

**LE PRIME OPERE D'ARTE REALIZZATE SU PROGETTO
CALATRAVA IN ITALIA SONO PONTI
II° NOTA: IL PONTE CALATRAVA A VENEZIA**

**THE FIRST ENGINEERING WORKS ON CALATRAVA'S DESIGN
WERE BRIDGES
II° ARTICLE: CALATRAVA'S PEDESTRIAN BRIDGE IN VENICE**

Chiara Romaro, Giorgio Romaro,
Studio Romaro
Padova, Italia
romaro@gruppo4.com

Alberto Miazzon, Luca Rampin
MIngegneria
Grisignano (VI), Italia
info@mingegneria.it

ABSTRACT

Giorgio Romaro together with C. Romaro, A. Miazzon and L. Rampin, who contributed to the realization of both the project and this article, describes the building and the erection of the fourth bridge over the Canal Grande in Venice. This work can be considered a macro sculpture with a length of almost 100 meters. Moreover this bridge has an unique static model with a segmental pushing arch with controlled and compensated thrust.

SOMMARIO

Giorgio Romaro descrive ancora, con C. Romaro, A. Miazzon ed L. Rampin che hanno collaborato alla realizzazione di quest'opera e della presente nota, la costruzione ed il montaggio del IV° Ponte sul Canal Grande a Venezia.

Un'opera d'arte che più che ad un ponte assomiglia ad una macro scultura di quasi 100 metri di lunghezza, ma che è anche un ponte ed un ponte con un modello statico originale: arco ribassato spingente con spinta controllata e compensata.

1 DESCRIZIONE GENERALE DEL PONTE

Il IV° Ponte sul Canal Grande, che sta sorgendo su progetto di Calatrava, sarà il primo ponte che incontrerà un turista che entra in Venezia da Piazzale Roma (arrivo auto e pullman), e non potrà certo sfuggire anche a chi arriverà in treno; è un ponte pedonale ad arco molto ribassato con una luce di circa 80,5 m e freccia di circa 3,6 m, la larghezza è di 9 m in mezzeria e di 6,5 m alle spalle (fig. 1). Il ponte ha una forma architettonica originale, antropomorfa, degna di una macro scultura che arricchirà i già incomparabili scorci di Venezia e che sarà goduta soprattutto da chi sottopasserà il ponte con i vari natanti (fig.2). L'intradosso del ponte ricorda lo scheletro di un cetaceo o una serie di 75 cirenei che a gambe larghe puntate su due archi molto tesi sostengono con braccia aperte e teste puntate sulla schiena l'uno dell'altro l'impalcato del ponte.

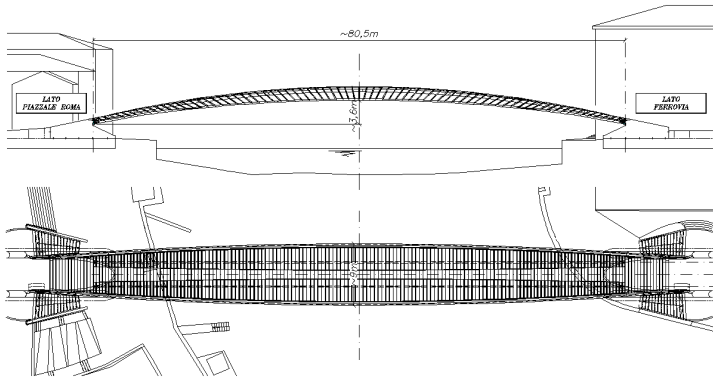


Fig. 1



Fig. 2

E' però originale, anche nel modello statico, che può essere così sinteticamente definito: “arco ribassato incastrato a spinta controllata e compensata”; d’altro canto Calatrava non è nuovo ad inventare modelli statici originali [1]. Il ponte è formato da 5 archi di acciaio, uno superiore centrale, due superiori laterali e due archi inferiori, collegati tra loro da 75 costoloni disposti radialmente. I tre archi superiori hanno raggio verticale di 180 m, mentre i due archi inferiori hanno raggio maggiore (circa 265 m). L’altezza complessiva della sezione del ponte risulta, così, massima in chiave (poco più di 2 m) e minima agli appoggi (circa 87 cm fig. 3). La pavimentazione della fascia in corrispondenza dell’arco centrale è in pietra d’istria, quella sopra le mensole dei 75 costoloni è in vetro temperato. Strutturalmente i carichi vengono portati alle spalle dall’arco centrale superiore e dai due archi inferiori, che sono vincolati a compressione sulle spalle (vedi sez. A-A in fig.3 per l’arco superiore). Inoltre l’attrito tra le piastre e, per basse compressioni, i perni di riscontro sulle spalle (3 per l’arco centrale e 1 per ogni arco inferiore) vincolano spostamenti e rotazioni dell’impalcato in fase di compensazione (fig.4).

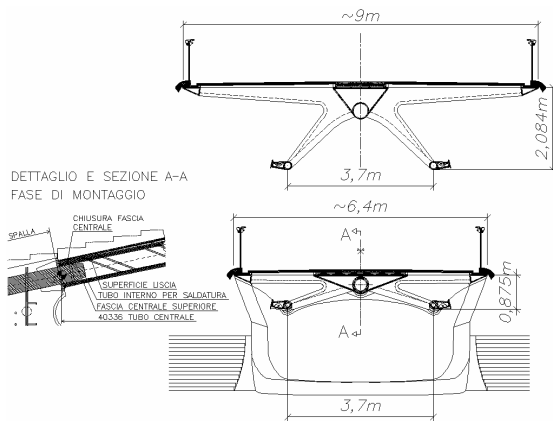


Fig. 3



Fig. 4

I due archi laterali a sezione triangolare non trovano riscontro longitudinale e trasversale sulle spalle (15 mm di aria), ma solo verticale e hanno funzione di stabilizzazione dell’impalcato, impedendo le rotazioni intorno al proprio asse. In caso di allontanamento orizzontale tra le spalle concomitante a calo di temperatura che porta accorciamenti del ponte, i costoloni, che collegano gli archi laterali a quello centrale, possono funzionare come montanti di travi Viendeel, di cui gli archi sono i correnti, cambiando lo schema statico che invece va salvaguardato (vedi avanti).

2 SCHEMA STATICO E VINCOLI

Il ponte ad arco ribassato è incastrato alle estremità nel seguente modo:

- **L'arco centrale superiore:** è vincolato a compressione e le forze di attrito tra le lamiere di spalla e del cassone centrale dovute alla compressione vincolano gli spostamenti verticali, trasversali e le rotazioni intorno al proprio asse (vedi sez. A-A fig.3), in assenza di attrito tra perni di riscontro fissati alle spalle (quello centrale $\varnothing 299$ mm in corrispondenza del tubo $\varnothing 419$ sp.60 mm e quelli laterali $\varnothing 110$ mm) bloccano gli spostamenti e le rotazioni intorno al proprio asse (fig.4). L'assenza di attrito si ha durante le fasi di montaggio, durante le fasi di ripristino dei cedimenti e in alcune combinazioni di carico di esercizio particolarmente gravose.
- **I due archi inferiori:** sono vincolati a compressione e sono bloccati gli spostamenti verticali e trasversali, attraverso l'attrito o il riscontro realizzato con un perno $\varnothing 79$ mm in assenza di attrito, che si ha solamente durante le fasi di montaggio e durante le fasi di ripristino dei cedimenti.
- **I due archi laterali:** sono liberi longitudinalmente e trasversalmente e sono bloccati solo verticalmente attraverso due perni di riscontro $\varnothing 80$ mm, che impediscono così le rotazioni dell'impalcato intorno al proprio asse.

Come abbiamo sopra ricordato il ponte può essere definito strutturalmente “un arco ribassato incastrato spingente a spinta controllata e compensata”, poichè se la spinta dovesse diminuire per un allentamento reciproco delle spalle, il ponte perderebbe il suo modello statico e tenderebbe a lavorare a trave Vierendeel invece che ad arco e a superare le tensioni di sicurezza nei nodi ad incastro che si formano. Calatrava scrive e prescrive testualmente: “Possiamo definire come valore limite degli spostamenti orizzontali sulle due spalle uno spostamento $DX = 20$ mm” e gli spostamenti andranno ripresi come chiaramente indicato nella sua relazione tecnica (figg. 5 e 6 ricavate dalla relazione e dai disegni Calatrava).

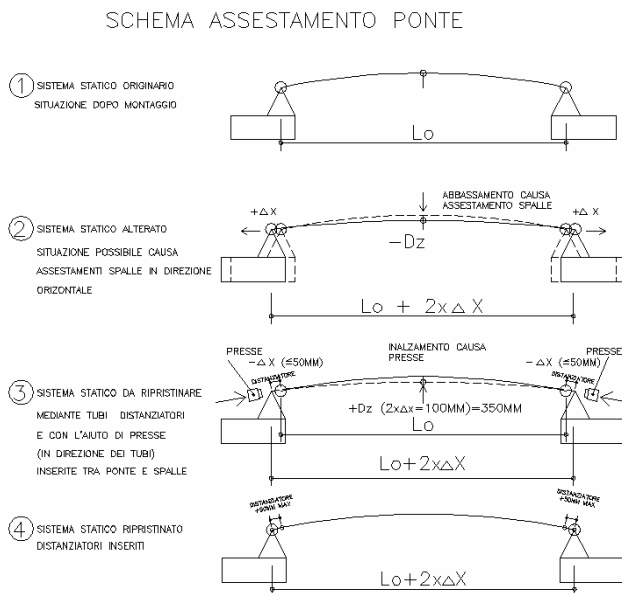


Fig. 5

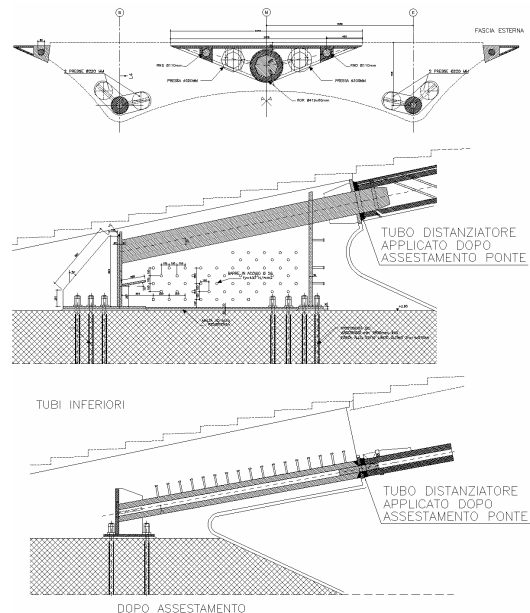


Fig. 6

3 NOTE SUL MONTAGGIO

3.1 Filosofia del montaggio

Constatata la particolarità del modello statico del ponte, l'impresa, che aveva vinto l'appalto nel lontano 2002, dopo molte traversie, nel dicembre del 2006 ritenne opportuno affidare la direzione del montaggio all'Ing. Giorgio Romaro. Questo incarico comprendeva anche l'onere di controllare le strutture, il progetto di trasporto e montaggio ed il progetto delle future compensazioni, intervenendo anche con disegni e calcoli al fine di completare le strutture, che una penosa diatriba tra impresa generale e fornitore in opera delle carpenterie aveva fatto sì che fossero abbandonate incomplete in banchina a Marghera. Il controllo delle strutture mise subito in evidenza che vi erano delle difformità tra quanto realizzato e il progetto Calatrava; in particolare le zone di interfaccia tra il ponte e le fondazioni erano parzialmente incomplete nelle parti realizzate. In figura 8 si nota il taglio sub-orizzontale del tubo centrale previsto per la posa, che rendeva la struttura molto diversa da quella progettata da Calatrava (fig.7) e le estremità degli archi portanti inferiori incompleti per l'ultimo metro circa.

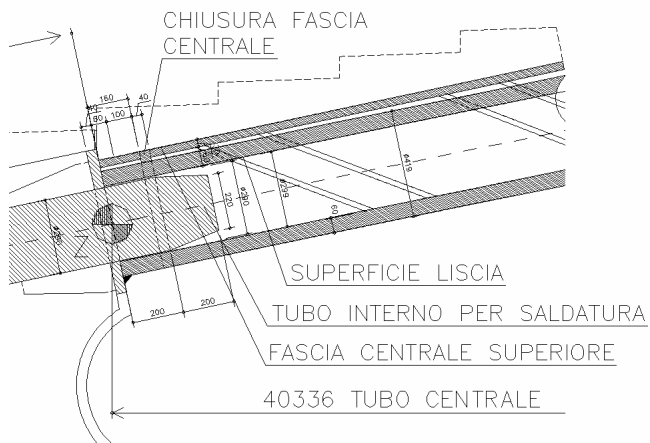


Fig. 7



Fig. 8

I blocchi del ponte erano tre come previsto dal progetto Calatrava, ma con lunghezze diverse ed i giunti tra i blocchi non erano finiti (fig.9 e 10). Verosimilmente andavano ristudiati completamente come in effetti fu fatto (fig. 11 per l'arco superiore) e poichè era escluso che si potesse aprire un cantiere che occupasse il Canal Grande per più di pochi giorni ogni problematica di aggiustaggio è stata risolta con un montaggio geometrico in bianco (vedi avanti).



Fig. 9



Fig. 10

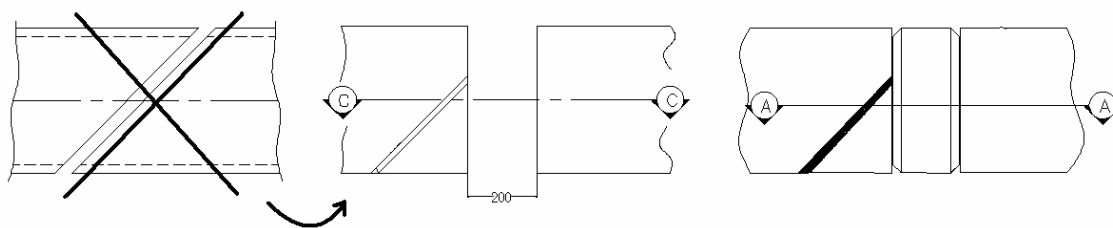


Fig. 11

Inoltre fu subito chiaro che il ponte non poteva essere banalmente posato, poichè i tre archi spingenti collegati tra loro dai soli costoloni, se non fossero stati subito contrastati avrebbero cominciato a lavorare a trave Vierendeel ed a snervare i nodi di unione tra archi e costoloni. Fu altrettanto chiaro che non si potevano contrastare gli archi su fondazioni, che dato il particolare terreno di Venezia, non davano un contrasto sicuro se non fosse stato possibile compensare gli spostamenti all'atto del montaggio. In definitiva poichè il ponte ha un modello statico legato ad una forza d'imposta predeterminata, ne consegue che le strutture devono essere prese in forza: entrare in compressione all'atto del montaggio e quindi ne consegue che la meccanica per preimporre con gradualità, secondo un preciso progetto, la forza disarmante e gli strumenti per controllarla (anche in vista delle ricordate future compensazioni) doveva essere in cantiere e funzionante prima di ogni altra struttura. Quindi prima dell'arrivo delle strutture dovranno essere in cantiere e funzionanti: martinetti, elettropompe, centralina, tubi di pressione per il collegamento, postazioni di controllo, strumenti di misura; ecc. Una volta preimposte le spinte sugli archi al momento del montaggio (e quindi per il peso proprio della sola struttura) si dovrà controllare che le spinte crescano su ogni arco come da progetto mano a mano che aumentano i carichi permanenti e infine durante la prova di carico per gli accidentali, sempre ovviamente compensando eventuali spostamenti tra le due spalle. Queste spinte sono state indicate nella relazione di calcolo Calatrava, ma ci siamo riservati di ricalcolarle con un nostro modello matematico (fig.12) perchè, essendo aumentati alcuni spessori e di conseguenza il peso e le rigidità, le spinte potevano essere leggermente diverse.

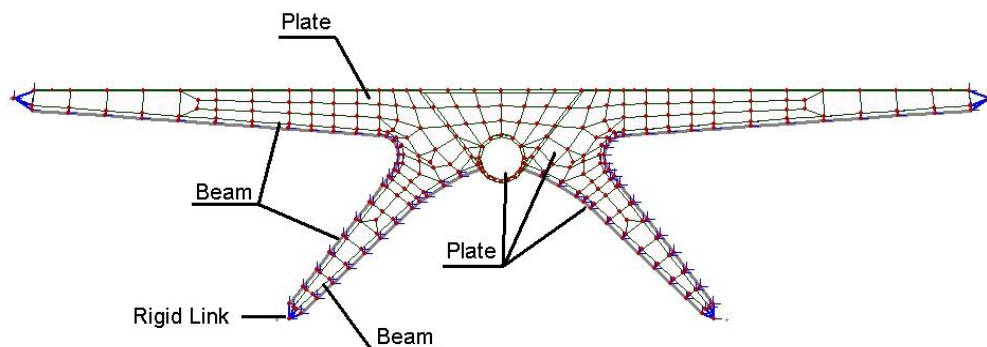


Fig. 12

Inoltre il ponte sarà strumentato con una serie di sensori in grado di fornire tutte le informazioni necessarie per conoscere la forza di compressione tra gli archi e le spalle e controllare il possibile cedimento orizzontale delle spalle tenendo anche conto del fenomeno, che potrebbe essere concomitante, di un abbassamento della temperatura (10 gradi portano ad un accorciamento di 1 cm circa). Tale strumentazione oltre a memorizzare gli andamenti dei parametri sotto controllo, sarà in grado di inviare al personale addetto degli allarmi automatici ove i parametri stessi superassero delle soglie prefissate.

3.4 Operazioni di montaggio e premontaggio

All'atto dell'incarico il ponte giaceva in tre pezzi in banchina a Marghera: uno centrale di quattro conchi tra loro già saldati di 55 m circa e due laterali di 13 m circa.

Il trasporto, progettato dalla Ditta Fagioli, prevede di spostare con chiatta, dapprima i conci laterali e di posarli tra i perni delle fondazioni e due pile provvisorie all'uopo predisposte sul Canal Grande e quindi trasportare, sempre a mezzo chiatta e sempre passando sotto il ponte di Rialto, l'elemento centrale e posarlo, convenientemente bloccato da opportune catene, tra le due pile (fig.13) secondo il progetto di montaggio sviluppato dagli Ingegneri dello Studio Bolina con la consulenza del Prof. Roberto di Marco e dei Prof. Vitaliani e Colleselli per le pile in alveo. Come abbiamo già ricordato al punto 3.1, era escluso aprire sul Canal Grande un cantiere per più di pochi giorni e lo stato riscontrato delle strutture richiedeva numerosi interventi di finitura che non potevano essere di banale completamento a disegno, inoltre il modello statico particolare non permetteva errori superiori al centimetro, mentre i rilievi evidenziano differenze di 2-3 cm sulla lunghezza, quindi già vicino ai 4 cm per i quali nel piano di manutenzione Calatrava richiede la ripresa e infine non era pensabile regolare al momento della posa in opera le giunzioni tra l'elemento centrale e i conci laterali. Per tutti questi motivi si è ritenuto necessario eseguire un premontaggio in bianco, cioè senza spinte né carichi, di tutto il ponte, costruendo due dime sicure per dimensioni, orientamento e posizionamento che hanno permesso di ricostruire in piazzale la situazione delle spalle del ponte e, senza mai mettere in forza la struttura, controllare tutte le geometrie del ponte al millimetro. Sono state applicate in piazzale le catene ed ogni altra attrezzatura di irrigidimento per il montaggio, controllate le manovre di posa e applicati i sostegni per i martinetti e tutte le stazioni per le misurazioni da eseguire durante la presa in forza, il collaudo e la futura compensazione. Solo dopo questo premontaggio in banchina e dopo la preparazione di tutte le parti meccaniche e di monitoraggio si è potuto eseguire il montaggio (fig.13) e saldare i tre elementi non sotto sforzo, perché incatenati. Infine sono stati caricati i tre archi portanti allentando le catene e controllando la spinta sulle spalle con i martinetti.

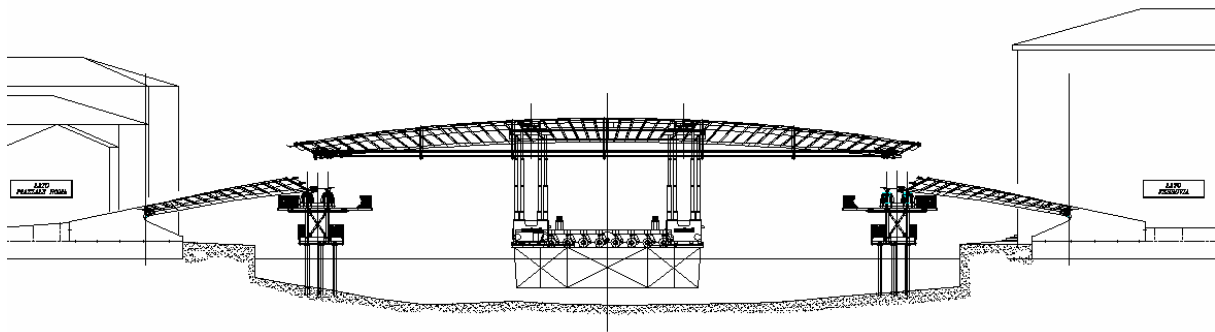


Fig. 13

4 BREVI NOTE SULLA FUTURA MANUTENZIONE

Il sistema di monitoraggio previsto permetterà di seguire con continuità ogni possibile spostamento orizzontale delle fondazioni e di intervenire spessorando tra tubi e fondazioni (fig.6) in modo tale che gli archi (soprattutto il superiore) restino sempre compressi. Comunque sarà predisposto insieme al Collaudatore (Prof. Ing. Enzo Siviero) una precisa specifica di manutenzione.

5 OSSERVAZIONI FINALI

Se un intervento su strutture già parzialmente realizzate è pur sempre una sfida che può portare a soddisfazioni anche maggiori di quelle che se si fosse stati chiamati fin dall'inizio (vedi ad esempio [2]) in questo caso mi è restato il rimpianto di non essere stato chiamato prima perché avrei messo a disposizione la mia esperienza per risolvere velocemente e più semplicemente la realizzazione dell'opera sempre nel rispetto del progetto Calatrava. A parte che sono sicuro avrei risolto sulla carta, cioè disegnando, quelle difficoltà costruttive che fecero

nascere lunghe diatribe che, a mio giudizio, fecero perdere di vista la globalità del progetto, oltre a tanto tempo. Mi sarebbe piaciuto principalmente proporre:

- un diverso meccanismo di compensazione (fig.14). Nella figura si vede che le estremità degli archi sono incastrate su un plinto di cemento a sua volta posato attraverso appoggi da ponte sulle fondazioni principali. I plinti sono inoltre riscontrati sulle fondazioni principali con un meccanismo (due grossi martinetti) che permette di compensare perdite di carico (e di conseguenza di forma) sia dovuto a possibili allontanamenti tra le fondazioni principali sia per salto negativo di temperatura. Questa proposta si rifaceva a una mia esperienza di quasi quarant'anni fa, apparentemente del tutto diversa, (posa di tubazioni in mare profondo [3] e [4] fig.15), ma sostanzialmente invece molto simile. Infatti sia nella posa di tubazioni in mare profondo che nel ponte di Calatrava è fondamentale la conservazione della forza (di trazione per le tubazioni e di compressione invece per il ponte) che garantisce la forma delle strutture che altrimenti possono snervarsi localmente. I blocchi di cemento posati, attraverso appoggi da ponte, sulle fondazioni principali in cemento si rifanno pure ad un'altra esperienza sperimentata nelle fondazioni delle saette e controsaette del ponte di Le Havre [5] .

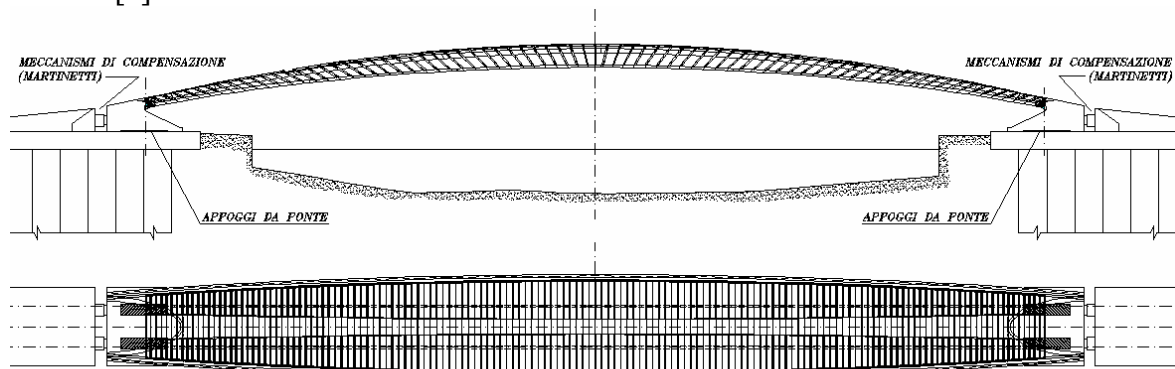


Fig. 14

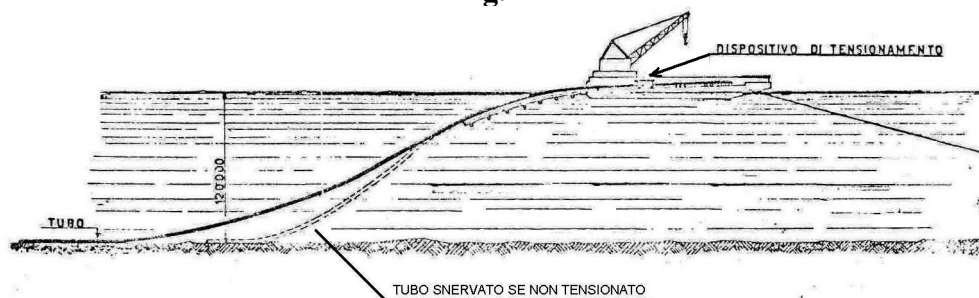


Fig. 15

- Un diverso montaggio (fig.16) consistente nel costruire altre due pile in Canal Grande (con ingombri in ombra delle pile già previste ma molto più alte e con mensole aggettanti dall'estremità dalle quali a mezzo martinetti cavi tenere appeso il pezzo centrale evitando di dover applicare (e poi smontare) i piatti per l'inserimento delle catene, ma soprattutto permettendo un montaggio con facili aggiustaggi, montaggio già sperimentato in numerosi cantieri anche per archi progettati da Calatrava (Atene e Reggio Emilia) [6] e [7].
- Proporre una diversa attrezzatura per permettere ai disabili di superare il ponte. La soluzione adottata è certamente in linea con il criterio: a ponte originale soluzione per trasporto disabili originale. Io però avrei patrocinato un altro principio: studiare un'attrezzatura semplice ed applicabile a tutti gli altri ponti di Venezia in modo da prevedere nel tempo, non dico di attrezzare tutti gli altri cento ponti, ma almeno rendere possibili ai disabili degli itinerari che permettano di girare per Venezia come fanno gli altri visitatori. In questa ottica

mi pare si sarebbero potute studiare delle vie di corsa adattabili al dorso dei vari ponti per trasportare delle piattaforme con un semplice sistema funicolare movimentato da un anello di funi.

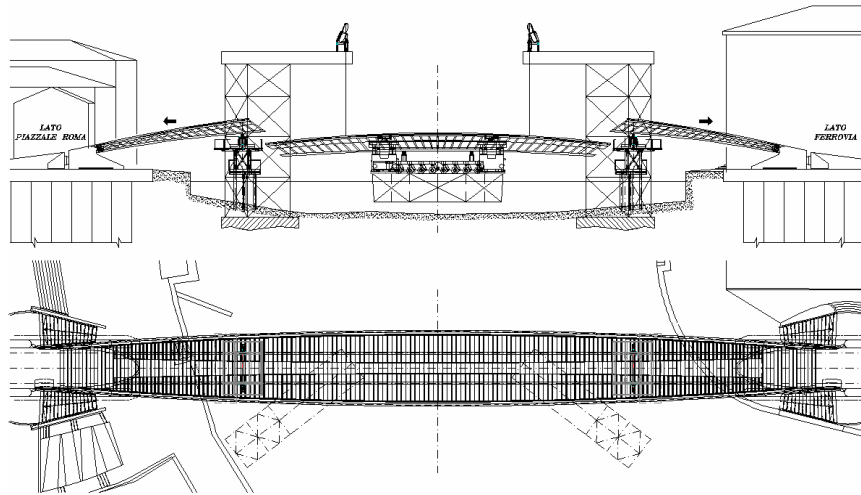


Fig. 16

BIBLIOGRAFIA

- [1] Romaro G., Impressioni di uno strutturista sulla mostra antologica di Santiago Calatrava, *Galileo 83*, settembre 1996
- [2] Romaro G., Copertura e facciate Sud per lo Stadio Olimpico di Cortina D'Ampezzo, *Galileo 167*, dicembre 2004
- [3] Romaro G., Problemi inerenti alla posa di tubazioni in mare, *Atti del Convegno di Verona del CTA*, ottobre 1977
- [4] Romaro G., Trent'anni di sfide sui mari, *Galileo 128*, giugno 2000
- [5] Colussi L., Romaro G., Viadotto sul Gran Canal Maritime a Le Havre. Note strutturali e di montaggio, *Costruzioni Metalliche*, I° parte marzo aprile 1995, II° parte maggio giugno 1995
- [6] Catanzano A., Colussi L., Romaro C., Romaro G., Sulla costruzione ed il montaggio della copertura dello Stadio Olimpico di Atene 2004, *Atti del XX Congresso CTA Ischia*, settembre 2005
- [7] Romaro C., Romaro G., Le prime opere d'arte realizzate su progetto Calatrava sono ponti. I° nota Viadotto Calatrava a Reggio Emilia, *Atti del XXI Congresso CTA a Catania*, ottobre 2007

DATI GENERALI:

Committente: **Comune di Venezia**

Progetto Architettonico e strutturale: **Arch. Ing. Santiago Calatrava - Zurigo**

Impresa Generale: **Impresa Cignoni srl - Lendinara (RO)**

Strutture metalliche a pié d'opera: **Lorenzon Techmec System S.p.A - Noventa di Piave (VE), Siro Marin - Correzzola (PD), Officina Metalmeccanica di Inzitari Obenito - Arquà Polesine (RO), Omar Costruzioni - Pegolotte (VE)**

Trasporto e posa in opera: **Fagioli Spa - Reggio Emilia**

Catene provvisorie per il montaggio: **Tensacciai Spa - Milano**

Attrezzatura di compensazione e monitoraggio: **4emme Service Spa - Bolzano**