

Costruire sull'esistente non è mai un'impresa semplice, ma farlo senza interrompere il servizio dell'opera è ancora più complesso, soprattutto se questa è impiegata per il traffico ferroviario e autostradale di una delle maggiori arterie italiane. Il sovrappasso Novara-Seregno rappresenta uno strategico intervento all'interno dell'intero riassetto dell'autostrada che collega Milano e Torino ed è situata a poca distanza dal casello di Novara Est. La complessità dell'idea progettuale è figlia dell'angolo di 27° generato dall'intersezione tra le due vie di trasporto: è molto difficile realizzare un'interruzione di impalcato con travi parallele all'asse autostradale soprastante e inoltre le normative ferroviarie impongono l'uscita dalle gallerie con conformazione detta "in retto", ovvero tale che l'impronta della galleria sia rettangolare. In questi tipi di opera, poiché non si vuole interrompere il flusso veicolare, si realizzano solitamente fasi di avanzamento costruendo parti di impalcato adiacenti, fino ad arrivare a completamento. Per questo sovrappasso, è stato studiato dall'azienda Tecnostrutture srl un ingegnoso sistema: una trave reticolare in acciaio di 30 m di luce serve ad appendere provvisoriamente un impalcato di travi reticolari metalliche che sostengono il piano di transito veicolare e che diventano parte di una piastra realizzata in struttura mista acciaio-calcestruzzo nella fase finale. Inoltre la trave di sospensione è studiata per essere impiegata in posizioni multiple durante le fasi costruttive permettendo di avanzare con l'opera senza modificare il concetto costruttivo e di montaggio, semplificando così le operazioni di cantiere ed evitando gli imprevisti.

Building on existing structures is never an easy job, but doing it without interrupting the service of the structures is even more complex, especially if this is used for rail and motorway traffic of one of the biggest Italian arterial roads. The Novara-Seregno overpass is a strategic intervention within the entire modernisation of the motorway that connects Milan and Turin and is located near the Novara Est toll gate. The complexity of the project idea depends on the 27° angle defined by the intersection of the two roads, because it is difficult to cut the existing deck with beams parallel to the motorway axis above and because railway standards require that the exit from the tunnels has a perpendicular conformation, i.e. with a rectangular shape. These types of structures, since the vehicular flow cannot be stopped, are usually performed in steps, by constructing parts of adjacent decks, until completion. For this overpass, using an ingenious system designed by the company Tecnostrutture s.r.l., a 30-metres trussed steel beam is used to temporarily hang a trussed beam deck that supports the vehicle transit and becomes part of a mixed steel-concrete plate in the final stage. Moreover, the

Un innovativo metodo per realizzare un allargamento stradale su di un sovrappasso ferroviario

An Innovative method to build a motorway enlargement of a railway overpass

Alessandro Pieretto, Stefano China, Giuliana Somma, Eric Puntel

trussed beam is designed to be used in multiple positions during construction, allowing the building work to proceed without changing the construction and assembly concept, thus simplifying site operations and preventing any unforeseeable issues.

INTRODUZIONE

Il sovrappasso dell'autostrada Torino-Milano sulla rete Ferrovie Nord della linea Novara-Seregno, è posto al chilometro 87+954 dell'arteria autostradale Torino-Milano. Fa parte degli interventi di ammodernamento e di adeguamento del tratto autostradale da Torino a Novara ed è stato motivato dai cinque punti seguenti: la consistente valenza artistica del territorio caratterizzato da aree a forte produttività agricola; l'espansione del corridoio di trasporti che da Torino raggiunge Milano; il superato limite di capacità veicolare autostradale già misurato in 35 milioni di veicoli annui del 1995 che comportano livelli di servizio E ed F Intollerabili; la geometria dell'asse autostradale irregolare; la mancanza della corsia di emergenza.

Le varie opere costituenti l'ammodernamento autostradale sono intersecate da numerose linee ferroviarie, tra cui i binari di raccordo con la linea FNM Novara Seregno, costituenti "infrastruttura strategica" ai sensi di Legge. Attualmente la linea infatti presenta un binario unico ma è destinata ad un raddoppio di binari e ad un maggiore traffico perché

Tecnostrutture s.r.l.	Sovrappasso Novara-Seregno: innovativo metodo di realizzazione	Costruzioni Metalliche	Sett. Ott. 2016
-----------------------	--	------------------------	-----------------

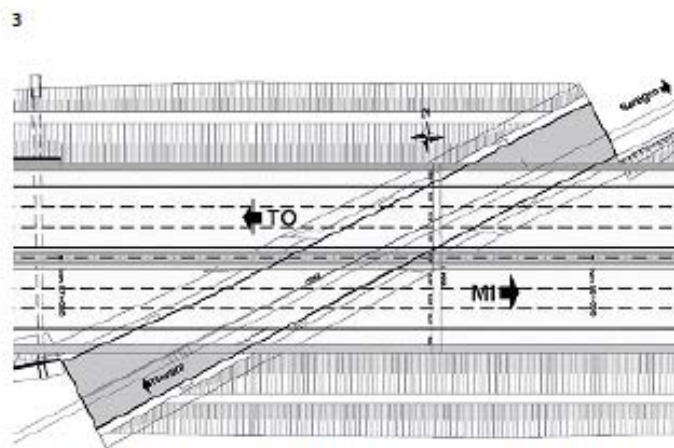
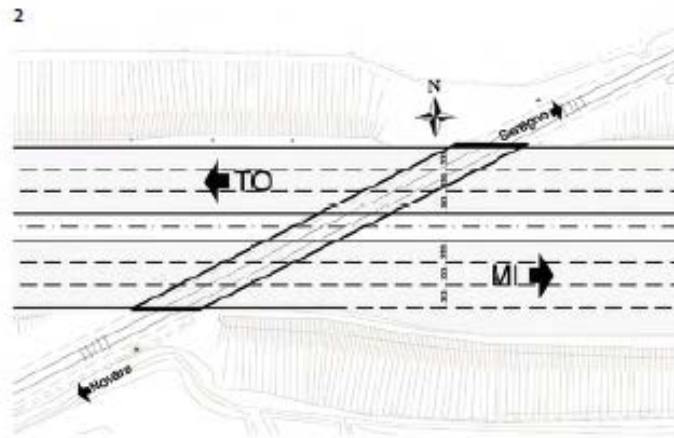


Fig. 1 - inquadramento territoriale dell'Opera 12. Fig. 2 - Sovrappasso, stato iniziale. Fig. 3 - Sovrappasso, stato di progetto finale

dovrà collegare l'aeroporto di Malpensa. Per l'Opera 12, ovvero il sovrappasso FNM Novara Seregno, sono stati stanziati circa 5 milioni di euro e i lavori hanno attraversato anche il periodo dell'Expo milanese, senza interferire con l'incremento del traffico. Criticità di questa intersezione è l'angolo di 27°. Il nuovo attraversamento comporta un leggero rialzamento della quota altimetrica autostradale, rispetto a quella iniziale e ciò per garantire un nuovo dislivello tra la piattaforma autostradale e l'attuale binario, sufficiente a consentire per il nuovo manufatto, della larghezza netta in retto di 11,00 m, il prescritto franco altimetrico di 6,00 m.

Il progetto dell'Opera 12 prevede dunque l'allargamento delle carreggiate dalle attuali tre da 3,33 m per senso di marcia, alle tre da 3,75 m più quella di emergenza. Di conseguenza la piattaforma stradale, dai 25 m iniziali di larghezza, passa a 36 m di progetto, mentre il sottopasso ferroviario passa dagli iniziali 54 m al 110 m di progetto, in quanto il tunnel deve essere realizzato con gli imbocchi in retto secondo prescrizioni ferroviarie.

Per la realizzazione dell'Opera 12 i progettisti del Gruppo SALC, dello Studio d'Appolonia e dell'ufficio tecnico di Tecnostrutture srl, hanno ideato un innovativo sistema per superare le difficoltà anticipate, ovvero quella di dover mantenere l'operatività dell'arteria veicolare e di affrontare un'intersezione con angolo così acuto con un sistema replicabile. L'articolo descrive le strutture metalliche che sono state adottate e le verifiche principali con relativi risultati, al fine di poter impiegare la tecnologia anche per altri lavori con simili caratteristiche.

ARCHITETTURA DI BASE E STRUTTURA DELL'OPERA METALLICA

L'Opera 12 si propone di modificare l'intersezione tra FNM Novara-Seregno e l'Autostrada Torino-Milano, all'altezza del casello di Novara Est (figura 1). Lo stato iniziale del cantiere è realizzato con un sovrappasso in calcestruzzo che nel tratto centrale è sostituito da un impalcato in acciaio. La larghezza e la geometria piano-altimetrica non garantiscono il rispet-

Tecnostrutture s.r.l.	Sovrappasso Novara-Seregno: innovativo metodo di realizzazione	Costruzioni Metalliche	Sett. Ott. 2016
-----------------------	--	------------------------	-----------------

to né delle normative ferroviarie (istruzione RFI A-44), né stradali (DM 5/11/2001 n.6792). Osservando la figura 2 in primo luogo si nota come l'imbocco del tunnel ferroviario non sia in retto (comunemente detto "a bocca di flauto") ma sia obliquo, inoltre è realizzato lasciando un franco netto verticale di 5,40 m nella zona centrale dove è presente la carpenteria metallica. Sempre nello stato iniziale, le due carreggiate stradali sono strette oltre il limite normativo, non sono presenti le corsie di emergenza e lo spartitraffico interno è troppo ristretto.

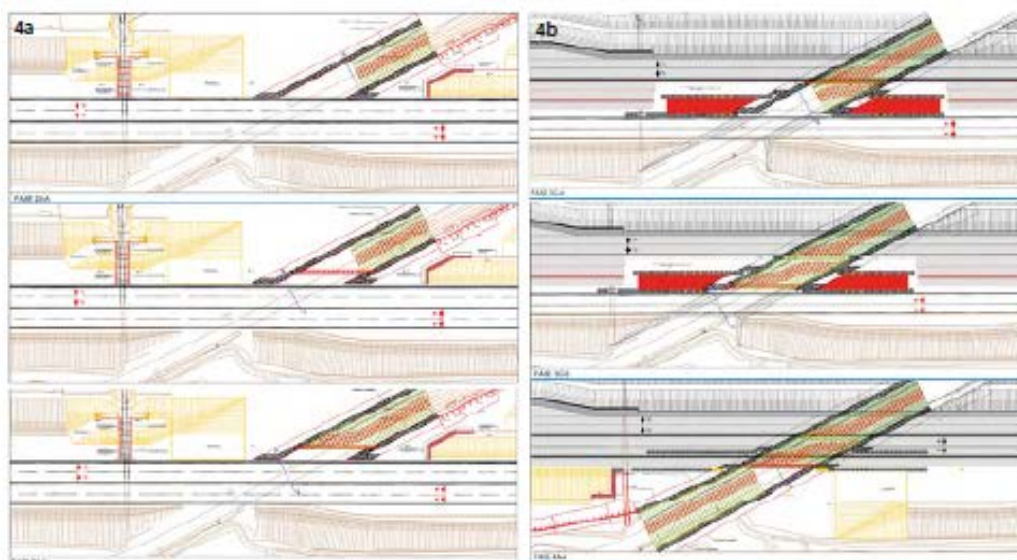
La figura 3 mostra invece la soluzione di progetto, con il tunnel realizzato correttamente e l'autostrada con corsie regolamentari. Infine l'altezza del tunnel è portata a 6,0 m, permettendo così l'uso desiderato della rete ferroviaria.

La soluzione tecnologica canonica per realizzare questo genere di lavoro è quella di realizzare l'impalcato impiegando delle travi autoportanti parallele all'asse autostradale; in questo caso però l'asse tra le direttrici delle vie è molto ristretto, circa 27°, pertanto, impiegando tale soluzione le travi sarebbero molto lunghe e poi non sarebbe possibile comple-

tare l'imbocco del tunnel in retto se non interrompendo la rete ferroviaria per realizzare strutture in calcestruzzo armato tradizionale o post-compresso. La soluzione scelta è stata quella di ordire delle travi autoportanti nella direzione perpendicolare all'asse del tunnel, con l'impiego di travi tipo BasicNPS® della gamma NPS® della ditta Tecnostrutture. Tali travi BasicNPS® sono realizzate con un piatto inferiore in acciaio Corten, e da un traliccio saldato superiormente che garantisce sia l'autoportanza iniziale che la portanza in fase di esercizio. L'avanzamento dei lavori avviene per fasi successive realizzando le spalle del tunnel in affianco alle precedenti dopo aver rimosso parte dell'impalcato autostradale e parte del sovrappasso. Nella figura 4 sono illustrate le fasi costruttive: si può notare la presenza di una struttura, parallela all'asse stradale, che divide l'impalcato interrotto in diagonale. Tale struttura è una trave reticolare metallica di 30 m ed è necessaria per sostenere le travi BasicNPS® che sono divise in due parti e che devono essere sostenute per le fasi di varo. La trave reticolare inoltre sostiene il carico da esse portato. Osservando le fasi di varo si nota che durante l'esecuzione

dei lavori, il traffico viene portato a fluire su due corsie per carreggiata, spostandosi nelle zone carrabili di fase in fase. Per esempio, nella fase 2A-2B-2C, viene realizzato il conchio di impalcato che sosterrà il traffico nelle fasi di cantiere 3. In questa fase però la trave reticolare deve sostenere sia i carichi di varo, che il traffico veicolare, senza generare spostamenti verticali eccessivi che impediscano poi l'accoppiamento delle travi BasicNPS® nelle fasi successive. Il controllo della quota altimetrica della soletta di impalcato avviene nella fase di montaggio, operando nell'unione metallica tra la trave reticolare e le travi BasicNPS® che vi sono appese (figura 5).

L'impalcato è realizzato con travi tipo BasicNPS® ossia delle travi reticolari di luce 11-14 m e 1000 mm di altezza, composte da un piatto inferiore di 1200 mm di larghezza in S355J0W corten e due file di tralicci multipli con anime e correnti in acciaio S355J0 di diametri variabili tra Ø30 e Ø42. La struttura è poi connessa alle spalle laterali larghe 1500 mm attraverso armatura lenta che garantisce i momenti d'incastro. Le travi BasicNPS® sono dimensionate a portare l'intero carico di esercizio, ma in ogni caso è disposta una



Figg. 4a e 4b - Fasi di varo

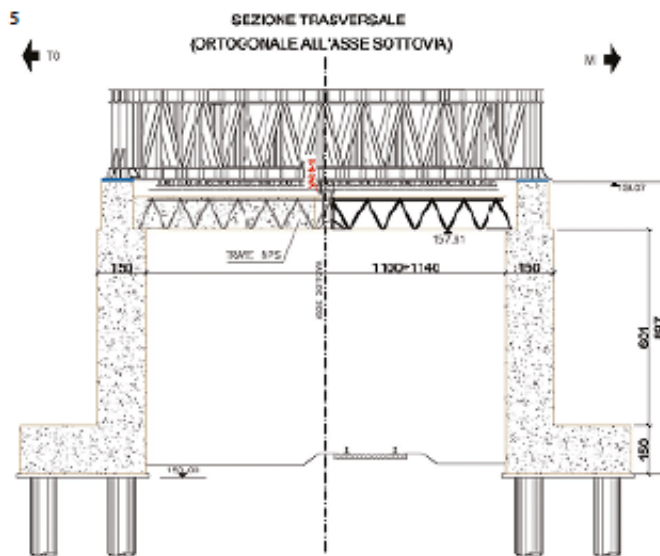
Tecnostrutture s.r.l.	Sovrappasso Novara-Seregno: innovativo metodo di realizzazione	Costruzioni Metalliche	Sett. Ott. 2016
-----------------------	---	------------------------	-----------------

rete in Ø12 superiore e inferiore con zone di infittimento, per distribuire gli sforzi tra le travi accostate e per controllare gli effetti piastra locali e le riprese di getto. Si puntualizza che piastre romboidali appoggiate su due lati opposti subiscono deformate e momenti ridotti rispetto a quelle di tipo rettangolare e questo va a vantaggio della soletta pensata nel progetto. La prima e l'ultima trave dell'impalcato sono dotate di una sponda metallica in acciaio corten per contenere il getto, invece le travi

di interruzione tra le fasi sono dotate di rete leggera per interrompere i getti e garantirne la ripresa di getto.

La trave reticolare tralicciata, essendo provvisoria, è prodotta in acciaio da carpenteria tradizionale non trattato. Le dimensioni sono di 28.400 mm di lunghezza, 2.800 mm di altezza e un peso di 64 ton. È realizzata con due tralicci affiancati e sfalsati che appoggiano la trave su un'area a forma parallelepipedo. I due tralicci sono composti di profili commerciali

HEM 360, HEB 240, HEA 160, HEM 240 interamente saldati tra loro. Nella trave sono stati inseriti numerosi dettagli per lo scarico degli sforzi e contro gli imbozzamenti locali come fazzoletti, angoli scantonati, nervature, etc. I due profili tralicciati componenti la trave sono uniti trasversalmente con degli elementi bullonati, smontabili ed eventualmente intercambiabili e a quelli inferiori sono poi saldati i pendini regolabili per fissare le travi BasicNPS® da appendere (figura 8).



PROGETTO STRUTTURALE TRAVI BASIC NPS®

Le travi BasicNPS® sono normalmente progettate nei confronti di un'autoportanza singola e di una sola fase di esercizio; questo perché le travi autoportanti, che siano reticolari o in c.a., precomprese o metalliche, prevedono una fase di flessione semplice in autoportanza e una di esercizio solitamente in situazione di incastro/continuità, dovuta alla presenza del getto integrativo (figura 6). Le travi BasicNPS® di questo impalcato sono per la maggior parte in luce alle spalle, ma 30 di queste sono giuntate provvisoriamente alla reticolare e presentano dunque due fasi provvisoriale, con anomali andamenti del momento flettente e delle deformate che sono stati controllati in fase di verifica, di montaggio e di collaudo. Osservando la figura 6 si capisce che, a parità di trave e carichi, questo sistema fornisce una

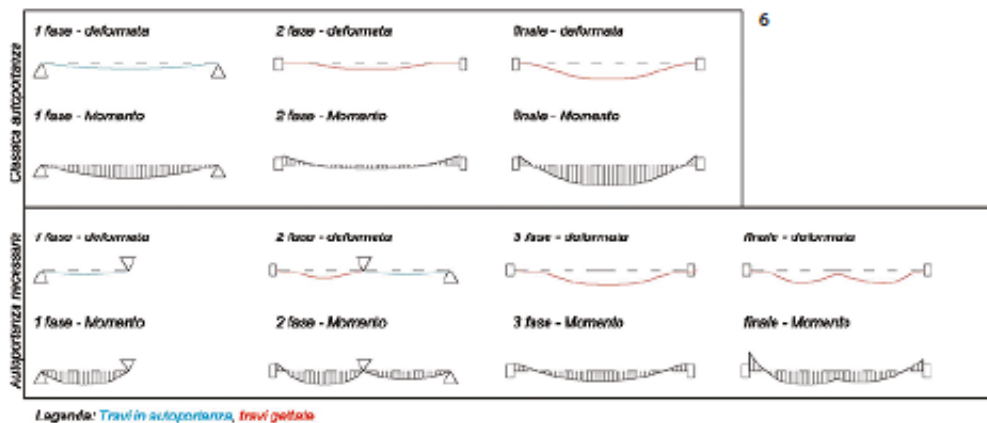


Fig. 5 - sezione impalcato nelle fasi di varo, nello stadio tra 2C e 3A. Fig. 6 - Confronto tra schemi di autoportanza

Tecnostutture s.r.l.	Sovrappasso Novara-Seregno: innovativo metodo di realizzazione	Costruzioni Metalliche	Sett. Ott. 2016
----------------------	---	------------------------	-----------------

minor deformata finale ma un maggior valore di momento su uno degli appoggi rispetto alla soluzione classica in autoportanza.

Oltre a quanto detto, bisogna considerare anche che le travi sono soggette a effetti di lunga durata e le deformate devono essere verificate secondo le normative ferroviarie:

- 1) la struttura deve presentare una contro-monta da determinare per la totalità dei permanenti, degli effetti lenti, e per il 25% dei carichi accidentali non dinamizzati;
- 2) sotto l'azione dei carichi accidentali di progetto incrementati dinamicamente nella Combinazione Rara, la freccia f deve essere $< L/700$;
- 3) la freccia dovuta ai soli carichi permanenti deve essere inferiore a $L/300$.

Le frecce attese di I e II fase, comprensive di effetti di ritiro e viscosità (considerato coefficiente di viscosità $\varphi = 2,2$), sono risultate di circa 30 mm per le travi da 14 m, di 15 mm per le travi da 11 m e di circa 2 mm per quelle giuntate, limiti che soddisfano abbondantemente le richieste restrittive delle norme ferroviarie. I progettisti hanno avuto però anche la possibilità di realizzare le travi BasicNPS® con una monta di costruzione e di poter posizionare quelle appese alle quote desiderate. Un elemento critico delle travi BasicNPS® giuntabili è l'elemento di connessione alla Trave Reticolare (figura 7). Questo elemento è connesso tramite saldatura alla trave BasicNPS® e fissato con delle barre filettate alla Trave Reticolare. L'aspetto più critico di tale elemento è che esso è molto rigido rispetto alla trave BasicNPS® composta dal traliccio di profili tondi e resta esposto senza protezione poiché l'interruzione di getto avviene, nel traliccio della trave BasicNPS®, circa un metro prima della giunzione. Per questo sono state condotte non solo analisi di sollecitazione per capire i percorsi e i limiti di tensione in fase di sospensione provvisoria e quelli in fase di esercizio a unione bullonata serrata, ma soprattutto analisi di buckling per controllare i luoghi di instabilità locale del dettaglio, imponendo un coefficiente di carico euleriano minimo di 4,0. Oltre a ciò, per tutto il dettaglio, in accordo alla NTC 2008 e alle Istruzioni fer-

roviarie A-44, sono state effettuate le verifiche a fatica per vita illimitata adottando i coefficienti richiesti dalle Istruzioni ferroviarie e il modello di carico di fatica n° 1 della NTC 2008, dove i carichi concentrati sono ridotti del 30% e quelli distribuiti sono ridotti del 70%.

PROGETTO STRUTTURALE TRAVE RETICOLARE

Per l'analisi della trave reticolare sono state realizzate due serie di modelli con due software distinti, Sismicad e Midas. Nel primo è stato realizzato uno dei due tralicci componenti la trave reticolare applicando i carichi dimezzati, corrispondenti però ad una situazione di carico con entrambi i lati nord e sud della reticolare caricati e transibili; nel secondo modello la struttura è stata modellata in maniera completa considerando lo sfalsamento e quindi gli effetti di svergolamento della struttura soggetta ai carichi completi. Dalle analisi di resistenza sono stati individuati i dettagli maggiormente sollecitati (risultati essere il corrente superiore e la giunzione a completa penetrazione nel corrente HEM 360 inferiore) e su tali dettagli sono state effettuate le verifiche di fatica a vita limitata (poiché in questo caso l'elemento è "provvisorio") secondo NTC 2008 e Istruzioni A-44 RFI (figura 8).

Nella verifica delle deformate attese dell'impalcato, si è considerato ovviamente anche che le travi BasicNPS® sono appese ad una struttura che è cedevole elasticamente nella direzione verticale e che pertanto ha abbassamenti diversi tra la fase di varo (trave reticolare con travi NPS® appese e getto in ca.), quella di esercizio parziale (impalcato realizzato e transibile su un lato e nessun carico sull'altro lato della trave reticolare) e quella di esercizio finale (impalcato realizzato e transibile su un lato e impalcato gettato sul lato opposto). Osservando le deformate verticali si è riscontrato uno spostamento verticale massimo di circa 35 mm in campata, mentre si è osservato un allungamento orizzontale longitudinale alle basi di 25 mm. Il primo valore è servito per calibrare le quote dei pendini delle travi BasicNPS®, mentre il secondo per determinare lo

spessore del neoprene strutturale di appoggio e il gioco relativo da lasciare nelle unioni metalliche ai quattro appoggi della trave reticolare. In concreto, fatte queste valutazioni, tutti i pendini sono stati posizionati a quote che seguivano l'inverso del profilo parabolico di abbassamento teorico della trave previsto per i carichi del getto e del manto stradale realizzato ai lati nord e sud della trave stessa. In questo modo, a impalcato terminato, tutto l'intradosso risulta complanare e orizzontale. Infine la trave reticolare ha mostrato una distorsione torsionale di 1,5 e 2,5 cm tra i lembi inferiore e superiore nelle combinazioni Quasi Permanente e SLU rispettivamente.

Considerato il carico SLU, si è effettuata un'analisi di buckling che ha evidenziato che l'intera trave reticolare ha effetti di instabilità globale se il valore del carico supera di 1,9 volte quello di progetto. Non sono stati evidenziati problemi di instabilità locale, che sono stati limitati dalla scelta di impiegare due tralicci paralleli interamente saldati e bullonati rigidamente tra loro. Infatti l'instabilità torsionale globale invece è importante per profili aperti, mentre quelli chiusi, anche se realizzati a traliccio, forniscono un'ottima resistenza torsionale.

CONSTRUZIONE, MONTAGGIO E COLLAUDO

Tutti gli elementi metallici sono stati marchiati CE secondo EN-1090, in Classe di Esecuzione EXC3, Grado di preparazione Superficie P1, Classe di Tolleranza Funzionale Classe 2. Particolare cura è stata posta nella trave reticolare e nei dettagli di sospensione ad essa. La trave reticolare è stata costruita per intero in stabilimento e trasportata in orizzontale (figura 9) fino al luogo di sollevamento dove è stata movimentata con due autogrù contemporaneamente, una da 200 ton e una da 350 ton. Il varo della trave reticolare, in entrambe le posizioni di esercizio, è stato immediato (20 minuti nel primo caso compresa rotazione e 4 nel secondo). In merito al montaggio delle travi BasicNPS® appese (figura 10) alla reticolare, al termine del getto di impalcato e successiva solidarizzazione, è stato necessario

Tecnostrutture s.r.l.	Sovrappasso Novara-Seregno: innovativo metodo di realizzazione	Costruzioni Metalliche	Sett. Ott. 2016
-----------------------	---	------------------------	-----------------

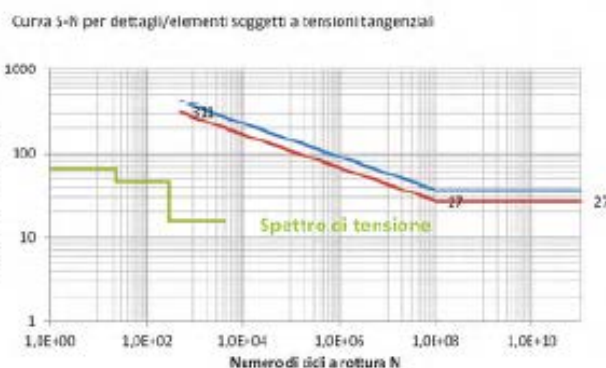
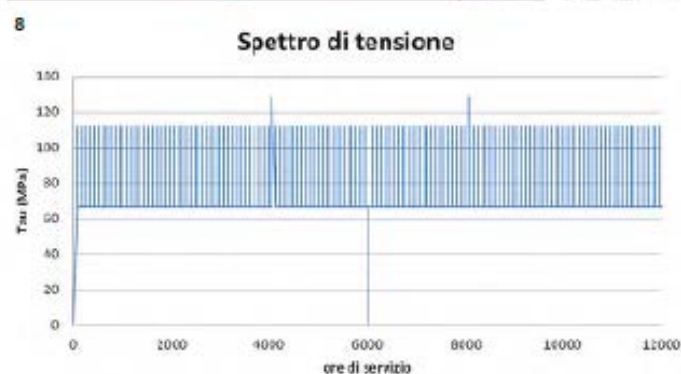
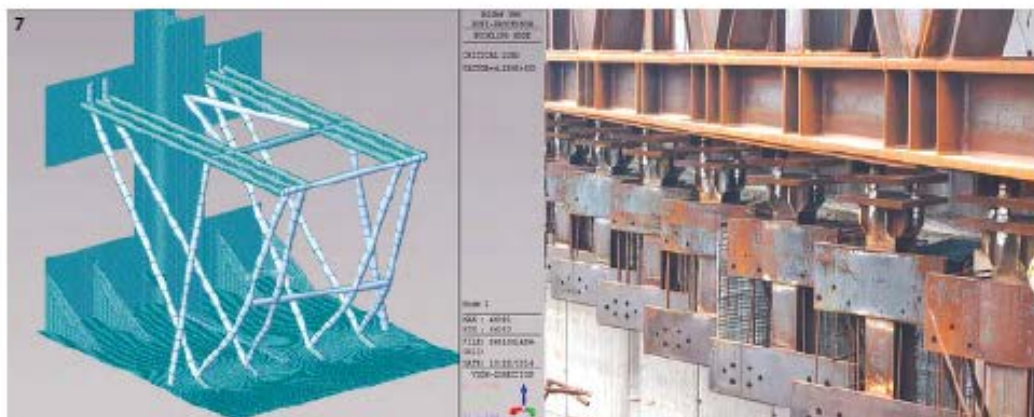


Fig. 7 - Pendino delle travi BasicNPS® giuntate. Fig. 8 - Spettro di tensione e verifica a fatica per la completa penetrazione del corrente inferiore della trave reticolare

controllare con rilievi topografici che le quote raggiunte fossero corrette e permettessero l'unione con le travi successive. Ciò ha confermato la bontà degli abbassamenti della trave reticolare che erano stati previsti con i

modelli. Per il varo di tutto l'impalcato sono stati impiegati 1 gruista e 2 operai montatori e ogni fase di varo è durata una notte, per permettere di accorciare i tempi di realizzazione e le interruzioni del traffico veicolare

autostradale. Per accelerare ulteriormente la funzionalità dell'opera inoltre sono stati usati calcestruzzi ad elevata resistenza C40/50 con additivi che dimezzassero i tempi di maturazione previsti nel progetto iniziale verificato con il C28/35.

A seguito del tempo di maturazione dei getti della soletta di impalcato, prima di ogni operazione di svaro e varo della trave reticolare da una posizione alla seguente, si sono effettuati i collaudi che hanno rilevato le misurazioni di freccia attesa nell'impalcato. Le misurazioni hanno evidenziato che l'abbassamento istantaneo a rilascio dalla reticolare è stato di circa 10 mm (figura 11) e che, sotto il carico di collaudo, le deformate delle travi BasicNPS® giuntate erano metà di quelle in luce per via dell'effetto del momento inverso in campata.

CONCLUSIONI

Grazie alla combinazione tra costruzioni metalliche pure e strutture miste come quelle della tecnologia NPS® Tecnostrutture, è stato possibile realizzare un'opera complessa e innovativa nella concezione strutturale. Si sarebbe certamente potuto realizzare la struttura con altri sistemi più tradizionali che solitamente prevedono un massiccio impiego di calcestruzzo in opera, sistemi di post-tensione e interruzioni elevate delle linee di trasporto. Ma il sistema adottato, nonostante le incognite iniziali, è stato voluto sin dal principio per la sua semplicità e per la possibilità di recuperare molto tempo,

Tecnostrutture s.r.l.	Sovrappasso Novara-Seregno: innovativo metodo di realizzazione	Costruzioni Metalliche	Sett. Ott. 2016
-----------------------	---	------------------------	-----------------

necessario a causa della prevista Interruzione dei lavori durante il periodo dell'Expo Milanese. La soluzione è fortemente adatta per intersezioni varie con angoli ristretti e può essere ancora migliorata per far fronte ad altre casistiche di irregolarità come salti di quota, pendenze di impalcato, etc. L'opera strutturale rappresenta dunque un'alternativa interessante perché evita di impiegare travi di impalcato eccessivamente lunghe e costose, evita la difficile analisi di compatibilità delle deformate e ritiri differenziali tra le parti di impalcato consecutive e permette di mantenere le vie di trasporto sempre fruibili.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la dott.ssa Giulia Daniele, l'ing Stefano Rossi di SALC e ing. Simone della Casagrande dello studio d'Appolonia per le informazioni e il contributo forniti.

Ing. Pieretto Alessandro

Ph.D. – Ingegnere Civile Tecnostrutture srl

Ing. Stefano China

Ingegnere Civile Direttore Tecnico Tecnostrutture srl

Prof.ssa Giuliana Somma

Ph.D. – Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura Università degli Studi di Udine

Prof. Eric Puntel

Ph.D. – Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura Università degli Studi di Udine

CREDITS

Progettista Generale: Ing Enrico Ghislandi - SINA spa

Progettista delle Strutture: Ing Andrea del Grosso - Studio d'Appolonia

Progettista NPS: Ing Alessandro Pieretto - Tecnostrutture

Direttore Lavori: Ing Stefano Miceli - SINAspa

Collaudatore: Ing Paolo Ruggeri - Enarch srl
Impresa esecutrice: SALC spa

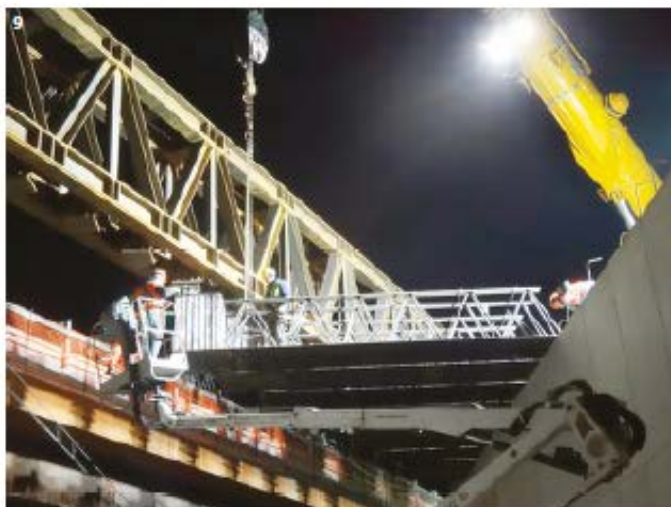


Fig. 9 - Montaggio travi basic NPS[®] appese. Fig. 10 - Trasporto trave reticolare. Fig. 11 - Sgancio delle travi BasicNPS[®] dalla reticolare e relativo abbassamento

Tecnostrutture s.r.l.	Sovrappasso Novara-Seregno: innovativo metodo di realizzazione	Costruzioni Metalliche	Sett. Ott. 2016
-----------------------	---	------------------------	-----------------