

Collegio dei Tecnici dell'Acciaio



PROMOZIONE ACCIAIO

**2^a SETTIMANA
DELLA COSTRUZIONE IN ACCIAIO**

VENEZIA 24 - 28 SETTEMBRE 2001

**XVIII
CONGRESSO C.T.A.**

VENEZIA 26 - 27 - 28 SETTEMBRE 2001

VOLUME 1

ASPETTI INNOVATIVI

APPLICAZIONI

PONTI

PONTE AD ARCO SUL PARCO ARCHEOLOGICO DI POZZUOLI (NA)

ARCH BRIDGE OVER THE ARCHAEOLOGICAL PARK OF POZZUOLI

Ing. Pierangelo PISTOLETTI, Ing. Luca ROMANO

Seteco S.a.s. Corso A. Saffi, 1/c Genova – Romano Associati Viale Martiri 68/a Albenga Sv

SOMMARIO

Nella memoria vengono presentati il progetto e la realizzazione di un ponte stradale in acciaio, ad arco, di 58 metri di luce.

L'impalcato è sostenuto da due archi inclinati tramite coppie di tiranti, posti a distanza di 3 metri. Gli archi sono alti 12.5 metri in chiave, sono in sezione a doppio "T" saldata, con l'anima festonata, in modo da permettere il collegamento dei tiranti tramite capicorda fissi. I tiranti sono costituiti da coppie di tondi $\varnothing 50$ e reggono traversi d'acciaio, collaboranti con la soletta in cemento armato.

Lo spessore massimo dell'impalcato è di 0.8 metri, necessario per non interagire coi ritrovamenti archeologici.

ABSTRACT

This report describes the design and construction of an arch bridge, with a main span of 58 m. Suspension of the deck is obtained through tension rods every 3 m. connected to the inclined arches.

Arches are 12.5 m. high at crown, have a composed "T" section and the web is scalloped to allow the pin-connection of tie-rods through open sockets.

Tension-rods are couples of solid $\varnothing 50$ steel rods, which bears transverse beams, connected to the concrete slab. The maximum deck thickness is 0.8 m. necessary not to interfere with the

1. INTRODUZIONE

Il progetto del piano intermodale dei trasporti prevedeva la realizzazione di un ponte a travata in struttura mista acciaio-calcestruzzo nella posizione ove sorge l'attuale ponte. Grazie ai lavori intrapresi per la realizzazione di tale opera sono venute alla luce l'antica via Antiniana e la splendida necropoli romana. E' nata a quel punto l'esigenza di salvaguardare i reperti archeologici pur realizzando il ponte in questione, essendo impossibile il ricoprimento degli stessi, così come l'abbandono della viabilità finora realizzata, comprendente fra l'altro vari ponti già terminati: il Consorzio si è adoperato per arrivare ad una progettazione rispettosa di tali vincoli.

La progettazione richiedeva la realizzazione di un ponte lungo circa 60 metri e di spessore massimo di 80 centimetri, cioè molto sottile, dato che non si poteva predisporre una pila intermedia sul basolato antico, come espressamente richiesto dalla Soprintendenza ai Beni Archeologici.

Il ponte doveva possedere pregi architettonici e doti di leggerezza e trasparenza tali da valorizzare il contesto archeologico su cui si inseriva, staccandosi tuttavia dallo stesso per modernità e snellezza. Il progetto del ponte è stato molto curato nei particolari strutturali, nelle finiture e anche nell'illuminazione: basti pensare che il passaggio pedonale è protetto all'esterno da una barriera in plexiglas trasparente alta due metri, voluta dalla Soprintendenza a protezione del parco archeologico, che si regge su una costolatura di elementi metallici a foglia di vertebre collegate solo da un mancorrente in acciaio inox.

Il progetto è stato visionato ed approvato in ogni sua fase da tutte le Soprintendenze competenti, le quali hanno anche scelto il colore definitivo del ponte (fig.1).

2. DESCRIZIONE DEL PONTE

La struttura del ponte è legata ad esigenze di valutazione d'impatto ambientale dello stesso, ai vincoli geometrici molto restrittivi sullo spessore dell'impalcato e sulla sua larghezza, alla necessità di avere fondazioni semplici e poco ingombranti, facilmente modificabili in caso di rinvenimento di reperti archeologici. Da queste premesse è stato sviluppato il ponte ad arco a spinta eliminata oggetto di questo progetto.

Si tratta di un ponte ad arco in acciaio, lungo 58 metri e largo 12, con una corsia ed un marciapiede per ogni senso di marcia. I due archi di sostegno dell'impalcato partono alle due estremità laterali del ponte, convergono al centro e ridiscendono alle due estremità opposte; gli stessi archi sono costituiti da lamiere formanti una travatura a doppio "T" con l'anima "festonata" in modo da poter permettere il collegamento dei tiranti. I tiranti, costituiti da doppi tendi in acciaio, sostengono dai

La qualità strutturale e le finiture (ringhiera, illuminazione, ecc.) sono particolarmente curate poiché il ponte sorvola il parco archeologico di Pozzuoli, quindi il progetto ha dovuto passare l'approvazione della Soprintendenza ai Beni Archeologici ed Ambientali.

Le esigenze dell'Amministrazione e della Soprintendenza sono state risolte con successo con lo schema strutturale adottato, che ha permesso un impalcato molto sottile, soli 80 cm. pavimentazione compresa, che sorvola i resti archeologici a poche centimetri di distanza (fig.2).

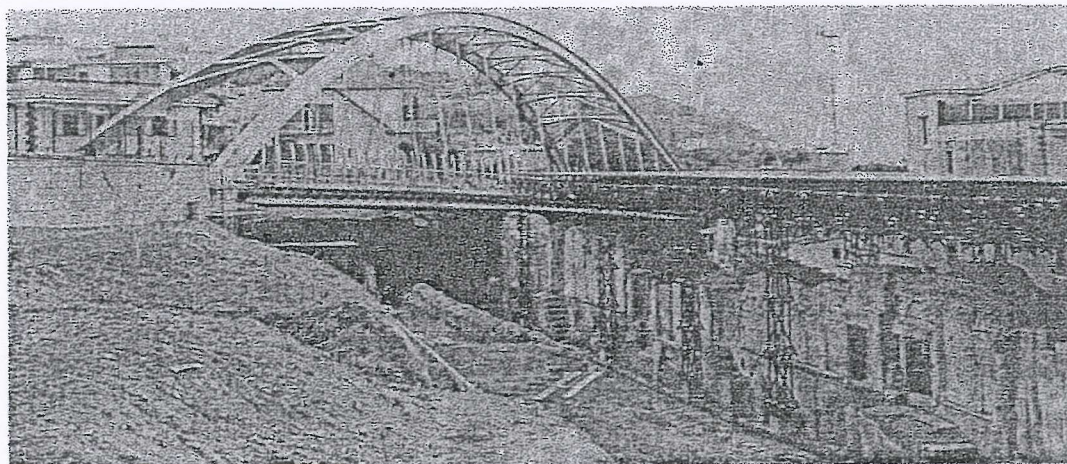


Figura 1: il ponte nel suo contesto

3. FONDAZIONI

Il ponte poggia su due spalle d'estremità, aventi spessore di 1,4 metri, lunghe 12 metri e rivestite in tufo.

Le fondazioni sono di tipo profondo, realizzate con pali trivellati.

Un plinto testa palo spesso 1,5 metri collega i pali di ogni spalla.

4. SPALLA FISSA, LATO VIA SOLFATARA

La spalla di fondazione lato via Solfatara è "fissa", dotata cioè di due appoggi che vincolano l'impalcato, uno con vincolo fisso sia in senso longitudinale che in direzione trasversale, l'altro con vincolo solo in direzione longitudinale.

Durante gli scavi per la realizzazione di tale fondazione, sono stati rinvenuti dei reperti archeologici. Per questo è stato necessario disporre i pali di fondazione in tre gruppi triangolari, nei vuoti liberi dai reperti e collegarli con un plinto trapezoidale.

Uno strato di sabbia ha protetto il tutto, che è stato tumulato sotto il getto.

La spalla poggia su 9 pali di 800 mm di diametro; la loro lunghezza è dettata dall'esigenza di infissare gli stessi in uno strato sabbioso molto addensato posto oltre i 17 metri di profondità dal

I pali hanno lunghezza di 20 metri e hanno prevalente portanza di punta.

Gli ultimi 3.4 metri di ogni palo, verso la superficie, sono immersi in un terreno riportato, non reagente, per cui non viene considerato nei calcoli: quindi gli ultimi metri sono in pratica una trave (pilastro presso-inflesso) incastrata nel plinto di base.

4. SPALLA MOBILE, LATO VIA CELLE

La spalla di fondazione del ponte posta lato via Celle é "mobile", dotata cioè di due appoggi che lasciano libero l'impalcato di dilatarsi longitudinalmente: un appoggio ha vincolo mobile multidirezionale, l'altro solo trasversale.

Tale spalla non ha presentato problemi legati a ritrovamenti archeologici, per cui la sua forma é rimasta quella prevista a progetto; poggia su 8 pali di 800 mm di diametro, lunghi 20 metri, disposti in modo regolare e baricentrico rispetto al plinto prismatico.

5. STRUTTURA DEL PONTE

La struttura del ponte é costituita da due archi in acciaio che reggono, tramite tiranti, dei traversi ogni 3 metri, anch'essi d'acciaio, posti al di sotto dell'impalcato; i traversi reggono la soletta.

L'arco é del tipo a spinta eliminata, in modo da avere solo reazioni verticali sulle spalle e semplificare al massimo le fondazioni; due catene collegano le estremità degli archi.

L'altezza in chiave degli archi é 12,5 metri, sono formati da lamiere di acciaio Fe510 spesse 30 mm, formanti una sezione larga 500 millimetri ed alta 1000 millimetri, con sezione a doppio "T".

Gli archi sono ottenuti per calandratura delle lamiere costituenti le piattabande, saldate poi con cordoni d'angolo all'anima.

I due archi sono collegati con controventi a "K" sul lembo superiore, controventi realizzati con profilo a doppio "T" sagomato.

L'anima dell'arco é festonata e fuoriesce ogni 3 metri per permettere l'attacco dei capicorda fissi dei tiranti di sospensione.

Gli archi sono stati interamente realizzati in officina in 5 tronchi l'uno, tronchi che sono stati giuntati tra loro in cantiere e collegati alle estremità al concio finale ed alla catena attraverso un giunto bullonato.

Le catene sono formate da lamiere spesse 20 millimetri ed alte 1 metro, irrigidite con una piattabanda inferiore che serve anche d'appoggio per il montaggio dei traversi.

Tutti questi pezzi rientrano nell'ingombro massimo per garantirne la trasportabilità stradale senza mezzi eccezionali.

I traversi sono costituiti da una piattabanda superiore spessa 20 millimetri che porta i pioli di collegamento alle solette...

L'attacco dei tiranti é realizzato all'estremità dei traversi: i tiranti passano attraverso fori realizzati nella piattabanda e sono bloccati sotto alla catena.

Il collegamento arco-impalcato avviene all'estremità, attraverso un giunto bullonato realizzato in cantiere.

L'arco é collegato all'impalcato tramite cavi costituiti da due tiranti ϕ 50 in acciaio Fe 510 D e bulloni d'estremità M 50.

Ogni singolo tirante é collegato all'arco attraverso un capocorda fisso, con perno M 50 e copiglia di bloccaggio ed all'impalcato attraverso capocorda regolabile, dotato di dado esterno.

La soletta é spessa 22 centimetri ed é stata gettata in opera sù predalle, disposte longitudinalmente all'asse del ponte, che poggiano sui traversi.

Il getto é stato eseguito in varie fasi: prima un getto di 2 metri a cavallo dei traversi, poi il completamento del getto lasciando 3 giunti da cm. 50 trasversali all'impalcato (uno ogni 14 metri) e due giunti longitudinali di cm. 50 di fianco alle catene. Dopo 28 giorni é stato completato il getto con calcestruzzo a ritiro compensato e resine per riprese di ancoraggio.

Questo procedimento é stato adottato per evitare eccessive fessurazioni nella soletta, fessurazioni causate dalla trazione che si instaurava a livello d'impalcato. In questo modo si é permesso alla catena di immagazzinare tutta la trazione necessaria ad equilibrare i pesi propri.

6. ANALISI STRUTTURALE

Lo schema strutturale del ponte é quello di un arco a spinta eliminata.

Il dimensionamento della struttura principale é avvenuto con un procedimento di successive ottimizzazioni. Si é partiti da un rapporto ottimale luce su altezza in chiave $L/f = 5$, successivamente si é proceduto ad un primo dimensionamento calcolando le sollecitazioni nell'arco e la trazione nella catena con uno schema di arco incernierato agli estremi. Determinata la geometria degli elementi principali e configurato l'arco a forma di parabola, si é proceduto ad una prima analisi con il metodo degli elementi finiti, utilizzando uno schema piano.

I risultati di quest'analisi hanno permesso di ridimensionare le caratteristiche inerziali dell'arco e correggere il rapporto tra le rigidezze della trave d'impalcato e l'arco stesso.

In questa fase é stata condotta una prima valutazione della sensibilità dell'arco agli effetti del secondo ordine, eseguendo un'analisi non lineare per geometria.

Al termine di questa fase si é stati in grado di verificare gli elementi principali della struttura e di dimensionarli in previsione della costruzione di un modello tridimensionale completo.

E' stato utilizzato il codice di calcolo SAP90, realizzando un modello con 160 nodi e 292 elementi trave, per un totale di 924 gradi di libertà. La prima analisi svolta é stata un'analisi dinamica, per

La seconda analisi é stata un'analisi statica, per verificare la sua flessibilità: è stata rinotata più

Il primo modo di vibrare del ponte corrisponde al secondo modo flessionale dell'impalcato e dell'arco nel piano verticale, con periodo proprio di 0,92 secondi, ottenuto dopo varie ottimizzazioni: si tratta di una struttura flessibile ma che non presenta eccessivi problemi di deformabilità e di sensibilità alle vibrazioni.

Il secondo modo è rappresentato da un'oscillazione del solo arco fuori dal piano verticale ed ha periodo di 0,76 secondi.

Il terzo modo è il terzo modo flessionale del ponte nel piano verticale, con $T=0,45$ secondi. Il quarto è il secondo modo flessionale di arco ed impalcato nel piano orizzontale, con $T=0,28$ secondi.

Dopo questo procedimento si era in possesso di una geometria strutturale sulla quale svolgere le analisi esecutive. Trattandosi di una struttura mista acciaio-calcestruzzo si sono sovrapposti gli effetti delle prime due fasi a 31 condizioni di carico di fase 3, in grado di massimizzare le sollecitazioni in tutti gli elementi.

Per quanto riguarda le azioni del vento è stata condotta una semplice analisi statica poiché si è verificato che l'eterogeneità della struttura non permetteva una regolarizzazione del distacco dei vortici e la sua non eccessiva flessibilità non dava luogo ad effetti aeroelastici dinamici; questi controlli sono stati effettuati utilizzando varie normative straniere. L'analisi statica è stata condotta posizionando le forze dovute alla pressione agente di normativa, 250 kg/mq, nei vari nodi del modello; un'analisi è stata necessaria per il vento che soffia a ponte scarico, mentre il vento a ponte carico è stato combinato col coefficiente 0,6 a tutte le 31 posizioni dei carichi mobili.

7. ANALISI SISMICA

La zona ove è ubicato il ponte è di II categoria, inoltre si è adottato un coefficiente di protezione sismica $I=1,4$ data l'importanza dell'opera.

La peculiarità strutturale ha richiesto un'analisi dinamica in campo elastico-lineare. E' stata eseguita un'analisi modale con la tecnica dello spettro di risposta, utilizzando i primi 6 modi principali, coi quali si raggiungeva un coefficiente di partecipazione maggiore del 90%.

La struttura è stata sottoposta ad un sisma in direzione orizzontale, ortogonale all'asse del ponte, e ad un sisma verticale; le sollecitazioni risultanti sono state combinate con la regola della radice quadra della somma dei quadrati (SRSS).

8. ANALISI LOCALE

I traversi sono stati calcolati come travi miste acciaio-calcestruzzo, sono dotati di connettori a piolo e sono semplicemente appoggiati agli estremi, sui tiranti di sospensione.

Il giunto d'estremità dei traversi è stato dimensionato nell'ipotesi di ...

Per i traversi é stata svolta un'analisi tridimensionale utilizzando elementi lastra, controllando di non avere concentrazioni eccessive di tensioni intorno ai fori.

La soletta é stata calcolata "a trave", tenendo conto della larghezza collaborante richiamata dalla distribuzione dei carichi mobili.

9. DETTAGLI COSTRUTTIVI

A testimonianza del livello progettuale nelle figg. 3, 4, 5 si possono osservare tutti i particolari strutturali, dall'anima festonata degli archi ai particolari di aggancio dei tiranti, dai componenti a "K" degli archi alla loro foggia geometrica curvilinea, dai còpri giunti curvi realizzati per collegare i controventi a quelli sagomati utilizzati per tutte le parti strutturali. La pavimentazione é costituita da un'impermeabilizzazione di 1 centimetro di spessore, uno strato di 5 centimetri di binder ed uno di 3 centimetri di usura.

Lo smaltimento acque piovane avviene tramite griglie poste ogni 6 metri, tra i traversi, su entrambe le estremità del ponte.

La pendenza trasversale del 2% della carreggiata é realizzata con la soletta.

La protezione delle passerelle pedonali é costituita da un montante in acciaio ogni metro, cui sono collegate lastre in policarbonato trasparente antisfondamento, alte 2 metri.

Un corrimano in tubolare di acciaio inox \varnothing 60 completa il parapetto.

L'illuminazione della carreggiata é stata realizzata con lampade poste sull'arco ed é completata da una coppia di proiettori in corrispondenza dei blocchi di incastro dell'arco, che servono ad illuminarlo di notte. Un'altra coppia di proiettori posti sulle spalle illumina l'intradosso dell'impalcato. Le spalle sono rivestite in tufo per meglio inserirle nel contesto.

10. FASI DI MONTAGGIO

Il montaggio é stato effettuato direttamente nella posizione finale, nelle seguenti fasi:

1. pre montaggio degli archi a terra ciascuno in 2 tronconi;
2. sollevamento dei tronconi, pesanti ca. 15 tonnellate l'uno e appoggio degli stessi alle spalle e ad un traliccio provvisorio in mezzzeria della sede del ponte; bullonatura in opera dei tronconi;
3. collegamento delle catene inferiori;
4. montaggio dei tiranti e controventi degli archi;
5. montaggio traversi e mensole marciapiede, sollevandole da terra e bloccandole alle funi;
6. una volta che le strutture principali in acciaio sono state nella loro sede definitiva, si é potuto procedere al posizionamento delle coppelle prefabbricate, delle armature ed al getto della soletta di

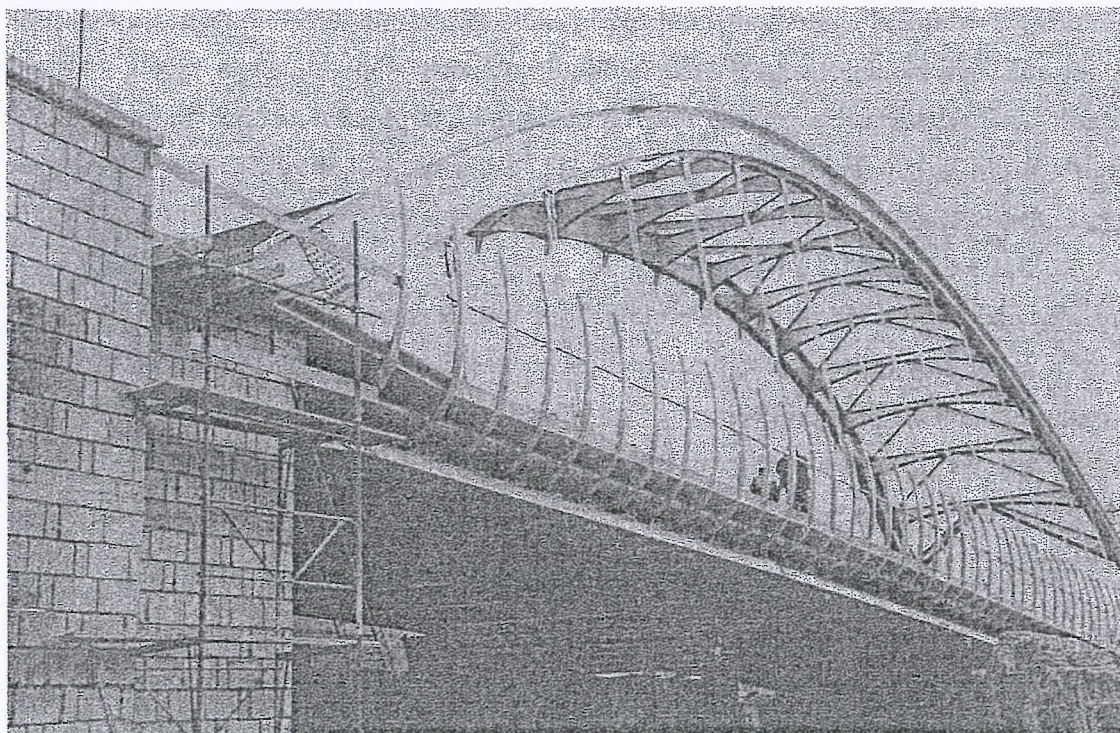
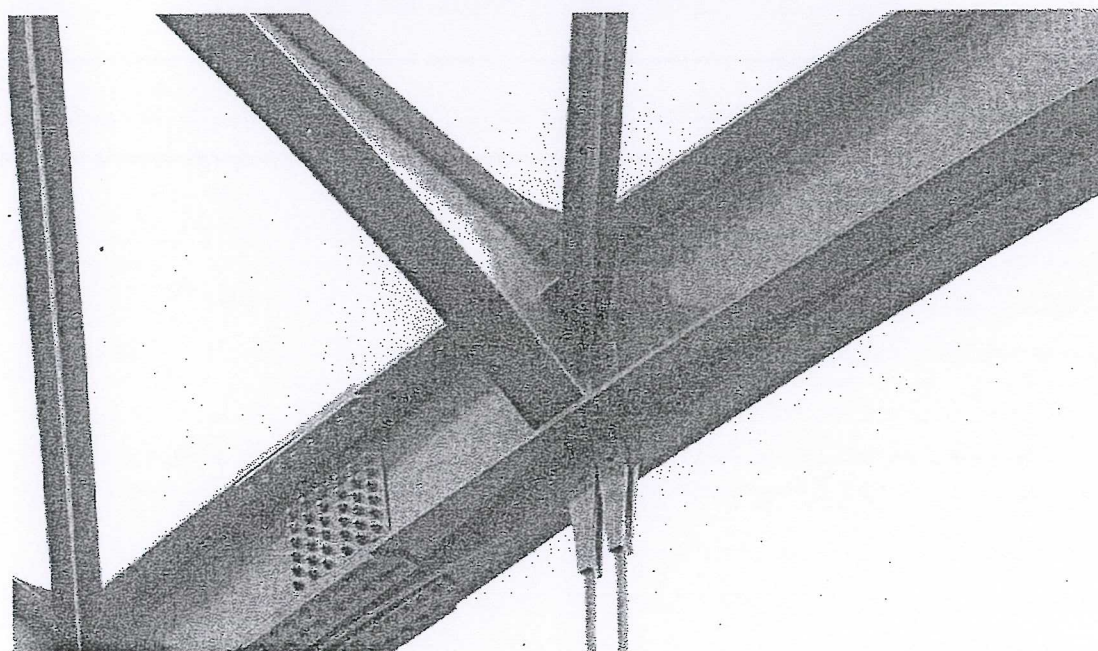


Figura 2: vista del ponte dal basso





Figura 4: particolari arco e prospetti



11. DATI GENERALI

Progetto architettonico e strutturale:

ing. Pierangelo Pistoletti, Genova, ing. Luca Romano, Albenga (SV)

Direzione lavori:

ing. Vincenzo Siculo, Napoli

Acciaio da carpenteria:

Arco = 68 ton.

Controventi. arco = 12 ton.

Catene = 23 ton.

Traversi = 122 ton.

Totale 225 ton. (escluse le funi).

Incidenza acciaio strutturale per mq d'impalcato: 320 kg/mq

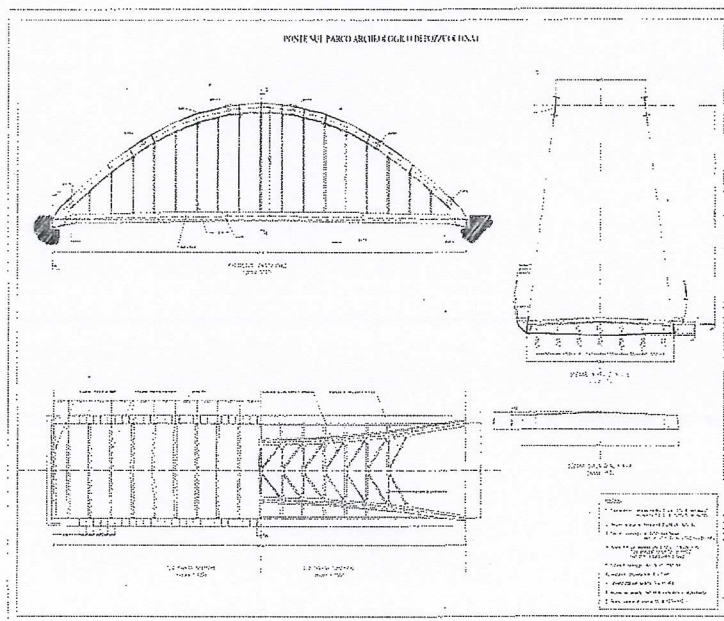


Figura 6: assieme strutturale