

Ponte ad arco inclinato sul Fiume Secchia, Campogalliano (Modena)

Nel '97 le Amministrazioni Comunali di Campogalliano e Modena decisero di costruire un ponte pedonale e ciclabile sul fiume Secchia, nella zona del "passo della Barchetta", ove anticamente era posizionato un ponte in legno; l'incarico di progettazione è stato affidato per mezzo di un bando nazionale.

L'esigenza dei committenti era quella di realizzare un'opera con un accurato inserimento ambientale, poiché si inseriva all'interno del "Parco della cassa di espansione del fiume Secchia".

La richiesta è stata quella di una struttura leggera e snella, non in cemento armato per velocizzare i tempi costruttivi e non richiedere costosi casseri, né di legno lamellare poiché in zona tale materiale, senza un'adeguata manutenzione, non avrebbe garantito adeguata durabilità.

Per questo si è scelto di utilizzare l'acciaio "corten" e di verniciarlo, per garantire una notevole vita utile all'opera, con la minima manutenzione.

Un'analisi del sito di costruzione e dell'alveo del fiume Secchia ha portato alla conclusione che occorre realizzare un ponte con una campata centrale di almeno 50 metri ed una di riva più corta.

Inoltre il Magistrato del Po richiedeva un ponte con un intradosso ad una quota almeno pari a quella dell'argine più elevato del Secchia.

Date queste premesse occorre realizzare una struttura molto sottile, per non aver rampe di accesso con pendenza eccessiva.

Questo risultato poteva essere ottenuto solo con un ponte strallato o con una soluzione ad arco, schemi che permettono di realizzare un'opera di tale lunghezza e con uno spessore ridotto a soli 50 centimetri, spessore che implica rampe con pendenza del 6%.

DESCRIZIONE PONTE

L'idea progettuale è nata dopo aver analizzato tre diverse soluzioni, tra le quali una strallata ed una ad arco centrale; i committenti hanno optato per una soluzione non tradizionale, ad arco obliquo, per la sua leggerezza, trasparenza ed originalità strutturale.

Tale soluzione ha incuriosito tecnici ed amministratori per lo sconvolgimento visivo della percezione dei normali equilibri.

Il ponte è costituito da una campata principale ad arco inclinato di 55 metri di luce ed una di riva, lunga 20 metri (figure 1, 2, 3 e 4).

L'arco è alto 11 metri ed inclinato di circa 15°, è in acciaio, a sezione triangolare cava, costruito con lamiere spesse 20 millimetri cui è collegato, ogni 2.5 metri, un tirante in profilo a "T" variabile, tirante che sostiene l'impalcato.

L'impalcato è costituito da un tubo, sempre d'acciaio, di 60 centimetri di diametro cui sono saldate, ogni 2.5 metri, le mensole che sostengono la pavi-

Nella memoria vengono presentati il progetto e la realizzazione di un ponte ciclabile, ad arco inclinato, su due campate, la principale di 55 ml, la secondaria di 20 ml.

L'arco è a sezione triangolare, è alto 11 metri ed è inclinato di 15°. I tiranti sono in profilo composto a "T", di sezione variabile e sostengono l'impalcato ogni 2.5 metri.

L'impalcato è costituito da un tubo-torsio rigido, con mensole che reggono la pavimentazione e controventi a croci di S. Andrea.

La pavimentazione è in legno.

Il ponte si inserisce all'interno del "Parco della cassa di espansione del fiume Secchia", attraversa il fiume stesso e collega i Comuni di Campogalliano e Modena.

An inclined arch bridge across the river Secchia in Campogalliano (Mo)

This report describes the design and construction of an inclined arch bridge, with a main span of 55 m and a side span of 20 m.

The arch is triangular in shape, is 11 metres high and has an inclination of 15°.

The deck is suspended using tension rods every 2.5m, with variable "T" structural shape elements.

The deck is made from a torsion-rigid tube, with side corbels bearing the pavement, and a cross bracing with tubular profiles in the form of a St. Andrew's cross.

The pavement consists of a wooden floor.

The bridge is built inside the "Parco della cassa di espansione del fiume Secchia". It crosses the river and connects the local authority territories of Campogalliano and Modena.



Figura 1
Vista del ponte
dal basso.

mentazione in legno; un controvento in tubi, a croci di sant'Andrea, lo rende rigido nel suo piano.

La larghezza utile del piano viabile è pari a 2.5 metri e permette il passaggio pedonale, ciclabile e di eventuali mezzi di soccorso (figura 5).

Il ponte poggia lato Campogalliano su una spalla e su una pila inclinata secondo la tangente all'arco, lato Modena su una spalla.

La spalla Modena e la pila sono fondate su pali di 600 mm di diametro e lunghi 15 metri, mentre la spalla Campogalliano ha fondazioni dirette.

Figura 2
Vista dalla sponda
Modena.

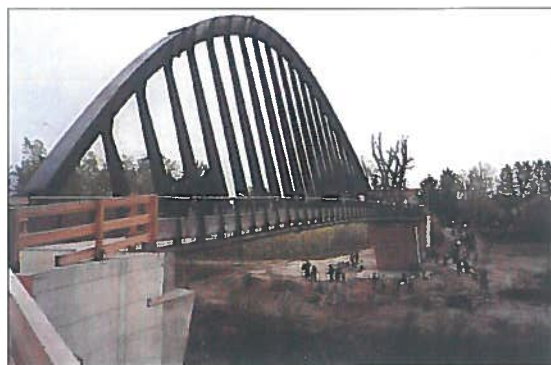


Figura 3
Vista dalla sponda
Campogalliano.



Figura 4
Il ponte da valle.

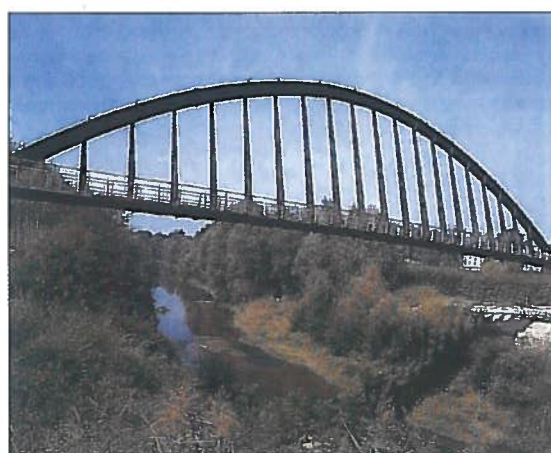


Figura 5
Vista durante
l'attraversamento.



Il carico della campata principale, gravante sulla pila inclinata, ha una forte eccentricità rispetto al baricentro della palificata, per cui è stato adottato uno schema strutturale puntone-tirante per ricentrare il carico e far lavorare correttamente i pali. Infatti i tubi della campata di riva costituiscono il tirante del triangolo delle forze, mentre la pila inclinata è il puntone compresso. In questo modo si è potuto salvaguardare la buona composizione architettonica ed il funzionamento delle fondazioni profonde.

Il ponte poggia su apparecchi d'appoggio in acciaio e teflon da 500 e 1000 kN.

Gli appoggi sulla spalla lato Campogalliano e sulla pila sono del tipo "fisso" e sono accoppiati a tirafondi in grado di trasmettere l'azione tagliante derivante dal funzionamento a tirante della campata di riva.

Gli appoggi sulla spalla lato Modena sono del tipo "unidirezionale", per poter permettere gli allungamenti della campata principale. Anche per essi sono stati previsti tirafondi, ancorati in profondità ma mobili, all'interno di un tubo riempito di mastice per consentire gli spostamenti orizzontali, ma impedire ogni movimento verticale.

Il peso totale della carpenteria metallica è circa 85 tonnellate e l'incidenza del peso dell'acciaio è di 450 kg/mq.

L'acciaio utilizzato è Fe510, del tipo "corten", tranne i tubi, che non sono stati reperiti sul mercato del tipo autopassivante.

ANALISI STRUTTURALE

Si tratta di un ponte in acciaio, ad arco a spinta eliminata; il funzionamento statico si può così riassumere: l'arco sostiene, mediante i tiranti, i carichi gravanti sull'impalcato la cui struttura ne assorbe la componente orizzontale ed evita gli spostamenti orizzontali.

La torsione, dovuta all'eccentricità del peso, è assorbita dal grosso tubo longitudinale d'acciaio, che la scarica sulle spalle in cemento armato.

L'immagine del ponte dà l'idea di questo complesso equilibrio, raggiunto attraverso pesi e contrappesi.

Dopo vari calcoli preliminari di dimensionamento ed un primo studio con un modello piano, è stato messo a punto un modello tridimensionale con 308 elementi finiti tipo trave, per un totale di 1169 gradi di libertà. Sono stati utilizzati 11 diversi elementi, di sezione e geometria tale da rispecchiare esattamente la struttura progettata.

Le analisi svolte sono state sia di tipo statico che dinamico.

L'analisi dinamica è stata svolta appena dimensionata la struttura, per determinarne i modi principali di vibrazione e la flessibilità. Questo perché per strutture così snelle spesso la deformabilità e la sensibilità alle vibrazioni sono più restrittive che la resistenza stessa del materiale.

Il modello era completo delle masse strutturali del peso proprio, dei carichi permanenti e delle rigidità come sulla struttura reale.

In figura 6 si possono vedere i primi 4 modi di vibrare del ponte e le corrispettive frequenze proprie. Il modo principale è quello flessionale del solo arco fuori dal suo piano, con frequenza di 0,923 Hz. Il secondo modo è quello flessionale dell'impalcato nel piano verticale ed ha frequenza di 1,92 Hz. L'analisi statica prevedeva 14 casi di carico elementare e 16 combinazioni degli stessi per massimizzare le sollecitazioni in tutti gli elementi.

La condizione più gravosa da un punto di vista deformativo è stata quella di massimo carico emisimmetrico per l'arco (accidentale su metà campata principale e sulla campata di riva), dove si è calcolata una flessione pari a $L/568 = 9.72$ cm (vedi fig. 7).

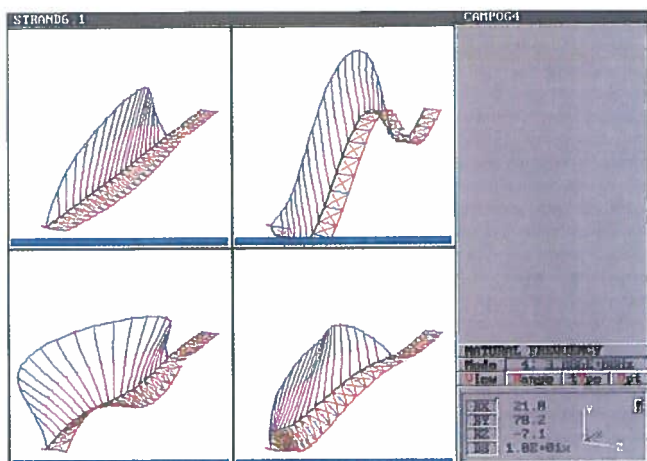


Figura 6 Primi 4 modi principali di vibrare.

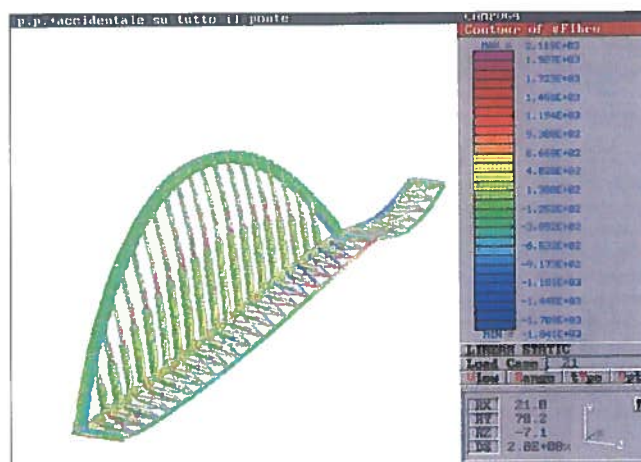


Figura 8 Tensioni dovute al massimo carico mobile.

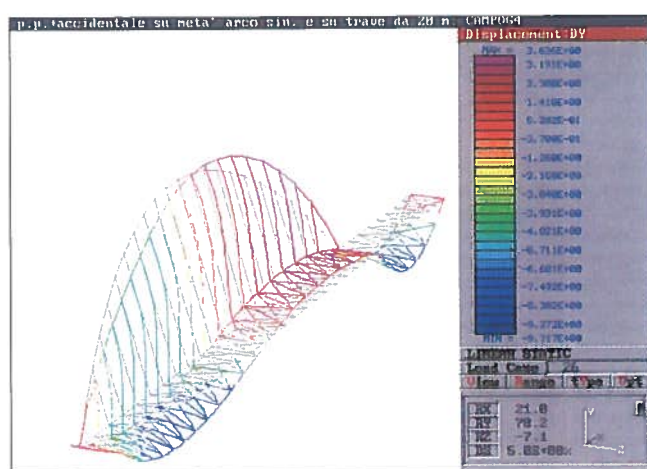


Figura 7 Spostamenti verticali dovuti al carico emisimmetrico.

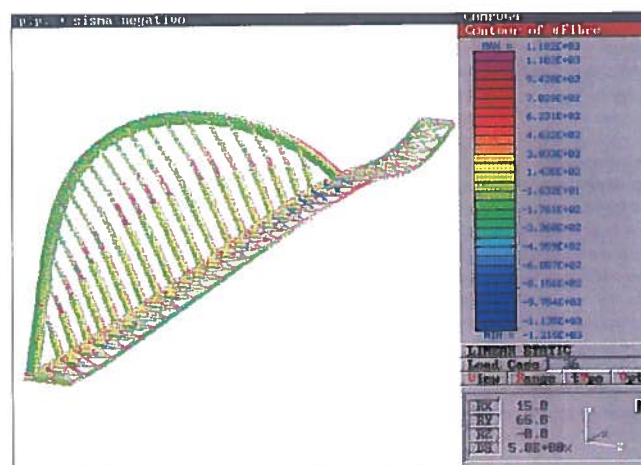


Figura 9 Tensioni in fase di sisma.

Tale valore aumentava a $L/491$ in caso di concomitanza del vento di normativa (250 kg/mq).

Il tasso di lavoro massimo nei materiali è stato calcolato per la condizione di carico corrispondente a carico accidentale su tutta la lunghezza del ponte, di valore pari a 2119 kg/cmq.

Nella figura 8 si può vedere l'andamento delle tensioni nelle fibre di tutti gli elementi, relativo alla condizione di carico accidentale su tutto il ponte. Considerato il tipo di struttura, è stata svolta un'analisi che tenesse anche conto della non linearità geometrica, per valutare la sensibilità degli elementi compressi agli effetti del secondo ordine.

L'analisi è stata svolta sulla condizione di carico permanente e accidentale massimo, oltre al peso proprio.

La convergenza alla soluzione è stata ottenuta attraverso 4 step di carico e 17 iterazioni, utilizzando una norma per la convergenza pari a 10^{-4} sugli spostamenti e 10^{-3} sulle forze residue.

La soluzione ottenuta è sostanzialmente uguale a quella dell'analisi statica lineare equivalente: si ha un incremento del 4% delle deformate in direzione "-z", ortogonale all'arco, nel verso meno resistente dello stesso ed un incremento del 5% circa delle tensioni di compressione.

Sempre per verificare la sensibilità della struttura ai problemi d'instabilità sono state effettuate quattro analisi di "buckling", per determinare i moltiplica-

tori critici per le principali condizioni di carico e le relative configurazioni.

I carichi distribuiti (400 kg/mq) hanno determinato valori dei moltiplicatori critici compresi tra 7.84 e 8.09, valori che comportano l'insorgere dell'instabilità nelle mensole laterali.

I carichi concentrati (1000 kg) hanno determinato valori dei moltiplicatori critici maggiori di 17.35, comportanti l'instabilizzazione laterale dell'arco.

Per ultima è stata eseguita un'analisi sismica modale con la tecnica dello spettro di risposta.

Tale analisi è stata svolta, anche se la zona non è classificata sismica, considerata l'importanza e la peculiarità dell'opera.

Nell'analisi modale si sono tenuti in conto i primi 10 modi di vibrare della struttura; lo spettro di accelerazione utilizzato è stato quello di normativa, per le zone sismiche di 2° categoria.

La struttura è stata sottoposta ad un sisma in direzione orizzontale (ortogonale all'arco) ed a uno verticale.

Le sollecitazioni risultanti e gli spostamenti totali sono stati combinati con la regola della radice quadrata della somma dei quadrati (SRSS).

Tali operazioni sono svolte automaticamente dal codice di calcolo utilizzato.

Nella figura 9 si possono vedere le sollecitazioni cui sono soggetti gli elementi strutturali durante il sisma.

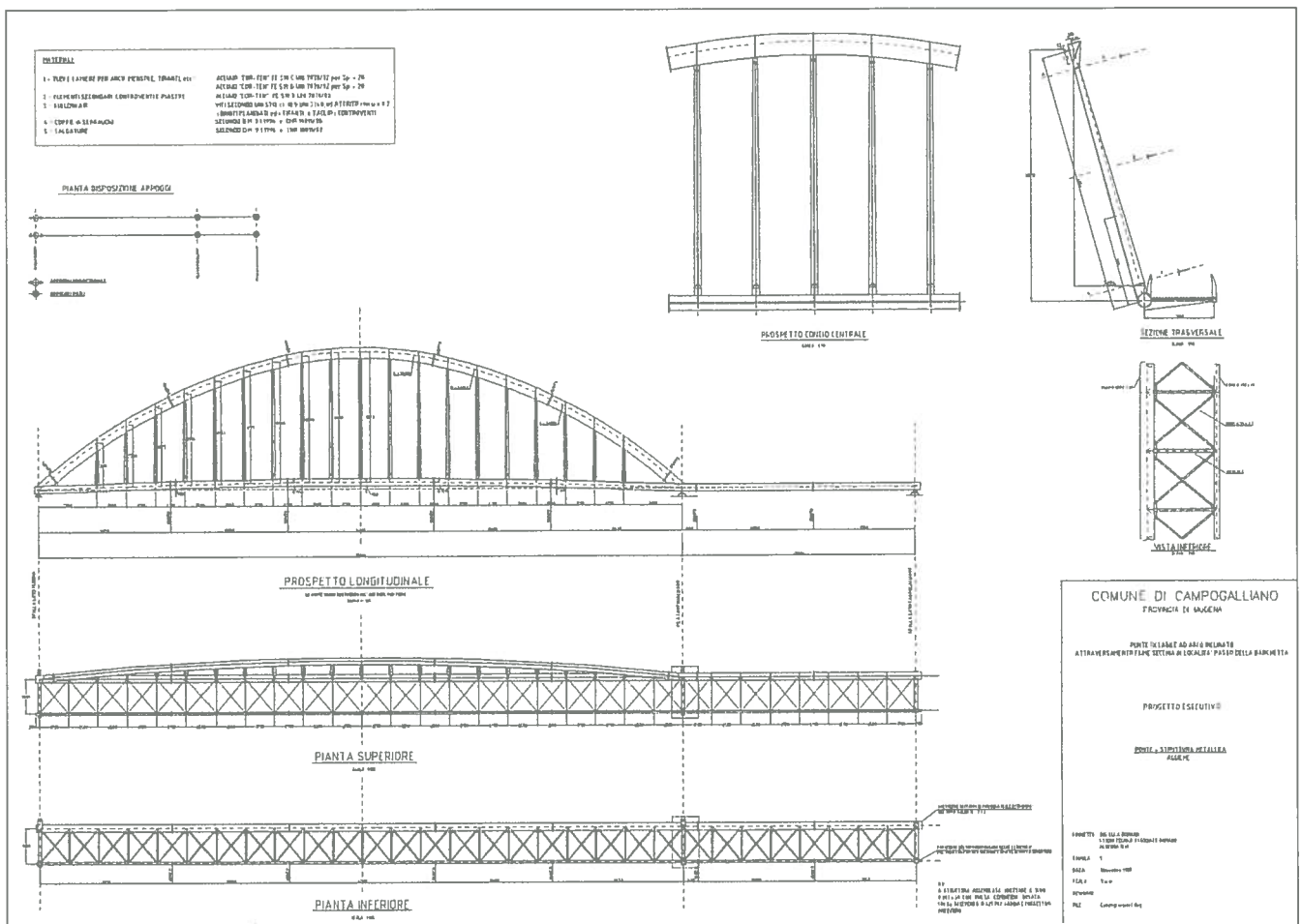


Figura 10
Prospetto e piante
del ponte.

DETTAGLI COSTRUTTIVI

In figura 10 si possono vedere l'insieme strutturale del ponte, la campata ad arco e quella di riva. L'arco è realizzato in 5 conci, ed è costruito con lamiere spesse 20 millimetri che formano un triangolo rovesciato. I conci sono connessi con giunti flangiati, bullonati con bulloni M22 classe 10.9. Ogni 2.5 metri fuoriescono dall'arco dei tronchetti a sezione composta a "T", tutti uguali, con una flangia, cui si connettono i tiranti. I tiranti, anch'essi a sezione composta a "T" e di dimensioni variabili, sono collegati all'arco ed al tubo grosso dell'impalcato con giunti flangiati, tutti uguali, con bulloni M22 classe 10.9. I tiranti hanno lo stesso tipo d'attacco superiore ed inferiore, come pure le stesse dimensioni della sezione a "T" sopra e sotto, ma diversa lunghezza: da qui la loro foggia originale ed omogenea. Anche l'impalcato è realizzato in 5 conci per la campata principale e 2 conci per la campata di riva, tutti di dimensione trasportabile. Tali conci sono collegati con giunti flangiati, con bulloni M22 classe 10.9. In figura 11 si può vedere la sezione trasversale dell'impalcato, realizzato con due tubi collegati da mensole ogni 2.5 metri ed irrigidito da un controvento. Il tubo principale è un $\varnothing 609.6 \times 20$ millimetri ed è l'elemento torsivo rigido dell'impalcato; vi sono saldate le mensole che in punta sono unite ad un tubo $\varnothing 203 \times 20$ millimetri. Tali mensole hanno forma triangolare e sezione a

"T" di altezza variabile, sono costituite da un'anima spessa 12 mm e da una piattabanda 100x10 mm. Il controvento è in tubi $\varnothing 73 \times 6.3$ millimetri, a croce di sant'Andrea, saldati al centro e collegati tramite un bullone M24 classe 10.9 a fazzoletti fuoriuscenti dai tubi (figura 12). La pavimentazione è in tavole di legno massiccio di larice di prima scelta, spesse 60 millimetri; tali tavole, lunghe 5 metri, sono bullonate alla piattabanda superiore delle mensole ogni 2.5 metri. I parapetti, visibili nella figura 13 e nel dettaglio di figura 14, sono realizzati a pannelli modulari in lamierino in inox microforato, cavetti d'acciaio e mancorrente inox AISI 304L $\varnothing 60.3$ millimetri. I montanti sono in lamiera d'acciaio, verniciato dello stesso colore del ponte e sono bullonati ai due tubi d'impalcato. La campata di riva ha lo stesso impalcato di quella principale, ma senza i tiranti di sospensione; è continua col resto del ponte e collega l'arco e la pila inclinata alla spalla lato Campogalliano.

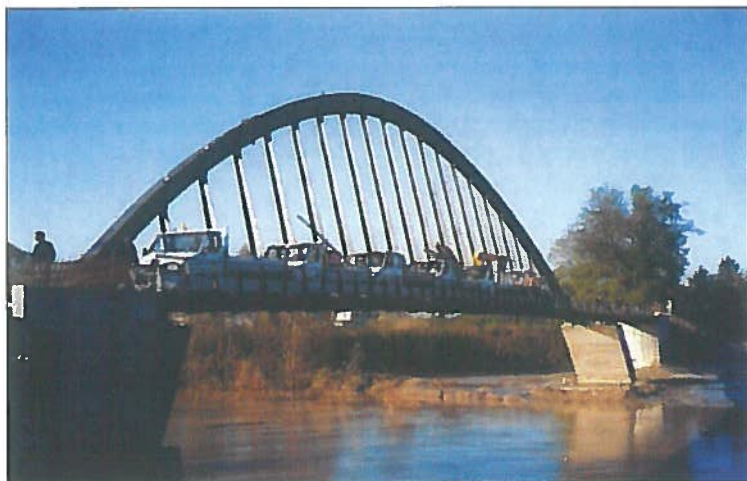
REALIZZAZIONE

La progettazione ha tenuto conto delle esigenze di fabbricazione, trasporto e montaggio. Il ponte è stato progettato in 12 conci, interamente realizzati in officina, di dimensioni comprese tra i 10 e 12,5 metri, trasportabili senza mezzi eccezionali. Tutti i conci sono stati sabbiati e verniciati con tre cicli in officina, per ridurre i tempi di realizzazione dell'opera e limitare la verniciatura in cantiere ai

Figura 14
Vista
del parapetto.



Figura 15
Fase di varo
con autogrù
da 4000 kN.



già stato completato in officina. Successivamente sono stati assemblati i cinque conci dell'arco, sollevati con autogrù e bullonati all'impalcato; per completare la struttura della campata principale sono stati connessi i tiranti, così da avere, a terra, tutto pronto per il primo varo. I rimanenti due conci della campata di riva sono stati collegati tra loro e facevano parte del secondo "tiro" di varo.

Il varo è stato effettuato in un'unica giornata, per mezzo di un'autogrù da 4000 kN di capacità. Per montare tale macchina sono stati necessari due giorni lavorativi ed il trasporto del materiale costituente la stessa per mezzo di due bilici e tre camion, mentre è occorso un giorno per lo smontaggio. Il peso della campata principale, lunga 55 metri, pari a 76 tonnellate, doveva essere "sbracciato" a 23 metri, per cui la macchina lavorava al limite delle sue possibilità. Per tale varo è stato necessario realizzare una gabbionata di appoggio per gli stabilizzatori dell'autogrù, dimensionata per i massimi carichi trasmessi dagli stessi nella posizione di maggior sbraccio (1600 kN); la gabbionata è stata successivamente riutilizzata per la realizzazione delle rampe di accesso.

In figura 15 si può vedere il momento del sollevamento dell'intera campata.

Posizionato il ponte sulla spalla lato Modena e sulla pila inclinata, si è proceduto a fissare i traversi tramite i tirafondi predisposti.

Il varo è stato completato col sollevamento della campata di riva, bullonata ai tubi di quella principale e tirafondata sulla spalla lato Campogalliano.

Il completamento dell'opera è avvenuto nei giorni successivi, bullonando il tavolato di pavimentazione ed i parapetti.

COLLAUDO

La prova di collaudo consisteva in 4 diverse fasi di carico, nelle quali si sollecitava il ponte per i massimi carichi flettenti ed anche con il massimo carico emisimmetrico per l'arco.

La struttura è stata caricata per mezzo di quattro furgoni tipo "Fiat Daily", un pulmino, due trattori ed un rullo. I mezzi sono stati pesati, misurati e disposti sull'impalcato per massimizzare le sollecitazioni di calcolo (vedi figura 16).

Le prime due fasi di collaudo sono state dei transitori per controllare la risposta della struttura ed arrivare alla fase di collaudo 3, massimo carico flettente sul ponte.

La fase di collaudo 4 corrispondeva al massimo carico emisimmetrico per l'arco e prevedeva di posizionare gli automezzi sulla metà campata principale lato Modena e su tutta la campata di riva lato Campogalliano.

Nel seguente schema si possono notare le percentuali di carico e sollecitazioni di prova raggiunti con le prove di collaudo.

Figura 16
Il ponte durante il collaudo.

PROVE DI COLLAUDO

- 1. Carico totale:** di progetto: $400\text{kg/mq} \cdot 2.5\text{m} \cdot 55\text{m} = 55000\text{kg}$
di collaudo: $3380+3520+3940+3700+4700+2520+2480+2020 = 26260\text{kg}$ (48%)
- 2. Spostamento massimo:** di progetto: 46mm
di collaudo: 38mm (83%)
- 3. Tensioni massime:** di progetto simmetrico: $\sigma_s = +1778\text{kg/cm}^2$
 $\sigma_s = -1847\text{kg/cm}^2$
di collaudo 3: $\sigma_s = +1361\text{kg/cm}^2$ (77%)
 $\sigma_s = -2116\text{kg/cm}^2$ (115%)
di progetto emisimm.: $\sigma_s = +1556\text{kg/cm}^2$
 $\sigma_s = -1805\text{kg/cm}^2$
di collaudo 4: $\sigma_s = +1269\text{kg/cm}^2$ (82%)
 $\sigma_s = -1960\text{kg/cm}^2$ (108%)

Nel seguito si riportano i confronti teorico-sperimentale relativi alle fasi salienti della prova di carico

Massimo carico flettente sull'arco (fase di carico 3):

abbassamento teorico massimo sul tubo piccolo esterno:	35.09mm
abbassamento sperimentale sul tubo piccolo esterno:	34.91mm
abbassamento teorico massimo sul tubo grande interno:	8.35mm
abbassamento sperimentale sul tubo grande interno:	5.51mm

Massimo carico emisimmetrico sull'arco (fase di carico 4):

abbassamento teorico massimo sul tubo piccolo esterno:	37.82mm
abbassamento sperimentale sul tubo piccolo esterno:	35.83mm
innalzamento teorico massimo sul tubo piccolo esterno:	-11.83mm
innalzamento sperimentale sul tubo piccolo esterno:	-11.47mm
abbassamento teorico massimo sul tubo piccolo, campata da 20m.:	27.19mm
abbassamento sperimentale sul tubo piccolo, campata da 20m.:	17.06mm

DATI RELATIVI ALL'OPERA

Peso totale della carpenteria:
85.000 kg

Incidenza acciaio:
450 kg/mq

Qualità acciaio:
"corten" con caratteristiche Fe510 C

Bulloni di classe:
10.9 UNI 5712

PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE

Committenti:
Comuni di Campogalliano e Modena

Impresa costruttrice e carpenteria metallica:
Vesuviana Carpenteria S.n.c., di S. Dell'Acqua,
Somma Vesuviana (NA)

*Progetto architettonico,
strutturale e direzione lavori:*
ing. Luca Romano,
Studio tecnico associato Romano, Albenga (SV)

Dr. ing. Luca Romano

Civile strutturista, specialista strutture in c.a. e c.a.p., libero professionista, Albenga (SV)