

Analisi statica e dinamica di una passerella pedonale in acciaio a La Spezia

Eugenio Pulsinelli¹, Ada Zirpoli², Paolo Sattamino³ ■



Progetto/Nome dell'opera:
Thaon Di Revel City Bridge

Ubicazione:
La Spezia, passerella pedonale di collegamento tra la banchina Thaon de Revel e il Porto Mirabello

Ente appaltante:
Autorità Portuale della Spezia

Progettisti:
EXA Engineering Srl di La Spezia (Ing. Sabatino Tonacci, Geom. Paolo Biggeri, Ing. Alessio Currarino, Ing. Lorenzo Da Pozzo, Ing. Eugenio Pulsinelli, Geom. Monica Zanello)

Direzione lavori:
Ing. Fabrizio Simonelli, Autorità Portuale di La Spezia

Principali ditte appaltatrici:
Società appaltatrice: S.E.T. Società Edilizia Tirrena Spa, La Spezia
Carpenteria metallica: Siman Srl, La Spezia
Esecuzione stralli: Redaelli Tecna Spa, Milano
Impianti elettrici: Cienne Srl, Avenza (MS)
Impianto oleodinamico: BMS Oleodinamica Srl, Brescia

Anno completamento lavori:
2013

La presente scheda riassume e sintetizza il lavoro relativo al progetto architettonico e strutturale della nuova passerella pedonale di La Spezia, recentemente inaugurata, che collega la banchina Thaon de Revel, in fondo alla passeggiata Morin, con il Porto Mirabello.

La passerella è inserita come prima opera del progetto Waterfront che interessa l'intero lungomare spezzino ed è caratterizzata da una campata centrale avente una luce pari a 18 metri, che ha la peculiarità di essere apribile, in modo da consentire il transito delle barche al di sotto del ponte.

Il progetto è stato condotto in accordo alle prescrizioni contenute nelle NTC08 (D.M. 14.01.2008) e nella Circolare Ministeriale n. 617 del 02/02/2009.

1. Il progetto

Il ponte pedonale è realizzato in carpenteria metallica e si presenta come un impalcato a forma leggermente arcuata sorretto da stralli collegati a due antenne gemelle, per una lunghezza totale di circa 157 metri.

La passerella è costituita da tre parti principali. In particolare, la prima campata collega la spalla del molo Revel al primo pennone e si

¹ EXA Engineering Srl, La Spezia - ✉ pulsinelli@exaweb.it

² Harpaceas Srl, Milano - ✉ zirpoli@harpaceas.it

³ Harpaceas Srl, Milano - ✉ sattamino@harpaceas.it

estende per una lunghezza di 65 m; la seconda campata centrale è caratterizzata dal concio apribile di luce 18 metri (l'apertura avviene per mezzo di due pistoni che, controllati da un impianto idraulico, spingono il concio centrale dal basso verso l'alto facendolo ruotare attorno a due cerniere poste ai lati dell'impalcato). La terza campata, infine, completa la passerella dal secondo pennone alla spalla lato Mirabello ed ha una luce di 45 metri (Figura 1).

L'impalcato è costituito da tre travi principali aventi sezione ad H e di altezza 700 mm, poste ad un interasse trasversale di 1000 mm, collegate fra loro da traversi disposti ogni 1500 mm. Una particolarità del ponte consiste nelle zone circolari dell'impalcato che attorniano i pennoni e appoggiano sulle due pile intermedie: nelle zone di interferenza con i pennoni, l'impalcato si divide simmetricamente attorno agli elementi verticali per poi ricongiungersi in corrispondenza della campata centrale (Figura 2).

Le antenne hanno un'altezza complessiva di 35 metri e sezione trasversale a forma ellittica di dimensioni variabili, riducendosi dalla base alla sommità. Gli stralli sono posti a coppie che, partendo dai tubolari correnti di bordo, convergono in un unico punto del pennone e sono caratterizzati da un interasse di 3000 mm ed una lunghezza variabile tra i 30 ed i 60 m.

Le spalle ai lati del ponte sono realizzate con monoliti in calcestruzzo armato da cui si dipartono aggetti dove sono collocati gli appoggi della passerella. Poiché il concio centrale è semplicemente appoggiato alla sua estremità mobile, le campate principali risultano strutturalmente collegate solo in direzione verticale, ma in modo monolatero. Entrambi i vincoli di estremità, infine, consentono al ponte le dilatazioni assiali dovute a differenze di temperatura; inoltre, mentre dal lato Mirabello la campata è semplicemente appoggiata, sul lato Revel sono posizionati sia vincoli a compressione, sia vincoli a trazione, in modo da avere una coppia reattiva che impedisce la flessione del ponte.

2. Modellazione ed analisi

Il modello principale della struttura è stato realizzato utilizzando elementi *general beam* per le travi e i traversi di impalcato e per i pennoni. Gli stralli sono stati modellati con elementi *truss tension only* mentre le pile e i loro blocchi di fondazione sono elementi *shell*. Poiché le pile della passerella poggiano ciascuna su sei pali, nel modello sono stati inseriti anche questi ultimi supposti incastrati ad una profondità pari ai due terzi della loro altezza. Inoltre, per tener conto della reale posizione degli stralli rispetto ai pennoni, le estremità di questi ultimi sono state dis-

poste nel modello secondo la loro reale posizione e sono state quindi vincolate alla struttura del pennone per mezzo di *Rigid Links*.

Le maggiori difficoltà che si sono dovute affrontare nello studiare la statica e la dinamica della passerella riguardano il dover simulare correttamente le diverse fasi di montaggio del ponte per poter stabilire l'andamento delle sollecitazioni e delle deformazioni con l'evolversi della costruzione; analogamente si è dovuto porre particolare attenzione nel valutare la sequenza di tesatura e il valore di pretensione da attribuire a ciascun strallo affinché la deformata del ponte in condizioni di esercizio fosse accettabile. Un'attenzione maggiore si è poi dovuta dedicare alla parte mobile del ponte e allo studio di tutti i particolari che intervengono nel meccanismo di apertura e chiusura.

Per le peculiarità dell'opera viste fin qui, sono state quindi eseguite tre differenti analisi:

- un'analisi statica durante le fasi di montaggio e le fasi di movimentazione della parte apribile;
- un'analisi statica e modale del ponte nella configurazione di esercizio e allo stato limite ultimo;
- differenti analisi puntuali e dettagliate riguardanti la determinazione dello stato tensionale e deformativo nelle parti più sensibili del progetto, in particolare tra gli elementi che intervengono nella parte apribile e i cassoni metallici realizzati per gettare in acqua le pile.

L'analisi a fasi (*stage analysis*) è stata condotta considerando la non linearità costitutiva dei cavi, modellati come elementi *truss* non resistenti a trazione, e la non linearità degli appoggi, resistenti unidirezionalmente. La non linearità geometrica dei cavi è stata trascurata poiché le loro caratteristiche sono tali da poter ritenere irrilevanti gli effetti del secondo ordine. I carichi inseriti in questa analisi sono i pesi propri strutturali, i carichi dovuti al parapetto e agli smorzatori, la pretensione negli stralli e, solo per gli ultimi due *step*, i carichi dovuti alla posa del tavolato in legno e un carico folla distribuito su tutto l'impalcato (Figura 4).

Una volta stabilite in fase progettuale le diverse fasi di montaggio della passerella (Figura 5), all'interno del modello sono state ricreate passo passo tutte le procedure costruttive, considerando accuratamente l'efficacia dei vincoli provvisori nelle varie fasi.

3. I risultati

Gli scopi principali della *stage analysis* sono stati di controllare le deformazioni e le tensioni nel ponte con l'evolversi della sua costruzione,

con particolare attenzione alla deformata conclusiva, e di verificare che la tensione in ciascuno strallo a ponte realizzato non scendesse al disotto di circa 20 KN, in modo da garantirne una ridotta catenaria. Per poter ottenere la soluzione ottimale, si è dovuto procedere iterativamente poiché, come noto, la tesatura di un cavo porta alla variazione, a volte anche sensibile, dello sforzo normale nei cavi precedentemente posti in opera. Dopo diversi tentativi si è giunti alla procedura conclusiva di tesatura che porta a frecce nei cavi non superiori ai 200 mm e un abbassamento massimo nella campata di luce maggiore pari a 75 mm, valore < 1/500 della luce e quindi del tutto accettabile.

La seconda analisi condotta nelle condizioni standard previste da Normativa, è stata effettuata principalmente per verificare gli elementi più sollecitati della struttura e determinare le frequenze e i modi predominanti di vibrazione della passerella, in modo da poterne effettuare non solo una verifica sismica ma anche uno studio più accurato di interazione con le vibrazioni cicliche indotte dalla folla e dal vento. Queste ultime sono infatti più restrittive in quanto il Comune di La Spezia risiede in una zona sismica di classe III e perciò a bassa pericolosità. Inoltre la sezione principale della passerella risulta debolmente rigida a torsione e perciò può essere soggetta a fenomeni di instabilità secondari indotti da azioni periodiche continuate nel tempo.

Avendo studiato la dinamica del ponte per mezzo di un'analisi modale, si è trascurata la non linearità costitutiva degli stralli introducendo l'ipotesi che, data la ridotta rigidità assiale, anche se compressi, i cavi non contribuiscono significativamente ad una variazione dei modi propri e delle frequenze principali di vibrazione della passerella. In complessivo sono stati considerati i primi 115 modi di vibrare della struttura, ovvero tutti quei modi con massa partecipante superiore al 5% e la cui massa partecipante totale fosse superiore all'85% (Figura 6). Oltre che per la valutazione delle sollecitazioni indotte dal sisma, determinate per mezzo dello spettro elastico di progetto secondo quanto previsto nel capitolo 7 delle NTC, l'analisi modale è stata necessaria per poter effettuare verifiche specifiche nei confronti delle azioni dinamiche della folla e del vento.

In particolare, poiché la prima frequenza di vibrazione della passerella risulta pari a 1.97 Hz e quindi interna ai valori di picco della gaussiana che descrive la distribuzione di probabilità della frequenza verticale del passo umano, si è deciso di inserire nella campata principale del ponte due smorzatori di massa TMD accordati con la frequenza naturale della passerella.

Per quanto riguarda l'interazione dell'impalcato con il vento, è stata valutata la possibilità che si verificano fenomeni secondari di flutter flessionale e di flutter flesso-torsionale.

Nel primo caso, la probabilità del realizzarsi di fenomeni di flutter flessionale è trascurabile se risulta verificata la seguente disuguaglianza:

$$\frac{1.2 \cdot v_{m,1}}{d \cdot n_{M,1}} \leq 3 \quad (1)$$

dove d è la dimensione del ponte in direzione del vento, $v_{m,1}$ è la velocità media del vento di riferimento, $n_{M,1}$ è la prima frequenza torsionale dell'impalcato.

Poiché risulta $d = 4.4$ m, $n_{M,1} = 4.13$ Hz, $v_{m,1} = 33.8$ m/s, la disequazione sopra riportata è verificata e quindi è bassa la probabilità del manifestarsi del fenomeno.

La probabilità dei fenomeni di flutter torsionale è trascurabile se risultano verificate le seguenti disuguaglianze:

$$\frac{n_{M,1}}{n_{L,1}} \geq 1.5$$

$$\frac{1.2 \cdot v_{m,1}}{d \cdot n_{L,1}} \leq 20 \quad (2)$$

$$\frac{1.2 \cdot v_{m,1}}{d \cdot n_{M,1}} \leq 2.5 \cdot \beta_F \cdot \sqrt{\left(\frac{n_{L,1}}{n_{M,1}}\right)^2} \cdot r_m \cdot \mu$$

dove :

$$r_m = \sqrt{\frac{I}{m \cdot d^2}} \quad (3)$$

$$\mu \geq \frac{2 \cdot m}{\rho \cdot d^2}$$

In cui d è la dimensione del ponte in direzione del vento, $v_{m,1}$ è la velocità media del vento di riferimento, $n_{M,1}$, $n_{L,1}$ sono rispettivamente le prime frequenze torsionale e flessionale dell'impalcato, I momento di inerzia di massa torsionale dell'impalcato per unità di lunghezza e β_F è il parametro di efficienza aerodinamica.

Assumendo $d = 4.4$ m, $n_{M,1} = 4.13$ Hz, $n_{L,1} = 1.84$ Hz, $v_{m,1} = 33.8$ m/s, $I = 1218$ kg m², $m = 900$ kg/m, $\beta_F = 0.4$, le disequazioni indicate sopra sono verificate e quindi è bassa anche la probabilità di manifestarsi dei fenomeni di flutter torsionale.

Sono stati realizzati, infine, alcuni modelli locali particolarmente dettagliati relativi a singole parti della passerella, allo scopo di verificarne

lo stato tensionale e deformativo nelle condizioni di esercizio. Tra questi, per esempio, è stato realizzato il modello dell'attacco dei pistoni ad uno dei traversi dell'impalcato per verificare la distribuzione di sollecitazione e la deformabilità laterale delle piastre principali (Figura 7).

Nel progetto descritto è stato necessario effettuare in poco tempo un'analisi non lineare dettagliata di tutte le fasi di montaggio della passe-

rella. A tale proposito, la facilità nella gestione dei dati di input del software utilizzato è stata da questo punto di vista determinante, avendo dovuto gestire 16 fasi di costruzione, 33 gruppi di elementi costruttivi, 23 tipologie di vincolo e 17 gruppi di azioni. La velocità del solutore per le analisi non lineari ha inoltre reso meno impegnativa la ricerca della sequenza ottimale di tesatura degli stralli, avendo dovuto effettuare più tentativi.

Figura 1
Una fase di montaggio della passerella, che nella configurazione finale è contraddistinta da due campate esterne di 65 m e 45 m, oltre a quella aprile intermedia, di luce 18 m.

Bibliografia

D.M. 14 febbraio 2008, Norme Tecniche per le Costruzioni.

MIDAS [2012], Integrated design system for buildings and general structures, Gen On-line manual (www.cspfea.net).



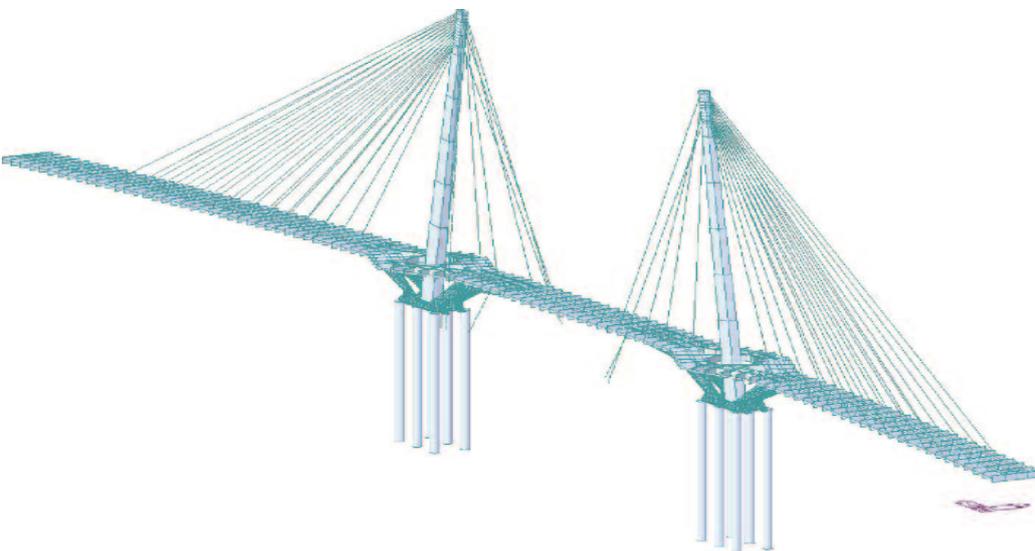


Figura 2
Sezione dell'impalcato. Si noti come nella zona di interferenza con i pennoni, questo si "allarga" dividendosi simmetricamente attorno agli elementi verticali e ricongiungendosi in corrispondenza della campata centrale.

Figura 3
Il modello principale della passerella, realizzato utilizzando elementi general beam, truss tension only, e shell.

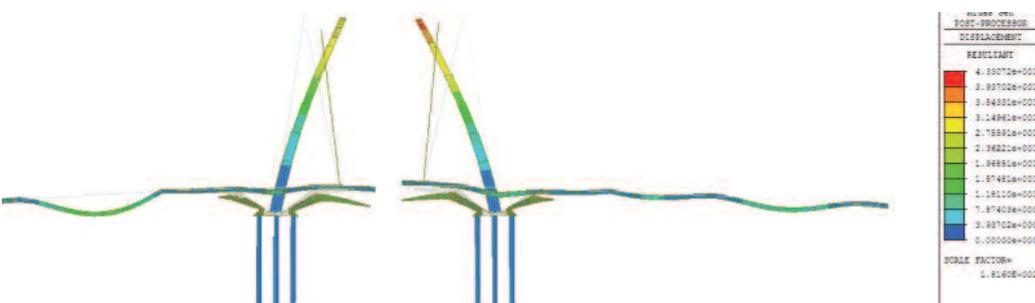


Figura 4
Deformata della struttura durante una delle fasi statiche considerate, legate all'evoluzione del montaggio della passerella, in cui i carichi introdotti sono quelli gravitazionali, oltre alla pretesione degli stralli.

Figura 5
Deformata della struttura durante una fase successiva a quella di Figura 4, comprendente anche la presenza dell'impalcato centrale.

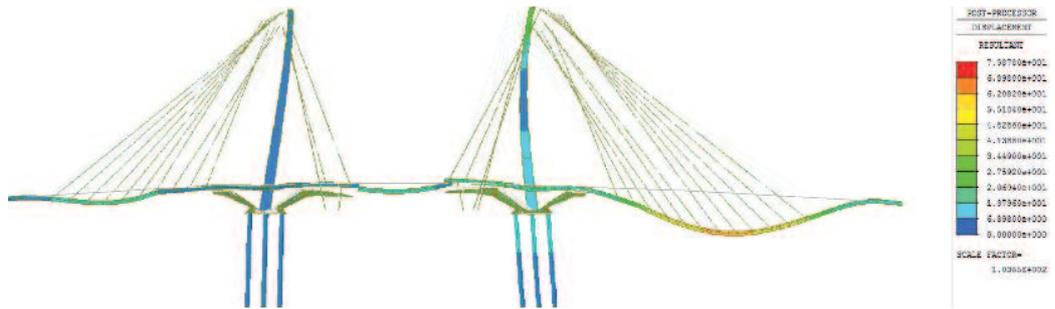


Figura 6
Esempio di deformata modale della struttura.

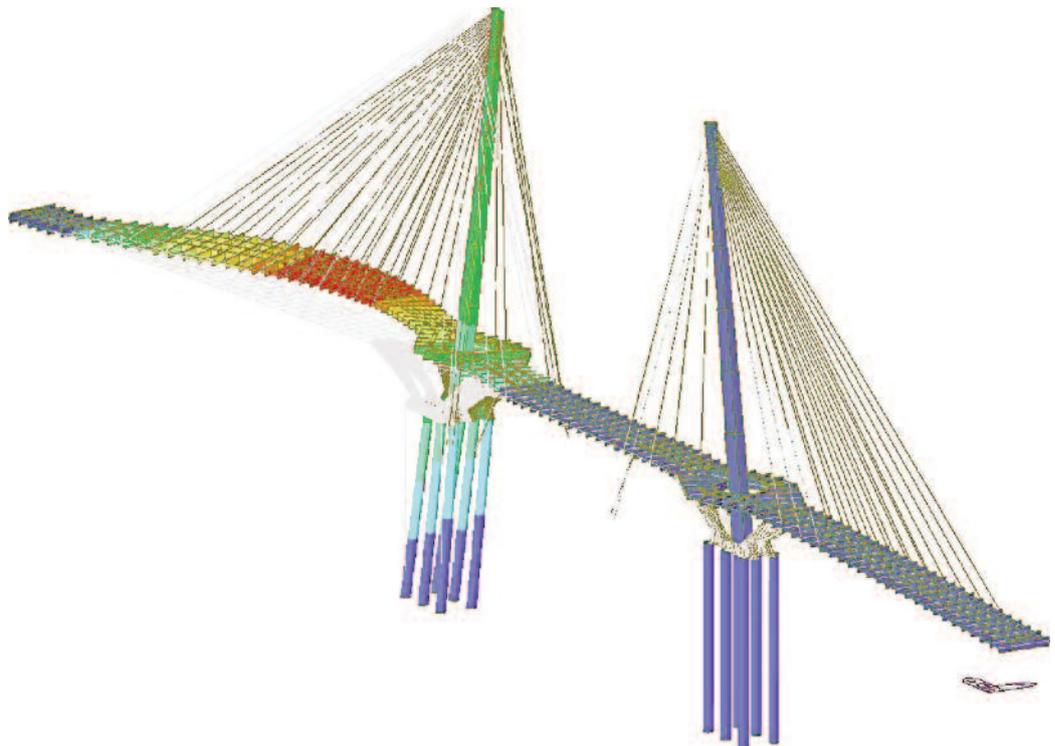


Figura 7
Modello locale dell'attacco dei pistoni ad uno dei traversi dell'impalcato, realizzato per valutare la distribuzione di sollecitazione e di deformazione laterale delle piastre principali.

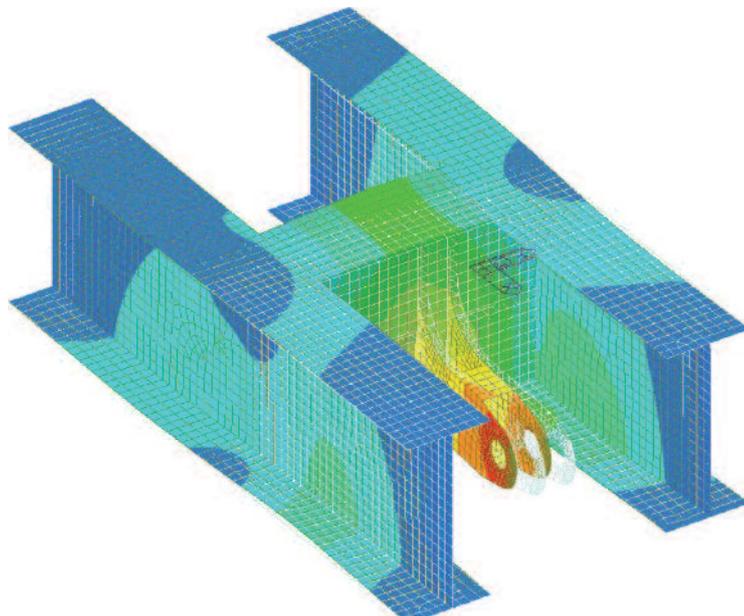




Figura 8
Intradosso
dell'impalcato visto
dal basso: vista parziale
di una campata laterale e
di quella centrale.

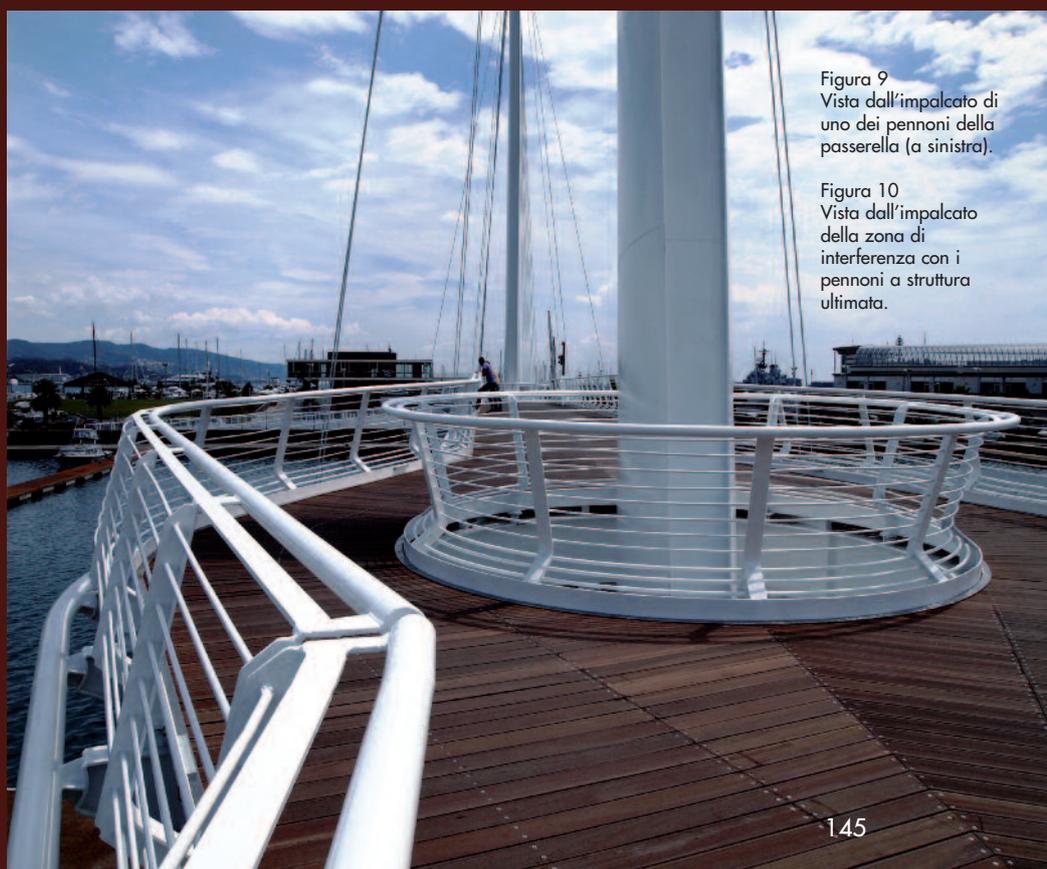


Figura 9
Vista dall'impalcato di
uno dei pennoni della
passerella (a sinistra).

Figura 10
Vista dall'impalcato
della zona di
interferenza con i
pennoni a struttura
ultimata.

Figura 11
Vista d'insieme della
struttura nel porto di
La Spezia.

