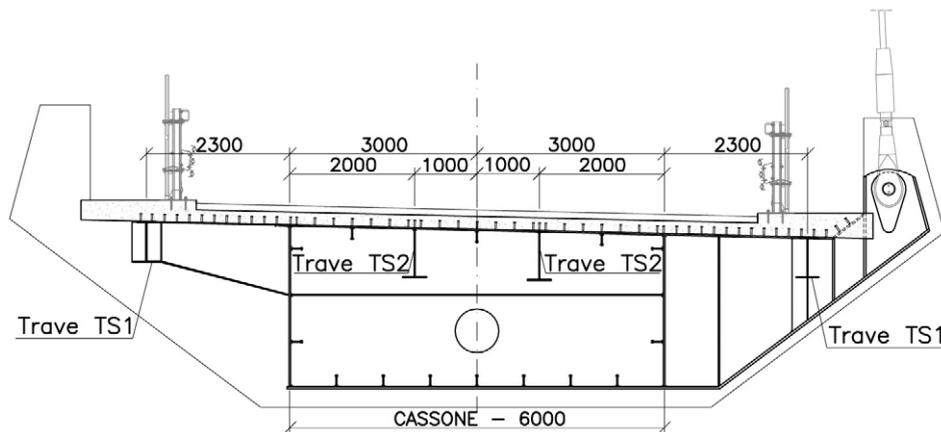


Fig. 17 – Ponte ad arco A8 – Sezione trasversale tipica in corrispondenza di una fune di sospensione

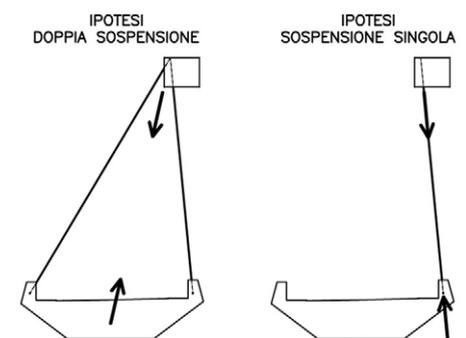


Fig. 18 – Ponte ad arco A8 - Diverse ipotesi per la sospensione dell'impalcato

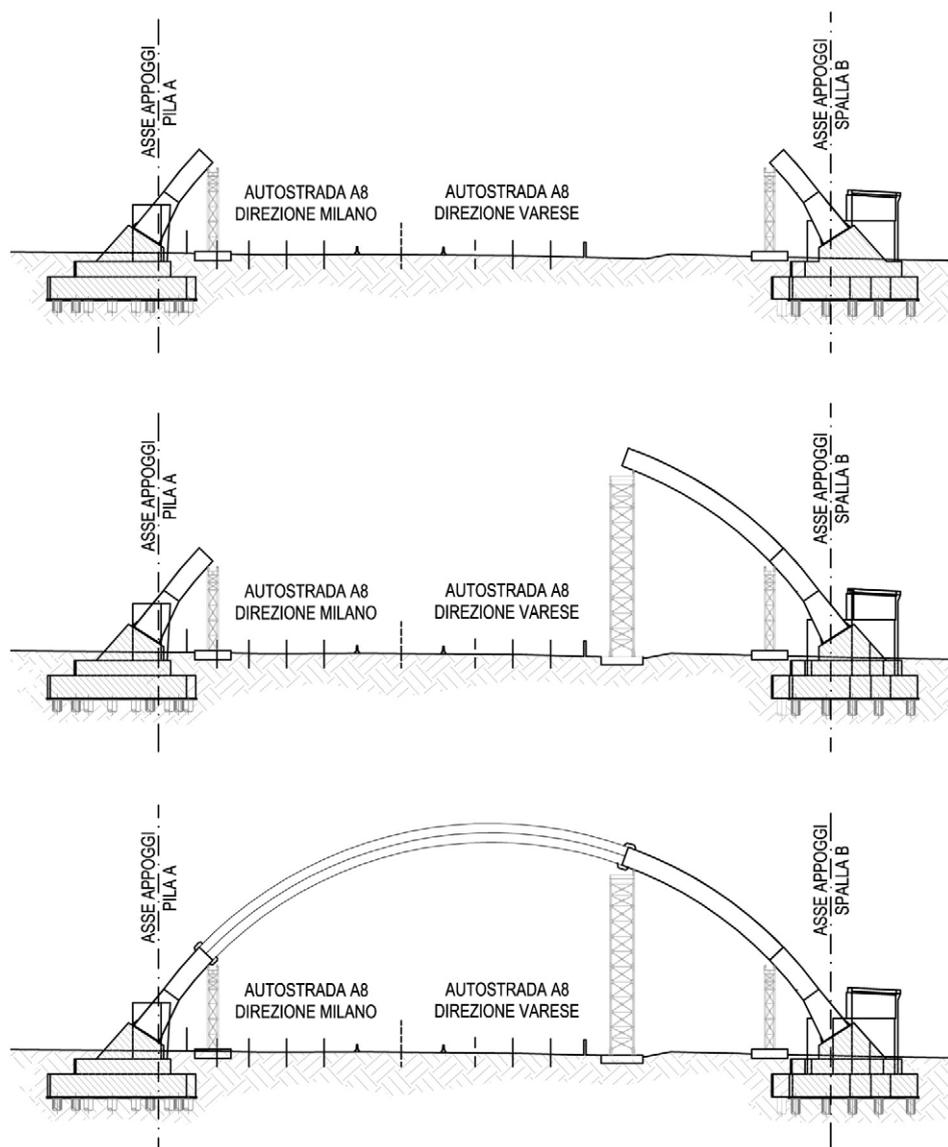


Fig. 22 - Schema montaggio arco su A8

della carreggiata autostradale. Al fine di evitare ulteriori chiusure notturne per il completamento delle opere di finitura, il concio centrale, lungo circa 50 m, è stato assemblato a terra completo di predalles metalliche e carter di rivestimento e varato in un'unica fase (figura 24).



Fig. 23 - Varo notturno del macroconco 4 dell'arco su autostrada A8. Fig. 24 - Varo notturno del macroconco centrale dell'impalcato sull'autostrada A8

4. IL VIADOTTO EXPO

Il "Viadotto EXPO" si inserisce tra due grandi archi estetici che garantiscono una continuità formale al sistema di opere infrastrutturali rappresentato in serie dal "Ponte ad arco sull'autostrada A4", dal "Viadotto EXPO" e dal "Ponte ad arco sull'autostrada A8" (figura 25)

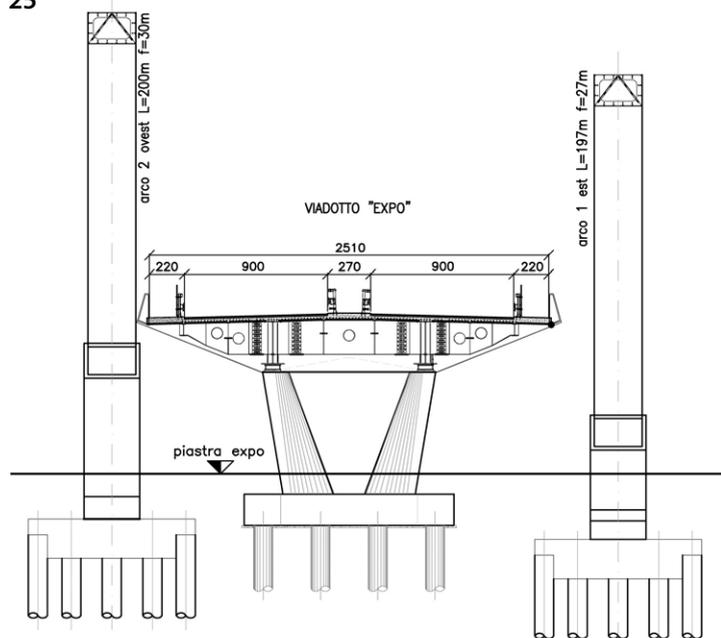


Il viadotto è costituito da una travata continua a 5 campate di 53 m di luce, per uno sviluppo complessivo di 265 m, disposte su 4 pile interne e due pile di estremità. Sul traverso che aggetta dal calcio trave all'estremità del viadotto su pila P1 trova appoggio la campata "C" a pianta trapezoidale del ponte ad arco sulla A4 la quale rimane, per il resto, strutturalmente indipendente dal viadotto. L'opera sostiene una piattaforma larga 25,10 m che ospita due carreggiate di 9,00 m ciascuna e due marciapiedi laterali ciascuno di larghezza pari a 2,20 m. Lo spartitraffico centrale è largo complessivamente 2,70 m (figure 26 e 27).

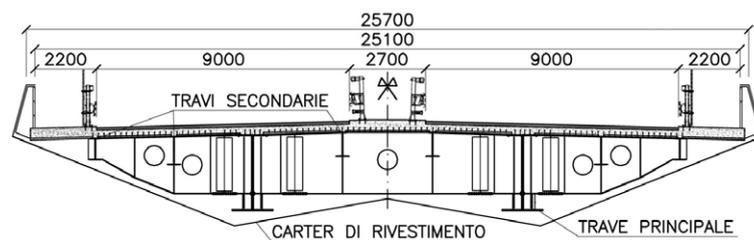
L'impalcato è del tipo misto acciaio-clc a due travi con soletta collaborante, completato da traversi in parete piena ad interasse di 8,83 m tra i quali sono poste 6 travi longitudinali secondarie. I traversi sono bullonati in corrispondenza delle travi principali. La soletta è ordita trasversalmente all'impalcato e poggia sulle travi longitudinali principali e secondarie con interassi variabili di 3,20 m e 2,80 m e prosegue a sbalzo per 2,15 m. L'impalcato è completamente rivestito con un carter di Alucobond che ne determina la particolare forma di intradosso che è rappresentata da una superficie piana in corrispondenza delle pile e forma un angolo concavo in mezzeria alle campate (figura 26).

Le pile sono costituite da due fusti in conglomerato cementizio armato separati e divergenti verso l'esterno dalla base alla sommità. Il disegno della pila è caratterizzato da una sezione variabile in altezza la cui geometria è costituita da una superficie ellittico-circolare sul prospetto frontale e da una superficie piana inclinata sul prospetto laterale. I due fusti sono collegati in sommità da un tirante metallico che ne mitiga le sollecitazioni flessionali. Esso è costituito da un piatto di acciaio S355 pretensionato prima della messa in opera dell'impalcato. Il tirante funge anche da testa pila e ospita i dispositivi di appoggio (figure 27 e 28). Le due travi di impalcato appoggiano sulla testa dei fusti per mezzo di isolatori elastomerici, caratterizzati da un comportamen-

25



26



27



Fig. 25 - Viadotto "EXPO" - Sezione trasversale. Fig. 26 - Viadotto "EXPO" - Sezione trasversale tipica intermedia. Fig. 27 - Viadotto "EXPO" - Vista d'assieme lato ponte ad arco su A4 della carpenteria metallica e delle pile

to sostanzialmente elastico lineare per le azioni orizzontali, che hanno permesso di allungare il periodo proprio della struttura riducendo sensibilmente le azioni sismiche trasferite alle sottostrutture.

Gli spostamenti prodotti dagli effetti termici e dal comportamento elastico degli isolatori elastomerici si sfogano nei giunti di dilatazione presenti su ciascuna delle due pile di estremità, in corrispondenza delle quali sono stati inseriti dei ritegni trasversali per avere nel giunto solo scorrimenti longitudinali. Anche per questa opera è presente un sistema di passerelle, sospeso al di sotto dell'impalcato e all'interno del carter di rivestimento, che permette di raggiungere e ispezionare agevolmente tutte le zone.

Il montaggio dell'impalcato è avvenuto con varo dal basso mediante l'ausilio di pile provvisorie (figura 29). La soletta è stata gettata su predalles in c.a. tralicciate autoportanti.

5. GLI ARCHI ESTETICI

Il progetto ha previsto la realizzazione di due archi estetici ai lati del viadotto EXPO denominati arco 1 ed arco 2. L'arco 2, di lunghezza complessiva di 200 m e freccia in chiave di 30 m (figura 30), ha sezione scatolare in acciaio di dimensioni 2000 x 3000 mm con

spessore dei piatti componenti variabile da 25 a 40 mm (figura 31). Tutti i conci sono assemblati tra loro mediante saldatura. La parte metallica è prevista incastrata, per mezzo di giunti flangiati, su mensole in calcestruzzo armato con sezione scatolare di dimensioni variabili che spiccano per 14 m dal plinto di fondazione. I tirafondi della flangia di base sono stati precaricati per garantire sempre, in condizioni di esercizio, il mantenimento di uno stato di compressione sulla piastra di base. La parte di arco in c.a. è realizzata cava per garantire l'ispezionabilità dell'opera senza creare indebolimenti sulla sezione di acciaio. L'arco 1, di lunghezza complessiva di 197 m e freccia in chiave di 27 m, presenta le stesse caratteristiche geometriche dell'arco 2 in termini di dimensione e spessori della sezione in acciaio e differisce da questo per le dimensioni della parte terminale in c.a. il cui sviluppo risulta pari a 7 m dal plinto di

fondazione. L'uso di sezioni scatolari in c.a. per le parti terminali poste alla base degli archi si è reso necessario per incrementare la rigidità delle strutture e migliorarne il comportamento dinamico ai fini degli effetti

28



29



30

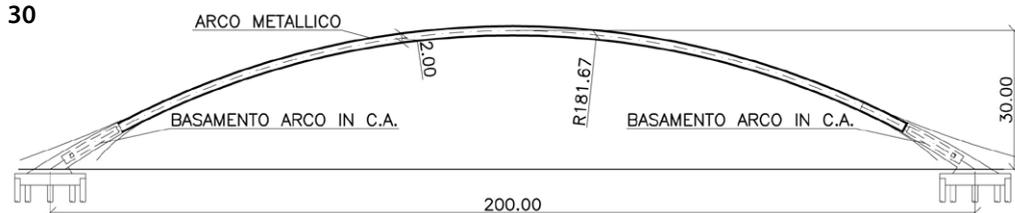


Fig. 28 - Viadotto "EXPO" - Particolare del tirante testa pila in fase di posa con il sistema di pretensionamento. Fig. 29 - Montaggio del viadotto EXPO con pile provvisorie. Fig. 30 - Arco EXPO 2 - Prospetto

del vento. Le fondazioni di entrambi gli archi sono realizzate con plinti di forma pseudo-circolare allungata posti su 31 pali Ø 1200 mm. Gli archi "estetici" sono caratterizzati da un struttura particolarmente snella e relativamente leggera dato che non sono assegnati loro compiti di sostegno di impalcati o di altri carichi verticali rilevanti, se non quelli derivanti dal peso proprio, dai rivestimenti che li avvolgono nella parte terminale e dal sovraccarico della neve. Considerando che le azioni sismiche risultano modeste per il basso grado di sismicità del sito e la leggerezza dell'opera, ai fini della verifica delle strutture risulta dimensionante l'azione del vento. In aggiunta alle azioni statiche equivalenti del vento, proprio per le caratteristiche di leggerezza, le strutture sono risultate particolarmente sensibili agli effetti aeroelastici del vento di "distacco di vortici" (*"vortex shedding"*) e di *"galloping"*. In merito a tali effetti si è ritenuto che i contenuti della normativa nazionale (NTC 2008) ed europea (EC1) pur integrati con quanto riportato nei documenti tecnici più aggiornati (CNR-DT 207/2008) non fossero sufficienti per ottenere una quantificazione esatta e completamente affidabile delle azioni indotte sulla strutture. Pertanto, pur procedendo ad una prima progettazione basata unicamente sulle indicazioni di normativa, si è deciso di effettuare una campagna di prove sperimentali. La progettazione si è articolata in vari stadi successivi, provvedendo ad una revisione del progetto man mano che le prove rendevano disponibili nuovi risultati. Le prove si sono articolate in:

- Prove in galleria del vento su modello sezione.
- Prove in galleria del vento su modello aeroelastico completo in scala.
- Prove di identificazione dinamica al vero sulle strutture complete.

Le prime sono servite a "quantificare" la risposta al vento della specifica sezione adottata e hanno consentito un'applicazione più consapevole dei metodi previsti in normativa utilizzando, per molti parametri, la quantificazione diretta in sostituzione di quella stimata derivabile dalle norme e rivelatasi non perfettamente aderente al caso in esame. Le seconde sono state necessarie per comprovare che il comportamento complessivo fosse soddisfacente e per cogliere effetti tridimensionali che le prove su modello sezione, per loro stessa natura, non possono indagare. Le ultime sono servite per avere la conferma definitiva che il comportamento dinamico della struttura reale fosse aderente alle previsioni progettuali.

5.1 Le prove su modello sezione

Le prove su modello sezione sono state eseguite presso il Centro di Ricerca Interuniversitario di Aerodinamica delle Costruzioni e Ingegneria del Vento di Firenze [1]. Il modello, in scala 1:26 e realizzato in legno con opportuni irrigidimenti in carbonio (figura 32), è stato sottoposto a due tipi di prove: la prima per l'individuazione delle caratteristiche delle azioni indotte dal vento in termini statici, la seconda per l'esame della risposta della sezione al distacco dei vortici e, più in generale, agli effetti aeroelastici. I

risultati delle prove hanno evidenziato una situazione potenzialmente più gravosa rispetto alla previsioni a cui si sarebbe giunti applicando le forzanti del vento desunte dalle formulazioni contenute nel CNR-DT 207/2008 e nell'Eurocodice 1 UNI EN 1991-1-4:2010. In particolare, per la specifica sezione 3 x 2 m, si è osservato che il numero di Strouhal è più elevato rispetto a quello riportato nelle indicazioni di normativa, con la possibilità quindi che si verificano fenomeni di sincronizzazione del distacco dei vortici a velocità critiche più basse. Inoltre, anche il valore del "fattore di instabilità da galoppo" a_G è risultato più piccolo di quello previsto evidenziando che vi è una maggior sensibilità della struttura al fenomeno del *"galloping"*. Pertanto le prove hanno messo in luce la necessità di conferire alla struttura un elevato numero di Scruton (circa. 230) per scongiurare la possibilità che le sue oscillazioni divengano rapidamente e sensibilmente elevate.

Il numero di Scruton è un parametro adimensionale che dipende dalla massa equivalente, dalla dimensione trasversale di riferimento e dallo smorzamento. Essendo stata fissata la dimensione di riferimento (larghezza della sezione dell'arco pari a 3 m) ed essendo la massa equivalente relativamente poco modificabile e legata alle dimensioni della struttura, nella necessaria revisione del progetto si è deciso di intervenire in maniera decisa sullo smorzamento. Ciò è stato fatto potenziando il sistema di smorzatori a massa accordata (TMD, Tuned Mass Dampers) che comunque erano stati previsti già nella prima versione del progetto. Questi dispositivi, largamente utilizzati per ridurre le oscillazioni prodotte dal vento nelle strutture, per loro natura, sono attivi selettivamente per la specifica frequenza, e quindi modo di vibrare, per cui sono stati progettati. Pertanto la prima esigenza progettuale è stata quella di limitare il numero di modi di vibrare interessati dai fenomeni aeroelastici per installare un numero ragionevole di TMD.

Si è ritenuto accettabile avere una struttura sensibile al distacco dei vortici per due

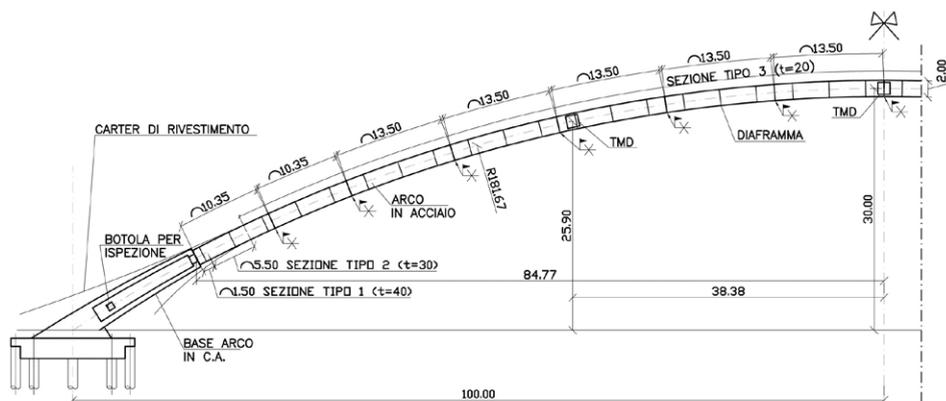


Fig. 31 - Arco EXPO 2 - Carpenteria metallica

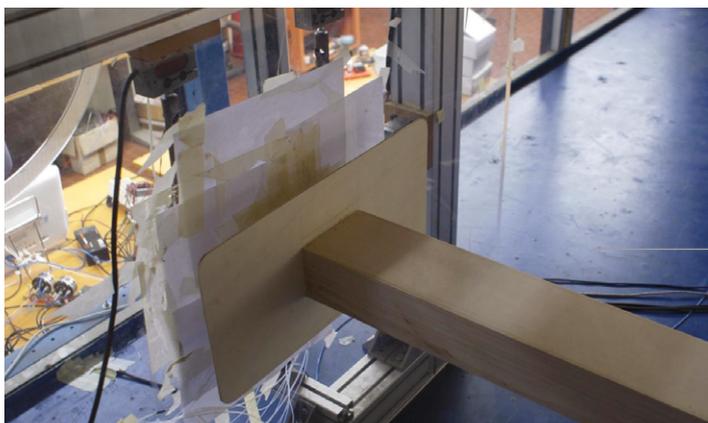


Fig. 32 - Vista del modello sezione nella camera di prova

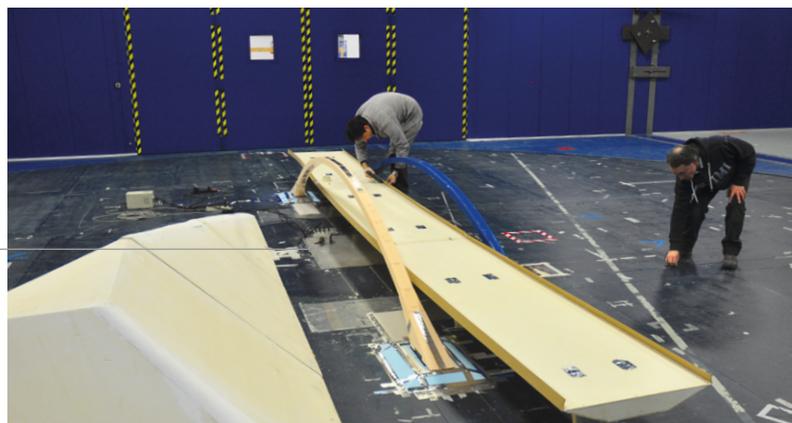


Fig. 33 - Il modello completo in scala in fase di assemblaggio

modi di vibrazione nel piano verticale, in particolare con il secondo modo eccitato da velocità critiche superiori a quelle con tempo di ritorno di 100 anni (vita utile della struttura) anche se inferiori a quelle con tempo di ritorno di 1000 anni che costituisce il limite superiore dell'intervallo per cui la struttura deve essere indagata per gli effetti aeroelastici (10 volte la vita utile). La geometria adottata per la struttura, in particolare gli spessori dei piatti componenti la sezione, consentono di ottenere questo risultato. Inoltre si è rivelata molto opportuna e, quindi, confermata la scelta della prima versione del progetto di realizzare le parti più basse dell'arco con struttura in c.a. per garantire una maggiore rigidità complessiva alla struttura nelle zone adiacenti gli incastri di base ed innalzare conseguentemente frequenze proprie e quindi le velocità critiche.

5.2 Le prove su modello aeroelastico completo

Le prove su modello aeroelastico completo sono state svolte presso la galleria del vento del Politecnico di Milano (figura 33) [2]. Le sperimentazioni condotte in regime laminare in assenza di smorzamento aggiunto a quello proprio della struttura, hanno messo in evidenza dei valori di accelerazione molto elevati, in corrispondenza di velocità del vento sostanzialmente in aderenza a quelle individuate dalle prove sul modello sezione. In particolare si è notata l'insorgenza di una forma di instabilità dinamica, identificabile

come "galloping". Tale instabilità si è ridotta aggiungendo smorzamento alla struttura, trasformandosi in una amplificazione dinamica ad ampiezza controllata e decrescente all'aumentare dello smorzamento. Nelle prove l'aggiunta di smorzamento è stata ottenuta sia mediante smorzatori viscosi a correnti parassite che con smorzatori a massa accordata – TMD. Tali risultati hanno confermato sostanzialmente quelli ottenuti sul modello sezione, anche se la "soppressione dell'instabilità" nel modello aeroelastico completo si è raggiunta con valori di smorzamento un po' più contenuti.

Rilevante è anche il fatto che le prove in flusso laminare e con angolo di esposizione al vento di 90°, ossia con direzione del vento ortogonale al piano dell'arco, sono risultate essere le più critiche dal punto di vista dell'insorgenza dell'instabilità. Superati i $\pm 15^\circ$ nell'intorno dell'esposizione 90°, i fenomeni di instabilità non si sono innescati neppure in presenza del solo smorzamento strutturale intrinseco (0.5% nel modello in scala). Come atteso, condizioni di flusso turbolento e presenza del modello di prosimità ("surrounding") hanno decisamente ridimensionato il problema, ma la quantificazione di questi benefici, ottenuta da una modellazione in scala, non è stata ritenuta sufficientemente affidabile per un impiego "progettuale" dei risultati e il vantaggio è stato prudenzialmente trascurato. Per ciò che attiene al piano trasversale, per tutto il campo di velocità di interesse e per tutte le esposizioni le prove non hanno eviden-

ziato l'insorgenza di nessun fenomeno di instabilità aeroelastica connesso a modi di vibrare nel piano orizzontale pur contando solo sullo smorzamento strutturale proprio. Nel corso delle prove, in assenza di smorzamento aggiunto, si è manifestata anche una amplificazione dinamica riconducibile ad "effetti scia". In particolare, con il modello aeroelastico posto in scia all'altro arco e all'impalcato, si è registrata una evidente amplificazione dinamica del secondo modo nel piano per valori di velocità compresi tra i 20 e i 30 m/s e, in misura minore, del primo modo nel piano per valori di velocità compresi tra i 10 e i 15 m/s.

Poiché per il primo modo nel piano era già stata prevista l'aggiunta di smorzamento con sistemi TMD, è stato effettuato un supplemento di prove per indagare tale effetto scia e valutare lo smorzamento necessario per abbattere le massime ampiezze di oscillazione per il secondo modo verticale. Le prove hanno evidenziato che l'aggiunta di uno smorzamento relativamente modesto esclude l'insorgere del problema.

A conclusione delle prove effettuate su modello aeroelastico completo si è proceduto a un aggiornamento del progetto con la definizione finale delle caratteristiche del sistema di smorzamento di cui sono stati dotati gli archi per scongiurare l'insorgere di forme di instabilità per effetto dell'azione eolica. Ciascun arco è stato dotato di 3 TMD che agiscono per i modi di vibrare nel piano verticale. Uno è ubicato nella sezione di mezzaria, ossia in sommità dell'arco, e

garantisce lo smorzamento degli effetti aerelastici connessi al primo modo di vibrare. Gli altri due sono posti a circa a 1/3 e 2/3 dello sviluppo e sono attivi per gli effetti del vento relativi al secondo modo di vibrare (figura 34). Dopo il completamento delle strutture sono state condotte le prove di identificazione dinamica in sito che hanno confermato un comportamento dell'opera in ottimo accordo con le previsioni progettuali. È stata comunque prevista anche una fase di monitoraggio, da eseguirsi nel corso dei primi mesi di esercizio dell'opera, per valutare l'effettivo comportamento degli archi e dei TMD anche in condizioni di vento reale particolarmente gravose e prossime alle velocità critiche. Il montaggio di entrambi gli archi è avvenuto con varo dal basso mediante l'ausilio di pile provvisorie che hanno permesso di saldare in quota i 5 macroconci in cui è stato suddiviso lo scatolare metallico (figure 35 e 36). In fase di assemblaggio si sono compensate con opportune distorsioni le deformazioni flessionali dei conci prodotte dai pesi propri per ottenere un montaggio "in congruenza".

6. MATERIALI IMPIEGATI

6.1 Acciaio da carpenteria

Acciaio da carpenteria secondo EN10025: S355 J2W (per lamiere fino a 50 mm di spessore), S355 K2W (per lamiere oltre 50 mm di spessore), S355 J0W (per i profilati).

6.2 Connettori a pioli

Pioli tipo Nelson in acciaio S235 J2G3+C450, in accordo con 11.3.4.7 del D.M. 14/01/08.



Fig. 34 - Il TMD in fase di installazione - in primo piano la massa oscillante posta sul telaio mobile

6.3 Bulloni

Collegamenti bullonati secondo UNI EN ISO 4016:2002 e UNI EN ISO 5592:1968. Viti classe 10.9 e 8.8, dadi classe 10 e 8, rosette e piastrine classe C50

6.4 Saldature e processi di saldatura

Collegamenti saldati eseguiti ai sensi del punto 11.3.4.5 del D.M. 14/01/08.

6.5 Funi

Funi spiriodali chiuse costruite da un nucleo interno di fili tondi zincati a caldo e minimo 2 strati esterni di fili sagomati a Z e protetti con una lega di zinco alluminio Zn95/Al5. Resistenza dei fili dopo zincatura: 1570 MPa min.

Proof stress $R_{p0.2}$: 1180 MPa min.

Allungamento a rottura: 4% min. su tratto utile di 250 mm.

$E = 163'000$ MPa

Duttilità dei fili: EN-10264

Zincatura : EN-10264 Classe A

I fili sagomati sono preformati rispetto alla

torsione in fase di cordatura.

Funi spiriodali chiuse: $\Phi 92$ mm:

$F_{u,k} = 8430$ kN

$F_{Rd} = 5109$ kN (forza di progetto)

Funi spiriodali chiuse $\Phi 72$ mm:

$F_{u,k} = 5210$ kN

$F_{Rd} = 3158$ kN (forza di progetto)

6.6 Profili Omega per sostegno carter di rivestimento

Acciaio da carpenteria secondo EN10025: S275 JR zincato a caldo secondo UNI 5744

6.7 Carter di rivestimento

Pannelli Alucobond® di alluminio

dott. ing. Riccardo Formichi

Pro Iter s.r.l., Milano,

dott. ing. Andrea Lucarelli, *Politecnica Ingegneria e Architettura, Modena,*

prof. ing. Massimo Majowiecki

Università di Bologna,

prof. ing. Salvatore Giacomo Morano

Università degli Studi di Firenze



Fig. 35 - Arco EXPO 2 - Montaggio macroconco 5



Fig. 36 - Arco EXPO 2 - Completamento montaggi

7. CARATTERISTICHE PRINCIPALI DELLE OPERE E QUANTITATIVI DEI MATERIALI

Ponte ad arco su A4	
Lunghezza impalcato	180 m
Superficie impalcato	4400 mq
Lunghezza archi	140 m
Altezza archi	35 m
Struttura metallica principale S355	2'450'000 kg
Funi Ø92	400 m
Funi Ø72	22 m
Passerelle di ispezione e grigliati	28'200 kg
Rivestimento in pannelli di Alucobond®	5'950 mq
Struttura di sostegno del rivestimento in Alucobond® S275/S355	135'000 kg
Rivestimenti in lamiera sp. 4 mm	81'000 kg
Struttura di sostegno dei rivestimenti in lamiera	37'000 kg

Ponte ad arco su A8	
Lunghezza impalcato	88 m
Superficie impalcato	1200 mq
Lunghezza arco	91 m
Altezza arco	28 m
Struttura metallica principale S355	900'000 kg
Funi Ø92	140 m
Passerelle di ispezione e grigliati	4'000 kg
Rivestimento in pannelli di Alucobond®	1'980 mq
Struttura di sostegno del rivestimento in Alucobond® S275/S355	48'000 kg
Rivestimenti in lamiera sp. 4 mm	36'100 kg
Struttura di sostegno dei rivestimenti in lamiera	14'500 kg

Viadotto EXPO	
Lunghezza impalcato	265 m
Superficie impalcato	6650 mq
Struttura metallica principale S355	1'600'000 kg
Passerelle di ispezione e grigliati	62'000 kg
Rivestimento in pannelli di Alucobond®	8'500 mq
Struttura di sostegno del rivestimento in Alucobond® S275/S355	195'000 kg
Rivestimenti in lamiera sp. 4 mm (interno parapetto)	37'000 kg
Passerelle di ispezione e grigliati	28'200 kg
Rivestimento in pannelli di Alucobond®	5'950 mq
Struttura di sostegno del rivestimento in Alucobond® S275/S355	135'000 kg
Rivestimenti in lamiera sp. 4 mm	81'000 kg
Struttura di sostegno dei rivestimenti in lamiera	37'000 kg

Archi estetici	
Lunghezza archi	200 m
Altezza archi	27-30 m
Struttura metallica principale S355	850'000 kg
Rivestimenti in lamiera sp. 4 mm	56'000 kg
Struttura di sostegno dei rivestimenti in lamiera	34'000 kg

CREDITS

Committente finale: Infrastrutture Lombarde S.p.A

Coordinamento Generale del Progetto:

ing. Riccardo Formichi (Pro Iter s.r.l.)

Progetto architettonico: arch. Antonio Citterio (Antonio Citterio Patricia Viel and Partners Architecture)

Progetto esecutivo: ing. Andrea Lucarelli (Politecnica Ingegneria e Architettura)

RTI:

- Pro Iter s.r.l. (Mandatara)

- Erre.Vi.A. s.r.l. (Mandante)

- Politecnica Ingegneria Architettura (Mandante)

- Antonio Citterio Patricia Viel and Partners Architecture (Mandante)

Consulenti opere strutturali:

prof. ing. Massimo Majowiecki, prof. ing. Salvatore Giacomo Morano

Direzione Lavori:

ing. Guglielmo Fariello (Infrastrutture Lombarde S.p.A)

Impresa Esecutrice: RTI:

- Eureka Consorzio Stabile (Mandatara)

- CCC Consorzio Cooperative costruzioni Soc. Coop. (Mandante)

- Vitali S.p.A. (Mandante)

- CIC Compagnia Italiana Costruzioni S.p.A. (Mandante)

Realizzazione strutture metalliche:

Cordioli & C. – Costruzioni metalliche

RIFERIMENTI

[1] Gruppo di ricerca coordinato da Bartoli G. – Università di Firenze
- CRIACIV– Report di prova “Archi EXPO Milano: Prove aeroelastiche su modello sezione”, 31/07/2012.

[2] Gruppo di ricerca coordinato da Belloli M. – Politecnico di Milano - Dipartimento di Meccanica – Report di prova “Comportamento di-namico indotto dalla sollecitazione eolica sull’Arco estetico Expo”, 18/02/2013.