

Costruzione, assemblaggio e varo dei ponti ferroviari metallici.

Parte 1^a: I ponti a travata reticolare

(Un esempio: l'attraversamento del Fiume Po a Pontelagoscuro (FE))

Prima di passare in rassegna alle fasi salienti della realizzazione dell'opera citata al titolo, che rappresenta un esempio notevole e recente d'ingegneria applicata all'argomento in oggetto (figura 1), è opportuno premettere alcune pur brevi considerazioni generali in merito al significato intrinseco da attribuire alle operazioni di costruzione (intesa in stabilimento), assemblaggio e varo di travate metalliche da ponte, fasi che qui, anche per comodità di esposizione, continueremo a riguardare come fra loro del tutto indipendenti, ancorché in realtà l'intero processo di realizzazione di siffatte opere non sia in queste suddividibile aprioristicamente, se non in modo comunque arbitrario. La fase di costruzione in officina comprende tutte quelle operazioni atte a trasformare la materia prima (profilati e lamiera) in elementi strutturali finiti, prefabbricati nelle massime sagome utili previste nel progetto, pronti per essere assemblati in cantiere; generalmente l'officina qui intesa non è annessa al cantiere.

La fase di assemblaggio in cantiere è quella durante la quale gli elementi strutturali, prefabbricati in officina, costituenti l'impalcato del ponte, vengono uniti fra loro così da realizzare la travata completa, nel rispetto delle tolleranze geometriche di progetto. In generale possiamo immaginare che in questa fase la travata venga assemblata in una posizione planimetrica ed altimetrica diversa da quella definitiva.

La fase di varo in opera è essenzialmente quella durante la quale la travata, completamente assemblata, viene traslata dall'area di assemblaggio sino a raggiungere la finale posizione planimetrica ed altimetrica, e termina con il posizionamento della medesima sui definitivi appoggi (figura 2).

TIPOLOGIE DEI PONTI FERROVIARI METALLICI.

I ponti ferroviari metallici possono essere suddivisi, da un punto

Il materiale contenuto in questa serie di articoli è stato in parte tratto dagli appunti preparati per le lezioni dal titolo: "Montaggi e vari di travate metalliche", lezioni da me svolte nell'ambito di alcune edizioni del: "Corso teorico pratico sulla gestione esecutiva di strutture metalliche", tenutesi a Foligno, organizzati dalle Ferrovie dello Stato, Divisione Infrastruttura, Direzione Tecnica Armamento e Opere d'Arte - Ponti (responsabile del corso ing. R. Mele, coordinatore ing. M. Tisalvi), negli anni 2000 e 2001.

La trattazione qui svolta dell'argomento non ha alcuna pretesa né di completezza né di generalità, ché non è questo lo scopo di queste note e neppure questa la sede appropriata per darne una esauriente esposizione.

È sin da subito da osservare che le soluzioni progettuali qui esposte non sono né le uniche tecnicamente possibili né necessariamente le migliori, semplicemente sono quelle che l'autore ha ritenuto, per lo specifico progetto, essere di miglior compromesso ed hanno almeno il vantaggio sia di avere conseguito il risultato desiderato sia di essere ben conosciute da chi scrive.

In molti casi l'esposizione viene limitata agli aspetti qualitativi, e non quantitativi, essenziali e qui di interesse, onde non appesantire inutilmente il testo, il completamento della parte omessa viene lasciato all'intuizione del Lettore.

Construction, assembly and launch of metal railway bridges

1st Part: The lattice girder bridges (An example: the crossing of the Po river at Pontelagoscuro (FE))
The materials contained in this series of articles were taken from the notes prepared on the lessons entitled "Assembly and Launch of Metal Bridges", taught by myself within the context of several editions of the theoretical and practical course on the executive handling of metal structures held in Foligno and organised by State Railways, Infrastructure Division, Technical Management of Reinforcements and Structures - Bridges (course manager R. Mele, coordinator M. Tisalvi) in 2000 and 2001.

These brief notes on the argument lay no claims to completeness or general application, nor is this the appropriate place to offer exhaustive coverage of this subject.

It should be noted right from the outset that the design solutions referred to here are not the only ones technically possible, nor necessarily the best, but simply those which in my opinion offer the ideal compromise for the specific design purpose, and at least have the advantage of having achieved the results necessary and being well known to me.

In many cases, the description is limited to the essential quality rather than the quantity aspects, for the sake of brevity. The part that has been omitted will be left to the reader's intuition.

Figura 1 - Vista d'insieme delle travate



Figura 3 - Ponte ad armamento diretto

di vista dell'armamento, in due famiglie:
 - travi con posa diretta del binario (figura 3 – figura 4);
 - travi con posa del binario con ballast (figura 5).
 All'interno di queste due famiglie, in relazione alle diverse tipologie strutturali, si hanno le seguenti ulteriori suddivisioni:

- A) travi con posa diretta del binario
 - travi a parete piena;
 - travi reticolari.
- B) travi con posa del binario con ballast
 - ponti a struttura mista acciaio-calcestruzzo;
 - ponti a lastra ortotropa;
 - ponti della tipologia A), interamente metallici, con cassone per il contenimento del ballast.

Figura 4 - Sezione ponte con posa diretta del binario

La suddivisione qui considerata è solo convenzionale e nemmeno esaustiva. Per una dettagliata esposizione relativa alle tipologie dei ponti ferroviari si rimanda alle Istruzioni FS [1].

Agli scopi del presente articolo saranno sufficienti solo alcune semplici considerazioni in merito alla tipologia richiamata al punto A), rimandando ad un successivo articolo l'approfondimento della tipologia B).

Nell'ambito della tipologia dei ponti con armamento che preveda il montaggio diretto del binario, le travi metalliche sono essenzialmente costituite da un impalcato metallico che comprende travi longitudinali secondarie (longherine) disposte allo stesso interasse del binario, sostenute da travi trasversali (traversi) (figura 6), queste ultime appoggiate alle travi portanti principali (figura 7). Le travi principali, come detto, possono a loro volta essere del tipo ad anima piena, per luci sino a circa 30 m, ovvero reticolari per luci maggiori (figura 1).

Il binario, con posa diretta, viene posato sulle longherine, di regola di sezione a doppio T laminato o composto saldato, con l'impiego di legnami quadrati (traversine in legno), per il fissaggio di questi ultimi vengono utilizzate piastre di nodo saldate alle longherine e speciali bulloni denominati chiavarde. Le longherine sono fra loro collegate da traversini e controventi orizzontali reticolari.

Le tipologie costruttive possono ulteriormente essere suddivise a seconda che la via di corsa (passaggio del treno) sia a livello inferiore, intermedio ovvero superiore rispetto alle travi portanti principali.

Nel seguito ci occuperemo della tipologia A), con travi reticolari a passaggio inferiore, che rappresenta la tipologia costruttiva maggiormente impiegata ed anche quella alla quale faremo riferimento nell'esempio citato al titolo.

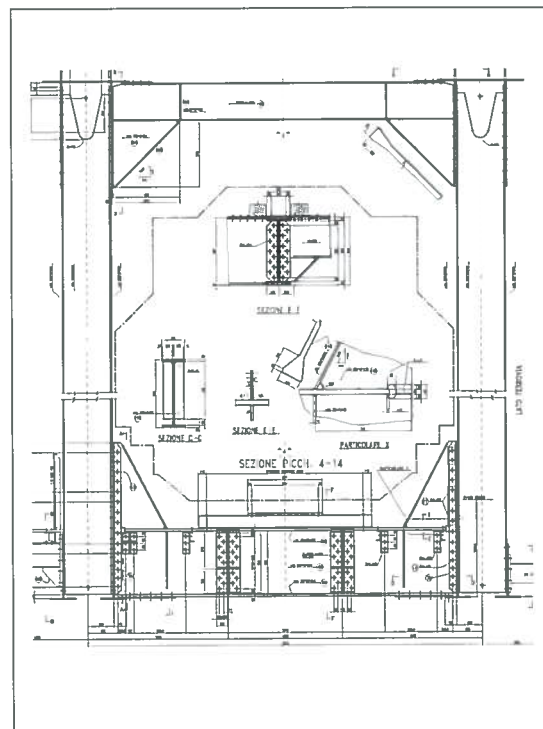


Figura 5 - Sezione ponte con posa del binario con ballast

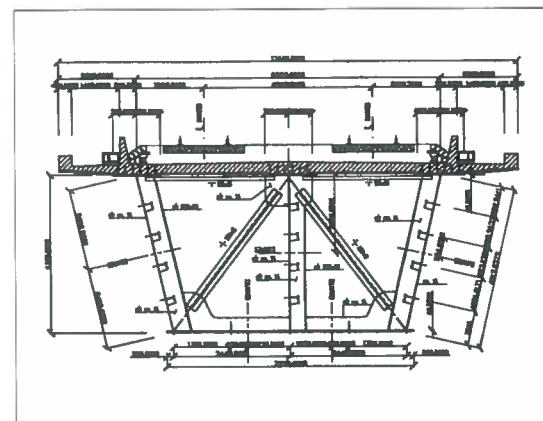


Figura 2 - Fasi di traslazione e varo





TRAVATE RETICOLARI A VIA INFERIORE CON POSA DIRETTA DEL BINARIO.

Come accennato al punto precedente questa tipologia è impiegata per luci di calcolo superiori ai 30 m, potendo raggiungere, come limite superiore, luci di 150 m. Sino a luci di regola inferiori ai 40 m dette travate sono aperte superiormente, oltre tale luce si preferisce disporre, fra le briglie superiori, un controvento reticolare, tale da chiuderle superiormente, onde garantire la necessaria "stabilità" alla travata (figura 8).

Lo schema statico delle travate principali è usualmente quello di trave semplicemente appoggiata agli estremi, indipendentemente dalle luci e dal numero di campate.

Le travi principali hanno un'altezza, riferita alla distanza dei baricentri delle briglie, compresa fra 1/7 ed 1/10 della luce di calcolo. La maglia triangolare delle travi principali è quella così detta tipo Warren tale da individuare nodi inferiori della maglia, corrispondenti ai trasversi principali, posti ad interasse compreso fra i 4 m e gli 8 m.

Le travi trasversali presentano alla loro estremità, in corrispondenza alla connessione dei nodi con le travi principali, delle espansioni di raccordo denominate "gussets" tali da garantire collegamenti (chiodati o, più recentemente, bullonati) di elevata rigidezza flessionale, anche al fine di assicurare la "stabilità globale" della travata, considerata l'ov-



Figura 6 - Dettaglio impalcato ad armamento diretto (traverso-longherine)

Figura 7 - Impalcato (traversi-longherine) in opera

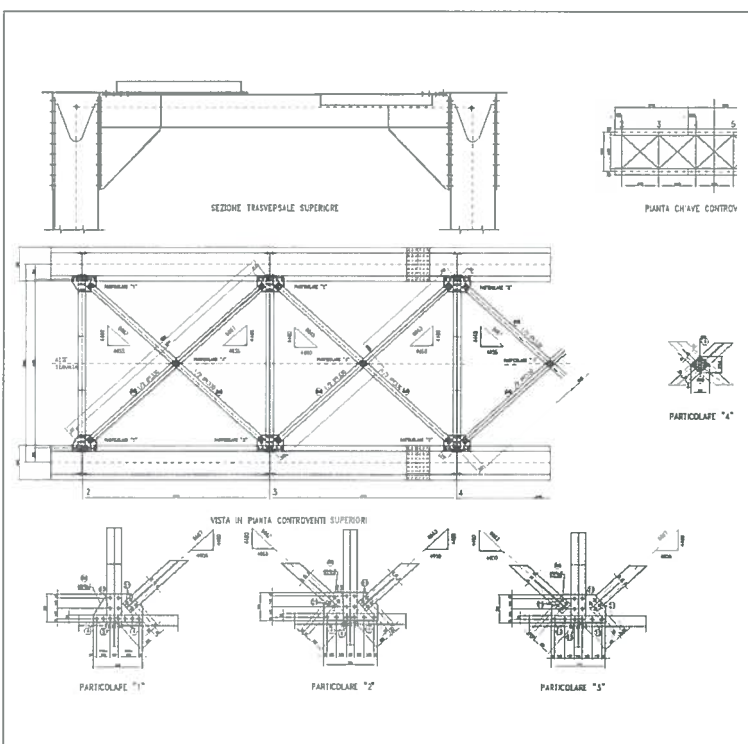


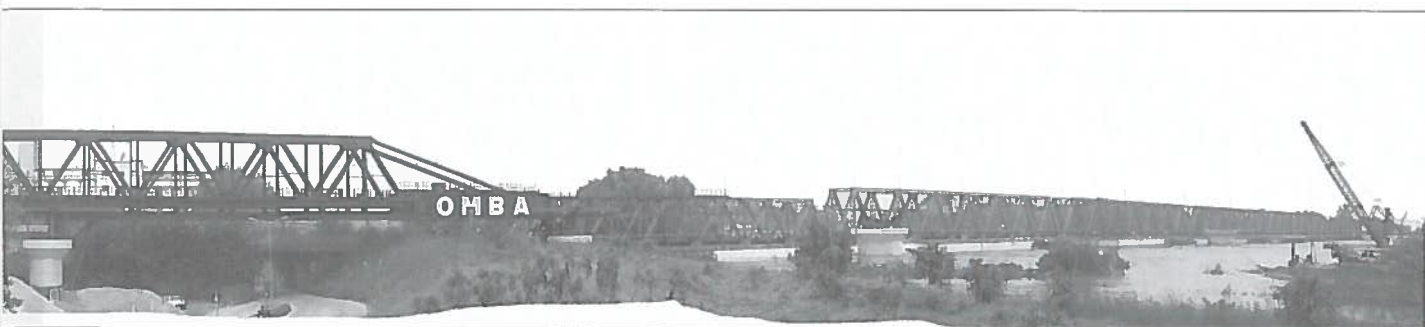
Figura 8 - Controvento superiore

via (per ponti a via inferiore) impossibilità di disporre diaframmi trasversali verticali fra le fiancate reticolari portanti principali (figura 9).

A livello dell'impalcato, e quindi delle briglie inferiori, viene realizzato un controvento orizzontale reticolare, costituito dalle briglie medesime, dai trasversi e da idonee aste diagonali.

Nel caso di travate reticolari aperte superiormente il controvento delle briglie superiori (soggette prevalentemente a sforzo normale di compressione) viene realizzato con una serie di telai rovesci costituiti dai trasversi intermedi e di testata, dai montanti e dai primi due diagonali (uno per ogni estremità) delle travi principali, oltre ovviamente dal controvento orizzontale inferiore.

Nel caso di travate reticolari chiuse superiormente, oltre agli elementi strutturali di controventa-



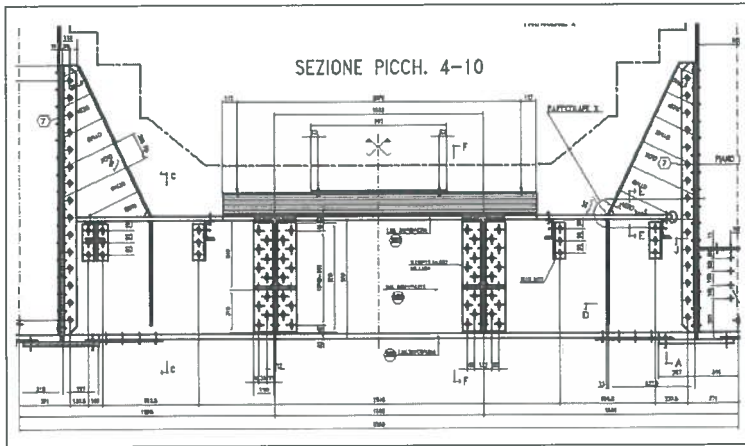


Figura 9 - Nodo traverso-briglia

mento descritti per le travate superiormente aperte, viene disposto un controvento orizzontale reticolare fra le briglie superiori. Per quanto riguarda l'armamento (binari, traversine, unione (binario)-(traversina in legno) e traversina-longherina) e longherine si è già detto sinteticamente al paragrafo precedente. Per quanto infine riguarda le unioni fra i vari elementi strutturali si deve fare una netta distinzione fra giunzioni d'officina e giunzioni di cantiere, in fase di assemblaggio finale.



Figura 10 - Piena del Po, ottobre 2000

Le giunzioni d'officina sono essenzialmente destinate alla composizione, partendo da lamiera o da profili laminati, degli elementi strutturali singoli: briglie superiori ed inferiori, diagonali e montanti, travi trasversali, longherine, controventi; per queste giunzioni è ormai d'uso l'impiego della saldatura ad arco elettrico, nei vari procedimenti (manuale ad elettrodo rivestito, semiautomatica sotto protezione di gas, automatica ad arco sommerso).



Figura 11 - Nuovo ponte FS sul PO

Le giunzioni di cantiere, viceversa, sono destinate all'unione dei vari elementi strutturali fra loro, onde ottenere come risultato la travata completamente assemblata; queste giunzioni, un tempo appannaggio della chiodatura a caldo, previa alesatura, sono ora di regola realizzate con l'impiego di bulloni ad alta resistenza, con accoppiamento di precisione forobullone (quindi fori alesati e bulloni con tolleranza geometrica ristretta), e giunti calcolati a taglio. I vantaggi principali della tipologia costruttiva qui considerata (travate reticolari a via inferiore) sono essenzialmente i seguenti:

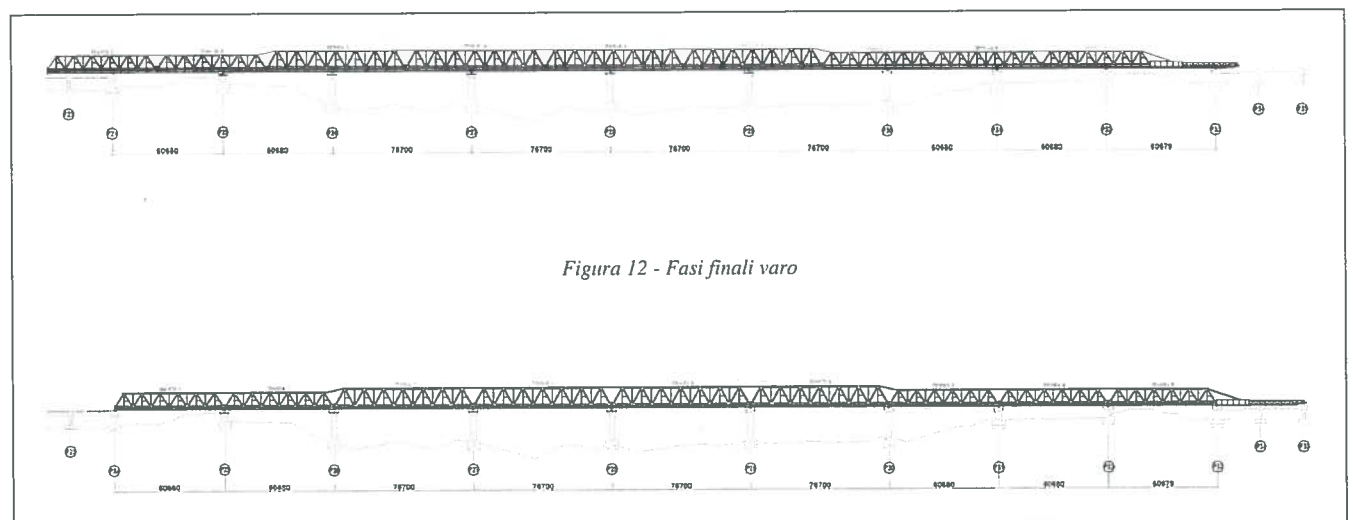


Figura 12 - Fasi finali varo

- si possono superare luci medie e medio-grandi (sino a circa 150 m) in modo economico;
- massa strutturale contenuta e pesi propri complessivi fra i più contenuti;
- altezza contenuta fra il Piano del Ferro e l'intradosso delle briglie inferiori ed indipendente dalla luce di calcolo della travata;
- buona accessibilità per l'ispezione e la manutenzione;
- schema statico "insensibile" al cedimento differenziato dei vincoli;
- tempi ridotti, dall'ultimazione del varo, per la messa in esercizio della linea ferroviaria;
- chiara individuazione degli schemi di varo.

Per contro sono da considerare anche vincoli, alcuni propri del tipo di armamento, quali ad esempio:

- tolleranza di costruzione delle travate particolarmente ristretta, per l'impossibilità di qualsiasi aggiustaggio fra longerina e binario;
- vincoli particolarmente stretti sull'andamento planimetrico ed altimetrico del tracciato;
- velocità massima di percorribilità dei convogli limitata a 200 km/h;
- impatto ambientale non sempre trascurabile;
- costi di costruzione e tempi complessivi di realizzazione elevati;
- elevato livello di specializzazione richiesto per tutte le fasi realizzative;
- complessità e specificità in particolare delle fasi di realizzazione in opera (cantiere di assemblaggio e varo);
- necessità di attrezzature "dedicate" sia per le fasi di assemblaggio che di varo.

IL NUOVO PONTE FERROVIARIO SUL FIUME PO A PONTELAGOSCURO (FE).

Inquadramento generale dell'opera

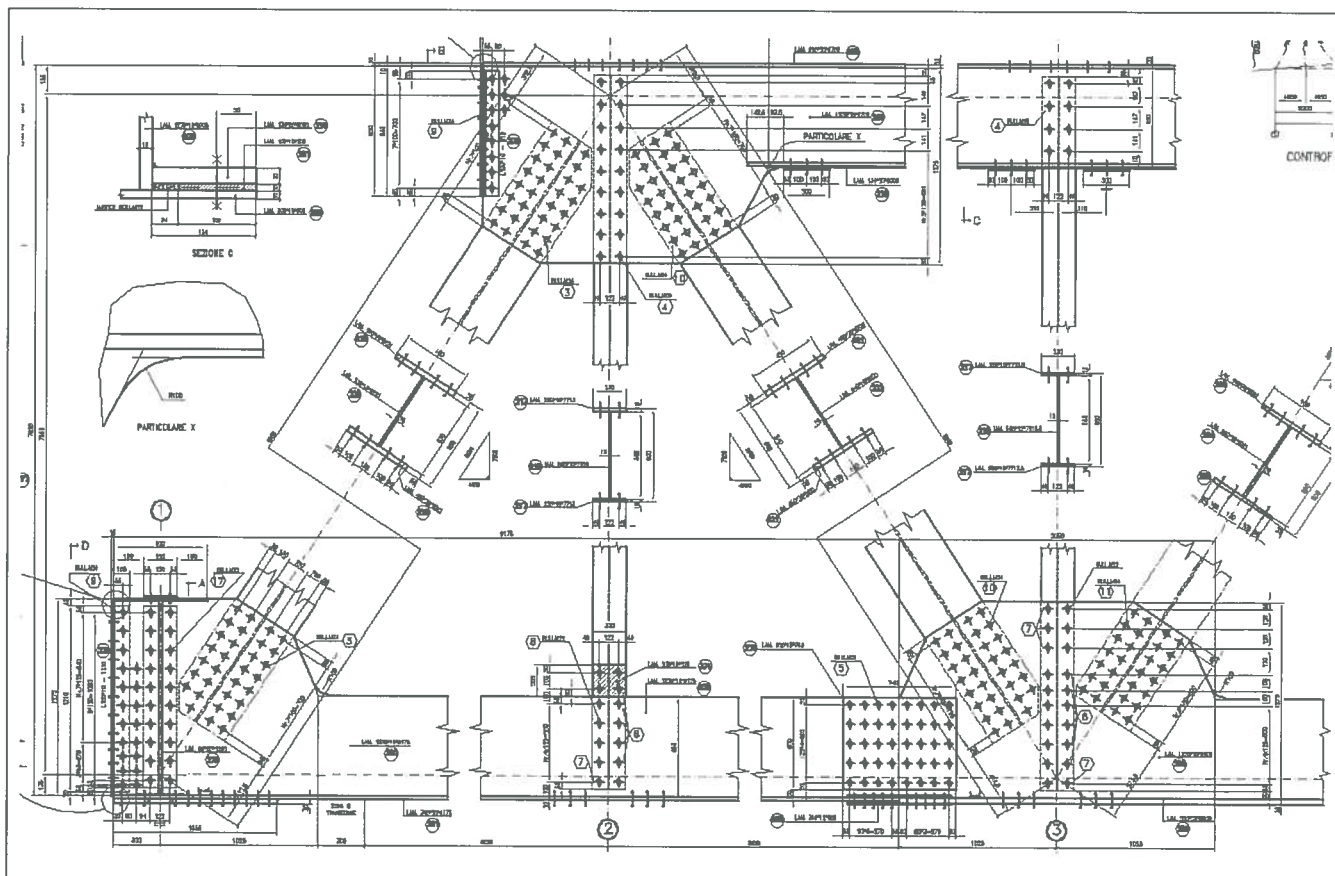
La linea ferroviaria fra Padova e Bologna presentava, in corrispondenza dell'attraversamento del fiume Po in località Pontelagoscuro, un duplice vincolo particolare:

- il ponte esistente, ricostruito nell'immediato dopoguerra (1949) in conseguenza dei pesantissimi danneggiamenti bellici del precedente ponte, consentiva il transito su semplice binario del traffico ferroviario, con le immaginabili conseguenze visto che tutta la linea rimanente PD-BO presenta una percorrenza a doppio binario;
- dopo l'esondazione del fiume Po del 1951, che ebbe effetti catastrofici, il Magistrato per il Po impose una nuova regolamentazione sia per quanto riguarda il franco libero fra il livello di massima piena e l'intradosso delle opere d'arte di attraversamento del fiume (3 m), sia per quanto riguarda il livello di massima piena del fiume; il ponte FS ricostruito nel dopoguerra non rispettava questi nuovi vincoli e necessitava di un ovvio importante adeguamento.

È anche da osservare che la quota altimetrica dell'intradosso dell'esistente ponte impediva il completamento della sopraelevazione degli argini maestri, permanendo in corrispondenza del medesimo ponte un importante varco determinato proprio dalla linea FS.

L'urgenza dei lavori qui descritti è stata in più di un'occasione agli onori della cronaca degli ultimi anni, proprio per il rischio che il ponte esistente venisse raggiunto dal fiume Po durante le, anche recenti, piene, l'ultima delle quali verificatasi nel-

Figura 13 -
Prospetto travata
(1)



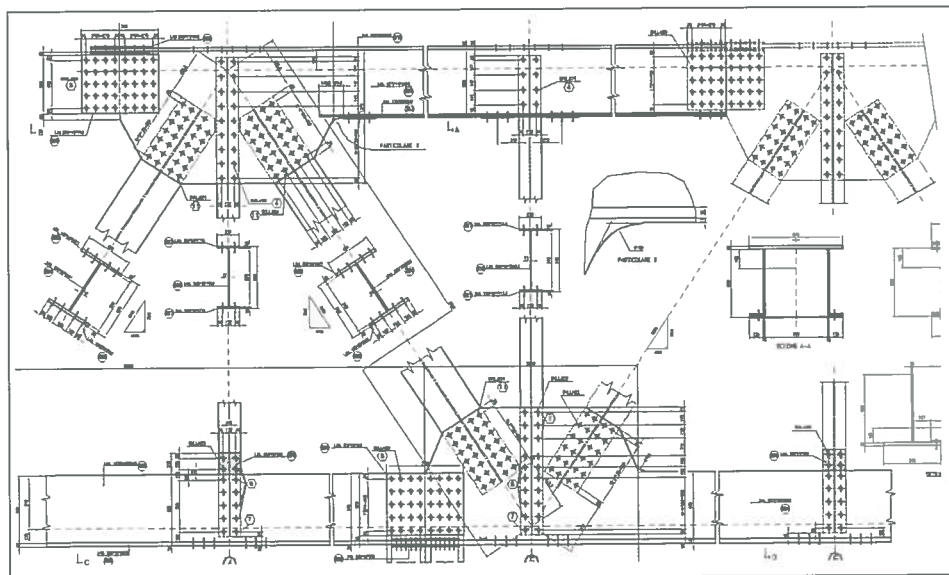


Figura 14 - Prospetto travata (II)

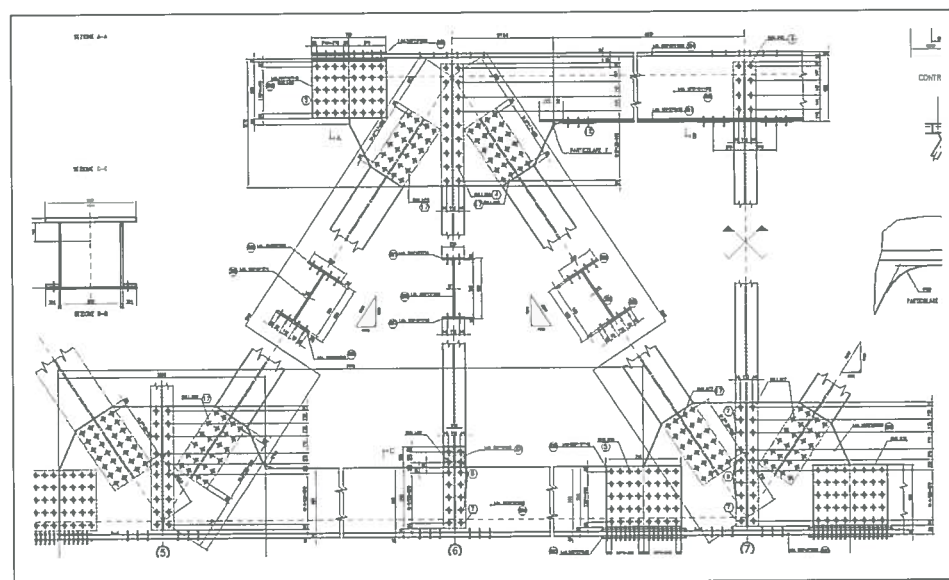


Figura 14 - Prospetto travata (II)

l'ottobre del 2000, con le possibili ed immaginabili conseguenze (figura 10).

Le motivazioni sopra esposte portavano le Ferrovie dello Stato alla decisione di realizzare, in una prima fase, un nuovo ponte di attraversamento del fiume Po, disposto più a valle dell'esistente di soli 13.50 m, che rispettasse i nuovi "vincoli idraulici" (figura 11).

Oltre ai lavori di costruzione di un nuovo ponte ferroviario, inaugurato con l'apertura del traffico ferroviario il 15 settembre 2001, le Ferrovie dello Stato hanno congiuntamente appaltato i lavori di alzamento dell'esistente ponte onde adempiere alle prescrizioni del Magistrato per il Po e, nel contempo, disporre, con un successivo appalto di altre opere d'arte, per tutta la tratta FS Padova-Bologna l'esercizio a doppio binario.

Descrizione generale dell'opera.

Il nuovo ponte sul fiume Po, della lunghezza complessiva di 1714 m, è costituito da due viadotti di collegamento alla linea (lato Bologna lunghezza 576 m, lato Padova lunghezza 528 m), disposti al

fuori dell'alveo del fiume, costituiti da impalcati in c.a.p., con schema statico di travi semplicemente appoggiate agli estremi, cadauna campata di luce 24 m; dal ponte a superamento del fiume, di lunghezza complessiva pari a 610 m, del tipo a travate metalliche reticolari, a via inferiore, semplicemente appoggiate agli estremi.

Qui di seguito ci occuperemo specificamente, come accennato, della parte di ponte a travate metalliche (figura 12).

Il ponte metallico è articolato nelle campate delle luci seguenti: (spalla lato Ferrara) m 59.4 + 59.4 + 75.6 + 75.6 + 75.6 + 75.6 + 59.4 + 59.4 + 59.4 (spalla lato Rovigo).

L'armamento (60UNI) è del tipo a binario direttamente montato sulle longherine d'impalcato, con interposizione di traversine in legno.

Il progetto delle travate metalliche

Ciascuna delle travate metalliche è reticolare a maglia triangolare del tipo cosiddetto Warren, con montanti disposti in corrispondenza di ciascun nodo, sia per quanto riguarda quelli della briglia superiore che di quelli della briglia inferiore; il maggiore numero (doppio) dei montanti (rispetto alla soluzione classica) è stato deciso per rispettare una similitudine con le esistenti travate che, va ricordato, a sollevamento ultimato si verranno a trovare perfettamente affiancate alle nuove (figura 11). Le briglie sono a correnti paralleli, disposte ad interasse (altezza della travata) pari a 7.50 m per le travate di luce 59.4 m e pari a 9.60 m per le travate di luce 75.6 m. L'interasse fra le due fiancate reticolari portanti, uguale per tutte le campate, è pari a 5.25 m (figura 13).

I nodi, e quindi anche le travi trasversali, delle travi reticolari sono disposti ad interasse di circa 4.95 m (PT 59.4 m) e 5.40 m (PT 75.6 m), determinando quindi luci di corrispondente valore per le longherine (figure 14, 15).

Come detto le travate reticolari sono a via inferiore, chiuse superiormente da un controvento orizzontale reticolare.

Gli elementi strutturali principali utilizzati sono essenzialmente i seguenti:

- briglie superiori a profilo del tipo composto saldato (monolitico), a forma di P-greco, costituito da tre piatti ossitagliati, oltre a due irrigidenti uno per ciascuna anima; le briglie comprendono, integrati, i nodi delle travi reticolari;
- briglie inferiori costituite, ciascuna, da due profili a T composti saldati, uniti fra loro da calastrelli

bullonati in opera, i profili a T sono a sezione variabile ed integrano, come per le briglie superiori, le piastre di nodo;

- aste di parete (diagonali e montanti), a sezione a doppio T simmetrico, composto saldato ricavato da piatte ossitagliati;
- travi trasversali (traversi), a sezione a doppio T simmetrico, composto saldato ricavato da piatte ossitagliati, complete di espansioni di estremità (gussets) saldate, per il collegamento ai nodi delle travi reticolari;
- longherine a sezione a doppio T, ricavate da travi laminate a caldo della serie HE...A e B, complete di espansioni di estremità (gussets), saldate, per il collegamento alle travi trasversali;
- traversi superiori, costituenti i montanti del controvento orizzontale tra le briglie superiori, ricavati da travi laminate a caldo della serie IPE;
- diagonali dei controventi orizzontali, superiori ed inferiori, a sezione a T ottenuta dall'ossitaglio longitudinale di travi laminate, per le aste meno sollecitate, ovvero per composizione saldata di piatte ossitagliati.

Le travate sono dimensionate per sopportare, oltre ai pesi propri strutturali e d'armamento, i carichi accidentali, verticali ed orizzontali, previsti dalle Istruzioni FS applicabili all'opera in oggetto (Treno teorico 1945 A), i carichi dovuti alla pressione cinetica del vento, i carichi dovuti alla folla sulle passerelle di fuga, i carichi indotti dall'esercizio delle passerelle d'ispezione, ecc..

Il modello di calcolo adottato prevede la schematizzazione della travata reticolare come telaio piano, per quanto riguarda l'analisi delle aste della travata reticolare, ma anche come "telaio spaziale (space frame)", per alcune analisi di cui si dirà nel seguito (figura 16).

Particolari analisi sono state sviluppate per quanto riguarda alcuni aspetti strutturali specifici, quali, ad esempio:

- dimensionamento delle unioni dei traversi inferiori ai nodi delle travi reticolari, onde garantire adeguata rigidezza ai telai trasversali;
- dimensionamento dei nodi di unione delle longherine con i traversi (continuità parziale delle longherine);
- sezione delle aste diagonali dei primi campi del controvento inferiore, onde minimizzare l'effetto di eccentricità geometrica della connessione ai nodi;
- dettaglio terminale degli irrigidimenti longitudinali delle briglie superiori, onde minimizzare la concentrazione di tensione locale e la conseguente penalizzazione del dettaglio per le verifiche a fatica (figure 17, 18, 19).

Le prescrizioni FS prevedono che le longherine vengano calcolate come travi semplicemente ap-

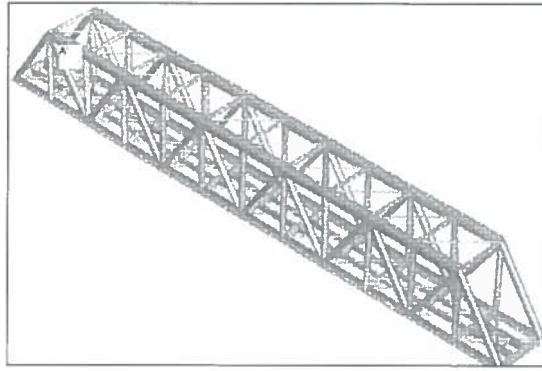


Figura 16 - Modello travata (3D)

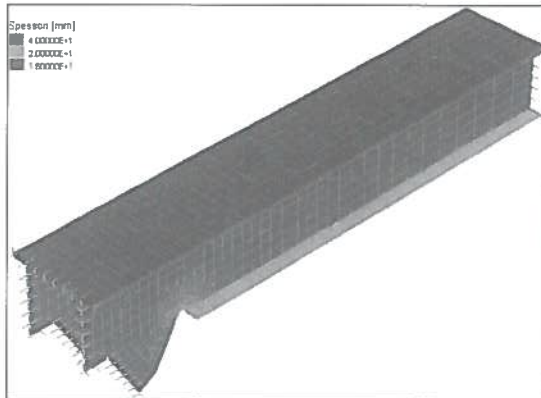


Figura 17 - Studio briglia superiore



Figura 18 - Analisi briglia superiore (1 ipotesi)

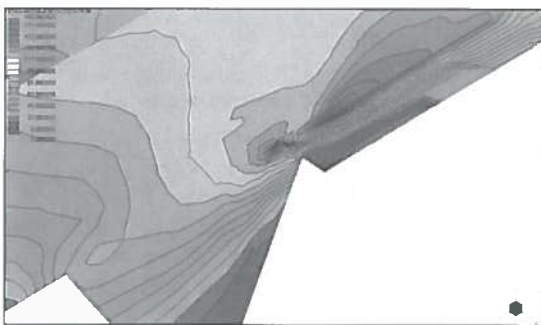
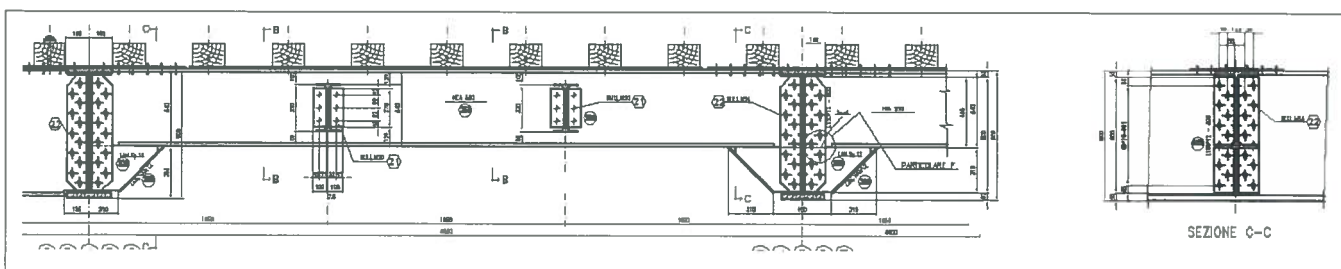


Figura 19 - Analisi briglia superiore (adottata)

poggiate alle estremità (in corrispondenza delle travi trasversali); tuttavia, in considerazione della continuità realizzata attraverso il nodo di unione longherina-traverso-longherina, ove non si eseguano verifiche più dettagliate per determinarne l'ef-

Figura 20 - Nodo longherina-traverso



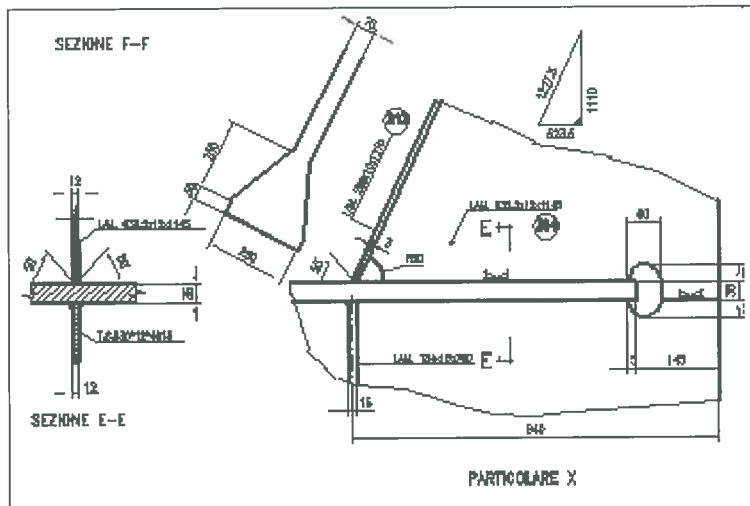


Figura 21 - Traverso, particolare gusset

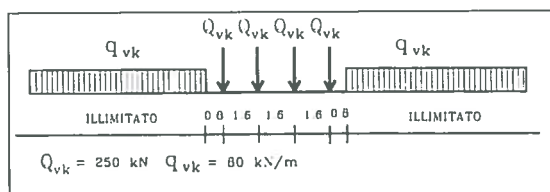


Figura 22 - Treno di carico LM 71

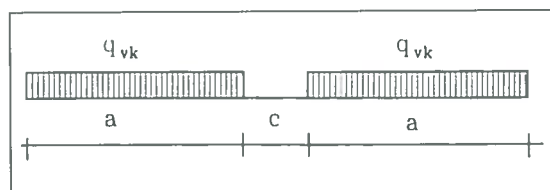


Figura 23 - Caratteristiche treni di carico SW

Tipo di carico	qvk [kN/m]	a [m]	c [m]
SW/0	133	15.0	5.3
SW/2	150	25.0	7.0

Figura 24 - Caratteristiche di carico SW

fettivo grado di vincolo, si deve considerare, per il dimensionamento del nodo sopra richiamato, un momento flettente pari a quello di incastro perfetto oltre allo sforzo di taglio (figura 20).

Analogamente per le travi trasversali (traversi) il calcolo viene eseguito considerando uno schema statico di semplice appoggio agli estremi, che corrispondono ai nodi inferiori delle travi reticolari principali; per il calcolo del nodo di estremità del traverso, compresi tutti gli elementi strutturali ivi convergenti, in mancanza di un'analisi più accurata del reale grado di incastro, si considera un momento flettente pari al 50% del momento di incastro perfetto che risulta considerando il traverso nelle medesime condizioni di carico assunte per il calcolo della trave trasversale, oltre, ovviamente, allo sforzo di taglio.

Per quanto riguarda il calcolo dei nodi di estremità delle longerine non si è ritenuto necessario procedere ad una più approfondita analisi statica in relazione sia alla tipologia costruttiva del nodo, sia alla condizione di carico specifica alla quale è assoggettato l'elemento strutturale. Ipotizzando lo schema statico della longerina come trave continua su "infiniti appoggi" sollecitata da un carico unifor-

memente distribuito, ed analizzando una campata intermedia, è ben facile vedere che per ottenere una significativa riduzione del momento flettente negativo in corrispondenza dell'appoggio si dovrebbero verificare deformazioni nel nodo di estremità al di fuori del campo elastico, assolutamente incompatibili con l'integrità strutturale del nodo medesimo (infatti per simmetria di struttura e di carico il nodo non può ruotare); oltretutto l'elemento strutturale è soggetto ad un numero considerevole di cicli di carico (si veda al riguardo quanto detto per le verifiche a fatica). Da ultimo rammentiamo che le longerine debbono essere collegate alle travi trasversali in modo da interessare l'intera altezza dell'anima di queste ultime, realizzando espansioni d'anima adeguate ove, come di regola si verifica, le longerine presentino altezza di profilo inferiore all'altezza del profilo delle travi trasversali.

Per quanto riguarda i nodi di estremità delle travi trasversali si è svolta un'accurata analisi per valutarne l'effettivo grado di incastro; in questo caso infatti appare evidente come il traverso sia vincolato alle estremità da vincoli di incastro cedevole, non per effetto di deformazioni dovute al collegamento semirigido delle aste nel nodo, bensì per il comportamento a telaio trasversale della struttura costituita da: traverso inferiore, aste convergenti nel nodo (un montante e due diagonali nell'ipotesi di massima rigidità di parete), traverso superiore, con condizioni di simmetria, secondo un asse verticale, sia geometriche che di carico. Dall'analisi del telaio trasversale descritto si determina il grado di incastro flessionale del traverso che risulta pari al 62.3% nel caso della travata $L = 59.4$ m e pari al 62.9% nel caso della travata $L = 75.6$ m (i valori numerici e le considerazioni svolte si riferiscono ai traversi intermedi, analogamente si è proceduto per i traversi di estremità, per i quali valgono evidentemente altri valori del grado di incastro). È opportuno ricordare che, in questo caso, è la condizione di massima rigidità del vincolo di estremità quella che determina la condizione più gravosa per la verifica del nodo in argomento, essendo la verifica della trave determinata dalla condizione di vincolo di semplice appoggio agli estremi (massimo momento flettente per la sezione di mezzzeria) (figura 21).

La progettazione degli elementi strutturali, specificamente quelli composti saldati, viene condotta con particolare attenzione al fine di garantire le migliori prestazioni per la vita a fatica della travata.

La normativa FS, applicata alla progettazione delle travate in argomento, prevede l'esecuzione di verifiche a fatica secondo quanto previsto dalle istruzioni CNR-UNI 10011, adottando i valori delle tensioni ammissibili corrispondenti a 2.000.000 di cicli.

La freccia verticale massima teorica ammessa dalle attuali Istruzioni FS [1], per questa tipologia di opere, è correlata ad un treno di carichi diverso da quello al quale ci si è riferiti nel progetto qui in oggetto, in quanto l'appalto è antecedente all'entrata in vigore delle attuali Istruzioni.

I treni di carico attualmente applicabili, denominati LM 71 ed SW, sono raffigurati negli schemi allegati (figure 22, 23, 24).

Come detto le Istruzioni FS vigenti forniscono valori di freccia verticale massima ammissibile, per

campate semplicemente appoggiate, funzione di alcuni parametri (numero di campate, velocità del treno, luce delle campate), per il treno di carico LM 71; il campo di valori assunto dalla freccia massima ammissibile è compreso fra 1/1200 e 1/3000 della luce L.

Nel caso in esame (appalto e progetto antecedente alle nuove Istruzioni FS [1]), con il treno di carico convenzionale adottato a base dei calcoli statici (Treno teorico 1945 A), la massima freccia verticale ammissibile è indicata, dalle corrispondenti Istruzioni FS, pari ad $F_{max} = 1/1000 \cdot L$, ove, convenzionalmente, la freccia massima viene calcolata considerando il sovraccarico equivalente uniforme flettente maggiorato dell'incremento dinamico.

Nel progetto in esame le frecce teoriche per il carico accidentale, come sopra determinato, sono risultate essere pari a:

- per la travata da 59.4 m di P. T., pari ad $1/1503 \cdot L$ (3.95 cm);
- per la travata da 75.6 m di P. T., pari ad $1/1518 \cdot L$ (4.98 cm).

Oltre alla freccia teorica dovuta al carico accidentale si è determinata la deformazione verticale che la travata subisce per effetto del peso proprio e dei carichi permanenti, al fine di determinare la controfreccia di montaggio che deve compensare oltre all'inflessione elastica di tutti i carichi permanenti anche il 25% del sovraccarico di progetto (amplificato del coefficiente dinamico). Specifiche analisi numeriche sono state condotte al fine di determinare con la massima precisione possibile la deformazione verticale dovuta ai carichi permanenti; la travata è stata schematizzata sia considerando la rigidità dell'impalcato (modello spaziale travata $L=59.4$ m, figura 16), sia trascurando detto contributo (modello piano). Le frecce massime così calcolate (travata $L=59.4$ m figura 25, modello piano; figura 26, modello spaziale) sono risultate le seguenti:

- travata $L=59.4$ m, modello piano $DY = 16.45$ mm, modello spaziale $DY = 15.60$ mm;
- travata $L=75.6$ m, modello piano $DY = 26.37$ mm, modello spaziale $DY = 24.29$ mm.

Le differenze percentuali dei risultati ottenuti con i due modelli di calcolo risultano contenute entro valori molto modesti (+ 8.6 % max), che legittima anche l'adozione di modelli semplificati.

Il controvento inferiore (figura 28) non influisce, come detto, nel computo delle rigidità per quanto riguarda i carichi permanenti (peso proprio travata), in quanto viene collegato dai definitivi bulloni solamente dopo che la travata è stata appoggiata agli estremi, per non solleccitarne le aste in conseguenza di detti carichi.

Come detto le Istruzioni FS [1] prevedono per questa tipologia costruttiva, per quanto riguarda l'assemblaggio in cantiere, due possibili tipologie di giunzioni:

- giunzioni a taglio con accoppiamento di precisione, con gioco foro-bullone, comprensivo delle relative tolleranze, non superiore a 0.3 mm per diametri sino a 20 mm e non superiore a 0.5 mm per diametri maggiori; classe del bullone 8.8+6S;
- giunzioni chiodate, ribadite a caldo, con gioco chiodo-foro pari ad 1 mm.

Di regola non vengono adottate giunzioni saldate in

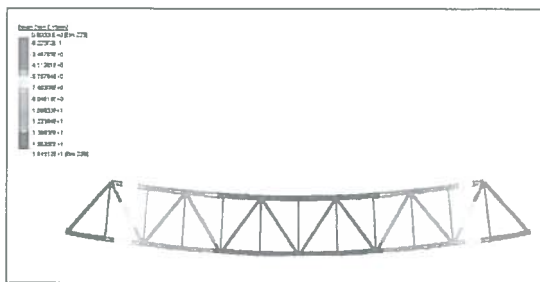


Figura 25 -
Deformata travata
(2D)

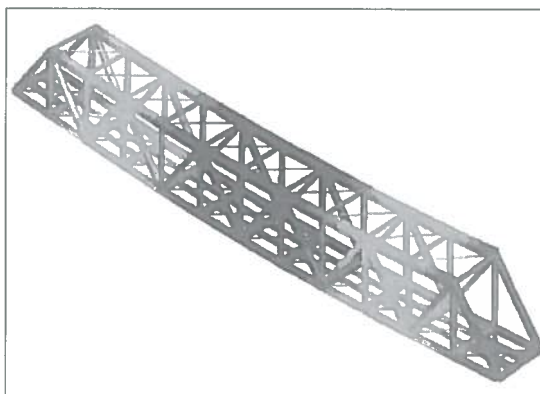


Figura 26 -
Deformata travata
(3D)

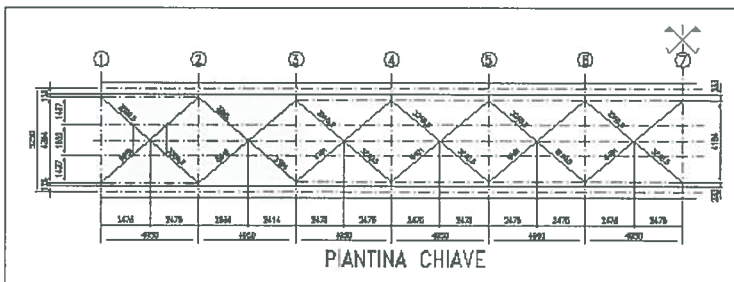


Figura 27 -
Controvento
inferiore, pianta

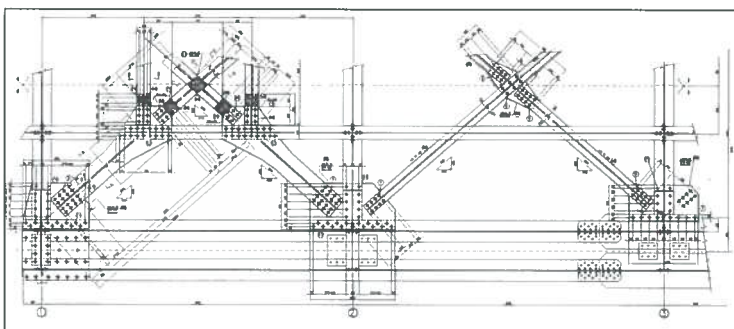


Figura 28 -
Controvento
inferiore, dettagli

opera in quanto tale tecnica male si adatta alla realizzazione dei nodi della tipologia costruttiva qui considerata, ancorché dette giunzioni non siano da escludere a priori; sicuramente la loro adozione richiederebbe una diversa impostazione del progetto. Per le travate in esame si sono adottati giunti bullonati "a taglio", come sopra descritti, dimensionati secondo il cosiddetto "metodo delle sezioni", tali quindi da garantire il massimo sforzo trasmissibile dalle aste collegate.

Il gioco foro bullone indicato nelle Istruzioni FS [1], per le travate in esame, è stato ridotto, indipendentemente dal diametro nominale del bullone, a 0.3 mm.

Come meglio detto nel capitolo relativo all'assemblaggio in cantiere, al fine di garantire le corrette condizioni di assemblaggio dei giunti bullonati e di assicurare nel contempo un'adeguata sicurezza

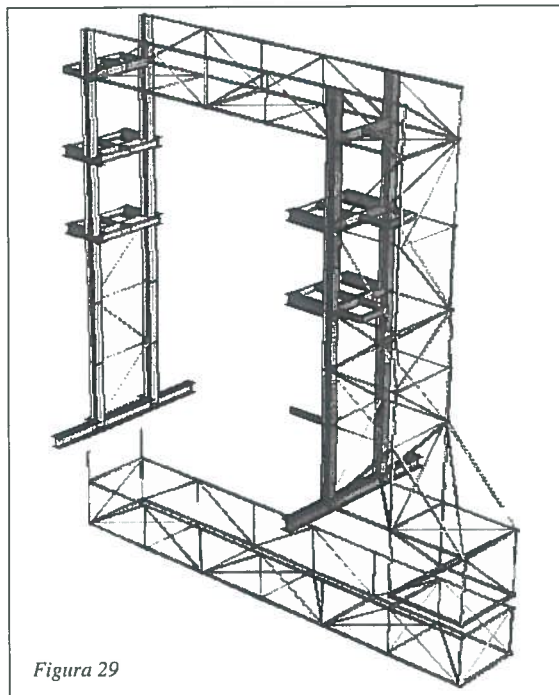


Figura 29

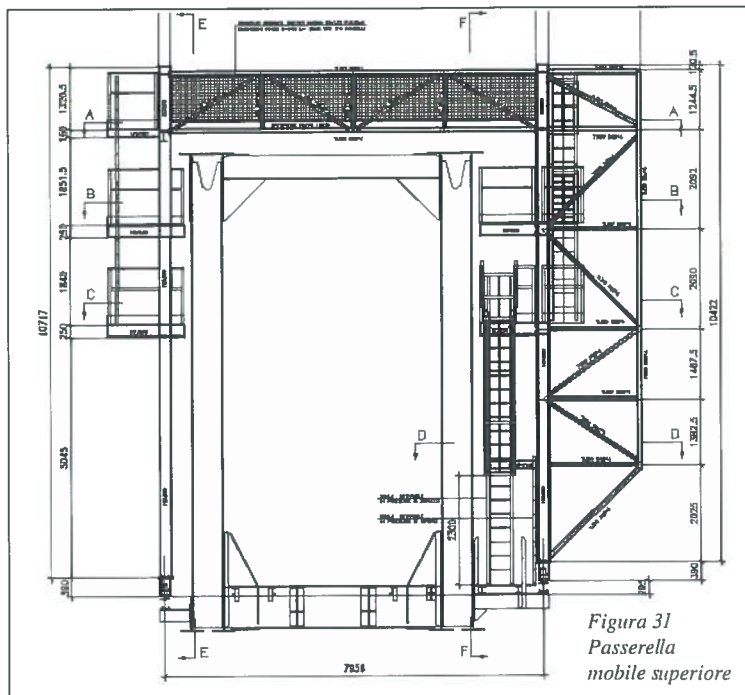


Figura 31
Passerella
mobile superiore

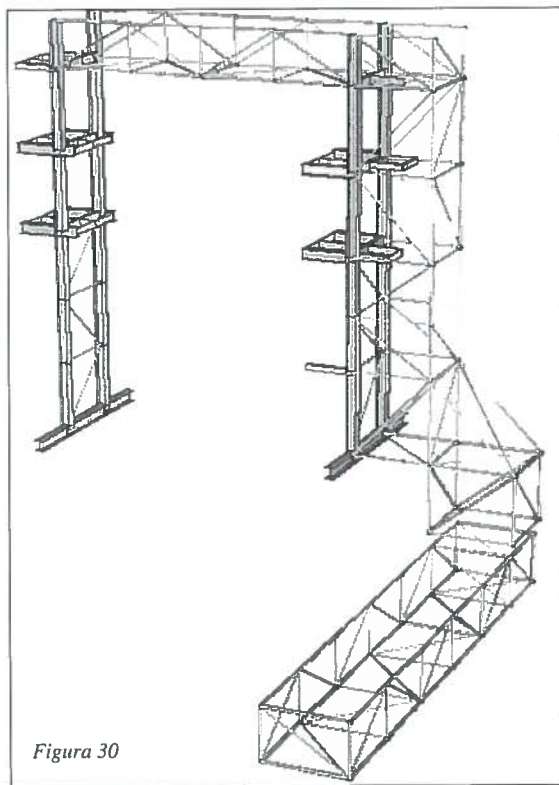


Figura 30

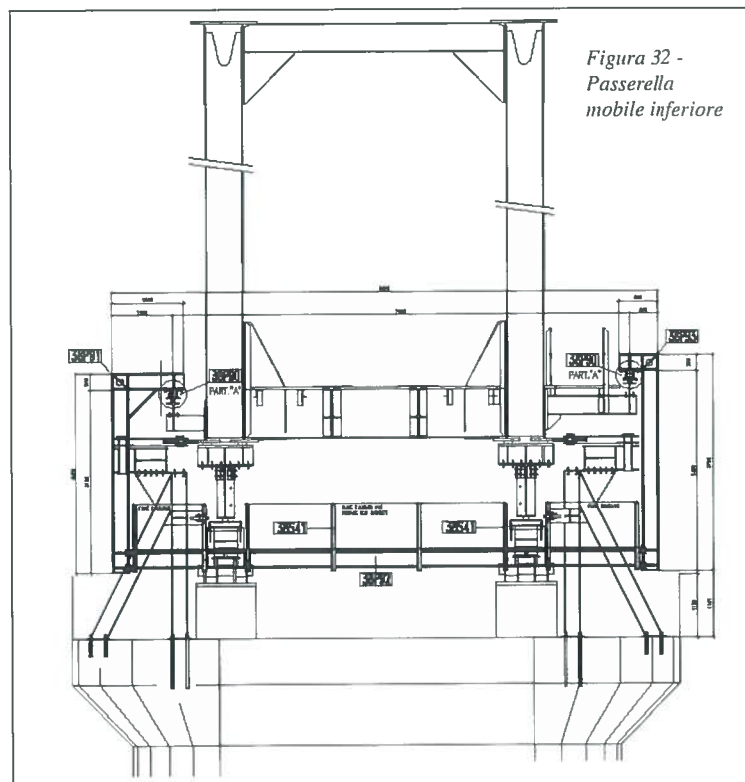


Figura 32 -
Passerella
mobile inferiore

contro lo sviamento dei bulloni, le Istruzioni FS prevedono il serraggio ad una coppia non minore dello 80% del valore tabellare previsto dalle Istruzioni CNR-UNI 10011 (bulloni soggetti esclusivamente a taglio). Nel progetto in esame si sono adottate coppie di serraggio pari al 100% del valore di tabella per il corrispondente diametro e per la classe (8.8) della vite.

Al fine di consentire una adeguata ispezionalità dei nodi bullonati, ma anche delle intere travate, durante l'esercizio del ponte, è stata prevista, già in fase di progetto, la realizzazione di una passerella scorrevole su apposite vie di corsa. Detta passerella del tipo a portale scorrevole esternamente al ponte on-

de consentire l'ispezionalità senza mettere fuori esercizio la linea, inizialmente era prevista unica per l'ispezionalità delle fiancate, della parte superiore ed inferiore delle travate (figure 29, 30). Una migliore analisi ha fatto preferire la soluzione, poi adottata, che prevede una struttura a portale esterno per la verifica di tre lati della travata (figura 31) ed una seconda struttura indipendente, scorrevole inferiormente per la verifica della parte inferiore dell'impalcato (figura 32). La passerella inferiore è replicata per le cinque campate in alveo che non possono essere ispezionate direttamente dal basso, con l'ausilio di piattaforma aerea semovente. La passerella superiore e quelle inferiori si col-

legano, e scollegano, in modo da consentire lo scorrimento simultaneo per singola travata dell'assieme delle due passerelle. Lo scorrimento dalla passerella d'ispezione sulle rotaie avviene tramite ruote in acciaio, a doppio bordino, montate su cuscinetti a rotolamento e motoriduttori elettrici alimentati da un gruppo elettrogeno.

Gli elementi strutturali principali delle travate sono realizzati in acciaio strutturale, laminato a caldo nella qualità Fe 430 D1, normalizzato ed a grana fine (S 275 J2 G3 - UNI EN 10025).

Per garantire le migliori condizioni di saldabilità dei giunti, le Istruzioni FS prevedono la limitazione del "carbonio equivalente" $C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$ al valore massimo pari a 0.38 %.

Gli apparecchi d'appoggio delle travate sono del tipo fuso in acciaio FeG 520, lavorati alla macchina utensile.

Le travate sono vincolate ad una estremità con una coppia di appoggi fissi a cerniera cilindrica (figure 33, 34) ed all'altra estremità con una coppia di appoggi mobili del tipo a doppio rullo (figure 35, 36).

Il dimensionamento delle parti a contatto (acciaio-acciaio) è basato sulla classica teoria di Hertz del contatto lineare fra una superficie cilindrica ed una superficie piana, entrambe ottenute da elementi fusi in acciaio, lavorati meccanicamente.

La prefabbricazione in officina.

Le brevi note che seguono vengono espone al solo fine di consentire una migliore comprensione delle fasi relative alle lavorazioni di cantiere (assemblaggio e varo), alle quali è principalmente rivolta l'attenzione della presente nota, non hanno quindi alcuna pretesa di completezza.

In generale la prefabbricazione in officina, come detto, ha lo scopo di costruire gli elementi strutturali in carpenteria metallica, sino alla massima dimensione utile al progetto, considerando i vari vincoli connessi, quali ad esempio:

- sagome massime praticamente trasportabili dall'officina al cantiere;
- sequenze di assemblaggio;
- vincoli geometrici (tolleranze di costruzione del manufatto finito);
- caratteristiche e capacità dei mezzi di sollevamento, sia d'officina che di cantiere;
- agibilità delle aree di cantiere;
- vincoli locali specifici;
- tempi di esecuzione dell'opera;
- qualità attesa.

Di tutti questi ed altri vincoli si tiene conto in fase di progettazione, non solo esecutiva e costruttiva ma anche di prima impostazione del progetto.

Passando ad analizzare l'opera qui in argomento è facile rilevare che la prefabbricazione in stabilimento è orientata alla costruzione dei vari elementi strutturali, che possiamo definire essenzialmente come travi anche nel senso lato

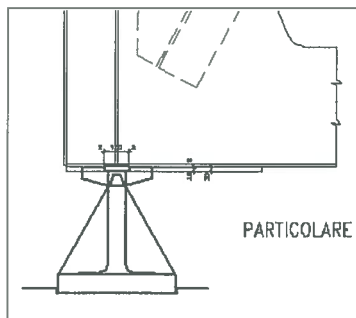


Figura 33 - Appoggio fisso

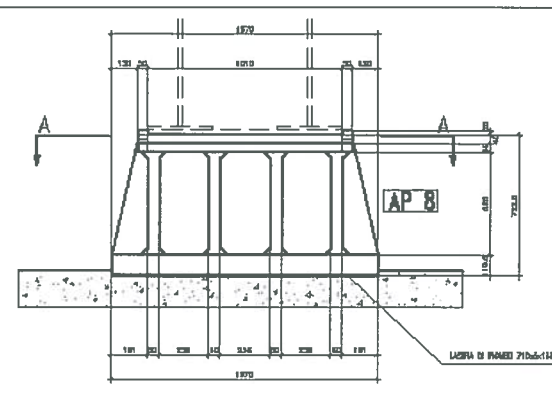


Figura 34 - Appoggio fisso, dettagli

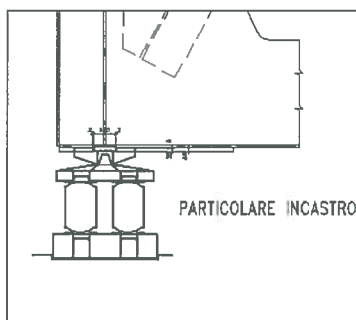


Figura 35 - Appoggio mobile

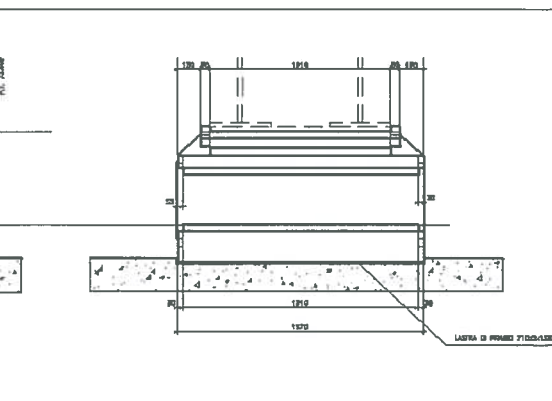


Figura 36 - Appoggio mobile, dettagli

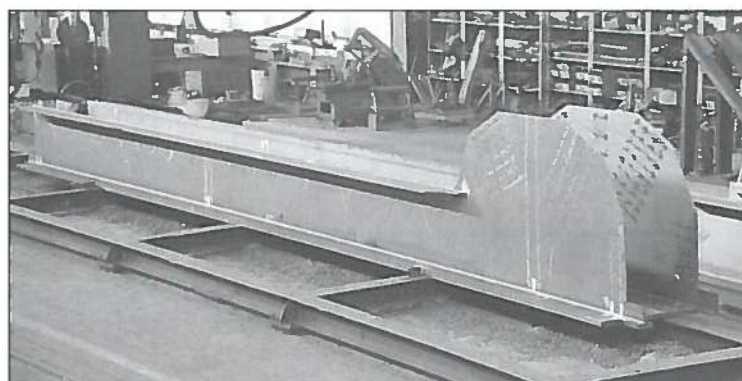
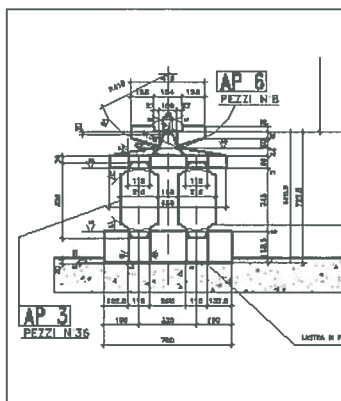
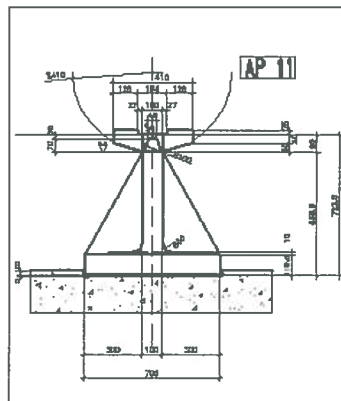


Figura 37 - Briglia superiore

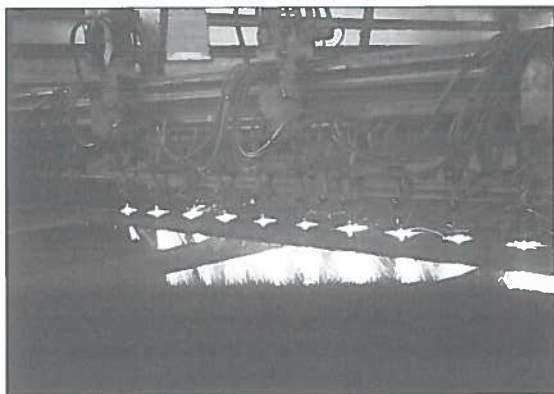


Figura 38 -
Ossitaglio lamiere

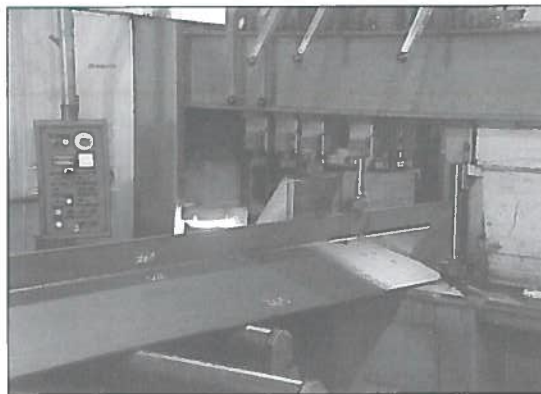


Figura 41 -
Innezzatura travi

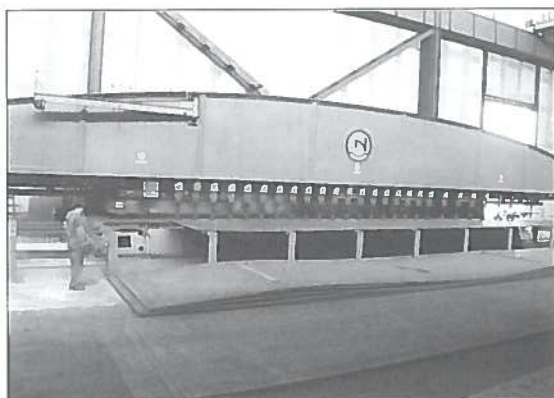


Figura 39 -
Cianfratura
lamiere



Figura 42 -
Foratura travi

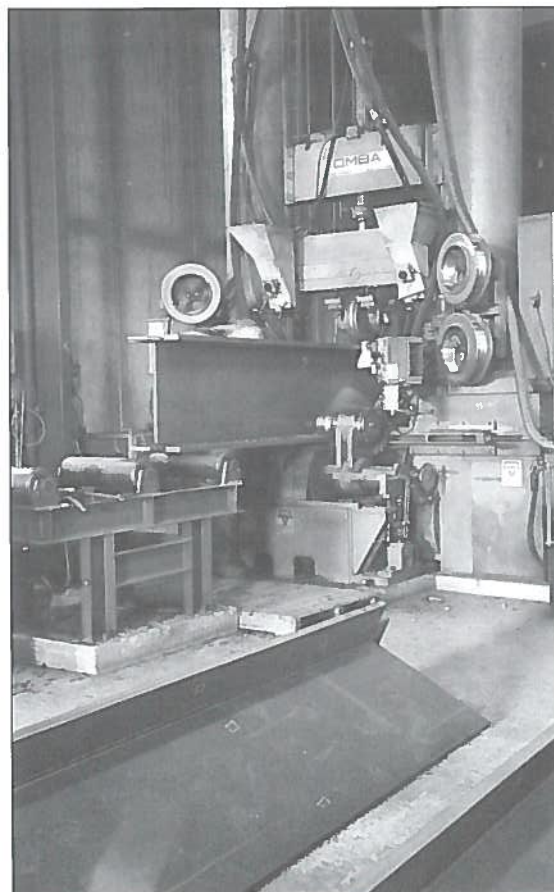


Figura 43 -
Foratura travi
a c.n., dettaglio

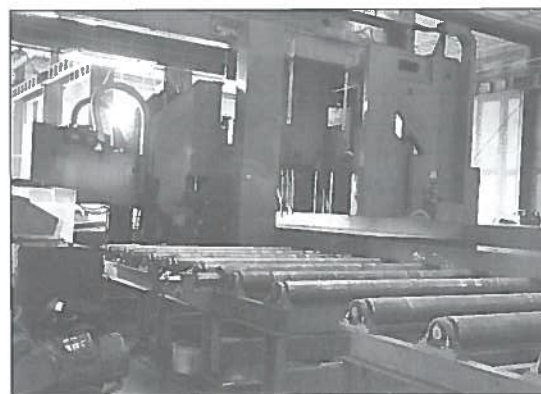


Figura 44 -
Assemblaggio
nodo

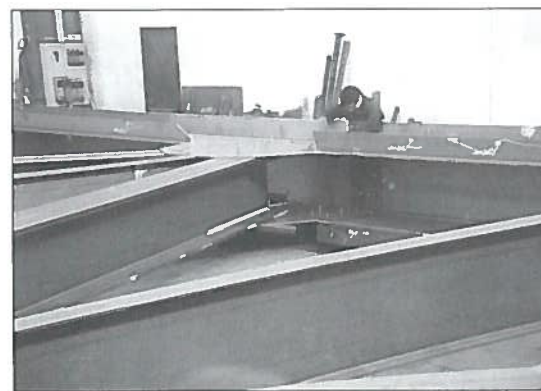


Figura 40 -
Saldatura travi
ad I

del termine, cioè elementi che hanno una dimensione (lunghezza) di un ordine di grandezza superiore rispetto alle rimanenti due dimensioni. Quindi la prefabbricazione si occupa della costruzione di travi, generalmente di tipo composto saldato, che costituiscono:

- briglie superiori;
- briglie inferiori;
- diagonali e montanti;
- travi trasversali (traversi) inferiori;
- profili a T di controvento orizzontale.

La prefabbricazione si occupa anche del completa-

mento delle lavorazioni relative alle travi laminato a caldo che essenzialmente costituiscono le longherine ed altri elementi strutturali minori.

Le lavorazioni d'officina, da un punto di vista operativo, sono essenzialmente le seguenti:

- tracciatura e marcatura dei materiali prima del loro inserimento nel ciclo produttivo;
- taglio alla fiamma delle lamiere, onde ricavare larghi piatti (figura 38);
- cianfrinatura alla macchina utensile (pialla, cesoia-pialla, alesatrice a montante mobile), per tutti gli elementi che devono essere composti per saldatura a piena o parziale penetrazione (figura 39);
- presabbatura di tutti i materiali prima di essere avviati alle lavorazioni che prevedono la saldatura, onde poter eseguire con la migliore qualità giunti saldati con procedimenti a filo continuo, sia ad arco sommerso che sotto protezione di gas, e minimizzarne la difettosità dovuta a ruggine o calamina;
- composizione, con impianti e procedimenti automatici di saldatura ad arco sommerso, dei profili a T e a doppio T; la composizione avviene senza imbastitura grazie all'impiego di linee completamente automatizzate (figura 40);
- composizione, con impianti di saldatura ad arco sommerso, dei profili a PI-greco delle briglie superiori; considerata la particolare tipologia e le tolleranze geometriche particolari questi profili devono essere prima composti per imbastitura su banco (figura 37);
- taglio a misura dei profilati sia composti saldati che laminati a caldo con sega troncatrice e impianti a controllo numerico (figura 41);
- foratura di travi e piastrine con impianti di foratura a trapano, a controllo numerico, di alta precisione (figure 42, 43);
- imbastitura e saldatura manuale o semiautomatica delle espansioni di estremità (gussets) di travi trasversali e longherine;
- altre lavorazioni di completamento;
- sabbiatura grado SA 2.5 ed applicazione della prima mano di antiruggine, spessore 40 micrometri, di antiruggine a base di fosfato di zinco non inquinante (CT 101).

Le lavorazioni descritte sono quelle fondamentali e danno una visione semplificata ma sufficiente di queste attività, per gli scopi della presente nota.

È opportuno tuttavia soffermarci su alcuni aspetti specifici che caratterizzano le lavorazioni d'officina di travate ferroviarie in acciaio.

Le travi saldate che costituiscono diagonali e montanti debbono essere costruite in modo da garantire tolleranze geometriche particolarmente ristrette, in particolare per quanto riguarda l'altezza (H) del profilo, che non deve discostarsi dal valore teorico per più di un millimetro: $H = H_{teorico} + 0/-1$ mm. Questa richiesta qualitativa è correlata alla necessità di realizzare correttamente i nodi delle travi reticolari principali, nodi ove confluiscono generalmente due diagonali ed un montante (figura 44), di sezione $H = 600$ mm circa (ovviamente costante per l'intera travata).

Per il progetto in esame queste travi sono state costruite con una tecnica particolare che prevede il rilievo degli spessori reali delle lamiere costituenti le

piattabande e successivamente il taglio delle anime non della dimensione teorica della larghezza della striscia di lamiera, bensì partendo dalla dimensione H della trave finita alla quale vengono sottratti gli spessori reali delle piattabande. È intuitivo comprendere il livello di complessità del ciclo produttivo attuato, che impone sequenze particolari, non generalmente utilizzate correntemente nella produzione. D'altro canto il dover aggiustare al montaggio profili con tolleranze più ampie, confluenti nel medesimo nodo, ricorrendo ad imbottiture risulta operazione non correttamente praticabile, a meno di costruire tutti i profili con ampie tolleranze per difetto (ad esempio -4, -8mm), prevedendo quindi imbottiture generalizzate per tutte le aste, con conseguente mediocre risultato.

Le tolleranze descritte impediscono l'impiego di profili laminati a caldo, per i quali tali tolleranze non sono raggiungibili neppure su specifica ordinazione.

A riguardo della necessità di elevata precisione costruttiva delle aste di parete è anche da ricordare che i nodi di unione alla briglia superiore sono ricavati nel profilo, monolitico, composto saldato costituente la briglia medesima e che diagonali e montanti debbono convergere in tali nodi. Valgono quindi le considerazioni sopra esposte circa la tolleranza sull'altezza della sezione delle aste di parete, alle quali sono da correlare analoghe tolleranze costruttive per quanto riguarda la distanza netta interna fra le anime dei profili a P-greco costituenti le briglie medesime.

Considerazioni del tutto analoghe valgono per la costruzione di tutte le aste costituenti la travata, per le quali non riportiamo un'analisi dettagliata.

Altro aspetto singolare, rispetto ad analoghe lavorazioni non afferenti a travate reticolari "ferroviarie", riguarda la foratura delle aste e delle piastre sia di nodo che di coprighiunto.

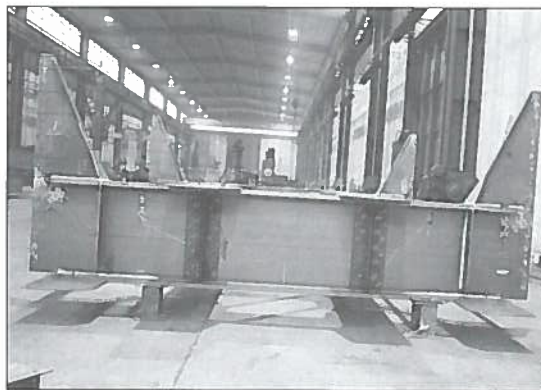


Figura 45 -
Montaggio in
bianco travi di
impalcato

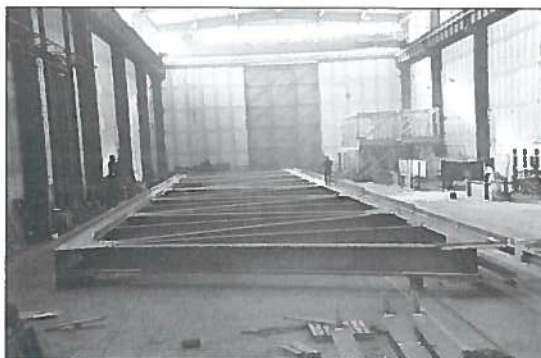


Figura 46 -
Premontaggio in
officina

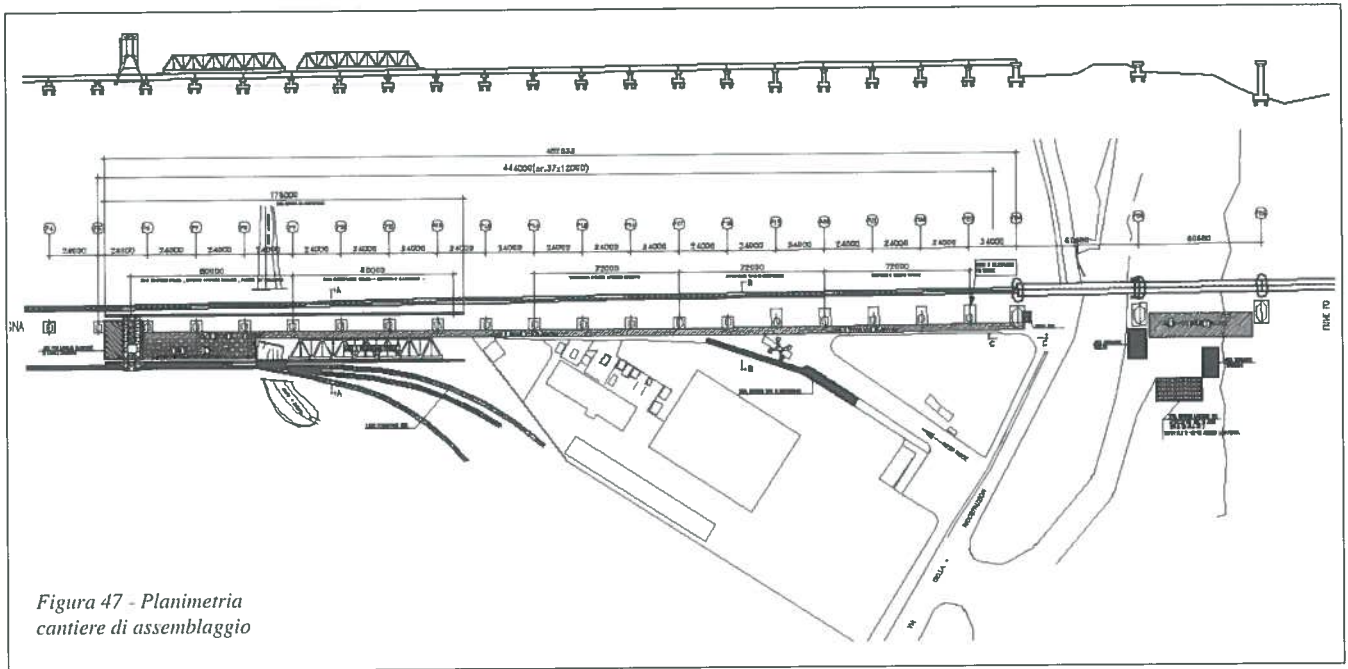


Figura 47 - Planimetria cantiere di assemblaggio

Come detto precedentemente i collegamenti bullonati impongono tolleranze di accoppiamento foro-bullone dell'ordine di pochi decimi di millimetro, ivi comprese le tolleranze di produzione dei bulloni.

È evidente che in fase di foratura, ancorché eseguita con impianti a controllo numerico, tali tolleranze non siano assolutamente garantibili per vari fattori, primo fra tutti quello relativo alla tolleranza di costruzione del profilo da forare, che può raggiungere l'ordine di grandezza del millimetro ma che risulta comunque inadeguata.

La soluzione tecnica adottata, nel progetto in esame, è stata la seguente:

- tutti i profili sono stati costruiti con tolleranze geometriche particolarmente ristrette, sia in relazione agli aspetti prima descritti sia per quanto riguarda rettilineità, parallelismo delle piattabande, fuori squadra, lunghezza, ecc.; dette tolleranze sono state mediamente dimezzate rispetto ai già elevati standard produttivi aziendali;
- i fori sono stati eseguiti a diametro inferiore di 3 mm rispetto al diametro del bullone da inserire;
- la foratura al diametro definitivo viene lasciata ad una specifica fase di montaggio, meglio descritta nel relativo capitolo, quando l'intera travata è assemblata;
- la foratura, esclusivamente a trapano, è stata eseguita con punte di qualità particolare, rivestite al nitrato di titanio, affilate con procedimento "Avyac", con ciclo di riaffilatura ridotto ad 1/3 rispetto alla normale prassi produttiva.

Inoltre si è proceduto alla costruzione di una serie completa di elementi costituenti una porzione di un quarto di travata, ottenuta suddividendo la travata medesima secondo i due piani di simmetria, per entrambe le tipologie (P.T. 59.4 m e P.T. 75.6 m); detti elementi sono stati montati "in bianco" (figure 45, 46), onde verificare la correttezza sia della costruzione che della foratura, in particolare per quest'ultima si è verificato che il sovrametallo di foratura (3 mm) fosse adeguato, in fase di alesatura dei fori al montaggio, a garantire la richiesta precisio-

ne di accoppiamento foro bullone. Come meglio si descrive nel relativo capitolo, solo una elevata precisione nella costruzione dei componenti e nella relativa foratura garantisce la finale ristretta tolleranza e qualità; l'alesatura finale dei fori infatti non può ovviare ad errori di concentricità elevati, ancorché questi teoricamente rientrino nei valori teorici di ricopertura del sovrametallo, in particolare per quanto riguarda "pacchetti" di elevato spessore. A conclusione del ciclo di fabbricazione in stabilimento, comprendente anche lavorazioni qui non descritte, i componenti, non ulteriormente assemblati, sono spediti in cantiere suddivisi per travata.

Gestione della qualità

Nulla si è detto in quanto precede riguardo l'aspetto della garanzia della qualità che, è bene dire, ha avuto un ruolo fondamentale per l'intero processo produttivo e realizzativo dell'opera.

La produzione in stabilimento è stata guidata da un dettagliato piano di costruzione che contiene non solo le fasi principali e le linee guida per attuarle, ma descrive anche dettagliatamente tutti gli aspetti delle singole lavorazioni, le propedeuticità, i controlli intermedi e finali, le tolleranze alle quali riferire la singola lavorazione e quelle finali alle quali riferirsi per la verifica del pezzo in costruzione.

Particolare attenzione è stata posta agli aspetti relativi alla identificazione dei pezzi componenti e alla loro rintracciabilità. In ogni fase del processo produttivo è così possibile determinare univocamente e semplicemente, per ogni singolo componente, da quale materiale (profilato o lamiera) esso derivi, ciò grazie ad una procedura aziendale standard per la rintracciabilità dei materiali.

Anche per la produzione in stabilimento, così come per tutte le fasi realizzative, è stato seguito un piano di controllo della qualità, che ha visto come attori sia gli Ispettori dello stabilimento sia Ispettori di Italferr sia, in particolare per quanto riguarda i composti saldati, Ispettori dell'Istituto Italiano della Saldatura.

Salvo le saldature relative alle espansioni (gussets)

di estremità di traversi e longherine, e quelle di composizione dei nodi delle briglie inferiori, del tipo a piena penetrazione, tutte le rimanenti saldature sono del tipo a cordoni d'angolo.

I controlli non distruttivi in stabilimento sono stati i seguenti:

- UT per saldature a piena penetrazione;
- RT per saldature a piena penetrazione;
- MT per cordoni d'angolo;
- Visivo per tutti i giunti saldati.

Oltre ai controlli non distruttivi, limitatamente ai giunti realizzati con procedimento automatico per la composizione delle travi saldate, sono stati eseguiti controlli di tipo distruttivo, con le seguenti modalità:

- le travi saldate, in percentuale opportuna, sono state costruite con espansioni adeguate (in generale le travi presentano lunghezza opportunamente maggiorata e prolungamenti di saldatura specifici) onde poter ricavare talloni rappresentativi dei cordoni di saldatura effettivi di produzione;
- i talloni, opportunamente contromarcanti, venivano staccati meccanicamente dalle travi;
- dai talloni sono ricavati provini onde eseguire macrografie, per il controllo della forma e dimensioni del cordone di saldatura (in particolare la penetrazione che deve essere non minore di 2 mm), e durezza (HV 10) in ZF, ZTA e MB, verificando che il valore massimo misurato sia minore di 300 N/mm².

I controlli di macro e durezza consentono la verifica diretta e costante della rispondenza dei parametri di saldatura utilizzati in produzione con quelli adottati in sede di qualifica del procedimento di saldatura e riportati nella relativa scheda di produzione (WPS); tali controlli consentono inoltre di assicurare che non si sono verificate anomalie significative durante il processo produttivo: posizionamento relativo dei lembi da saldare, distacco dei lembi, caratteristiche meccaniche delle lamiere (per analogia), composizione chimica (per analogia).

Assemblaggio in cantiere

È da premettere che il tipo di varo prescelto per superare l'ostacolo artificiale costituito dall'alveo del fiume Po, è quello del varo di punta: le travate vengono assemblate una alla volta dietro alla spalla di lancio, fra loro via via solidarizzate e spinte sino a raggiungere la spalla di arrivo e quindi raggiungere ciascuna la posizione planimetrica finale.

È stato quindi necessario individuare l'area di assemblaggio in relazione alla possibilità di poter assemblare le travate in linea con la posizione planimetrica di fine varo (figura 47).

Al momento dell'inizio dei lavori di assemblaggio in cantiere erano realizzati entrambi i viadotti di accesso in c.a.p., sia dal lato Bologna che dal lato Padova, ed era iniziata la costruzione delle pile in golena ed in alveo dal lato Bologna.

Veniva quindi individuato il cantiere di assemblaggio nella parte di viadotto in c.a.p. lato Bologna, compresa la disponibile area a fianco di tale viadotto dal lato opposto alla linea FS in esercizio, linea che come detto dista pochi metri dal nuovo ponte. Come è facile dedurre dalle foto del cantiere (figura 48) l'area disponibile per lo stoccaggio e l'as-



Figura 48 - Vista aerea del cantiere

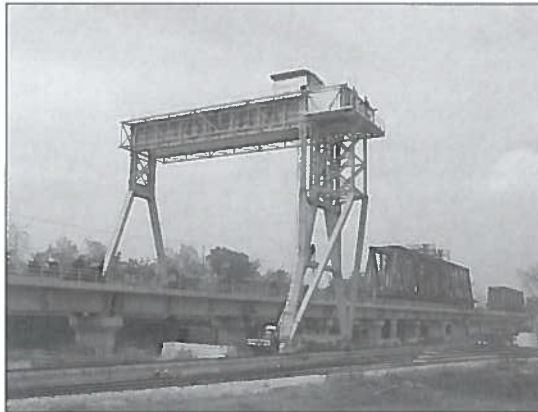


Figura 49 - Gru a cavalletto

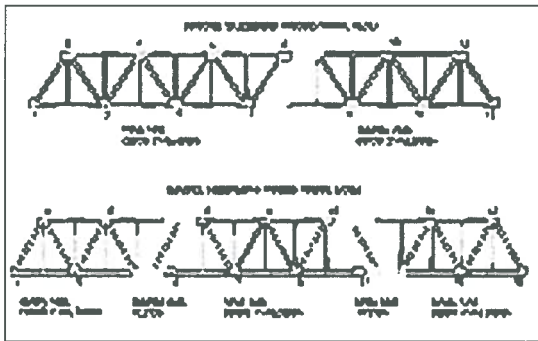


Figura 50 - Suddivisione in conci fiancate

semblaggio a terra a fianco del viadotto era particolarmente limitata in larghezza e disponibile ad una distanza di circa 300 m dalla spalla di lancio.

Per servire l'area di assemblaggio e sollevare i componenti (figura 50) sull'impalcato veniva montata una gru a cavalletto a cavallo dell'impalcato in c.a.p., della portata di 500 kN altezza 25 m e scartamento 23 m (figura 49).

L'impostazione del cantiere di assemblaggio è stata la seguente (figure 51, 52, 53, 54, 55):

- nell'area a terra, a fianco del viadotto in c.a.p., le travate venivano assemblate, con bulloni provvisori, in sottoinsiemi secondo due tipologie costituite una da semifiancate reticolari complete e l'altra da parti di impalcato (longherine e travi trasversali), sino a raggiungere elementi di peso massimo pari a 500 kN (figura 51);
- gli elementi così assemblati venivano sollevati dalla gru a cavalletto e posizionati sull'impalcato in c.a.p., utilizzando per il corretto posizionamento geometrico delle carpenterie una complessa struttura provvisoria in acciaio che sosteneva la travata in corrispondenza dei nodi, sia intermedi che di estremità, lasciando nel contempo

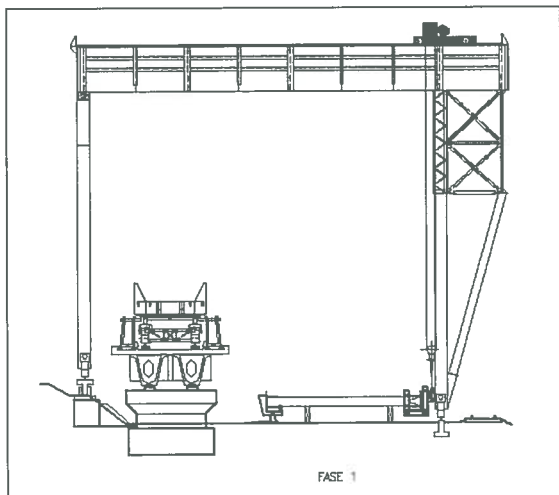


Figura 51 -
Assemblaggio
fiancate I

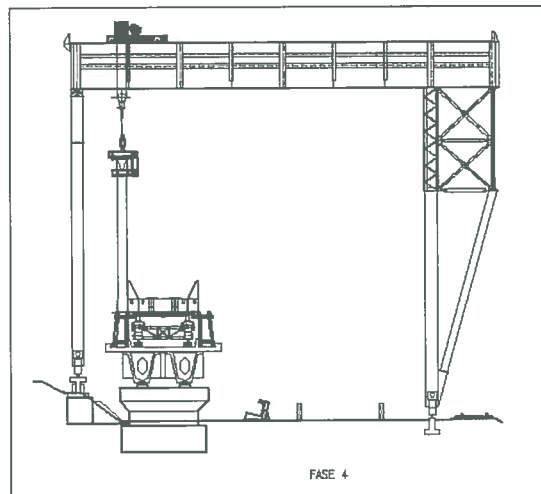


Figura 54 -
Assemblaggio
fiancate IV

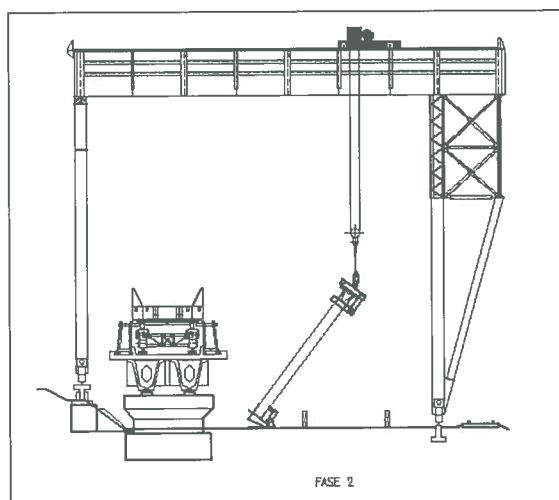


Figura 52 -
Assemblaggio
fiancate II

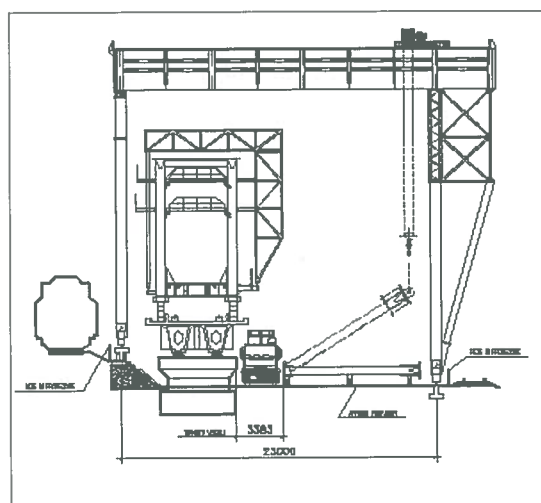


Figura 55 -
Sollevamento
fiancate, assieme

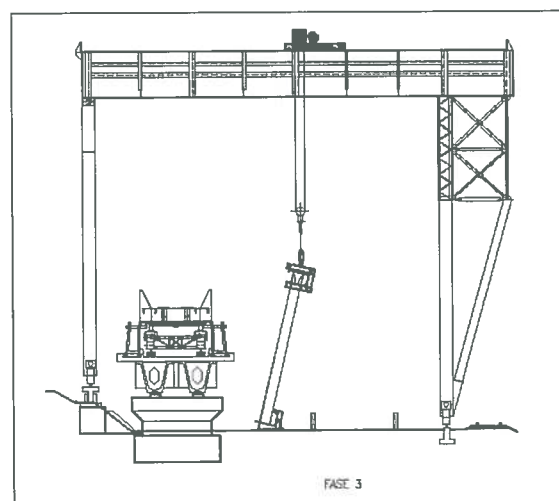


Figura 53 -
Assemblaggio
fiancate III

libera una fascia centrale al di sotto dell'impalcato per la successiva traslazione della travata (figure 52, 53, 54, 56);

- gli elementi di travata venivano quindi assemblati fra loro sempre con bulloni provvisori e spine di centraggio, sino all'assemblaggio dell'intera travata (figura 57);
- nella stessa posizione, dopo controllo geometrico, si procedeva alla alesatura dei fori della travata ed alla contemporanea sostituzione dei bulloni provvisori con bulloni definitivi, tranne per i fori dei nodi delle aste del controvento inferiore,

al fine di non assoggettare le aste del controvento inferiore a sollecitazioni indotte dal peso proprio della travata per effetto del comportamento "globale" della struttura (figura 58);

- la travata veniva quindi appoggiata ai soli nodi di estremità, ed in questa fase si procedeva alla alesatura anche dei fori dei nodi di controvento sopra citati;
- si procedeva quindi alla traslazione della travata completa, ultimata delle lavorazioni propriamente strutturali, in postazione intermedia ove potevano essere eseguite altre lavorazioni di montaggio di elementi accessori, quali ad esempio il montaggio di parapetti, piazzole di rifugio, grigliati, traversine ecc. (figura 59);
- la travata veniva nuovamente traslata in una nuova posizione o di temporaneo parcheggio od in area di varo, che viene più dettagliatamente descritta nel relativo capitolo;
- nella posizione di parcheggio od in area di varo veniva eseguita la verniciatura finale, costituita da una seconda mano di antiruggine, uguale alla prima mano, e delle due mani di vernice (CT 111) a finire, per uno spessore complessivo di 160 micrometri.

Le fasi sopra descritte sono una sintesi delle attività di cantiere dei lavori identificabili come quelli di assemblaggio; alcuni aspetti notevoli vengono qui di seguito meglio descritti, così come alcune semplici modifiche al ciclo prima descritto.

È subito da osservare che il viadotto in c.a.p. non era stato progettato per sostenere i carichi derivanti dalle attività di assemblaggio sopra descritte.

Si è dovuto quindi condurre un accurato studio per individuare le posizioni esatte ove appoggiare le travate completamente assemblate e le strutture per la diffusione dei carichi concentrati, inoltre si è dovuto intervenire estesamente per la diffusione dei carichi indotti dai cavalletti di appoggio delle travate in corrispondenza della postazione di assemblaggio, in quanto le fiancate reticolari si trovavano ad insistere alla estremità degli sbalzi della soletta degli impalcanti in c.a.p..

I blocchi di sostegno in corrispondenza della estremità delle travate completamente assemblate, così come i cavalletti intermedi disposti per il sostegno dei nodi durante le operazioni di assemblaggio, sono stati realizzati in modo da consentire, nello spazio compreso fra intradosso travata ferroviaria ed estradosso impalcato in c.a.p. ed all'interno dell'interasse delle fiancate reticolari, lo scorrimento di speciali carrelli atti a sollevare una travata completa alla volta, proprio in corrispondenza dei traversi di estremità della travata medesima, nella posizione prevista a progetto per il sollevamento in occasione di manutenzione degli apparecchi d'appoggio definitivi (figura 60).

Questa necessità ha comportato immaginabili complicazioni realizzative, sia per le strutture mobili che per quelle fisse.

I carrelli adottati per la traslazione delle travate, dalla postazione di assemblaggio sino all'ultima postazione (quella di varo), dovevano anche compensare la curvatura planimetrica del tracciato, formata dall'impalcato in c.a.p. e dovevano gravare sopra una apposita trave di ripartizione dei carichi, onde non sovraccaricare la soletta in c.a. dell'impalcato prefabbricato (figura 61).

La scelta finale ha determinato l'adozione di due carrelli ciascuno a 2+2 ruote, articolate a bilanciere onde garantire un'uguale carico per ogni ruota. La travata poggiava, come detto, in corrispondenza delle nervature previste a progetto per il sollevamento del ponte, nervature disposte in corrispondenza delle travi trasversali di estremità. Onde garantire una sorta di articolazione fra travata reticolare e carrello quest'ultimo è stato dotato di un segmento di ralla in acciaio-PTFE, incernierata in corrispondenza dell'asse del carrello medesimo, tale da consentire una rotazione relativa di circa $\pm 5^\circ$ fra carrello e travata, questo accorgimento si è reso necessario proprio per compensare l'andamento planimetrico curvilineo del tracciato intercorrente tra la postazione di assemblaggio e quella di varo (figura 62).

Le ruote di scorrimento, del tipo a doppio bordino scorrevoli su rotaie ferroviarie UNI 60, sono realizzate fucinate in acciaio basso legato (39 NiCrMo3), bonificato, montate su cuscinetti volventi del tipo a rulli a botte di alta capacità, nel diametro unificato di 630 mm e sono dimensionate per una portata teorica pari a 1000 kN cadauna.

La trazione per lo scorrimento avviene su tutte le 8 ruote impegnate, grazie a motoriduttori comandati da azionamento vettoriale a variazione di frequenza (inverter) e motori a corrente alternata per una potenza complessiva installata pari a 150 kW. Una



Figura 56 - Sollevamento elementi



Figura 57 - Travata assemblata



Figura 58 - Alesatura su travata assemblata

potenza così elevata, nonostante la velocità di traslazione e gli attriti molto contenuti, si è resa necessaria per superare la pendenza longitudinale dell'impalcato in c.a.p. pari a 1.05%

Tutte le manovre potevano in questo modo essere variate con continuità, in velocità, accelerazione e frenamento, con una gamma di valori a piacere, con comando simultaneo di tutti i motoriduttori, senza dover ricorrere a complessi e delicati, per

Figura 59 -
Traslazione
travata



Figura 60 -
Premontaggio su
impalcato in cap

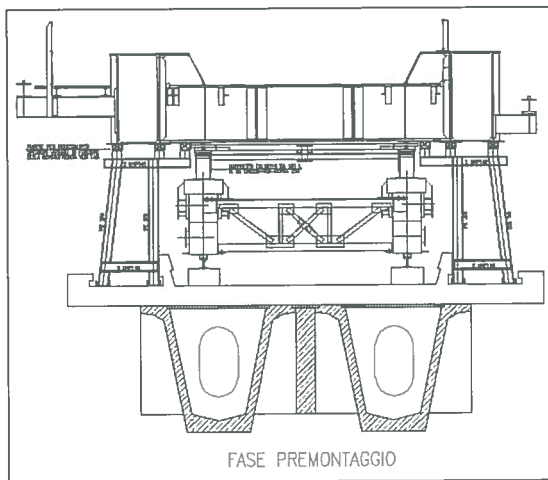


Figura 61 -
Traslazione su
carrelli

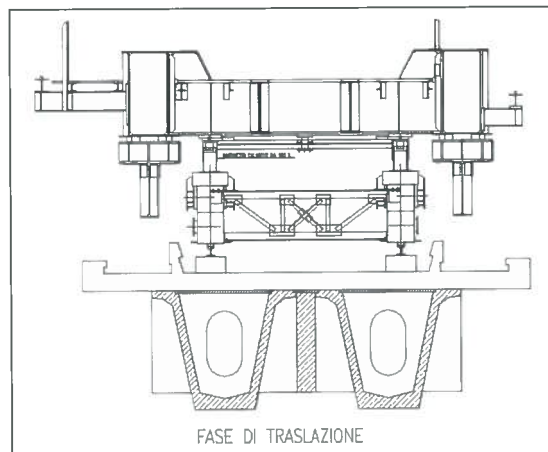
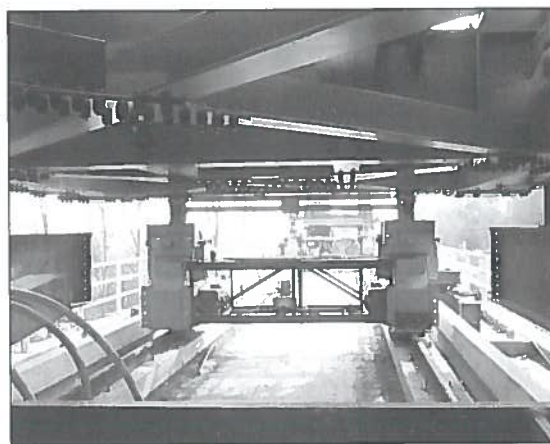


Figura 62 -
Carrelli di
traslazione



l'uso in cantiere, azionamenti in corrente continua. Anche le travate di P.T. 75.60 m e del peso, completamente allestite, superiore a 4500 kN sono state facilmente traslate nella massima sicurezza, nonostante la rilevante altezza (10 m) ed il relativamente modesto valore dello scartamento dei carrelli (3.20 m). Per questa operazione, come detto successivamente, è stata limitata la massima velocità del vento ammissibile a 40 km/h.

Da un punto di vista operativo l'operazione di traslazione avveniva con le seguenti fasi:

- inserimento dei carrelli inferiormente alla travata ultimata;
- sollevamento della travata dai blocchi di appoggio grazie a due coppie di martinetti oleodinamici, comandati simultaneamente da due centraline, disposti alle estremità dei carrelli, onde rispettare la simmetria dei carichi;
- traslazione della travata, sostenuta dai due carrelli, con comando ad unico variatore di frequenza centrale ed asse elettrico, onde sincronizzare la rotazione delle 8 ruote;
- riposizionamento sopra ai nuovi appoggi, con l'impiego dei quattro martinetti oleodinamici.

Con il ricorso ad estese lavorazioni di assemblaggio degli elementi costituenti le travate in area cantiere ma a terra, e successivo sollevamento sopra al viadotto di sottoinsiemi di grandi dimensioni si sono ridotte al massimo tutte le operazioni di assemblaggio "in quota" (il piano di lavoro sopra l'impalcato in c.a.p. era a quota variabile sino a circa +12 m rispetto al piano del cantiere, a tale valore va aggiunta l'altezza della travata sopra ai cavalletti per una quota massima complessiva di +22 m), minimizzando in questo modo le operazioni di maggiore pericolosità per il personale addetto al montaggio, e velocizzando al massimo l'esecuzione dei lavori. Inoltre questa tecnica ha consentito di ridurre la criticità delle varie fasi di assemblaggio, consentendo l'esecuzione di più lavorazioni in parallelo, al di fuori del "percorso critico" (figura 63). Le travate di luce maggiore venivano assemblate sopra l'impalcato con l'unione di 10 sottoinsiemi di travata mentre quelle di luce minore con 7 sottoinsiemi, riducendo il numero dei sollevamenti, rispetto ad un assemblaggio tradizionale, di quasi due ordini di grandezza (figura 50).

L'elevata precisione sia costruttiva che di assemblaggio a terra, consentiva il posizionamento e l'unione degli elementi preassemblati con precise manovre di posizionamento relativo, senza il ricorso a scuciture parziali e senza ulteriori aggiustaggi per la corretta messa in monta delle travate.

Tutte le operazioni di assemblaggio sono state verificate geometricamente sia con tecniche elementari, ricorrendo a banchi di lavoro precedentemente misurati e dotati dei riferimenti di tracciatura, sia ricorrendo a misurazioni di precisione con l'utilizzo di stazioni topografiche totali di altissima precisione (teodoliti con risoluzione ad 1/10000 di grado centesimale, con distanziometro incorporato con errore di lettura inferiore ad 1mm su distanza di 100 m).

Dopo che la travata era completamente assemblata, veniva verificata la geometria (assi briglie, monta teorica, ortogonalità delle estremità, lunghezza complessiva fra gli assi degli appoggi, ecc...).

Ad esito positivo di questa fase era possibile iniziare la fase di alesatura di tutti i fori, eccezion fatta per i nodi dei controventi inferiori, come già detto. L'operazione di alesatura deve garantire per i fori la prescritta tolleranza massima complessiva foro-gambo della vite, comprensiva della tolleranza sul gambo della vite medesima.

Il valore pari a 0.3 mm di tolleranza complessiva anche per i bulloni di diametro maggiore di 20 mm, quelli di maggiore impiego nelle unioni principali qui considerate, in pratica si riduceva alla possibilità di eseguire fori alesati ad un valore pari a +0.2 mm rispetto al diametro teorico della vite: ad esempio bullone $d=24$ mm, foro $D=24.2$ mm, considerando la tolleranza di produzione delle viti (determinata per "famiglie" omogenee di pezzi).

Considerato un sovrametallo del foro pari a 3 mm ed un disallineamento medio di 1 mm dei fori delle lamiere costituenti il pacchetto del giunto, conseguì la pratica impossibilità ad eseguire con unica operazione (utensile ad alesare cilindrico-conico-cilindrico di diametro definitivo +0.2 mm rispetto al teorico) l'alesatura al diametro voluto finale, con le richieste tolleranze.

D'altra parte una operazione di doppia alesatura, con una prima pre-alesatura a diametro intermedio di allineamento foro, comportava tempi di lavorazione praticamente doppi, insopportabili non solo per i costi ma soprattutto per i tempi inconciliabili con il programma generale dei lavori in quanto la fase di alesatura rientra fra quelle in percorso critico.

Al fine di superare i vincoli e limiti descritti, pur garantendo la richiesta precisione della lavorazione di alesatura, veniva studiato un particolare utensile a doppia conicità e doppia sezione cilindrica a finire che, dopo una specifica messa a punto su una serie conveniente di campioni fuori opera, forniva con unica operazione di alesatura il richiesto grado di precisione e qualità.

L'alesatura vera e propria veniva realizzata con trapani-alesatori elettrici o pneumatici, supportati da basi magnetopermanenti, dotati di guide a slitte con superfici rettificata a sezione di coda di rondine.

L'utensile ad alesare, montato sul trapano, veniva centrato manualmente nel foro da lavorare grazie alla parte iniziale a nocciolo ridotto e successiva parte conica, quindi veniva bloccata la base magnetica direttamente al pezzo da alesare, quindi con comando manuale a volantina si comandava l'avanzamento dell'utensile mantenuto ad un elevato numero di giri di rotazione grazie al motore elettrico o pneumatico di cui è dotato il trapano (figura 64).

L'operazione, qui descritta semplicemente, richiede personale specializzato ed adeguatamente addestrato per assicurare il richiesto grado di precisione, essendo lasciata alla esperienza e sensibilità del personale addetto la determinazione della corretta posizione relativa utensile-foro, nonché la corretta velocità di avanzamento.

Il personale addetto alle operazioni di alesatura operava in piena sicurezza per tutte le posizioni di lavoro, molte delle quali ad un'altezza dall'impalcato in c.a.p. di circa 10 m, potendo contare su piani di lavoro mobili, scorrevoli su rotaie fissate alle travate, sia interni che esterni alle travate, all'uopo predisposti (figura 63).

Ultimata la fase di alesatura, controllo ed inseri-



Figura 63 -
Cantiere di
assemblaggio



Figura 64 -
Alesatura



Figura 65 -
Serraggio bulloni
con chiave
dinamometrica

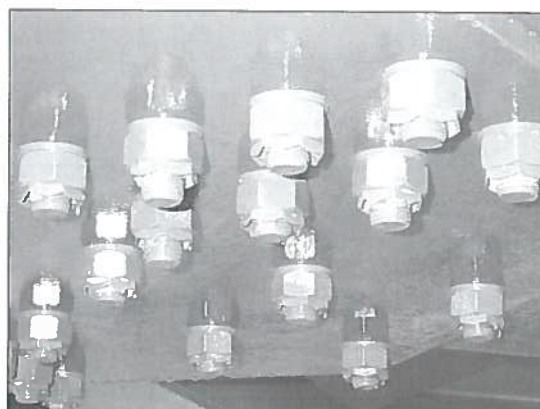


Figura 66 - Dadi
con dispositivo
antisvitamento

mento bulloni definitivi, si procedeva al serraggio dei bulloni con apposite chiavi, sia pneumatiche che dinamometriche.

Il valore della coppia di serraggio dei bulloni è normato dalle Istruzioni FS citate, che prescrivono per bulloni impegnati a taglio una percentuale pari almeno all'80% di quanto tabellato nella norma CNR-UNI 10011, consentendo quindi di raggiungere una percentuale del 100% di quanto contenuto nella medesima tabella per la corrispondente qualità (8.8) e diametro.

Concordemente con Italferr per questo progetto veniva deciso di adottare coppie di serraggio pari al valore tabellare della citata norma, a migliore garanzia di non svitamento dei bulloni; fenomeno quello dello svitamento dei bulloni al quale FS ed Italferr pongono particolare attenzione per la rilevante aliquota di sollecitazioni dinamiche alle quali le travate della tipologia qui considerata sono sottoposte, rispetto alle complessive sollecitazioni, ed all'elevato numero dei cicli di carico.

Oltre all'adozione di coppie di serraggio massime previste per la bulloneria adottata, a scongiurare il fenomeno dello svitamento in esercizio, si sono adottati dadi elastici supplementari (palmutter) montati all'esterno del dado (figura 66).

Per garantire un corretto serraggio dei bulloni si sono adottati accorgimenti particolari volti a garantire sia una elevata ripetitività dei risultati sia la garanzia di non superare il valore di coppia prescritto, eventualità da non sottovalutare sia in considerazione del fatto che i bulloni adottati di classe 8.8 hanno coppie di serraggio ben inferiori ai bulloni 10.9 di pari diametro, sia per l'impiego di diametri anche modesti (20 mm) raffrontati a quelli generalmente utilizzati per i ponti.

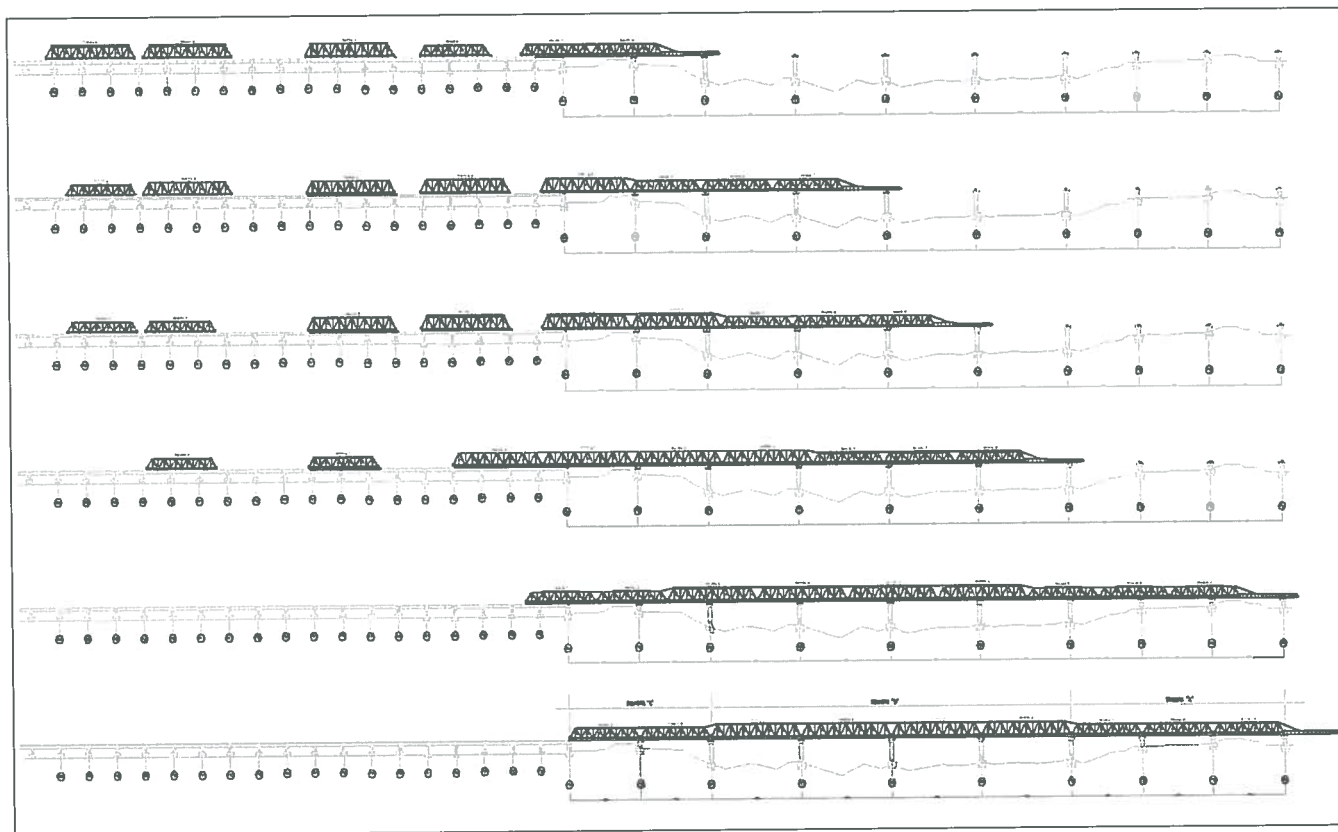
Onde conseguire il risultato desiderato e nel contempo non penalizzare i tempi di esecuzione dei la-

vori (anche le operazioni di serraggio dei bulloni rientravano fra quelle sul percorso critico), veniva messa a punto la specifica procedura operativa seguente:

- i bulloni di ogni nodo venivano serrati ad una coppia di valore pari al 60% del nominale, con pistola pneumatica a battente alla quale era interposta una barra di torsione adatta a limitare la massima coppia di serraggio; per ciascun diametro erano state preventivamente testate e caratterizzate un conveniente numero di barre di torsione, sia in relazione alla necessità di disporre di pezzi di ricambio pronti in cantiere sia in relazione alla specifica chiave pneumatica adottata; i bulloni utilizzati per testare barre e pistole sono stati prelevati dagli stessi lotti di bulloni approvigionati per la costruzione delle travate al fine di ottenere la minore dispersione possibile dei risultati;
- successivamente veniva completata l'operazione di serraggio per ciascun nodo utilizzando chiavi dinamometriche tarate, con cadenza di taratura settimanale grazie all'impiego di celle di carico e attrezzatura specifiche, disponibili nel laboratorio di stabilimento; questo secondo serraggio portava la coppia al valore nominale, con la desiderata precisione (figura 65).

La tecnica sopra descritta consentiva di coniugare la rapidità di serraggio propria delle chiavi a battente pneumatiche, con la garanzia della precisione propria delle chiavi dinamometriche manuali; con l'osservazione che la precisione di un finale serraggio con chiave dinamometrica può ragionevolmente essere garantita solo se tale ultima operazione comporta un adeguato incremento nel valore della coppia medesima e, quindi, in particolare se la coppia di serraggio preliminare non eccede il 60% del finale valore.

Figura 67 - Fasi di varo



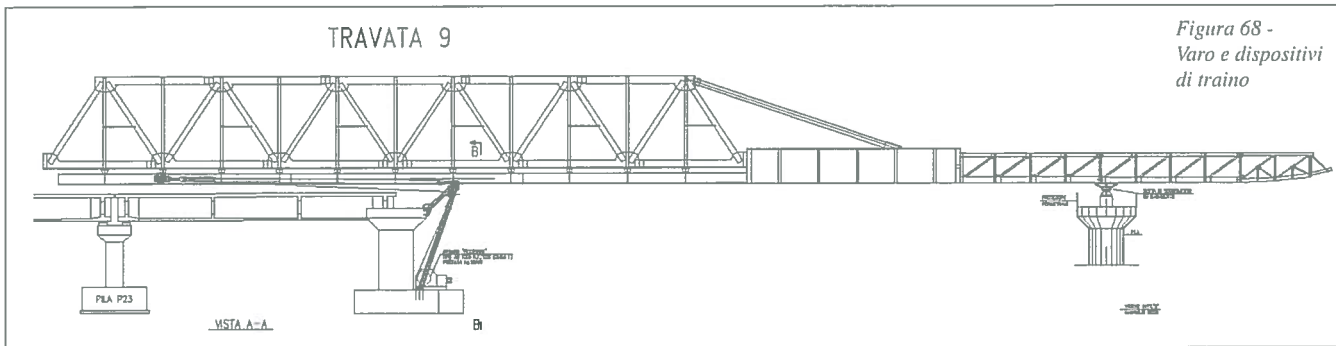


Figura 68 -
Varo e dispositivi
di traino

È altresì da aggiungere che sono state condotte, sempre presso il laboratorio dello stabilimento, prove volte a garantire la corrispondenza fra coppie di serraggio e precarico nei bulloni, impiegando sempre bulloneria proveniente da lotti specifici approvigionati per l'assemblaggio delle travate. Le quantità di bulloni per lotto erano state convenientemente maggiorate anche in relazione alle prove qui descritte.

A conclusione delle operazioni di serraggio dei bulloni vi era la fase di controllo, secondo specifica, del valore della coppia, controllo condotto sotto la supervisione di Ispettori Italferr.

Alla fine della catena di fasi denominate appunto assemblaggio si aveva come risultato la travata ultimata pronta per essere traslata in area di varo.

Varo e calaggio sugli appoggi

Come detto la tecnica adottata per porre ciascuna travata nella finale posizione, sopra ai definitivi appoggi, è quella del varo di punta con lancio delle travate, una dietro l'altra, dalla pila-spalla di lancio (figura 67).

Questa tecnica comporta (figura 88) l'attuazione delle seguenti attività:

- collegamento provvisorio delle travate fra loro, così da realizzare, per il varo, uno schema statico di unica travata reticolare continua, via via più lunga mano a mano che le travate vengono collegate e varate, inserendo le aste mancanti a completare un unico schema a travata reticolare che a fine varo raggiunge l'intera lunghezza del ponte (610 m) (figure 69, 71);
- utilizzo di una struttura speciale, denominata avambecco, montata anteriormente alla prima travata da varare, struttura considerevolmente più leggera della travata medesima; tale struttura consente di ridurre il massimo momento flettente negativo che si determinerebbe se il raggiungimento a sbalzo delle successive pile avvenisse direttamente con le travate definitive anziché con l'avambecco (figure 68, 70);
- utilizzo di piani di scorrimento, che nel caso in esame sono stati realizzati con slitte oscillanti in acciaio e superfici a basso attrito in legno speciale, denominato Azobè (Lophira Procera), rivestito in PTFE (politetrafluoroetilene), materiale sintetico dotato della proprietà di presentare il più basso coefficiente di attrito conosciuto in natura;
- spinta del treno di travate, fra loro collegate, attuata con taglie di funi ed argano elettrico;
- guide laterali per garantire la rettilineità dell'avanzamento realizzate con grandi ruote orizzon-

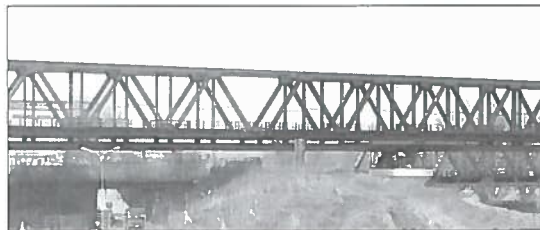


Figura 69 -
Solidarizzazione
travate per il varo



Figura 70 -
Avambecco e
prima fase di varo

tali in acciaio, montate su cuscinetti a strisciammento in bronzo, del tipo a bilanciere registrabile, ingaggiate alle briglie inferiori delle travate.

Le operazioni di varo erano precedute dal montaggio di apposite travi, provvisorie, disposte al di sotto delle briglie inferiori. Tali travi sono necessarie in relazione alla specifica tecnica di varo adottata che prevede lo scorrimento dell'intradosso del ponte sopra ai richiamati piani di scorrimento (slitte), piani di scorrimento che hanno estensioni limitate, nel caso in esame si sono adottate slitte di lunghezza variabile, in relazione al loro posizionamento e quindi ai carichi da sostenere, compresa fra 1000 e 2000 mm e sono disposte a coppie (una in corrispondenza a ciascuna fiancata) in corrispondenza delle pile da superare.

Come detto al capitolo dedicato al progetto, le briglie inferiori delle travate reticolari sono costituite da coppie di profili a T rovescio, composti saldati, idonee ad assorbire le sollecitazioni di trazione indotte dal funzionamento statico in esercizio del ponte, ma certamente inadeguate ad assorbire sollecitazioni di tipo flessionale determinate dall'applicazione di carichi concentrati verticali agenti in posizione diversa dai nodi dello schema reticolare.

Si è reso quindi necessario disporre, come detto sopra, travi a doppio T inferiormente alle briglie inferiori, ed a queste connesse solo in corrispondenza dei nodi della reticolare associata alla travata, in guisa che solo tali travi venissero ad essere sollecitate direttamente in corrispondenza dei piani di

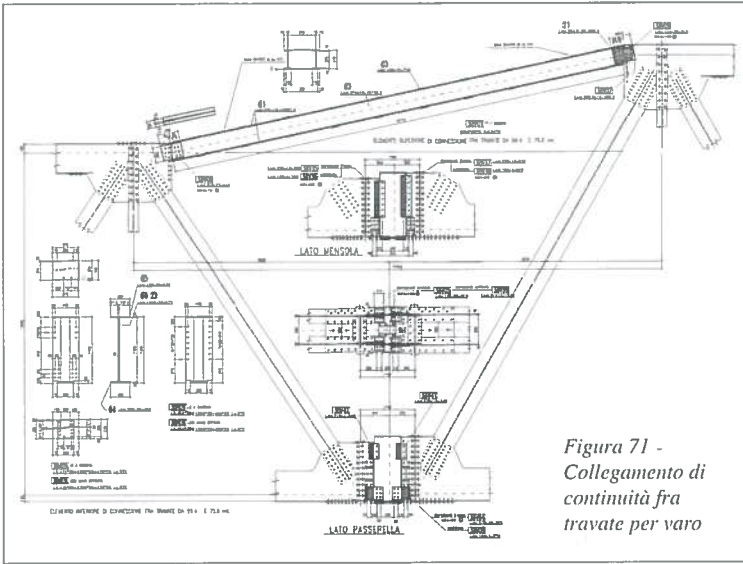
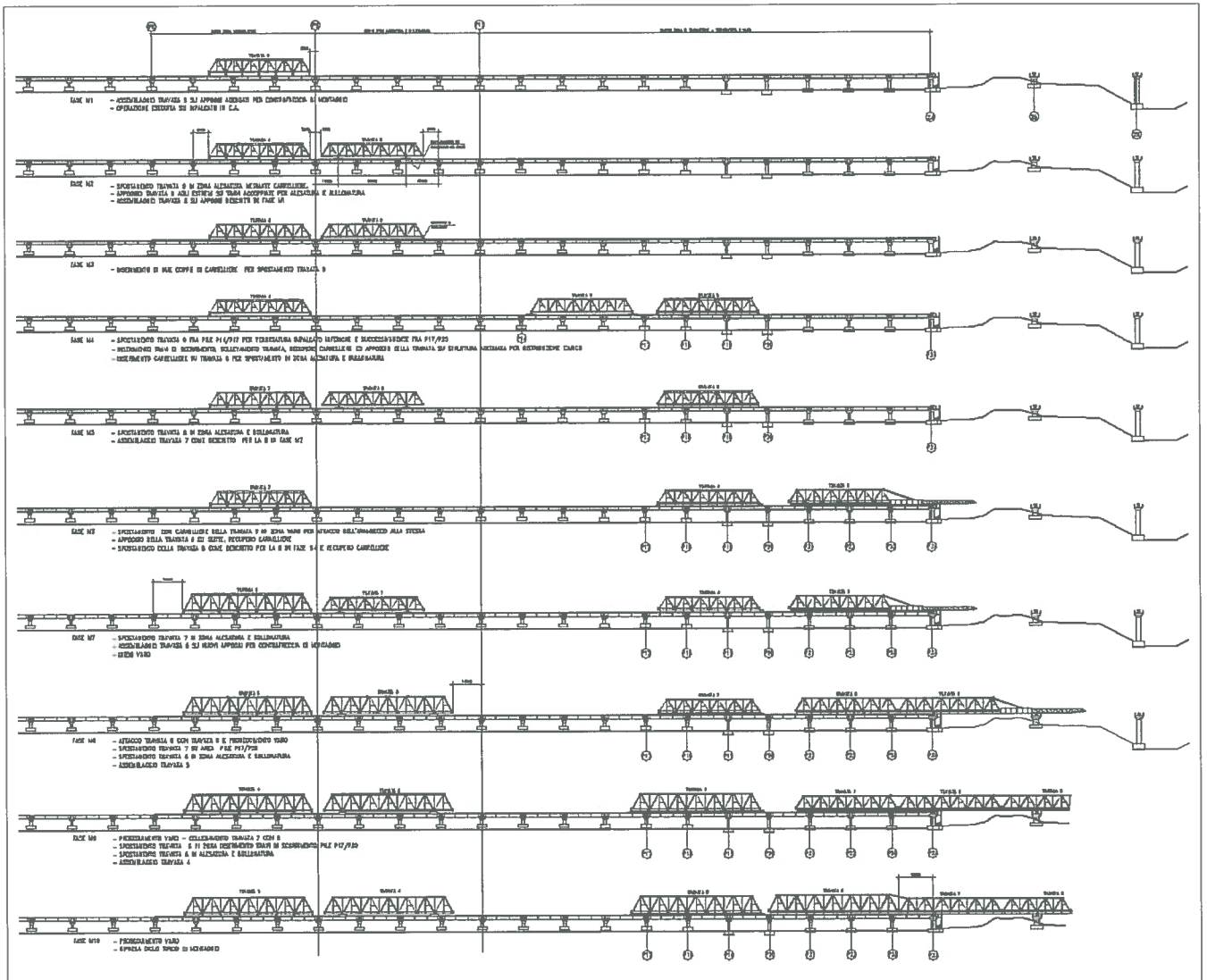


Figura 71 - Collegamento di continuità fra travate per varo

scorrimento (slitte) dalle reazioni vincolari d'appoggio determinate dalle travate in fase di varo; tali forze venivano trasferite quindi direttamente ai nodi delle travi reticolari costituenti il ponte (figura 75). L'analisi statica delle fasi di varo ha richiesto lo studio di un considerevole numero di modelli strutturali (figura 73) in considerazione della geometria del treno di travate in varo, diversa per ciascuna fa-

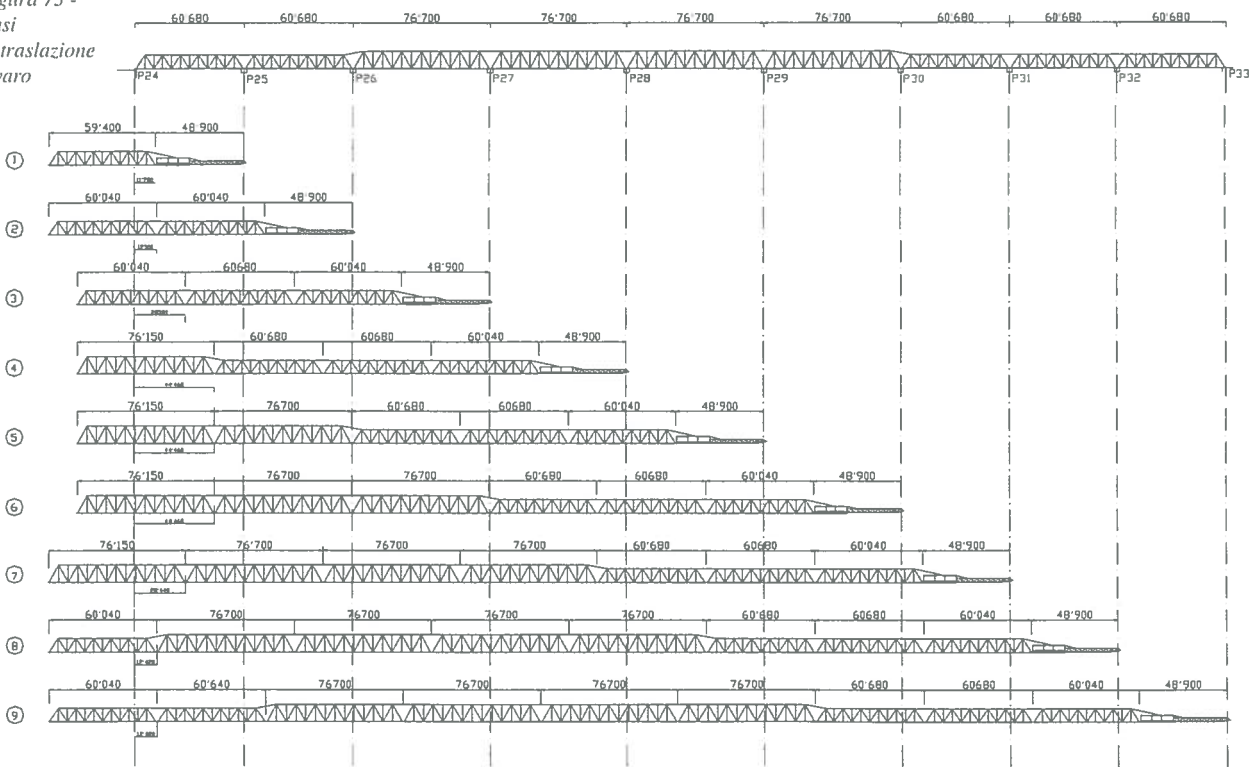
Figura 72 - Fasi di traslazione e varo



se di avanzamento, così come il numero dei vincoli (verticali) costituiti dalle slitte di scorrimento. Per ciascuna fase di avanzamento si sono valutati i parametri massimi di sollecitazione, per ciascuna diversa sezione di asta, si sono determinate le reazioni massime per ciascuna slitta e, in corrispondenza del massimo sbalzo per ciascun avanzamento "significativo, la freccia massima della punta dell'avambecco. Per la valutazione delle sollecitazioni nell'avambecco si è analizzato un "modello spaziale" (figura 74), che meglio coglie tutte le problematiche qui di interesse. Nelle analisi statiche svolte si è anche valutata la effettiva geometria (contofreccia travate, profilo intradosso avambecco) che la struttura in varo assume nelle varie condizioni di avanzamento. La problematica relativa alle contofreccie non è banale quando si pensi che le campate non sono tutte di luce uguale e, per contro, le travate sono dotate di elevata rigidezza flessionale. La soluzione alla fine adottata è stata quella di compensare le contofreccie disponendo le sottotravi di varo in modo tale da individuare una superficie piana per l'intera fase di varo, disponendo in corrispondenza dei nodi ai quali dette travi erano vincolate tronchetti di spessore opportunamente variabile. Le fasi principali di varo (figura 72) sono state le seguenti:

- posizionamento, con traslazione su carrelli, della

Figura 73 -
Fasi
di traslazione
e varo



- prima travata in area di montaggio delle sotto travi di varo (a monte della pila-spalla di lancio, sull'impalcato in c.a.p.);
- montaggio delle sotto travi ed inserimento delle slitte di scorrimento sopra all'impalcato in c.a.p., onde consentire l'avanzamento in varo della campata;
- montaggio dell'avambecco e suo collegamento alla prima travata, pronta al varo, in area posteriore alla pila-spalla di lancio (la prima travata da varare è quella che deve raggiungere a fine varo la pila-spalla di arrivo);
- avanzamento del treno di varo, spinto da taglie di funi con argano elettrico disposto alla base della pila-spalla di lancio, carrucola mobile di rinvio, bozzello fisso ancorato in aggetto alla sommità della pila-spalla di lancio e bozzello mobile ancorato alla travata da varare;
- la prima fase di varo si conclude quando l'avambecco raggiunge a sbalzo la slitta della pila successiva e ivi va in appoggio, avanzando sino a liberare l'area posteriore alla pila-spalla per il collegamento della seconda travata alla prima;
- un avanzamento completo per le travate lunghe 59.4 m è appunto di pari lunghezza (per quelle da 75.6 m è, analogamente, pari alla lunghezza della travata); questo comporta due posizionamenti del bozzello mobile per non utilizzare taglie di funi eccessivamente lunghe;
- il procedimento descritto viene ripetuto per tante volte quante sono le travate, con gli ovvii adattamenti; le fasi si succedono con il trasferimento della travata successiva, il montaggio delle travi di scorrimento sotto le briglie inferiori, il collegamento alla travata appena varata, l'avanzamento in varo del treno di travi+avambecco, per una lunghezza pari all'ultima travata collegata (figura 76). Le slitte di scorrimento (figura 77) erano disposte

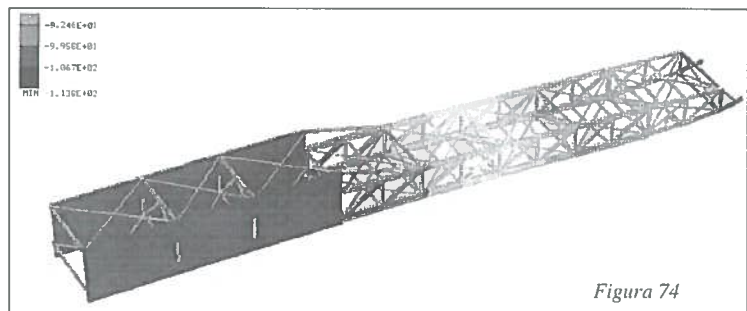


Figura 74

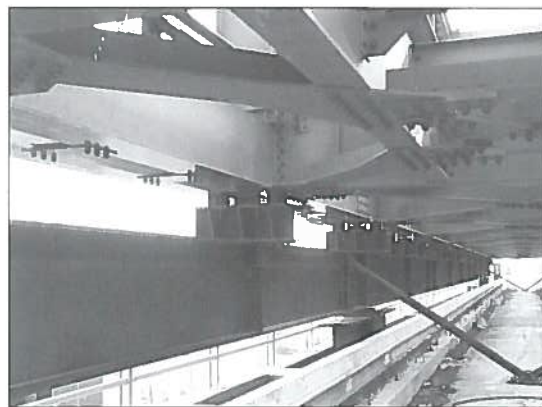


Figura 75 - Sotto travi di varo

alla sommità, in asse, delle pile, sia in golena che in alveo. Per il loro montaggio in opera si è ricorso a pontoni con gru (in alveo), ovvero ad autogrù per le pile della zona golenale. All'interno delle slitte, sulla sommità delle pile, erano disposte pile di calaggi e martinetti oleodinamici, onde consentire durante le operazioni di varo la manutenzione ai piani di scorrimento (PTFE) ed a varo ultimato il sollevamento delle travate e lo smontaggio delle slitte, per il successivo calaggio del ponte sui definitivi appoggi.

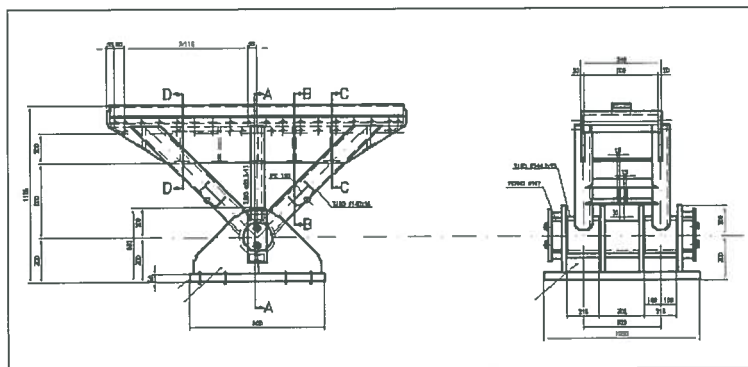
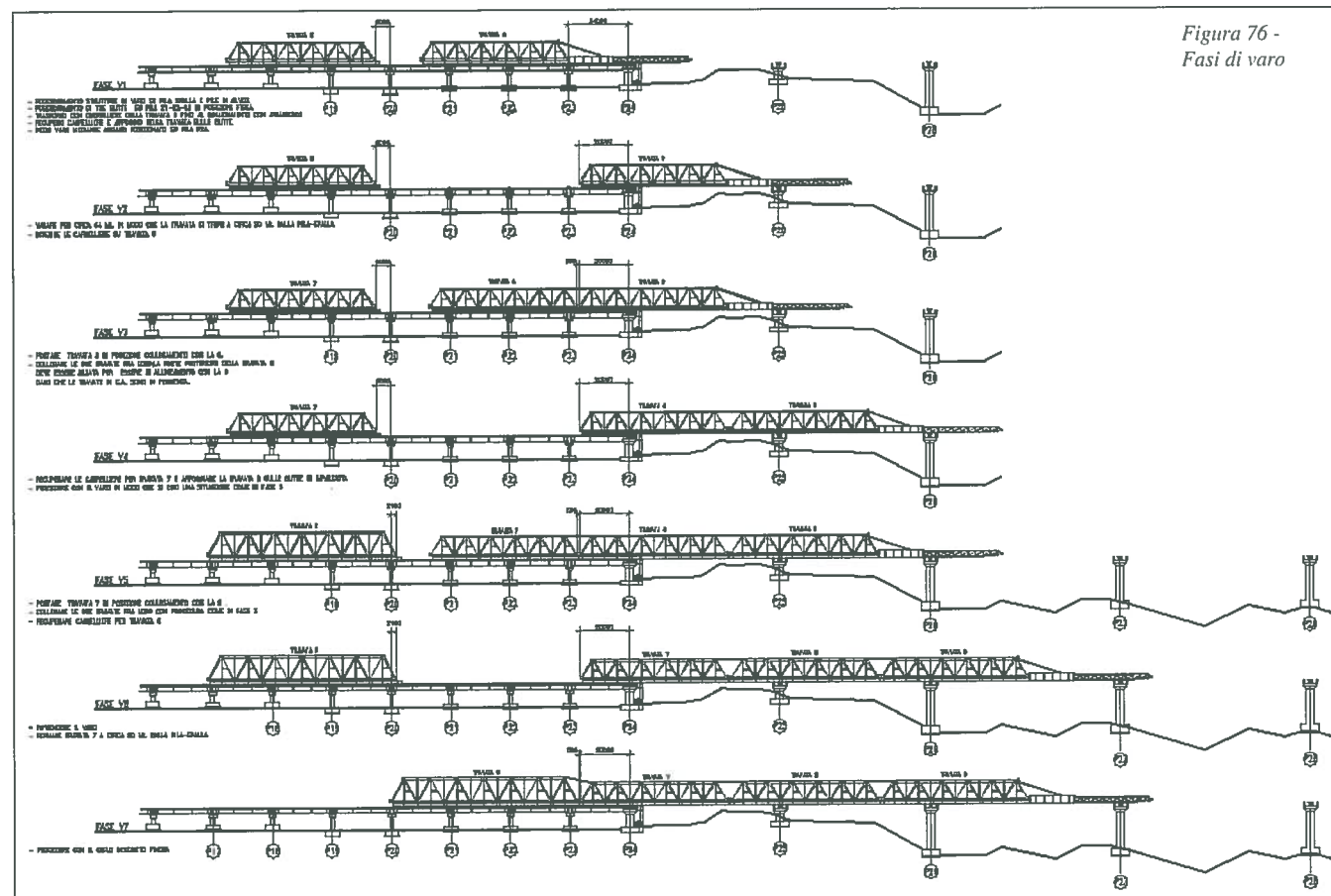


Figura 77 Assieme
slitta di
scorrimento

Come accennato le superfici di scorrimento erano costituite da lastre in PTFE montate sull'estradosso delle slitte oscillanti, che costituivano il pattino fisso mentre il pattino mobile era costituito dalla piattabanda inferiore delle sotto travi di varo. Per ridurre il coefficiente di attrito determinato dal particolare accoppiamento acciaio-PTFE le superfici venivano lubrificate con speciale grasso silconico spalmato con continuità sulla piattabanda della trave di scorrimento, a contatto con il pattino in PTFE; il pattino inoltre era di tipo nicchiato per contenere una certa quantità di grasso, così come la piattabanda presentava superficie solo sabbata per contenere anch'essa una certa quantità di grasso. La particolare attenzione che qui viene posta alle superfici di scorrimento è facilmente comprensibile quando si pensi che il finale treno in varo, costituito dalle 9 travate, dagli accessori, dalle sotto travi di varo e dall'avambecco superava il peso di 45000 kN; considerando un coefficiente di attrito medio, dinamico, pari a 6% si ottiene una forza ne-

cessaria all'avanzamento (che può riguardarsi come moto rettilineo uniforme su superficie orizzontale) pari a 2700 kN. Al momento dell'inizio del moto inoltre è da considerare un attrito di primo distacco sensibilmente superiore al valore medio, ancorché il PTFE garantisca in condizioni ideali differenze fra i due valori di attrito praticamente trascurabili; nelle condizioni pratiche qui descritte, anche in considerazione del fatto che il grasso silconico disposto tra pattino e piattabanda veniva espulso praticamente completamente dopo alcune ore dalla fermata delle operazioni di varo, a causa delle rilevanti pressioni di contatto (dell'ordine dei $30 \text{ N/mm}^2 = 30 \text{ MPa}$). Nell'ultima fase di varo si sono raggiunti valori della forza di avanzamento superiori a 3400 kN.

L'argano impiegato per l'avanzamento, disposto alla base della pila di lancio e con tiro rinviato a mezzo di un'apposita baia (figura 78), era in grado di fornire un tiro pari a 230 kN (tiro in "prima"); la taglia di funi era costituita da due bozzelli a 10 pulegge cadauno (figura 79) con il capo fisso collegato al bozzello mobile, determinando così un tiro in 21esima (21 tratti utili).

Per mantenere prossimo ad un angolo retto l'angolo formato dalla fune, rispetto all'asse del tamburo, che si dipanava dal tamburo dell'argano, veniva disposta la prima puleggia di rinvio del tipo flottante, così da realizzare un primo tratto di fune di lunghezza ideale pari allo sviluppo della complessiva distanza fra asse argano e bozzello mobile.

Le carrucole, in acciaio ad alta resistenza ricavate dal pieno per lavorazione meccanica, erano tutte montate su speciali cuscinetti a rotolamento onde minimizzare gli attriti e quindi le perdite di carico

nella fune. Tuttavia la fase finale di varo, quindi di massima sollecitazione, determinava valori del tiro nella fune, all'uscita dall'argano, dell'ordine di 200 kN (per la determinazione delle perdite di carico per attrito e quindi per il rendimento della trasmissione per mezzo di funi si è fatto riferimento all'opera fondamentale di Hellmut Ernst: DIE HEBEZEUGE ed. F. Vieweg u. Sohn, Braunschweig).

Si è accennato sopra al fatto che le slitte di scorrimento erano realizzate in acciaio, con struttura di supporto del pattino di tipo oscillante, con cerniera al piede del tipo a perno. Questa caratteristica costruttiva è determinata dalle seguenti due necessità:

- poter orientare il pattino con angolo di incidenza adeguato all'impegno con la punta dell'avambecco, che raggiunge la slitta dopo il superamento a sbalzo della campata n-esima e quindi con deformata elastica e rotazione dell'estremità (punta dell'avambecco) non trascurabile; al momento dell'impegno della slitta da parte dell'avambecco segue una fase di avanzamento durante la quale l'avambecco recupera la freccia elastica, "risalendo" proprio grazie al variabile angolo assunto dalla slitta medesima ed alla geometria della punta (figura 80);
- garantire che la reazione vincolare determinata dall'appoggio del treno di varo sulla slitta abbia un punto certo di passaggio, asse del perno della cerniera, e di conseguenza che la distribuzione del carico agente sul pattino della slitta abbia per risultante una forza ivi passante.

La seconda delle condizioni sopra richiamate, nel caso di slitta e trave di scorrimento schematizzabili come corpi indeformabili e privi di imperfezioni geometriche, porterebbe come conseguenza (trascurando l'attrito durante il moto) una distribuzione uniforme della pressione sul pattino di scorrimento, condizione questa ideale per il migliore funzionamento nelle fasi di varo.

È evidente che queste condizioni non si possono praticamente raggiungere ma ad esse ci si può avvicinare in particolare per quanto riguarda una distribuzione delle pressioni che risenta poco delle imperfezioni geometriche e delle deformazioni elastiche delle superfici a contatto.

Nel progetto esaminato si è fatto ricorso essenzialmente a due accorgimenti:

- realizzare sotto travi di varo dotate di elevata rigidità flessionale, comparata alla luce di calcolo (pari all'interasse dei nodi della travata reticolare);
- interporre fra pattino in PTFE e corpo in acciaio della parte oscillante della slitta (riguardabile come solido praticamente indeformabile) un elemento a modulo elastico (non lineare) convenientemente ridotto e di dimensioni opportune tale da assumere la funzione di "molla non lineare" di supporto del pattino medesimo; a questo fine si è individuato in una speciale essenza di legno dal nome comune di azobè il materiale più adatto.

La messa a punto del procedimento costruttivo dei pattini in PTFE abbinati al legno in Azobè ha richiesto un lungo periodo di prove sperimentali, presso il laboratorio dello stabilimento di carpenteria metallica, che qui non è il caso descrivere.

Altra problematica affrontata e risolta in modo ori-

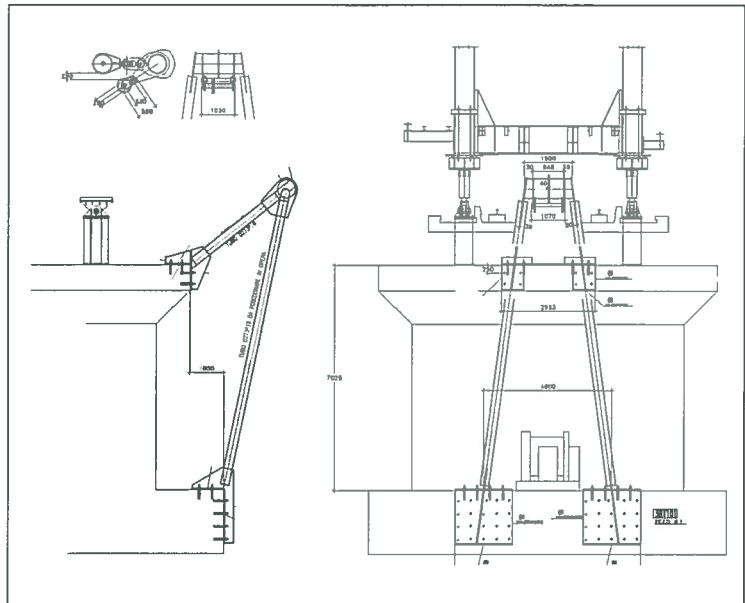


Figura 78 - Baia di traino

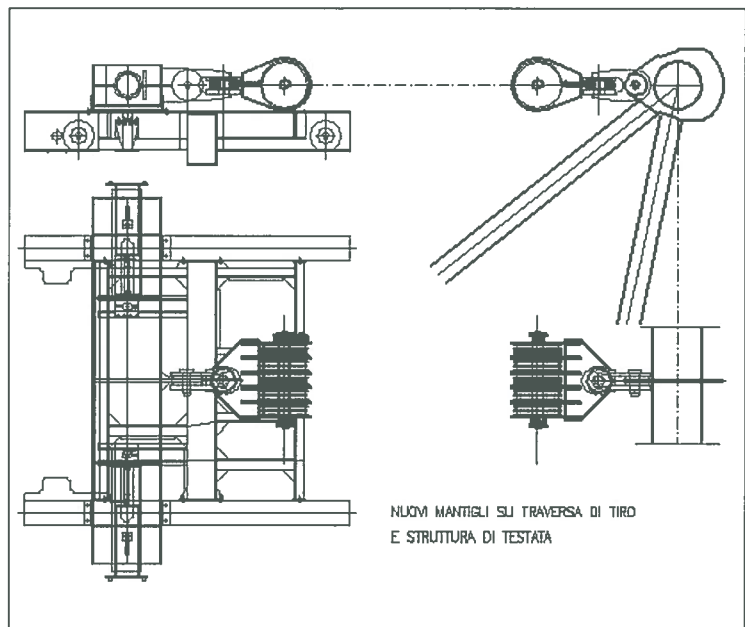


Figura 79 - Mantiglio di traino

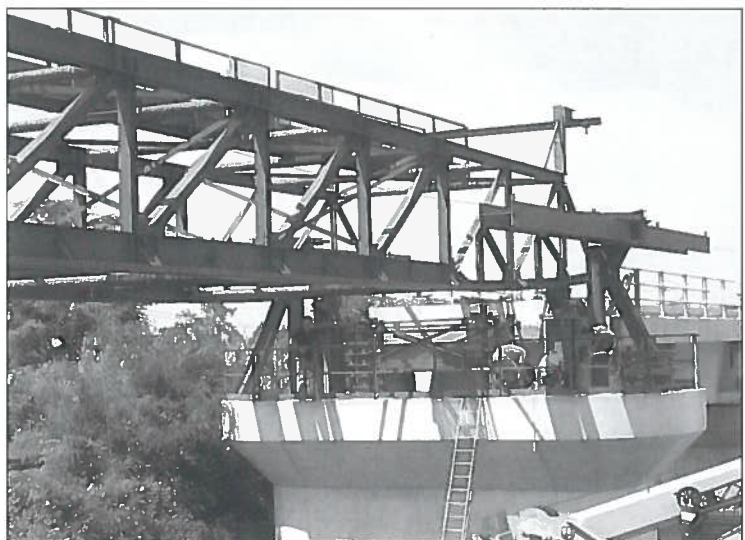


Figura 80 - Avambecco su slitta

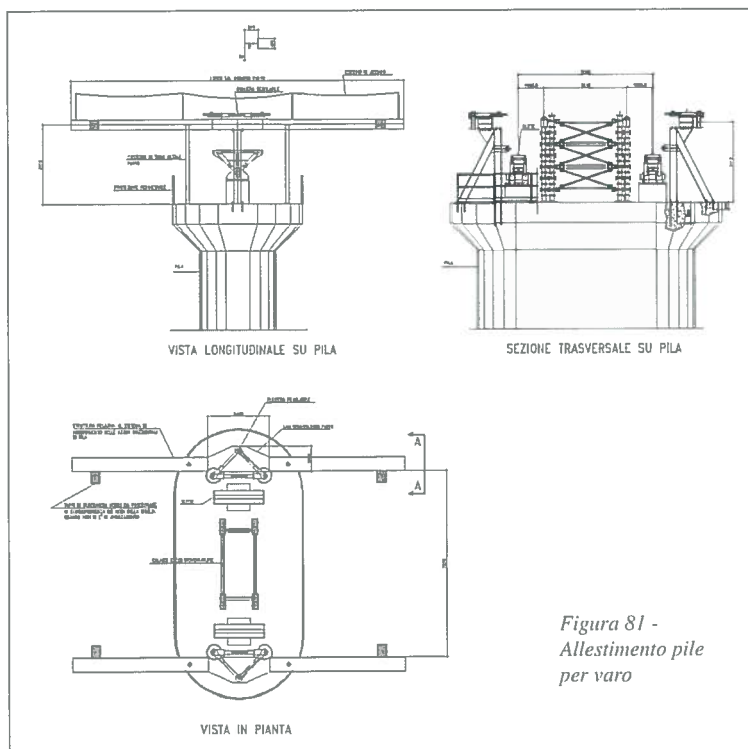


Figura 81 -
Allestimento pile
per varo

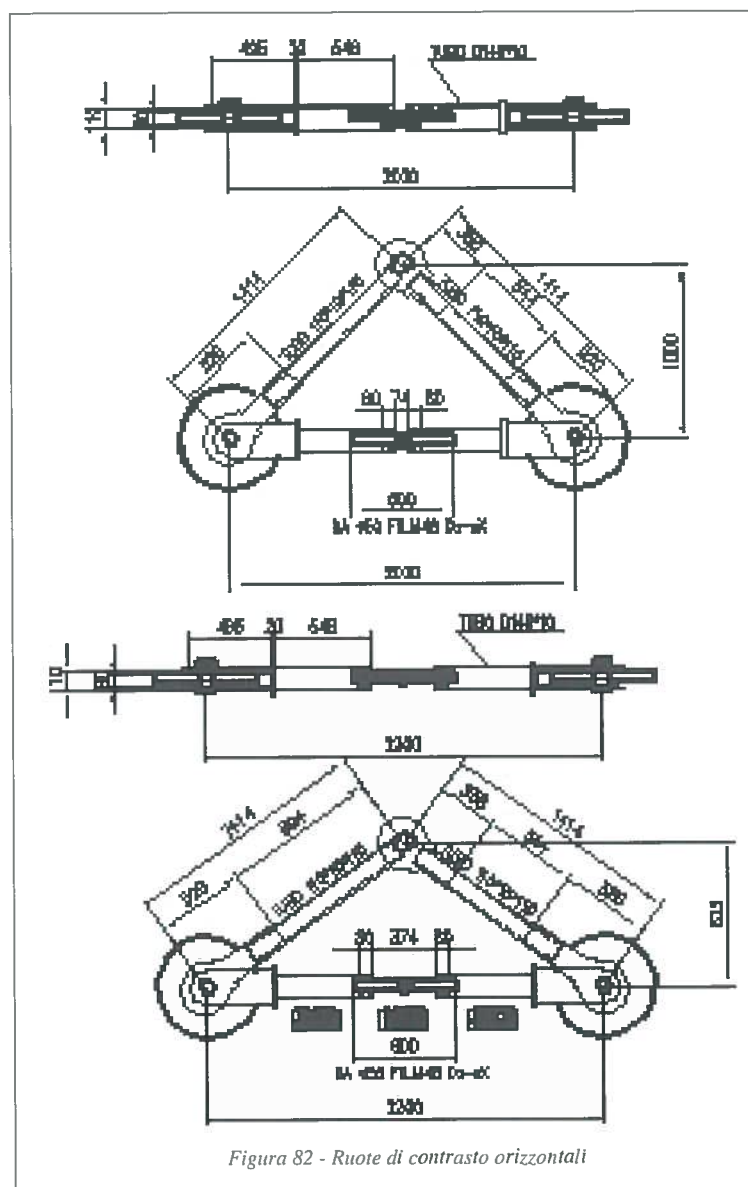


Figura 82 - Ruote di contrasto orizzontali



Figura 83 - Ruote di contrasto impegnate

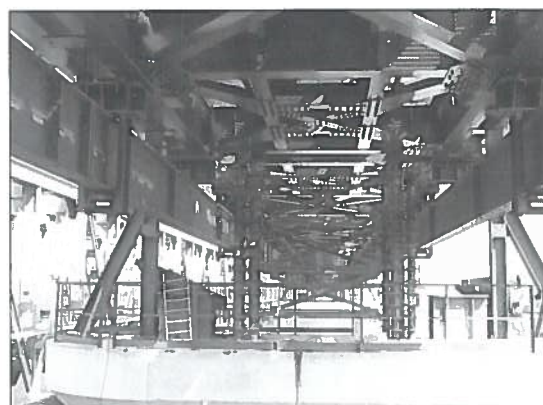


Figura 84 - Sollevamento travate



Figura 85 - Travi di contrasto orizzontali

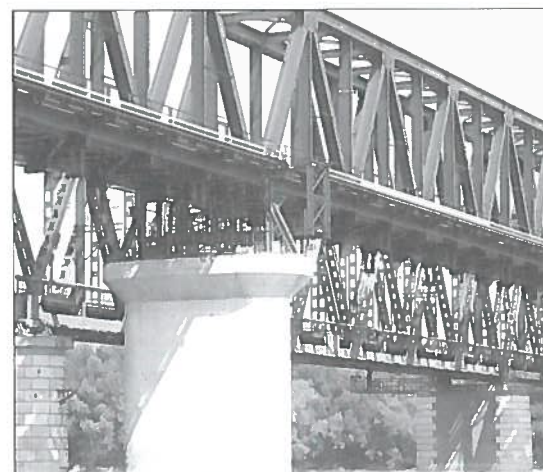


Figura 86 - Camaggio ponte

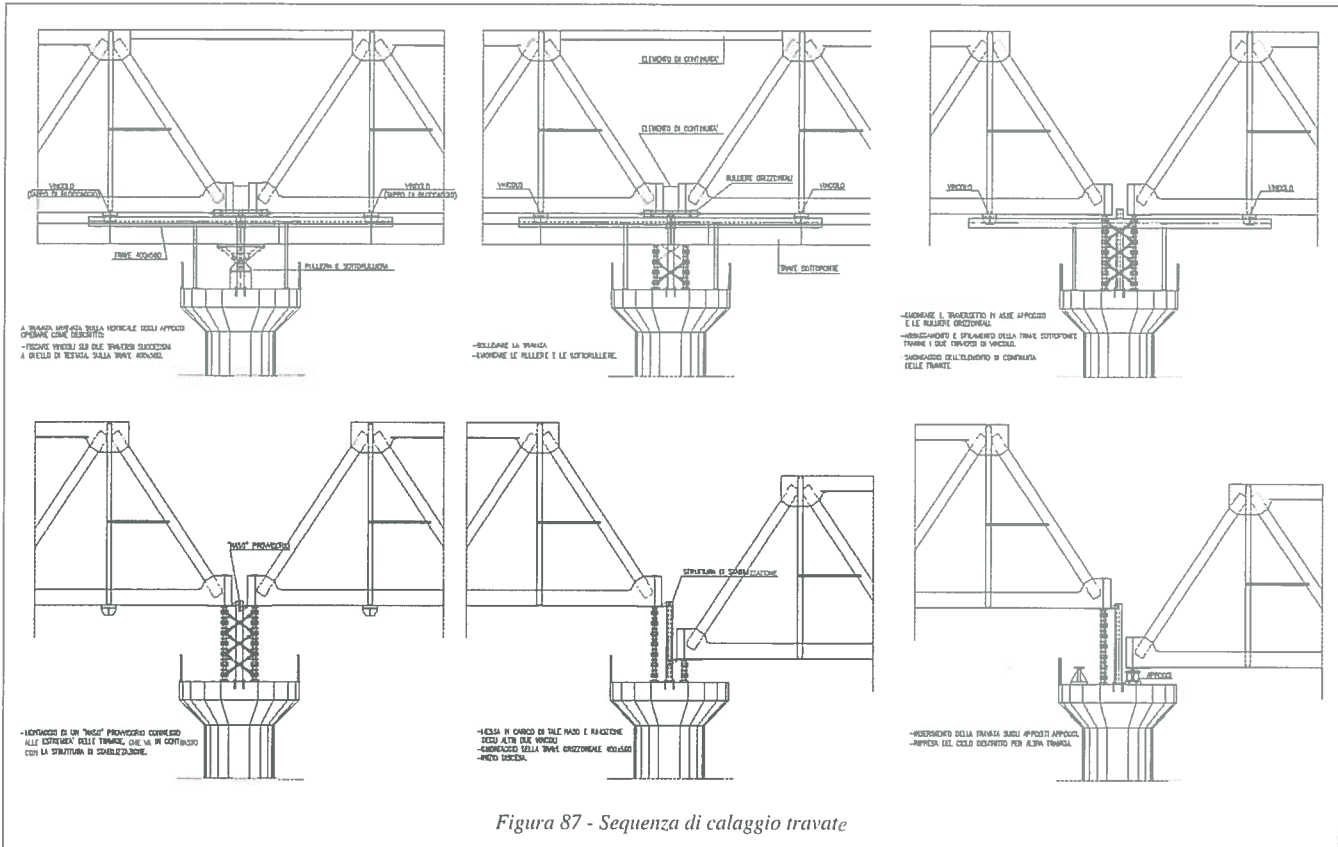


Figura 87 - Sequenza di calaggio travate

ginale ed inusuale rispetto ad altre tipologie di varo, è quella relativa alla necessità di garantire un adeguato vincolo orizzontale sia durante il varo vero e proprio sia nelle fasi di attesa fra una fase di avanzamento e la successiva (figura 81).

È subito da considerare che è stata condotta una accurata analisi per determinare la pressione cinetica da attribuire al vento essenzialmente per le seguenti fasi (oltre che naturalmente per quanto riguarda la pressione del vento da considerare in esercizio, anche se per questo caso la valutazione del parametro da assumere a riferimento era determinata direttamente dalla normativa FS):

- azione del vento durante le fasi di montaggio, con travate anche parzialmente assemblate, che potessero comportare periodi di permanenza significativamente lunghi e non altrimenti modificabili con interventi di messa in sicurezza rapidi;
- azione del vento durante fasi di montaggio o varo temporanee, che potessero essere interrotte in tempi ragionevolmente rapidi, con messa in sicurezza delle strutture quasi istantanea, indipendentemente dalla fase esecutiva.

Nella seconda casistica sono state fatte rientrare le fasi di varo durante le quali le travate erano in effettivo movimento, le fasi di traslazione su carrelli delle travate nelle varie posizioni di assemblaggio, le fasi di assemblaggio vero e proprio con sollevamento e movimento dei componenti, le fasi di calaggio delle travate intese come fasi effettive operative e non quelle durante le quali le travate si trovavano ferme.

Alla prima casistica viceversa sono state considerate appartenenti tutte le rimanenti fasi di assemblaggio e varo, ad esempio per il varo le fasi di sosta delle travate anche parzialmente varate.

Per poter considerare una significativa limitazione

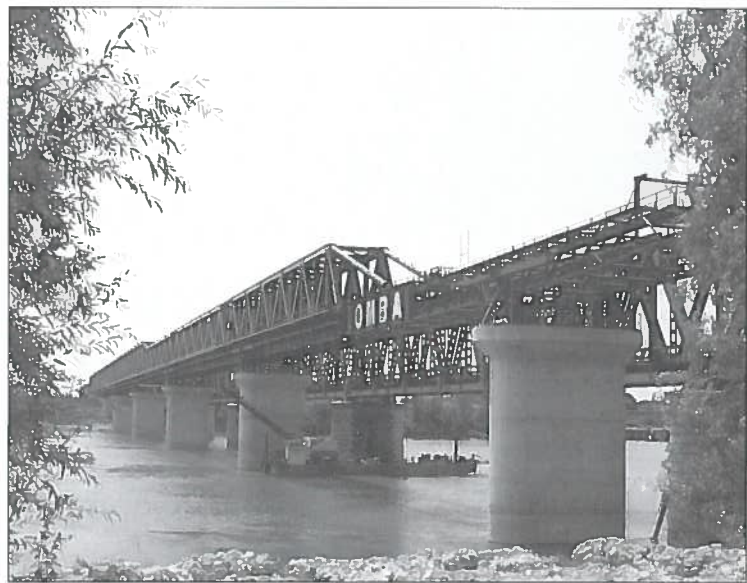


Figura 88 - Fasi finali di varo

della pressione cinetica del vento per le fasi di reale movimento (punto 2), ci si è riferiti ad una velocità limite operativa del vento pari a 40 km/h, ove tale velocità fosse stata superata le relative operazioni dovevano essere interrotte e si doveva procedere alla immediata messa in sicurezza del cantiere (operazione sempre possibile come detto).

Per quanto riguarda invece il vento agente nelle fasi richiamate al primo punto si è fatto riferimento ad una velocità pari a 82.2 km/h, corrispondente ad un tempo di ritorno ventennale.

Ritornando alla guida orizzontale in fase di avanzamento, questa era costituita da due distinti sistemi:

- uno costituito da coppie di ruote in acciaio per ciascun lato di ciascuna pila, dette ruote agivano direttamente a contrasto delle piattabande delle

briglie inferiori; per consentire la continuità di azione le coppie di ruote erano conformate a bilancino a larghezza variabile a comando meccanico, tale dispositivo si è reso necessario per compensare la variabilità in larghezza delle piattabande medesime (vento=40 km/h) (figure 82, 83);

- l'altro costituito da travi di contrasto orizzontali, disposte a ciascun lato delle pile, in similitudine alle ruote del punto precedente, dotate di riscontri scorrevoli in acciaio (rivestito in legno azobè), da posizionare in corrispondenza di due nodi consecutivi (distanti circa 5 m) onde agire sempre in corrispondenza di nodi del controvento inferiore (vento=82.8 km/h) (figura 85).

Nel caso in cui la velocità del vento avesse superato il valore di 40 km/h, in fase di avanzamento, il varo doveva essere interrotto, si dovevano inserire i riscontri orizzontali fissi e disimpegnare le ruote di guida orizzontali.

Ultimate le operazioni di varo tutte le travate si sono trovate in posizione planimetrica definitiva, praticamente in asse ai definitivi appoggi, ma ad una quota altimetrica superiore di circa 3 m, determinata dal vincolo del lancio in varo dall'estradosso dell'impalcato in c.a.p. (quindi ad una quota, a meno del ballast, pari a quella che a ponte finito deve assumere l'estradosso delle longherine).

Per portare le travate sopra ai definitivi appoggi si è proceduto con le seguenti fasi (figura 87):

- agendo da ciascuna pila, con l'impiego di pile provvisorie composte con calaggi (tronchetti di lunghezza adeguata uniti fra loro a flangia e tali da poter essere singolarmente manovrati a mano) adeguatamente fra loro controventati, con martinetti oleodinamici le travate, ancora fra loro solidarizzate, venivano sollevate in corrispondenza delle travi trasversali di estremità (esattamente nei punti previsti ed irrigiditi); si liberavano in questo modo le slitte e si disimpegnavano le sotto travi di varo (figura 84);
- venivano sfilate dall'estremità (pila-spalla di lancio) le sotto travi di varo, utilizzando speciali supporti a rullo e ancora le slitte disposte sulle pile (allentando i bulloni di sospensione delle

sotto travi le medesime andavano ad appoggiarsi ai rulli ed alle slitte e potevano quindi essere scollegate dal ponte);

- con l'ausilio di autogrù, anche su pontone, venivano smontate le slitte dalle pile e venivano smontate le aste di continuità disposte ad unione delle travate del ponte; al completamento di questa fase le travate risultavano fra loro indipendenti, nel finale schema statico di progetto, appoggiate proprio in corrispondenza dei punti previsti a progetto per il sollevamento delle travate in occasione dei lavori di manutenzione e/o sostituzione degli apparecchi d'appoggio;
- veniva completato il montaggio delle stilate provvisorie, essendo disponibile lo spazio in precedenza impegnato dalle slitte (figura 86);
- venivano posizionati sulla testa delle pile gli apparecchi di appoggio, in posizione decentrata onde non interferire con le attività di calaggio;
- agendo contemporaneamente dalle quattro estremità di ciascuna travata, si procedeva all'abbassamento ed all'appoggio sugli apparecchi d'appoggio definitivi, delle medesime travate, avendo avuto cura di sistemare gli appoggi in posizione corretta nella fase immediatamente precedente all'ultima sequenza di calaggio.

Gli apparecchi di appoggio venivano quindi definitivamente inghisati e si poteva procedere alla esecuzione delle opere di completamento dell'armamento ferroviario e dell'elettrificazione, nonché alle prove di carico per il collaudo statico delle travate, in tempo per consentire l'apertura al traffico ferroviario, con il passaggio del primo treno sul nuovo ponte il 15 settembre 2001.

NOTE.

[1] FS istruzioni N. I/SC/PS-OM/2298:

Sovraccarichi per il calcolo dei ponti ferroviari - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo. Ed aggiornata dic. 1997.

(Il testo delle istruzioni al quale qui ci si è riferiti è stato pubblicato nella rivista INGEGNERIA FERROVIARIA, anno LII, dicembre 1997, numero 12).

CARATTERISTICHE TECNICHE DEL PONTE IN ACCIAIO - DATI

Lunghezza complessiva del ponte:	.....610 m
Travate reticolari:	.....N. 9 di cui 4 da 75.6m e 5 da 59.4 m
Peso complessivo di acciaio strutturale:	.....3.300 t
Carichi di progetto:	.....treno teorico 1945 A, velocità convenzionale 100 km/h
Velocità di transito:	.....160/170/180 km/h nei tre ranghi
Peso per asse:	.....Categoria D4 (22.5 t/asse)
Sagoma ferroviaria:	.....Gabarit C (Autostrada viaggiante)
Progettazione:	.....Ferrovie dello Stato S.p.A. - Area Ingegneria e Costruzioni
Direzione Lavori:	.....Italferr S.p.A.
Progetto Esecutivo e Costruttivo:	.....Ufficio Tecnico OMBA
Progetto del Montaggio e Varo:	.....Ufficio Tecnico OMBA
Costruzione in Stabilimento, Assemblaggio e Varo:	.....OMBA S.p.A. Torri di Quartesolo (VI)
Collaudo Statico:	.....Prof. dr. Ing. Giancarlo Turrini

Dott. Ing. Alberto Miazzon - Direttore Tecnico OMBA S.p.A.