

Il nuovo ponte mobile nel porto Mediceo del porto di Livorno è ad unica volata con una luce libera di movimento di quaranta metri ed oltre quattro metri di franco sul livello del mare. Lo schema strutturale, del tutto innovativo, non prevede zavorra e si presenta, in estrema sintesi, come una trave continua su tre appoggi che durante il movimento si riducono a due: questa scelta ha rappresentato una sensibile riduzione dei costi ed un generale miglioramento strutturale con ridotte deformazioni, migliore comportamento per effetti dinamici e drastica riduzione delle sollecitazioni di fatica. La struttura

metallica, interamente prefabbricata ed assemblata in officina, è stata studiata in modo da ottimizzare le qualità di resistenza, durabilità e deformabilità strutturale. La movimentazione della struttura è ottenuta per mezzo di cilindri idraulici, in modo da garantire la velocità del movimento, la silenziosità delle manovre e la facilità di manutenzione. Il contrasto posteriore, in cemento armato, è stato precompresso in alcune parti in modo da eliminare la fessurazione sotto carico.

The new movable bridge at the Medici (?) harbour in Livorno is an interesting structure for architects and engineer alike. While extremely reliable in terms of structure and function, it also fits perfectly into the important historical framework of Medici harbour and shows elegance and attention to detail. The new bridge was built very quickly. It is an absolutely remarkable structure, not only because of its size - which break the record in terms of breadth of rotation (40.00 metres) - but also due to the innovative oil dynamic mechanism and the ballast-free constraint system.

Nuovo ponte girevole nel porto di Livorno

New swing bridge at Livorno harbour

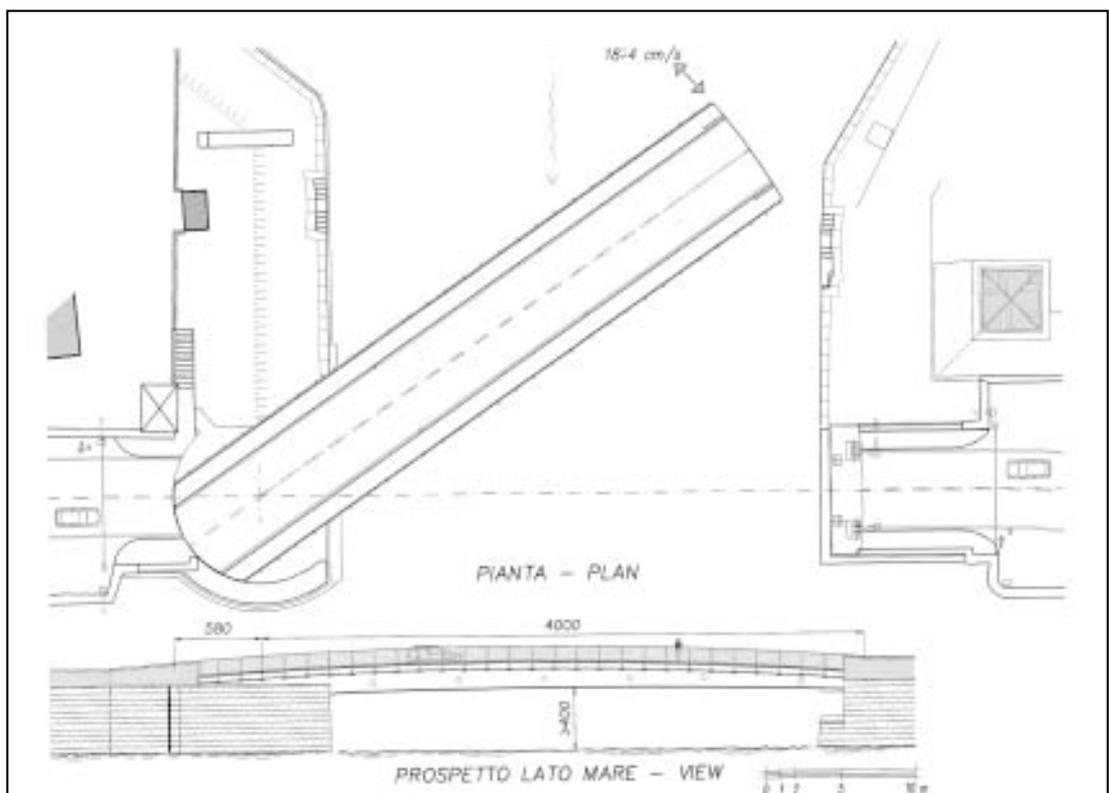
Raffaello Bartelletti, Massimo Viviani

INTRODUZIONE

Il porto di Livorno è inserito in un contesto cittadino e presenta una parte di notevole interesse storico risalente all'epoca dei Medici. In questo ambito la successione delle darsene

ed il collegamento dei canali navigabili cominciò a prendere forma nella prima metà del secolo XVII; col tempo lo sviluppo del porto richiese la costruzione di nuovi bacini ed altri terrapieni, I moli furono modificati e si venne a cre-

Fig. 1 - Pianta e prospetto della struttura



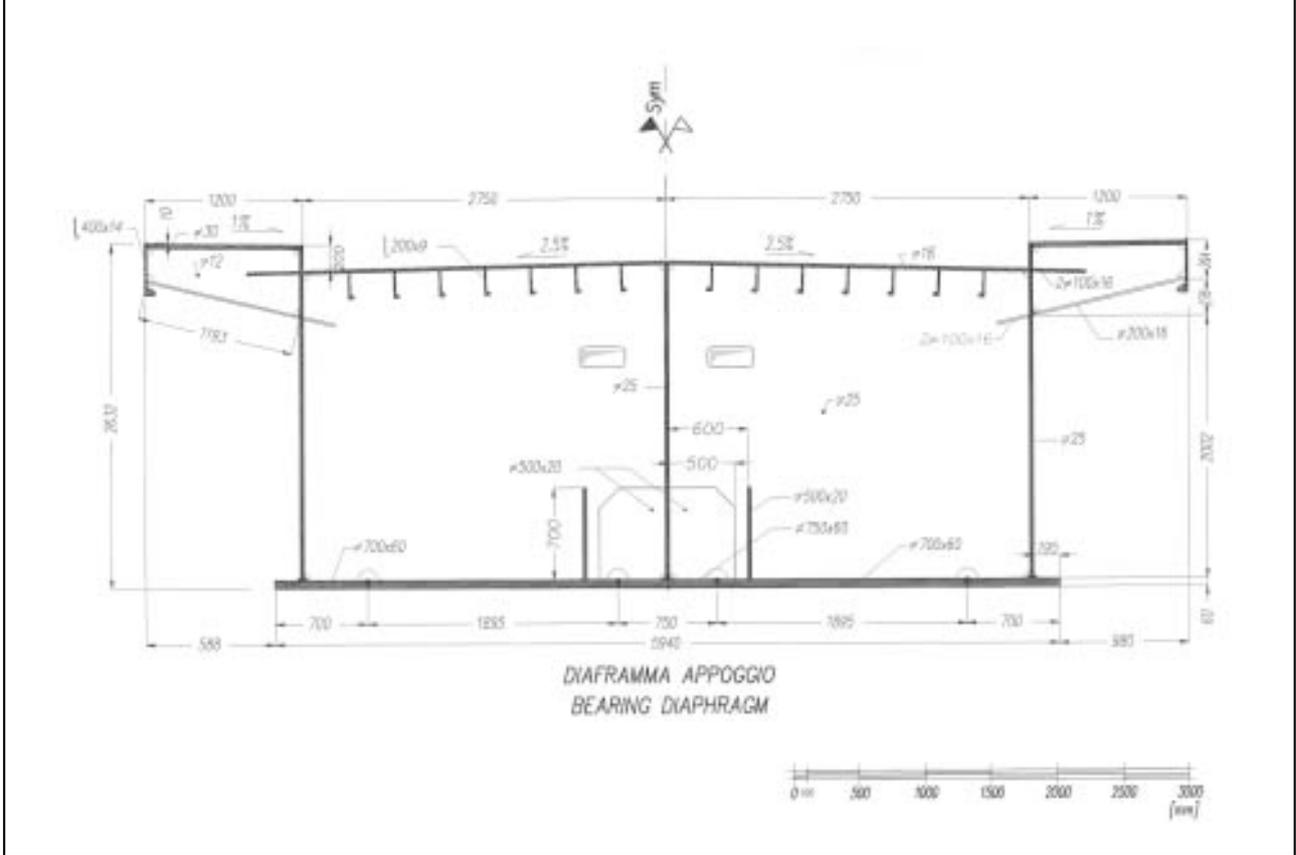


Fig. 4 - Sezione in corrispondenza dell'appoggio sferico intermedio



Fig. 5 - Vista dell'impalcato in officina

fianco di questi aspetti di forte caratterizzazione paesaggistica l'area è estremamente attiva dal punto di vista umano sia per le attività lavorative con i moli sempre occupati da natanti e persone intente alle più disparate lavorazioni, sia per le attività sportive in acqua o di semplice passeggio.

In questo contesto la scelta architettonica progettuale è stata indirizzata verso soluzioni che non "segnasero" il territorio con un'opera di grande visibilità cercando di studia-

re un collegamento mobile che si inserisse, per quanto possibile, senza alterazione dell'equilibrio architettonico delle varie componenti del paesaggio. La viabilità è stata rettificata in modo da mantenere l'originario dosso del vecchio ponte con un leggero addolcimento di curvatura a tutto vantaggio della funzionalità del traffico sia viario, sia ciclo-pedonale.

Le proporzioni dell'impalcato, rapporto altezza-luce del ponte, sono state assai contenute (1/20-1/30), per

poter realizzare un'opera a via superiore, in modo da non alterare lo scorcio prospettico del vecchio molo Mediceo come invece sarebbe accaduto adottando più comuni strutture reticolari con soluzioni a via inferiore od intermedia.

La porzione di estremità dell'impalcato che rimane vincolata durante la rotazione è stata inserita in un volume cilindrico che, oltre ad assolvere le funzioni di contrappeso, rappresenta un manufatto che si richiama ai vecchi bastioni in pietra. A fronte di queste precise scelte progettuali l'opera è caratterizzata da un attento studio dei dettagli: parapetto sagomato a falce con correnti in funi di acciaio inox, spallette di raccordo in muratura a faccia vista e pietre di rivestimento simili, per quanto possibile, alle pietre originarie, e provenienti dalle cave francesi di Tourris a nord di Tolone. Il risultato ottenuto, visibile nelle foto, è stato conforme agli intendimenti progettuali.

IMPOSTAZIONE STRUTTURALE

Per esplicita disposizione dell'ente committente, la struttura doveva essere girevole con volata unica di quaranta metri ed aveva la possibilità di estendersi con una parte d'impalcato per la zavorra e le movimentazioni in un'area posteriore di ampiezza limitata a sei metri. Seguendo una impostazione tradizionale per le



Fig. 8 - Inizio manovra di sbarco del ponte metallico con sollevamento dalla nave



Fig. 9 - Manovra di sbarco del ponte nelle sedi definitive



Fig. 10 - Visti inferiore della carpenteria metallica in fase di varo

cestruzzo, conformata a corona circolare piana, avente il centro sull'asse di rotazione dell'impalcato. L'appoggio principale dell'impalcato è del tipo sferico, così da consentire rotazioni comunque orientate dell'elemento vincolato senza provocare alcun spostamento orizzontale del centro della sfera, coincidente con il punto d'incontro degli assi di rotazione delle dodici ruote coniche.

L'estremità della volata presenta, in condizioni di ponte chiuso, due sostegni pendolari che garantiscono il vincolo di appoggio semplice per la corrispondente sezione.

In definitiva lo schema statico presenta due differenti configurazioni in linea con le possibili condizioni del ponte: aperto e chiuso. Nel caso di ponte chiuso la struttura si presenta come trave continua su tre appoggi, con vincoli torsionali collocati alle due estremità. In fase di manovra l'impalcato è vincolato ad una estremità, per la trasmissione delle reazioni verticali negative (anche disuniformi per effetto delle inevitabili azioni torcenti), dalla rulliera posteriore; in corrispondenza dell'asse di rotazione, per la trasmissione della reazione verticale positiva, dalla cerniera sferica.

Questa impostazione strutturale migliora sensibilmente il comportamento statico e dinamico della struttura rispetto a soluzioni convenzionali ed ha consentito di sfruttare al meglio l'acciaio, mantenendo la deformabilità entro limiti accettabili ed i valori delle tensioni nei materiali correttamente equilibrati tra la condizione in manovra e la condizione a ponte chiuso con carico massimo di esercizio (1a categoria).

LA STRUTTURA METALLICA

La struttura metallica del ponte è costituita da tre travi ad altezza variabile organizzate in una sezione trasversale a comportamento scatolare mediante controventi inferiori di torsione. La sezione trasversale presenta una larghezza fuori tutto di 7900 mm, composta da due marciapiedi laterali di 1200 mm ed una parte centrale di 5500 mm. Il profilo delle travi è stato studiato in modo da ottimizzarne il comportamento strutturale. La parte di impalcato tra la cerniera di rotazione fissa e la rulliera è stata progettata di altezza elevata (variabile tra 2016 e 2600 mm) e con

forti spessori di piattabande (60 mm) in modo da ridurre al minimo il contributo deformativo della parte con la maggiore sollecitazione flessionale. Questa scelta ha consentito altresì di ricavare un ampio locale per le macchine all'interno della struttura, in modo da migliorare drasticamente il complesso di collegamenti elettrici ed idraulici del sistema di movimentazione. Per la parte d'impalcato in volata la travata è stata sagomata (altezza variabile da 950 a 1536 mm) affinché l'intradosso mantenesse un franco di almeno quattro metri sul pelo d'acqua e l'estradosso consentisse un corretto raccordo altimetrico delle due sponde. La lamiera d'impalcato in piastra ortotropa dello spessore variabile tra 16 e 18 mm, è stata sagomata con due pendenze laterali del 2,5% ed irrigidita con ferri a bulbo 200x9 che presentano ottime caratteristiche in termini di comportamento statico e durabilità. Le parti a sbalzo sono state realizzate in lamiera di grosso spessore (30 mm) conferendo un notevole incremento



Fig. 11 - Dettaglio del sistema di movimentazione, pistone e cerniera sferica

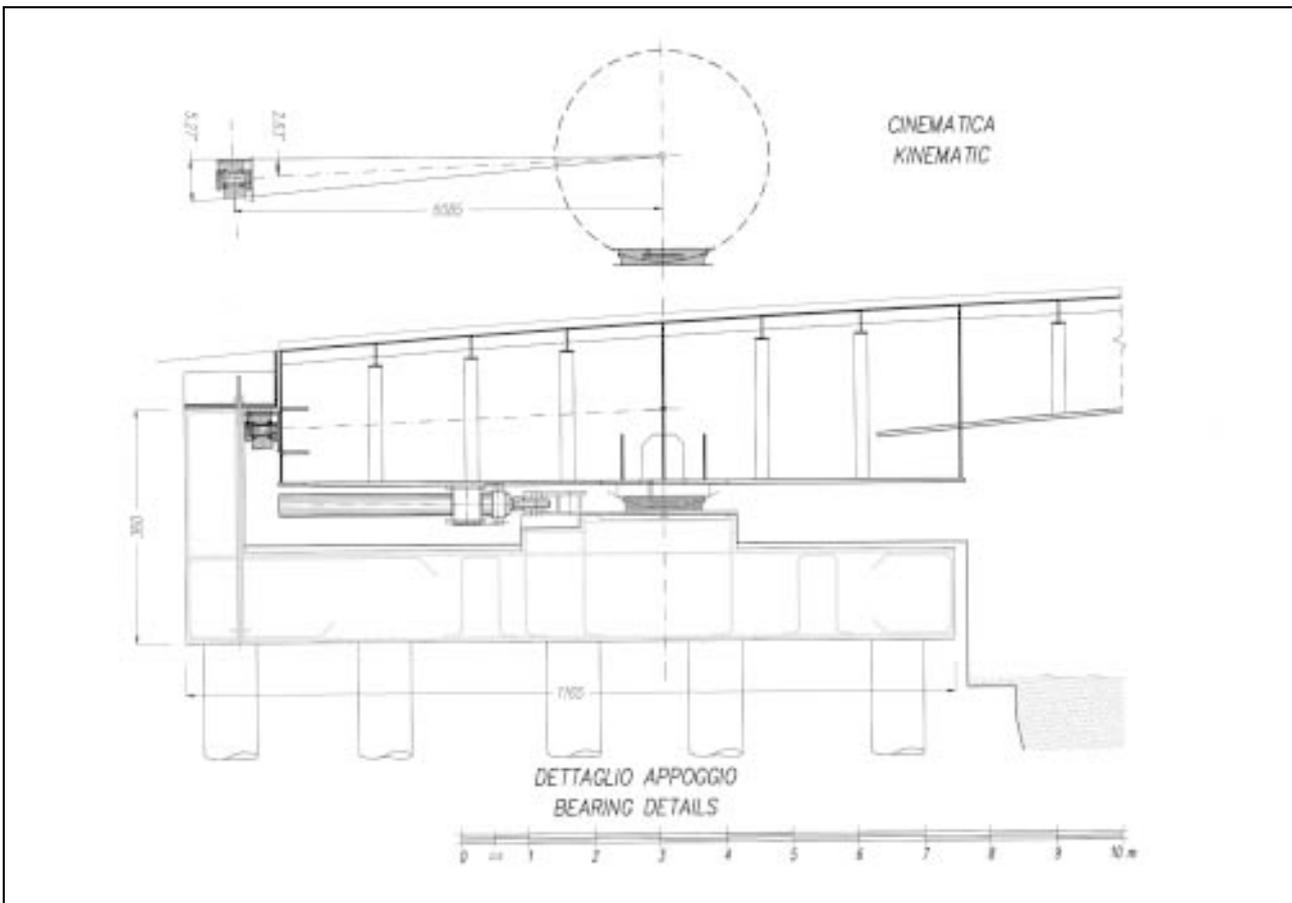


Fig. 12 - Sistema di movimentazione e sottostrutture

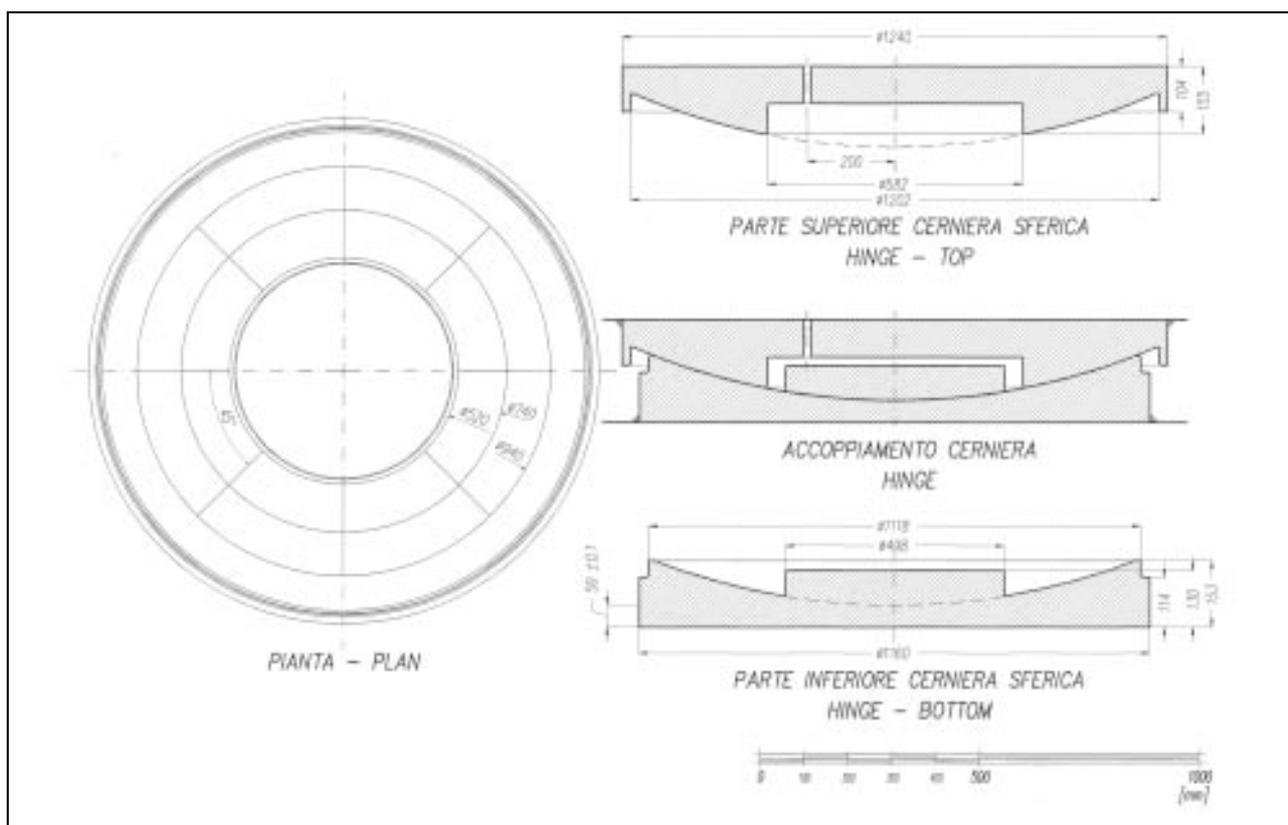


Fig. 15 - Particolari cerniera sferica intermedia

re nel tempo di circa 6 minuti a cui corrisponde una velocità periferica di circa 18 cm/sec. La catena cinematica di riferimento è costituita dal blocco di fondazione a cui è vincolato, a mezzo di una cerniera cilindrica ad asse verticale, il settore mobile costituito dall'impalcato; il suddetto schema di vincolo è stato in concreto realizzato mediante una cerniera sferica posta sull'asse di rotazione ed una rulliera posteriore di contrasto, concentrica all'asse di rotazione stesso. Il meccanismo di rotazione utilizza un unico cilindro oleodinamico a doppio effetto e uscita singola, posizionato in modo tale da minimizzare i movimenti relativi tra pistone e impalcato, ottenendo così una migliore distribuzione degli sforzi ed una ridotta usura dell'accoppiamento di snodo agli attacchi del pistone. Il passaggio dallo schema statico della struttura in esercizio stradale a quello della struttura in movimento avviene eliminando, mediante dispositivi oleodinamici che garantiscono la gradualità dell'operazione, gli appoggi a pendolo in estremità alla volata. Tali appoggi, a ponte chiuso, sono regolati in modo da fornire un

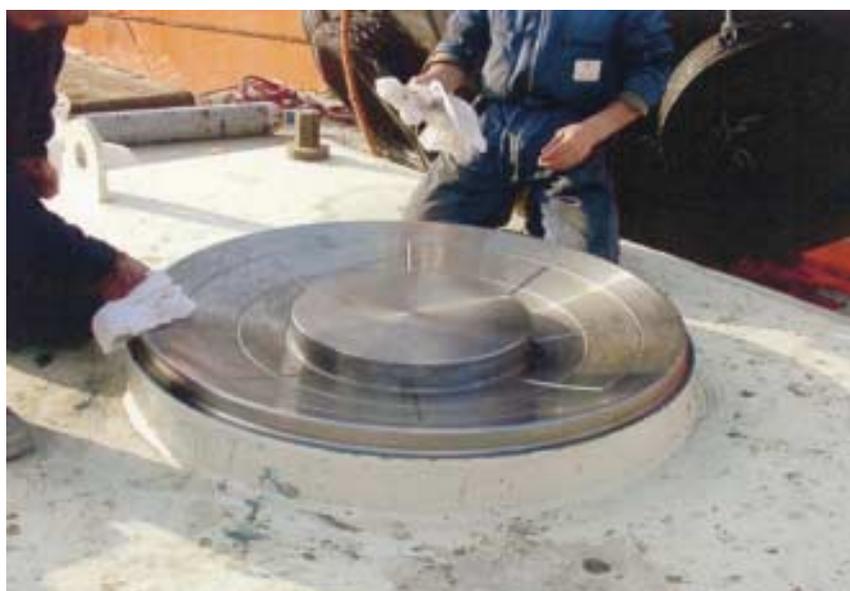


Fig. 16 - Preparazione della parte di cerniera sferica solidale al blocco di fondazione

valore della reazione corrispondente allo schema di trave continua su tre appoggi. La messa in posizione degli appoggi avviene per mezzo di una coppia di cilindri oleodinamici che rialzano l'estremità della volata

recuperando la freccia elastica dovuta al funzionamento a sbalzo fino a consentire l'inserimento delle bielle nelle loro sedi definitive; i pistoni vengono poi richiusi, lasciando il ponte appoggiato sui pendoli. Nella

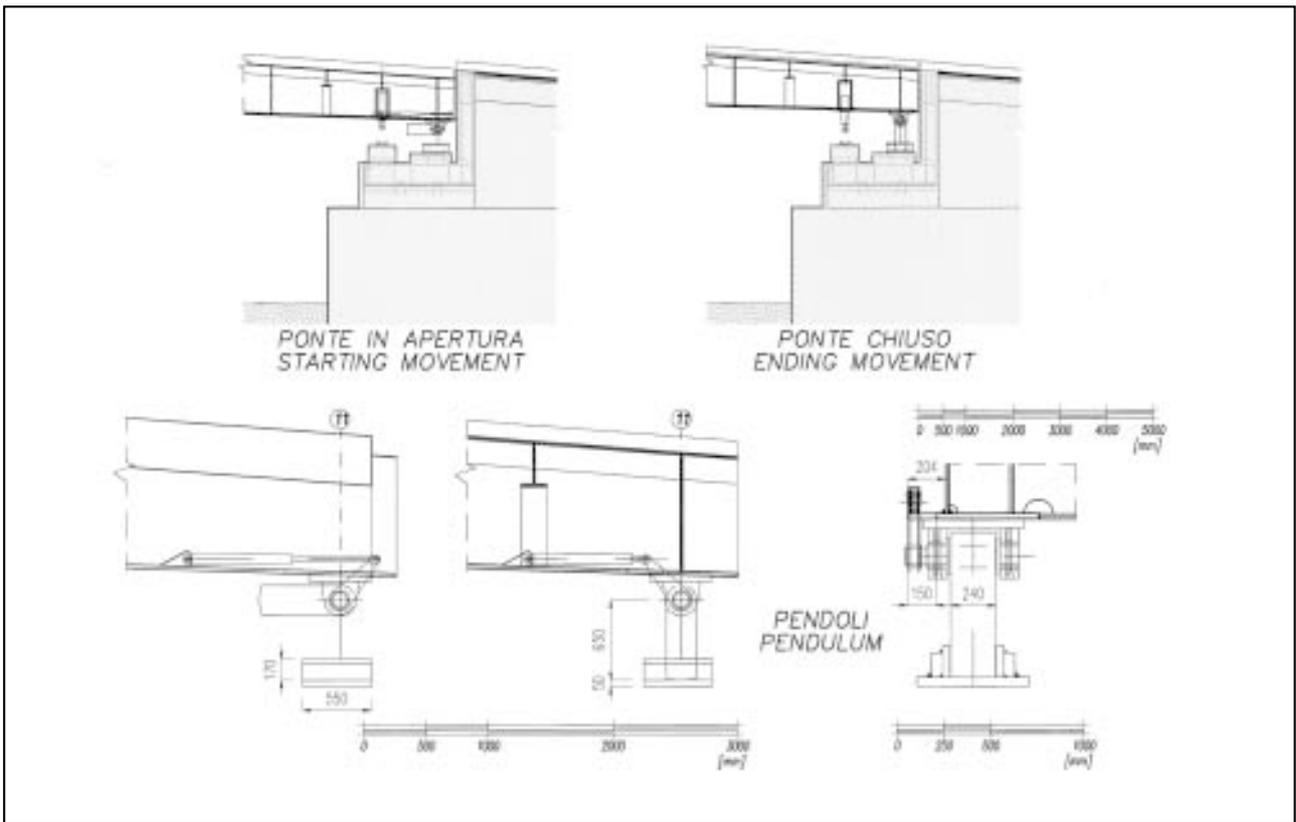


Fig. 17 - Dettagli del sistema di appoggio pendolare di estremità

fase di apertura il sistema opera in senso inverso, provocando prima un lieve sollevamento dell'estremità della volata, che consente il rialzamento dei pendoli di appoggio, e successivamente il graduale abbassamento fino al momento in cui il ponte, privo di appoggi all'estremità, è completamente libero di ruotare. Tutto il sistema è completato da una ulteriore coppia di cilindri oleodinamici, posti circa a due terzi della volata, destinati a sostenere il ponte al termine della fase di apertura per consentire tutte le operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria. In tale posizione è possibile procedere alla sostituzione anche delle ruote posteriori e della cerniera centrale. Tutto il sistema di movimentazione è costituito da cilindri oleodinamici a doppio effetto e singola uscita con valvola overcenter flangiata sul fusto e valvole regolabili di frenatura ed avvicinamento. La centralina oleodinamica, dotata di due pompe idrauliche, una pompa per grasso ed una pompa a mano di emergenza è collocata nella parte posteriore del ponte, in un vano ricavato tra la lamiera d'impalcato ed il controvento

inferiore.

Le parti meccaniche sono state studiate in modo da limitare al minimo gli effetti di inevitabili imperfezioni di esecuzione sia in officina, sia in

cantiere. I due pendoli di appoggio sono costituiti da un settore cilindrico di raggio pari 650 mm, sufficiente a limitarne l'inclinazione conseguente alle variazioni termiche dell'impal-



Fig. 18 - Vista della parte terminale del ponte in esercizio

cato a valori pienamente accettabili. La cerniera sferica centrale, di raggio pari a 1515 mm, è limitata ad una calotta costituita da due parti: la prima è rappresentata dalla corona circolare a superficie sferica (diametro esterno/diametro interno 1118 mm/498 mm) ed è destinata al trasferimento del carico, mentre la parte centrale del diametro di 498 mm a superficie orizzontale raccoglie il grasso di lubrificazione che, durante il movimento, viene messo in leggera pressione a guisa di pistone ottenendo così una sensibile riduzione dell'attrito della cerniera. Le ruote della rulliera di contrasto sono di forma troncoconica (diametro medio 560 mm; angolo al centro 5,27°) in modo da evitare strisciamenti sulla guida in lamiera dello spessore di 60 mm in acciaio Hardox; la generatrice di contatto delle ruote è stata posta orizzontale in modo da evitare componenti assiali della reazione e forzamenti dovuti alla dilatazione termica dell'impalcato rispetto alla cerniera fissa. Il perno è quindi leggermen-

te inclinato sull'orizzontale ed accoppiato alle ruote a mezzo di un sistema di cuscinetti orientabili a rulli.

Tutto il sistema oleodinamico è solidale con la struttura mobile del ponte e pertanto il collegamento tra questa e la cabina di manovra posta a terra si limita alla sola parte elettrica.

Il sistema descritto è in pieno accordo con le migliori caratteristiche di durabilità; tutti i cilindri sono a stelo chiuso in condizione di ponte in esercizio e tutte le parti mobili sono dotate di sistema di ingrassaggio automatico durante la movimentazione. Le manovre di apertura e chiusura sono gestite da un locale apposito costruito nelle immediate vicinanze del ponte.

Il sistema elettrico di comando presenta una sofisticata serie di controlli che consente di eseguire ogni manovra in piena sicurezza e con la possibilità di interrompere ed invertire ogni movimento in qualsiasi momento per poter fronteggiare ogni evenienza.

LA COSTRUZIONE E IL MONTAGGIO

La richiesta del committente era di ridurre al minimo il tempo di realizzazione dell'opera in modo da limitare, per quanto possibile, il parziale isolamento della parte di molo a mare.

In sintesi le lavorazioni da compiere sono riassumibili nelle seguenti attività:

- demolizione del ponte esistente;
- costruzione delle sottostrutture (fondazioni, spalle e blocco di contrasto) e casotto di manovra
- realizzazione della struttura mobile in officina;
- montaggio della parte metallica e degli impianti;
- tarature, finiture e prove.

Tutte le operazioni sono state compiute interrompendo per un tempo molto ridotto il traffico stradale, precisamente dal 17 dicembre 2001 al 19 aprile 2002, giorno dell'inaugurazione del nuovo ponte; questo risultato è stato possibile grazie alla notevole organizzazione dell'impresa esecu-

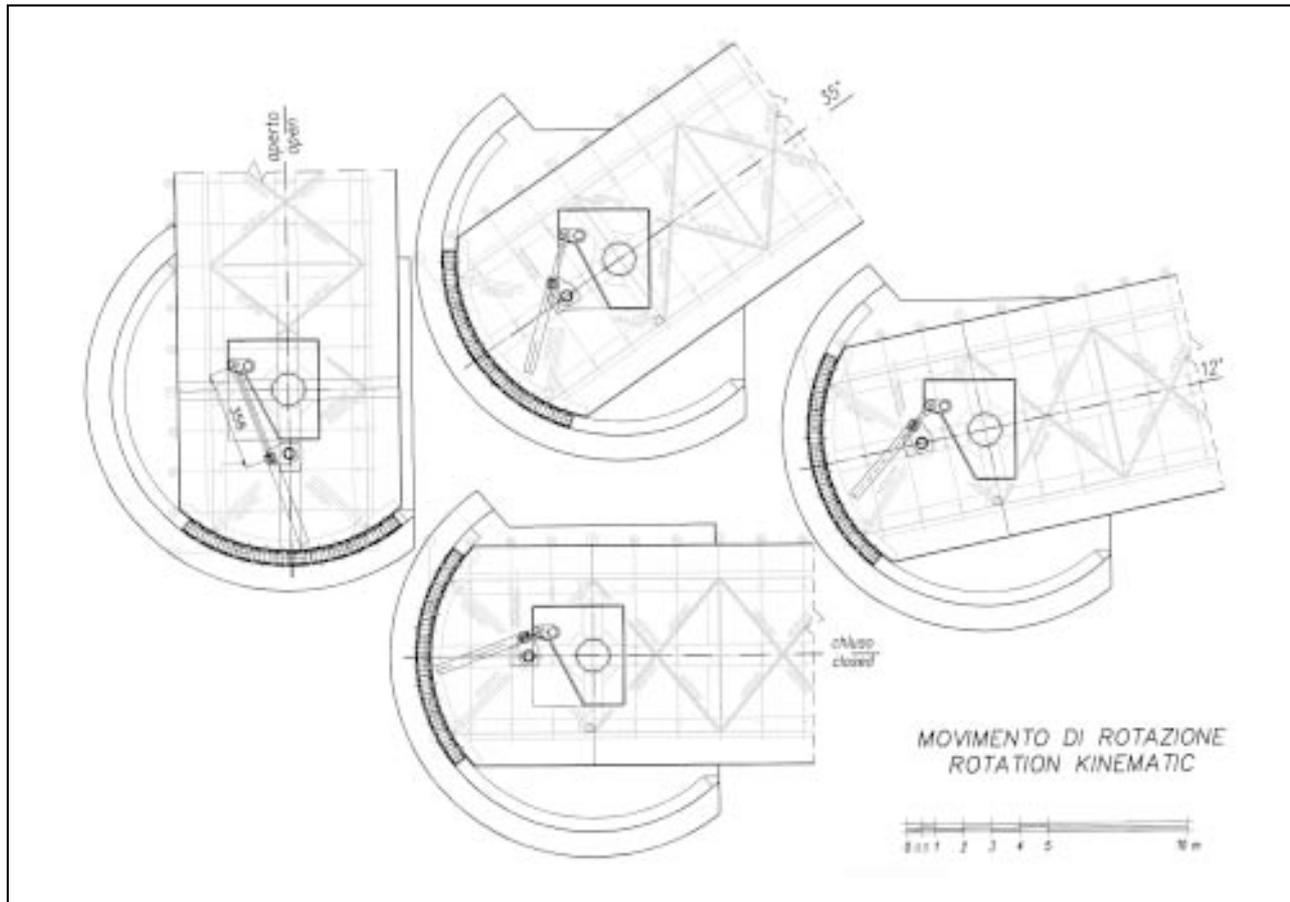


Fig. 19 - Cinematica del movimento di rotazione



Fig. 20 - Scorcio prospettico della struttura in movimento



Fig. 21 - Vista della struttura lato sistema di movimentazione



Fig. 22 - Scorcio prospettico del ponte in esercizio alla vi di terra

trice e all'ottimizzazione di tutte le fasi realizzative.

L'impalcato è stato interamente prefabbricato in officina e completato in ogni sua parte strutturale e meccanica. Tutte le saldature sono state controllate e l'intero sistema oleodinamico è stato controllato e tarato in officina effettuando verifiche di tenuta in pressione e di movimentazione. Al termine delle lavorazioni il manufatto metallico era composto di due soli pezzi:

- 1) il ponte metallico completo dell'impianto oleodinamico, delle rulliere e della parte di cerniera sferica solidale al ponte;
- 2) la trave metallica del contrasto posteriore con la guida in hardox da solidarizzare con il blocco di fondazione dopo la posa in opera del ponte.

La struttura metallica è stata realizzata nelle sue parti elementari nell'officina Ortolan di Codognè per poi essere assemblata e completata presso l'officina Ortolan di Trieste in fregio alla banchina. Al termine della costruzione l'intero manufatto è stato caricato dalla nave Storman Asia dotata di due bigli capaci di sollevare fino a 400 t ciascuno e dopo il periplo della penisola è giunto al porto di Livorno per lo scarico nella posizione definitiva. In simultanea con le lavorazioni d'officina venivano realizzate le sottostrutture partendo dalla palificata di fondazione (ventuno pali del diametro di 80 cm e lunghezza di 28 m), il blocco di fondazione, la parete verticale di contrasto posteriore e la spalla lato mare. Il complesso delle attività per la realizzazione delle sottostrutture non presentava particolari difficoltà fatta eccezione per la necessità di rispettare i tempi molto ristretti imposti dalla committente e per la necessità di rispettare le tolleranze geometriche di costruzione paragonabili con le tolleranze dell'officina meccanica. Per il primo aspetto la programmazione dei lavori era stata dettagliata a tutte le attività superiori ad un giorno e continuamente aggiornata sulla base delle risultanze di cantiere. Per il raggiungimento delle forme di progetto, non potendo utilizzare dime, a causa delle notevoli dimensioni dell'opera, l'intera successione delle attività è stata soggetta al continuo controllo geometrico a mezzo di strumentazione topografica con la tolle-

ranza planimetrica non superiore al millimetro. Il risultato è stato la rispondenza tra il manufatto mobile d'officina e le sottostrutture fisse in calcestruzzo. Dopo circa una settimana di viaggio il ponte è stato scaricato nella posizione definitiva senza alcuna difficoltà apprezzabile. Il posizionamento della trave di contrasto a mezzo di una serie di barre Gewi del diametro di 50 mm pretese, ha completato il montaggio dell'opera viva e consentito l'avvio delle tarature e delle prove di movimentazione. Dopo alcuni giorni il ponte è stato interamente completato con tutte le finiture di progetto ed aperto definitivamente al traffico.

CONCLUSIONI

Il nuovo ponte mobile costruito nel porto Mediceo di Livorno rappresenta un'opera di sicuro interesse sia per le dimensioni sia per le innovazioni relative alle parti impiantistiche e di montaggio. La concezione statica variata tra ponte chiuso e ponte in manovra ha consentito di ottenere una sensibile riduzione dei costi ed un generale miglioramento strutturale con ridotte deformazioni, migliore comportamento per effetti dinamici e drastica riduzione del danneggiamento per fatica. La struttura metallica è stata interamente prefabbricata in officina senza alcun collegamento bullonato con l'unica eccezione delle parti rimovibili per manutenzione. La composizione dell'impalcato prevede l'utilizzo di profili aperti, lamiere e piatti a bulbo in modo da assicurare le migliori prescrizioni di durabilità. La protezione superficiale ricalca quanto di meglio oggi disponibile per strutture esposte in ambiente marino; per la parte stradale e pedonale la superficie è stata trattata alla stregua della coperta di navi soggette a diffuse azioni erosive. La movimentazione della struttura è ottenuta per mezzo di cilindri idraulici in modo da garantire la velocità del movimento, la silenziosità delle manovre e la facilità di manutenzione. Le sottostrutture sono di tipo corrente in cemento armato ordinario fondate su pali di medio diametro verificati con ampio margine rispetto alle condizioni di esercizio e con barre di acciaio zincato a caldo. Il contrasto posteriore è stato precompresso in modo da eliminare la fessurazione delle parti in



Fig. 23 - Vista ponte aperto alla via di mare

c.a. con sensibile miglioramento della durabilità dell'intero manufatto. L'intero ponte è stato prefabbricato nelle officine di Trieste e trasportato su natante fino alla sua posizione definitiva. Il completo montaggio sia della carpenteria sia della parte impiantistica ha permesso la riduzione dei tempi di costruzione a valori estremamente ridotti. Il costo complessivo dell'intera opera, compren-

sivo delle demolizioni è risultato di € 1.123.768,96, con una incidenza per metro quadro d'impalcato pari a 3.105,88 €/m².

Prof. ing. Raffaello Bartelletti
Ordinario di Teoria e Progetto dei Ponti
Facoltà di Ingegneria, Università di Pisa

Dott. ing. Massimo Viviani
Libero Professionista, Lucca

Dati caratteristici

Strutture ed impianti

- Ponte mobile girevole ad unica volata di luce pari a 40,00 metri e franco di almeno 4,00 m sul pelo d'acqua.
- Lunghezza complessiva del ponte 46,00 m per una larghezza fuori tutto di 7,90 m.
- Peso della carpenteria metallica, 2400 KN.
- Rulliera posteriore costituita da 12 ruote troncoconiche (Dm = 560 mm) per 500 KN di carico ciascuna su guida di contrasto in acciaio speciale Hardox.
- Cerniera centrale sferica del diametro di 1240 mm e carico trasmesso pari a 10.000 KN.
- Pistone di movimentazione di tipo oleodinamico a doppio effetto e singola uscita, corsa 3000 mm e sforzo massimo di 700 KN.
- Potenza necessaria alla movimentazione 30 KW.
- Tempo di manovra, apertura/chiusura, 6 minuti.

Progetto e costruzione

Progetto: Prof. Ing. Raffaello Bartelletti, Pisa - Dott. Ing. Massimo Viviani, Lucca.
Costruzione strutture metalliche: ORTOLAN s.r.l., Codognè, Treviso.
Costruzione impianto oleodinamico: CIESSE s.n.c., Gorgo al Monticano, Treviso.
Costruzione opere in c.a.: IN.CO. s.r.l., Lucca.
Direzione di cantiere: Dott. Ing. Massimo Viviani, Lucca.

Cronologia essenziale

- 17 dicembre 2001: inizio demolizione vecchio ponte.
- 30 marzo 2002: arrivo a Livorno del nuovo ponte prefabbricato a Trieste.
- 19 aprile 2002: inaugurazione con apertura del nuovo ponte al traffico.