

# IL VIADOTTO DI SCAVALCO DELLA FERROVIA CASARSA-PORTOGRUARO

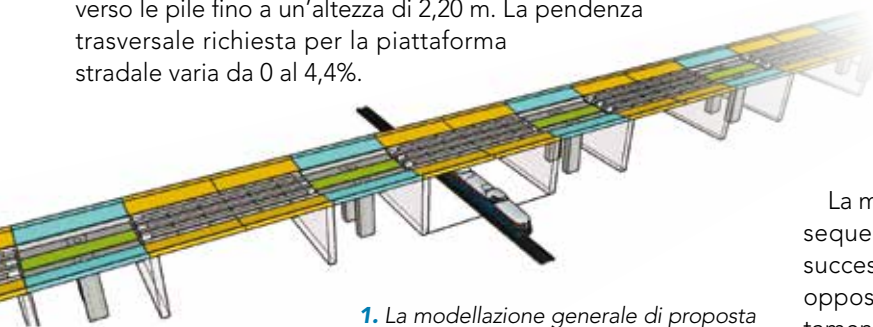
**PREFABBRICAZIONE SU MISURA: UNA SOLUZIONE "MISTA" NEL RISPETTO DI MATERIALI E GEOMETRIA**

*Il viadotto di San Vito al Tagliamento a fine lavori*

**L**ing. Michele Defina, che collabora con PAC Srl dal 2006, racconta le ragioni e il percorso di studio dietro la soluzione sviluppata appositamente per l'impalcato di un nuovo viadotto a San Vito al Tagliamento, commissionato dalle Imprese Adriastrade Srl e Coletto Srl, esecutrici dell'appalto per Friuli Venezia Giulia Strade SpA.

La nuova circonvallazione di San Vito al Tagliamento, proposta da Friuli Venezia Giulia Strade SpA e realizzata dalle Imprese Adriastrade Srl e Coletto Srl, supera la linea ferroviaria Casarsa-Portogruaro con un viadotto a sette campate per una lunghezza complessiva di 250 m, con un tracciato planimetrico in curva variabile con raggio minimo di 900 m e raccordi in clotoide.

Il progetto generale dell'asse stradale è stato sviluppato dalla Società di Ingegneria E-Farm di Vigonza (PD). La larghezza dell'impalcato varia da un minimo di 14,60 m ad un massimo di 15,10 m e comprende due corsie da 3,75 m, banchine laterali variabili da un minimo di 1,50 m, marciapiedi e cordoli di larghezza complessiva di 2,05 m. Lo spessore dell'impalcato è di 1,20 m per le campate correnti e 1,30 m per quelle di riva e aumenta gradualmente verso le pile fino a un'altezza di 2,20 m. La pendenza trasversale richiesta per la piattaforma stradale varia da 0 al 4,4%.



1. La modellazione generale di proposta



2. L'elemento a vasca realizzato in stabilimento per il getto in opera dei pulvini

La tipologia del manufatto, stabilita dal progetto di appalto, presenta un impalcato a sezione piena continua, in appoggio su pile e spalle, in calcestruzzo armato precompresso, composto da cinque campate intermedie da 37 m e campate di riva da 32 m, oltre a 60 cm di retrotrave verso i paraghiaia di spalla.

La modalità esecutiva del progetto di appalto prevedeva una sequenza di getti in opera e di post-tensione di campate in successione obbligatoria, a partire da una spalla verso la spalla opposta. Tale modalità non poteva però garantire il completamento della campata centrale sopra la ferrovia nella finestra

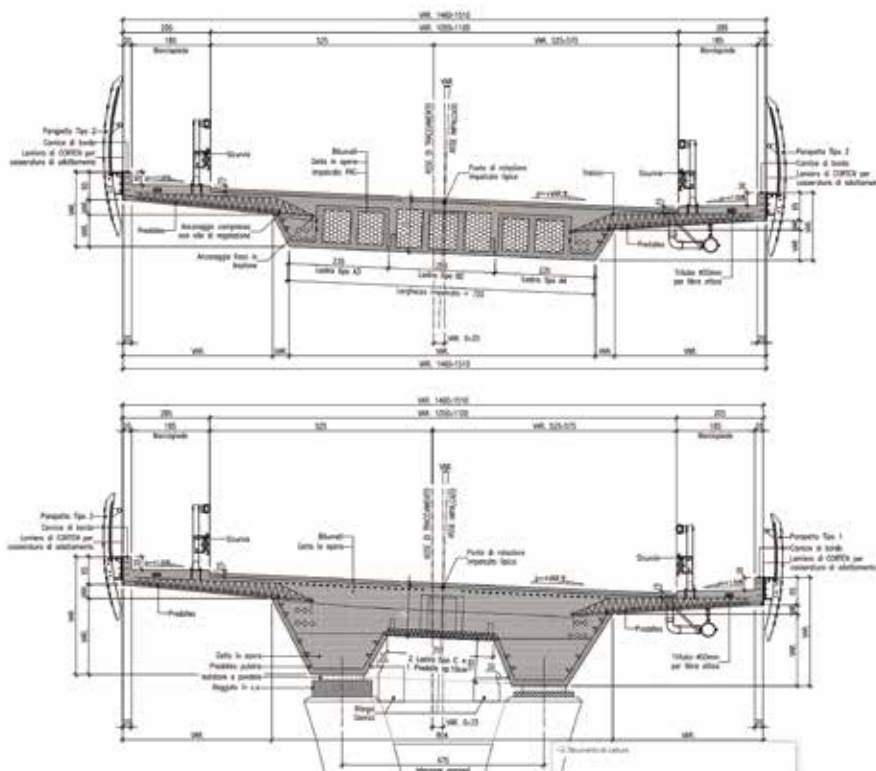
temporale definita preventivamente da RFI, dato che non era possibile stabilire una data precisa di partenza dei lavori, né tantomeno garantire una prosecuzione regolare della sequenza dei getti e delle post-tensioni senza interruzioni, al fine di scavalcare la ferrovia nei tempi previsti.

Si è così presentata la necessità di studiare una variante migliorativa che, conservando la geometria e i materiali previsti nel progetto d'appalto sviluppato da NET Engineering SpA, con ricorso alla prefabbricazione, fosse in grado di rendere indipendenti tra loro i montaggi delle singole campate e di ridurre i tempi di costruzione, in modo da garantire il rispetto della data di consegna e il completamento della campata sulla ferrovia nei tempi predeterminati.

Offrire alle Imprese e ai Progettisti la miglior soluzione possibile sul piano tecnico ed economico, coniugando la costruzione di grandi elementi prefabbricati in stabilimento con il completamento in opera tramite getti integrativi e post-tensione: questo è l'ambito in cui si muove abitualmente PAC Prefabbricati Srl, accogliendo ogni lavoro come una sfida unica, una sorta di abito costruttivo da confezionare su misura, nel quale mettere a frutto un'attività di ricerca incessante e la lunga esperienza accumulata nell'ambito degli impalcati in calcestruzzo. Il viadotto di San Vito al Tagliamento a scavalco della ferrovia costituisce uno dei frutti più recenti di questa filosofia.

Lo studio del problema, affrontato dai Tecnici della PAC Srl di Fara Vicentino (VI), ha portato a proporre l'esecuzione di un viadotto mediante casseri prefabbricati e precompressi in stabilimento e completati con getti in opera e con una post-tensione finale per la realizzazione della continuità strutturale.

Nello stabilimento PAC sono stati realizzati gli elementi rettilinei di campata prefabbricati e precompressi a trefoli aderenti

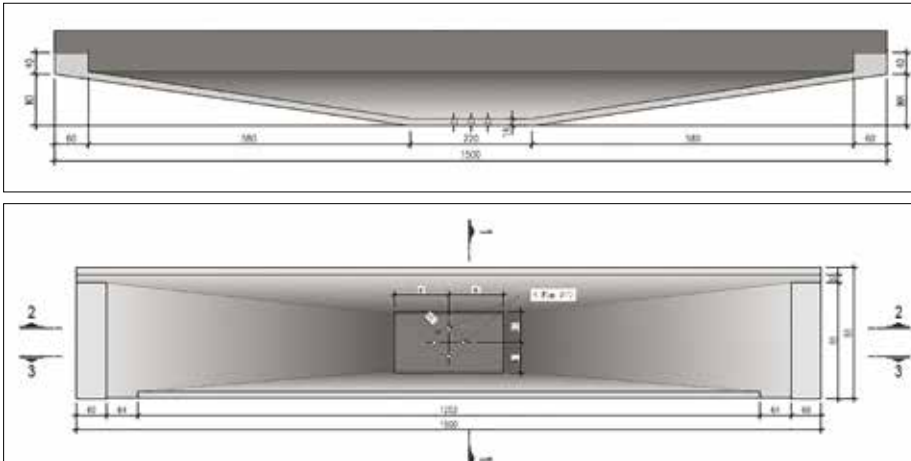


4A e 4B. La sezione in campata (4A) e in asse pila (4B)

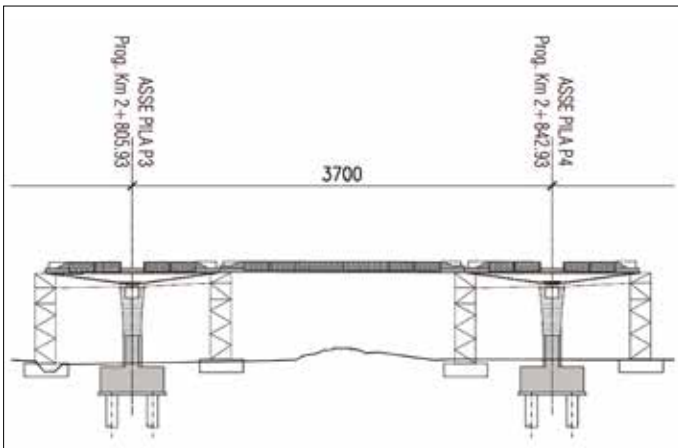


3A, 3B e 3C. La fase di montaggio dell'impalcato

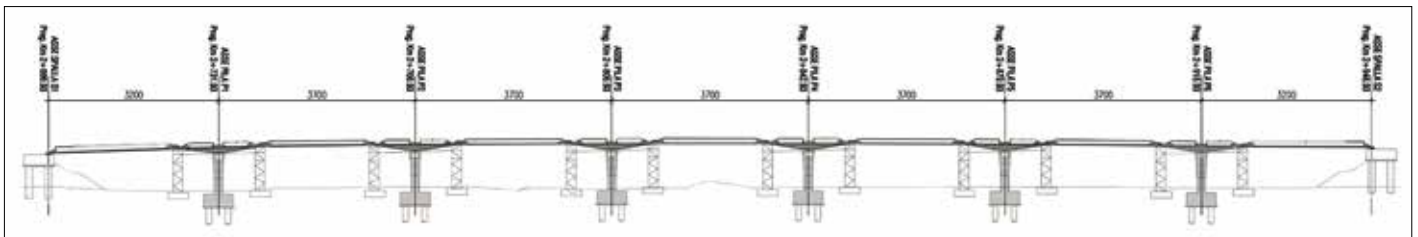




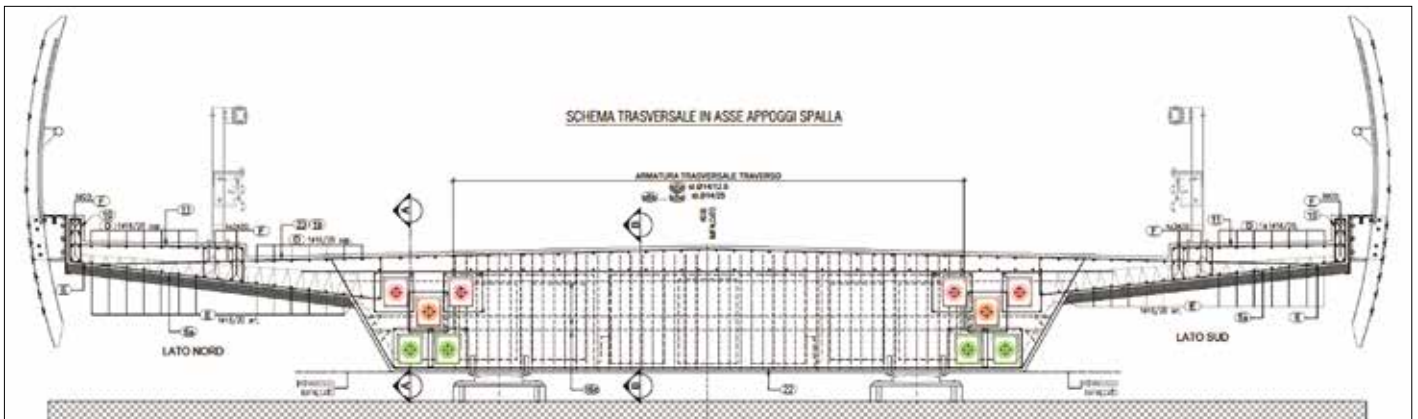
5A e 5B. Il semipulvino prefabbricato in sezione (5A) e visto dall'alto (5B)



6. L'assemblaggio dei prefabbricati in campata sulla ferrovia



7. Il completamento dei montaggi e dei getti prima della post-tensione finale



8. Le testate di post-tensione sul traverso di spalla

con lunghezza di 21,55 m (23,85 m per le campate di riva) ed elementi di pulvino in armatura semplice ad altezza variabile da posizionare sulle pile, lunghi 15 m.

Le lastre di campata sono alleggerite mediante l'inserimento di blocchi di EPS e, una volta accostate e solidarizzate tra loro mediante getti in opera di completamento, presentano una sezione pluricellulare a comportamento ortotropo, plurinervata sia in direzione longitudinale che trasversale e chiusa sia inferiormente che superiormente, con grande beneficio in termini di peso, rigidità e di redistribuzione dei carichi eccentrici e dei carichi concentrati.

Data la sensibile riduzione dei pesi rispetto alla sezione piena del progetto di appalto, le sottostrutture e le opere di fondazione sono state riprogettate; lo sviluppo di tale riprogettazione è stata affidata alla Società di ingegneria geotecnica Sogen di Padova.

Le strutture prefabbricate sono state varate separatamente su torri di sostegno provvisorio in carpenteria metallica senza necessità di una sequenza di montaggio in successione, essendo indipendenti tra loro.

Gli elementi che costituiscono i pulvini sono stati tesati in opera, dopo un getto di prima fase ma ancora separati dalle campate, mediante l'inserimento al negativo di trefoli viplati.

Il successivo getto di completamento in opera delle sezioni e dei nodi di sutura tra i prefabbricati ha generato la struttura completa del viadotto continuo, ancora in appoggio su spalle,

pile e torrini provvisori, a cui è stata applicata la quota di precompressione finale ancora mancante mediante la post-tensione di dieci cavi da 19 trefoli da 0,6".

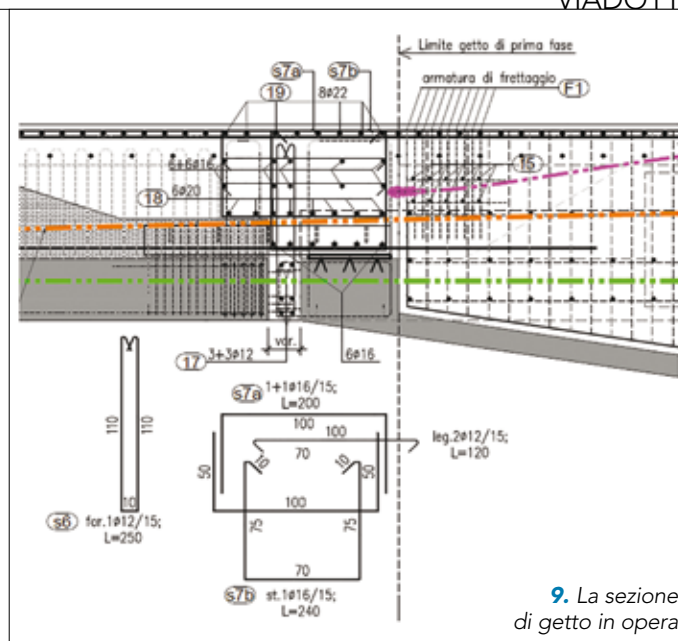
Il sito su cui sorge l'opera è al confine tra le zone sismiche 2 e 3. La vita nominale prevista è di 100 anni, con coefficiente d'uso 1,5, quindi con un periodo di riferimento di 150 anni.

Al fine di ridurre significativamente le spinte sismiche sulle sottostrutture, il sistema di appoggi è costituito da isolatori pendolari a doppia concavità, come già previsto nel progetto di appalto. Non si hanno quindi vincoli fissi o unidirezionali di contrasto alle azioni orizzontali: nel libero scorrimento amnesso, ogni appoggio assorbe per attrito e concavità la propria quota di spinta longitudinale e trasversale ed è in grado di ricentrarsi ad azione conclusa.

Il montaggio per elementi isostatici delle strutture prefabbricate sui torrini provvisori e sulle pile porta ad avere disconnessioni temporanee nelle sezioni di giunto tra pulvini e campate. Le campate risultano pertanto in semplice appoggio alle estremità dei prefabbricati a spessore costante mentre i pulvini sono saldamente appoggiati in pila e mantenuti in equilibrio sui torrini alle estremità.

Tale sistema costruttivo ha comportato una serie notevole di vantaggi, di seguito elencati:

- la costruzione mediante il posizionamento di elementi prefabbricati isostatici separati e indipendenti tra loro ha permesso di garantire il superamento della ferrovia nelle date previste dagli accordi di protocollo RFI;
- la prefabbricazione per macroelementi in stabilimento ha eliminato le onerose opere di centinatura e cassetatura in opera, sostituite da coppie di torrini provvisori di facile assemblaggio;
- le lastre prefabbricate di campata, alleggerite mediante l'inserimento di blocchi di EPS, hanno ridotto i pesi strutturali e le masse inerziali soggette ad azioni sismiche;
- gli elementi prefabbricati hanno maturato ancora in stabilimento quota parte delle azioni e deformazioni reologiche del calcestruzzo, con significativa riduzione delle perdite di precompressione per i cavi di post-tensione finale;
- la precompressione in stabilimento di elementi provvisoriamente isostatici risulta pienamente efficace per le sollecitazioni che deve assorbire: momenti positivi in campata, momenti negativi in pila, senza reciproche influenze;
- la separazione provvisoria dei prefabbricati annulla gli effetti di accorciamento elastico complessivo della struttura, dato che i giunti di sutura vengono gettati in una fase successiva: non si hanno pertanto spostamenti parassiti agli appoggi. Il posizionamento di questi ultimi tiene conto soltanto della temperatura ambiente nel momento dei getti di sutura e degli effetti della modesta post-tensione finale;
- l'infilaggio dei trefoli nelle guaine dei cavi di post-tensione è stato eseguito prima dei getti di completamento della sezione e del ricoprimento delle guaine stesse: ogni eventuale criticità durante l'operazione di infilaggio, comunque mai presentatasi nonostante la lunghezza dei cavi continui, sarebbe stata facilmente individuabile e superabile;
- la post-tensione finale, ridotta alla sola necessità di continuazione strutturale per i carichi di seconda fase, agisce su



9. La sezione di getto in opera

calcestruzzi decisamente più maturi rispetto alla soluzione del progetto di appalto, annullando praticamente la necessità di riprese di tesatura.

La soluzione adottata, applicata ad un sistema prefabbricato alleggerito, ha determinato una riduzione complessiva della necessità di precompressione, pur nel rispetto dei limiti decisamente ristretti di accettazione delle tensioni massime di trazione nel calcestruzzo imposti dalle Normative RFI.

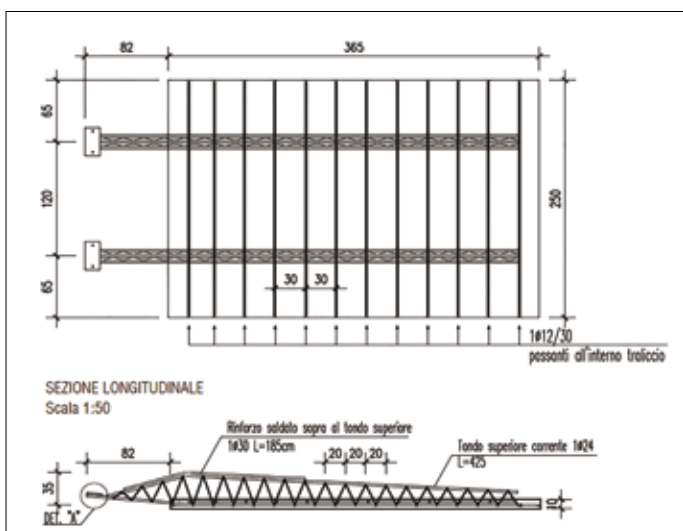
Lo studio delle modalità operative di costruzione per questa particolare tipologia esecutiva ha richiesto per contro un'analisi approfondita della geometria spaziale dell'opera: si tratta infatti di una struttura che, pur con l'impiego di elementi prefabbricati a geometria rigida, doveva soddisfare le necessità planimetriche di un tracciato con raggio di curvatura variabile e con conseguente rotazione trasversale variabile delle sezioni lungo il tracciato: ciò significa che anche la larghezza dell'impalcato deve variare in funzione della curvatura, mentre lo spessore varia da un valore costante minimo nel tratto centrale delle campate a un valore massimo in pila. Il secondo problema era legato all'impiego di elementi prefabbricati, dei quali andava garantita una dimensione trasportabile; ciò ha portato all'adozione di tre diverse tipologie di precompressione, come descritte in seguito. Ogni elemento è stato suddiviso in più parti da assemblare in opera: le singole campate sono formate dall'unione di tre lastre parallele e complanari, con pendenza trasversale media sulla lunghezza del manufatto. Per raccordare le differenti pendenze trasversali di due campate in successione, anche il pulvino è stato progettato in tre parti parallele, ma non più complanari tra loro, in modo da garantire alle estremità la medesima quota di intradosso delle lastre di campata su entrambe le testate.

L'elemento centrale del pulvino è stato suddiviso a sua volta in tre parti: un tratto corto centrale per la formazione del traverso di pila e due lastre indipendenti per raccordare la differenza di quota tra gli elementi laterali. Un distacco di circa 20 cm tra campate e pulvini ha permesso di assorbire con il getto in opera le piccole differenze che necessariamente rimangono tra elementi prefabbricati, a causa delle rotazioni relative tra corpi rigidi.

Lo studio delle quote di posizionamento dei prefabbricati e



10. La distribuzione delle predalles degli sbalzi



11. Le predalles degli sbalzi

delle rotazioni relative ha reso possibile il mantenimento di tali differenze entro il valore massimo di un centimetro, quindi di fatto impercettibili.

Completato il montaggio dei prefabbricati, che costituiscono l'ossatura centrale della sezione di impalcato per una larghezza di circa 7 m, sono stati montati gli sbalzi di soletta di lunghezza variabile da 3,54 a 3,78 m, formati da una sequenza di lastre

predalles da 2,50 m portate da coppie di tralicci di armatura ad altezza variabile per garantire l'inclinazione trasversale d'intradosso della sezione di progetto.

Lo studio delle quote di posizionamento delle lastre che costituiscono gli sbalzi ha tenuto in considerazione la deformazione dell'intero impalcato per effetto della sequenza di montaggio e dei successivi getti di completamento: un sistema di regolazione a vitoni di ancoraggio dei tralicci ha permesso di garantire il corretto allineamento degli sbalzi. È stato in tal modo rispettato l'esatto profilo altimetrico di progetto della struttura così come il corretto andamento planimetrico. Completata la posa di tutti gli elementi prefabbricati e collegate le guaine di post-tensione, si è proceduto con le fasi dei getti in opera, a cominciare dai pulvini, successivamente precompressi al negativo mediante trefoli viplati.

La prima tipologia di precompressione, ovvero quella a trefoli aderenti realizzata in stabilimento, è una lavorazione standard per la PAC, eseguita come di consueto con uno stretto controllo del materiale e delle attrezzature, prestando particolare attenzione alla taratura e alla manutenzione di queste. Molto più complessa è la progettazione della geometria dei manufatti, che non può ammettere errori in fase di assemblaggio in opera: a questo scopo, come per altri lavori eseguiti, è stato allestito in sede un campo di preassemblaggio per gli elementi dei pulvini e per le predalles degli sbalzi laterali della sezione.

In opera, la post-tensione con trefoli viplati è stata adottata for-

se per la prima volta in Italia in maniera così ampia sui pulvini di un viadotto, per cui sono stati eseguiti diversi campionamenti di prova in stabilimento PAC al fine individuare gli ancoraggi più idonei. Particolare attenzione è stata rivolta alle testate di tiro che sono state smontate per studiarne gli ingombri, all'ammorsamento dei cunei di ancoraggio dei trefoli e alla resistenza delle connessioni delle guaine alle testate, sottoposte all'effetto dei getti e della loro vibrazione. Predisposto un piano di sequenza delle tesature, in cantiere è stata controllata la posa a garanzia del corretto tracciato. Per la post-tensione finale con cavi da 19 trefoli è stato allestito, presso la sede PAC, un campo prove all'aperto con



12A, 12B e 12C. La post-tensione con trefoli viplati

una guaina lunga 250 m e con un accentuato andamento sinusoidale rispetto a quello di progetto, allo scopo di individuare il miglior metodo di infilaggio.

Condotte alcune prove con spingitrefolo, sia in condizioni asciutte e di bel tempo che di elevata umidità ambientale che hanno dato tutte risultati non entusiasmanti e mostrato i limiti del sistema, si è deciso di cambiare il sistema di assemblaggio: il cavo è stato confezionato a monte della guaina, quindi per una lunghezza di ulteriori 250 m, ancorato in testa a un dispositivo di aggancio collegato a un singolo trefolo, infilato nella guaina e successivamente trainato con un muletto dalla testata opposta fino al completo inserimento del cavo.

Oltre a rendere l'operazione più agevole, il traino del cavo ha consentito di eliminare il rischio di accavallamento dei trefoli, che può dare luogo a tesature irregolari, e l'effetto di 'corda molla' iniziale, il cui recupero di prima tesatura offre sempre un valore di allungamento fittizio aleatorio, soprattutto nei cavi molto lunghi.

Nell'esecuzione in opera è stato possibile approfittare delle lunghe rampe di accesso al viadotto per il confezionamento dei cavi, avendo cura di non danneggiare i trefoli durante il trascinarsi.

Gli allungamenti evidenziati dalla tesatura finale, eseguita a una testata del viadotto e ripresa da quella opposta, hanno confermato i valori teorici attesi.



**13A e 13B.** Le prove di infilaggio per la post-tensione finale con cavi da 19 trefoli presso la sede PAC

Il getto di completamento della soletta dell'intero impalcato e delle sezioni di giunto tra campate e pulvini ha realizzato la continuità strutturale necessaria per procedere con la post-tensione finale dei 10 cavi da 19 trefoli. Quest'opera rappresenta un caso interessante di impiego della prefabbricazione in stabilimento di grandi elementi in calcestruzzo con dimensioni limite, sia per i pesi che per le possibilità di trasporto in condizioni di viabilità ordinaria: al di sopra sarebbe necessario ricorrere a sistemi di costruzione a piè d'opera o all'acciaio, ma su queste lunghezze la prefabbricazione si fa preferire per la maggior economicità.

Oltre allo schema statico dell'impalcato, andava rispettata la condizione al contorno del sistema di vincolo con isolatori antisismici. Trattandosi di apparecchi dissipatori pendolari a doppia concavità che non prevedono un punto fisso, durante tutto l'iter costruttivo è stato analizzato il sistema di spostamenti incrementali per la successione delle tesature e la variazione termica stagionale: questo al fine di stabilire il corretto presettaggio degli apparecchi e in modo tale che, conclusa la post-tensione finale, gli elementi componenti di ogni apparecchio risultassero esattamente nel loro asse di esercizio, come di fatto è avvenuto, con scostamenti minimi dai valori teorici.

La progettazione esecutiva e costruttiva dell'impalcato è stata risolta in tempi relativamente brevi, ma è dovuta sottostare a un iter di validazione sicuramente approfondito,

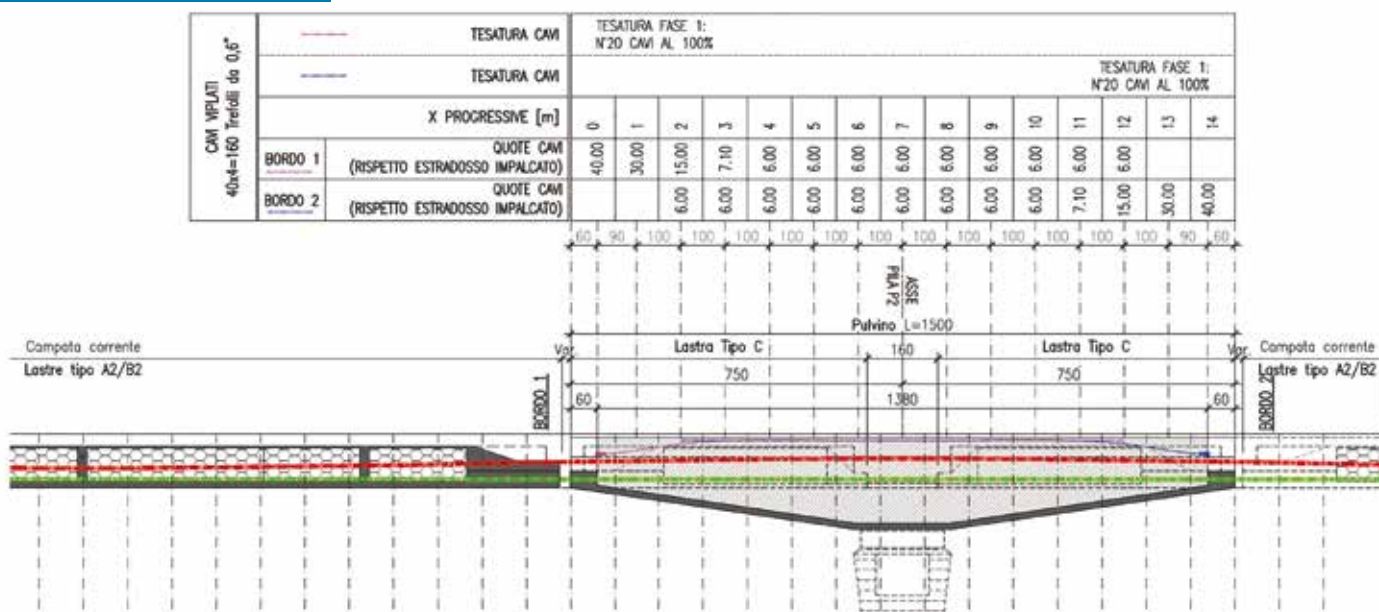
anche per il necessario e continuato confronto con i Progettisti delle sottostrutture (pile, spalle e fondazioni) e con il Progettista generale dell'opera per la conferma dei dati geometrici salienti: tracciato, larghezze, curvature, pendenze, spessori, ecc.. Tutto il processo costruttivo è stato costantemente monitorato dalla Direzione Lavori mediante il rilievo planaltimetrico periodico di numerosi punti dell'impalcato e delle temperature ambientali, con report puntuali per ogni fase della costruzione.

Il lavoro è stato completato nei tempi previsti, senza ritardi. La rispondenza tra le deformate attese e quelle misurate durante il collaudo statico delle campate ha confermato la correttezza delle complesse ipotesi di progetto che hanno dovuto coniugare le tre diverse tipologie di precompressione su calcestruzzi prefabbricati e gettati in opera, con sostanziale modifica dello schema strutturale in una fase intermedia.

Il collaudo statico, che ha confermato la correttezza dei dimensionamenti e della funzionalità della precompressione, ha riguardato tre campate, con particolare attenzione per quella di scavalco sopra la ferrovia: una campata di riva con sei autocarri a quattro assi da 42 t, per un carico totale di 252 t pari all'84% del carico teorico di progetto, e due campate interne, ciascuna con otto autocarri, per un carico totale di 336 t pari al 102% del



**14.** Il sistema di trascinamento dei cavi da 19 trefoli



15. I trefoli viplati in pila e il tracciato delle guaine dei cavi di post-tensione

carico teorico. Il maggior carico di collaudo rispetto al progetto per queste campate si è reso necessario al fine di raggiungere i valori di momento massimo previsti. Le massime deformazioni rilevate sono di 17 mm per la campata di riva e 22 mm per quelle interne: valori decisamente contenuti e inferiori a quelli attesi. La vita utile dell'opera non è un'ipotesi di massima, ma una precisa determinazione di progetto. In questo caso, trattandosi di un'importante opera infrastrutturale, coerentemente con la Normativa di riferimento, è stata attribuita una vita nominale pari a 100 anni, sempre a patto che venga eseguita regolare manutenzione.

Il progetto di appalto di questo viadotto prevedeva una struttura continua da spalla a spalla, per una lunghezza complessiva di 250 m, che corrisponde anche alla visione costruttiva di PAC: puntare con sempre maggior decisione, ogni volta che è possibile, all'eliminazione o riduzione dei giunti di campata, analizzando l'iperstaticità della struttura che ne deriva sotto ogni aspetto, non ultimo quello della reologia del calcestruzzo e del gradiente termico tra superfici esposte e in ombra.

Queste sono le premesse per una maggior durabilità, poi dipenderà dal monitoraggio nel tempo e dalla manutenzione curata dal Gestore.



16. Il collaudo

Per quanto riguarda i calcestruzzi, rispettati rigorosamente i copriferri e la qualità dei materiali e della loro messa in opera, non ci sono particolari esigenze manutentive, che invece andranno rivolte ai giunti di spalla, oggetto di continui battimenti soprattutto per il transito di carichi pesanti, e al sistema di isolamento sismico, sempre molto delicato, che richiede pulizia delle superfici di scorrimento per garantire la capacità di ricentraggio geometrico a seguito delle dilatazioni termiche e della azioni sismiche. Ora inizia quindi una fase altrettanto importante nella vita dell'opera, che è quella del mantenimento della sua piena funzionalità nei prossimi decenni.

<sup>(1)</sup> Ingegnere, Direttore Tecnico di ETRA Srl

## DATI TECNICI

- Stazione Appaltante:** Friuli Venezia Giulia Strade SpA
- Contraente Generale:** R.T.I. composta da Adriastrade Srl, Coletto Srl ed Ecovie Srl
- RUP:** Ing. Luca Vittori di FVG Strade SpA
- Direzione dei Lavori:** Ing. Maurizio Cusin di FVG Strade SpA
- Progetto Generale in variante:** Ing. Rolando Tonin di E-Farm Engineering & Consulting Srl
- Progetto strutturale impalcato e opere provvisionali:** Ing. Michele Defina di ETRA Srl
- Progetto delle sottostrutture:** Ing. Simone Carraro di Sogen Srl
- Collaudatore:** Ing. Gianpaolo Guaran
- Direzione Operativa dei Lavori:** Ing. Piero Brugnera e Domenico Amoroso di Poll Engineering Srl
- Responsabile Sicurezza:** Ing. Vittorio Bozzetto
- Direzione di Cantiere:** Ing. Massimo Contadin di Adriastrade Srl
- Concezione strutturale, prefabbricazione, torri di sostegno, montaggi e post-tensione impalcato:** Cav. Giovanni Galliazzo, Rag. Claudio Galliazzo, Geom. Massimo Poncina di PAC Srl
- Post-tensione:** Ing. Marco Bizzozero di Dywidag Systems Srl
- Durata Lavori Impalcato:** Giugno/Dicembre 2019