

SPECIALE PONTE SAN GIORGIO GENOVA

ISSN n° 0010-9673 Poste Italiane SpA - Spedizione in Abbonamento Postale - D.L. 358/2003 (con. in L. 27.02.04 n° 46) Art. 1, comma 1, LO/MI Prezzo a copia: € 15,00 - in caso di mancato recapito inviare al mittente previo pagamento reso



LUG/AGO 2020

CTA
COLLEGIO
DEI TECNICI
DELL'ACCIAIO

UNICMI

RIVISTA BIMESTRALE
PER LA DIFFUSIONE
DELLA CULTURA DELL'ACCIAIO

COSTRUZIONI METALLICHE

AL SERVIZIO DELLE GRANDI OPERE



INGEGNERIA, TRASPORTI E SOLLEVAMENTI
AD ALTO VALORE AGGIUNTO PER LE COSTRUZIONI

PONTI



ESTA e SC&RA
AWARDS 2020



Demolizione del ponte Morandi; Installazione delle sezioni del nuovo ponte S. Giorgio a Genova: SPMTs, Strand Jacks e Gru Cingolate

EDIFICI



1.350
ton

Sollevamento e Installazione di 10 piani completi di due edifici INTEL in India con l'ausilio di strand jacks

STADI



216
Jacks

Sollevamento e Installazione del tetto in tenso-struttura del nuovo stadio del TOTTENHAM con l'ausilio di 216 strand jacks in simultanea

GALLERIE



486
ton

Rilocazione, Trasporto e Installazione di talpe meccaniche (TBM): trasporto con carrelli modulari, SPMT; sollevamento e installazione con sollevatori idraulici e strand jacks

STRAND JACKS

oltre 1.000 unità (15 - 750 ton)



TORRI MODULARI

oltre 1.000 m di torri



GRU CINGOLATE

capacità fino a 1.350 ton



SPMT

oltre 1.300 assi



SOLLEVATORI IDRAULICI

capacità fino a 800 ton



Tekla® Structures

Il BIM per l'Ingegneria Strutturale

Tekla Structures 2020 offre processi di modellazione 3D più veloci, dettagli più precisi, un migliore controllo delle modifiche e una produzione più rapida di disegni, oltre ai guadagni in termini di efficienza legati al flusso di lavoro.

- Lofted plate per creare piatti svergoli da linee e oggetti di costruzione anche polycurve
 - Saldature solide e preparazioni di saldatura automatiche
 - Clonazione e storico delle versioni dei disegni
- e molto altro...

**METODI DI LAVORO
DI NUOVA GENERAZIONE**

**MIGLIORE COMUNICAZIONE
DEL PROGETTO**

**Scopri tutti i vantaggi di
Tekla Structures 2020**

Rivenditore esclusivo per l'Italia

30 anni

HARPACEAS

More than BIM

La competenza è una conquista

Professionalità e competenza da oltre 60 anni

Il Gruppo IIS mantiene l'obiettivo prioritario che da sempre ha caratterizzato l'Istituto Italiano della Saldatura: produrre e trasferire conoscenza negli ambiti delle attività svolte dalle Società che lo costituiscono, attento e fedele all'origine del suo brand.

In questo contesto il Gruppo IIS si propone quale riferimento in Italia e all'Estero per fornire servizi di formazione, assistenza tecnico-scientifica, ingegneria, diagnostica, analisi di laboratorio e certificazione, garantendo sempre il rispetto delle previste condizioni di qualità, sicurezza, affidabilità e disponibilità di sistemi ed impianti industriali, di strutture saldate e di componenti saldati.



www.iis.it



COSTRUZIONI METALLICHE - FONDATA NEL 1949**REDAZIONE****DIRETTORE RESPONSABILE:** BRUNO FINZI**EDITOR IN CAPO:** ELIDE NASTRI Università di Salerno, Italia**COMITATO DI REDAZIONE:**

NADIA BALDASSINI Università di Trento, Italia
 ANDREA CAMPIOLI "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 PAOLO CASTALDO "Politecnico" di Torino, Torino, Italia
 MARIO DE MIRANDA IUAV Università di Venezia
 RAFFAELE LANDOLFO Università di Napoli "Federico II", Italia
 EMANUELE MAIORANA Isolcomit Srl, Legnaro (PD), Italia
 GIOVANNI METELLI University of Brescia, Italia
 EMIDIO NIGRO Università di Napoli "Federico II", Italia
 VINCENZO PILUSO Università di Salerno, Italia
 SHAHAB RAMHORMOZIAN University of Auckland, New Zealand
 ATSUSHI SATO Nagoya Institute of Technology, Japan
 SERGIO SCANAVINO Istituto Italiano di Saldatura, Italia
 MARCO SIMONCELLI "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 LUCIA TIRCA Concordia University of Montreal, Canada

COMITATO EDITORIALE ESECUTIVO: GIANCARLO CORACINA, BENEDETTO CORDOVA, RICCARDO DE COL, ALBERTO VINTANI**COMITATO SCIENTIFICO:**

GIULIO BALLIO "Politecnico" di Milano, Milano, Italia,
 CLAUDIO BERNUZZI "Politecnico" di Milano, Milano, Italia,
 MARIO D'ANIELLO Università di Napoli "Federico II", Italia
 LUIGINO DEZI Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia
 ERIC DUBOSC Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris, France
 DAN DUBINA Polytechnic University of Timisoara, Timisoara, Romania
 FEDERICO M. MAZZOLANI Università di Napoli "Federico II", Italia
 ROSARIO MONTUORI Università di Salerno, Salerno, Italia
 RENATO MORGANTI Università degli Studi dell'Aquila, Italia
 VITTORIO NASCÉ "Politecnico" di Torino, Italia
 D.A. NETHERCOT Imperial College London, London, UK
 MAURIZIO PIAZZA Università di Trento, Trento, Italia
 COLIN ROGERS McGill University, Montreal, Canada
 LUIS SIMOES DA SILVA University of Coimbra, Portugal
 ENZO SIVIERO Università Telematica E-campus, Italia
 CARLO URBANO "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 RICCARDO ZANDONINI Università di Trento, Trento, Italia

SEGRETARIA: VALERIA PASINA**EDITORE:** GIANGIACOMO FRACCHIA EDITORE Srl
Via C. Goldoni 1, 20129 Milano, tel. 02 49524930
C.F./P.Iva: 07153040964 - CCAA Milano REA n° 1939256**UFFICIO ABBONAMENTI:** CTA Collegio Tecnico dell'Acciaio,
20129 Milano, Viale dei Mille, 19
tel. 02 784711; costruzionimetalliche@ctanet.it
http://www.collegiotecniciacciaio.it/costruzionimetalliche/**CONCESSIONARIA PUBBLICITÀ:**Agicom srl, Viale Caduti in Guerra, 28,
00060 Castelnuovo di Porto (RM)
Tel. +39 069078285

www.agicom.it

Dott.ssa Manuela Zuliani, Cell: +39 3467588821
manuelazuliani@agicom.it**IMPAGINAZIONE, GRAFICA E STAMPA:**GIERRE PRINT SERVICE Srl, Via Carlo Goldoni, 1
20129 MILANO Tel. 02 49524930
e-mail: commerciale@gierreprint.com**ABBONAMENTI PER L'ANNO 2020 (6 NUMERI):**Italia: € 60,00 - Estero: € 150,00 - Studenti: € 20,00
Prezzo a copia: € 15,00

Garanzia di riservatezza per gli abbonati: l'Editore garantisce la massima riservatezza dei dati forniti dagli abbonati e la possibilità di richiederne gratuitamente la rettifica o la cancellazione. Le informazioni custodite nell'archivio elettronico dell'Editore verranno utilizzate al solo scopo di inviare agli abbonati eventuali proposte commerciali (legge 675/96 tutela dati personali)

La rivista non assume alcuna responsabilità delle tesi sostenute dagli Autori e delle attribuzioni relative alla partecipazione nella progettazione ed esecuzione delle opere segnalate dagli stessi Autori

La rivista è inviata ai soci del Collegio dei Tecnici dell'acciaio (C.T.A.)

Iscrizione al Tribunale di Milano in data 8 febbraio 1949,
n. 1125 del registro.

Iscrizione ROC n. 020654 (Art.16 Legge 62 - 7/03/2001)

ISSN n. 0010-9673

Spedizione in A.P. - D.L. 353/2003 (conv. in L.27.02.14
N. 46) - Art. 1 comma 1 CNS PD

Questo numero della rivista è stato chiuso in redazione e stampato nel mese di settembre 2020

È vietata e perseguibile per legge la riproduzione totale o parziale di testi, articoli, pubblicità ed immagini pubblicate su questa rivista sia in forma scritta, sia su supporti magnetici, digitali, ecc.

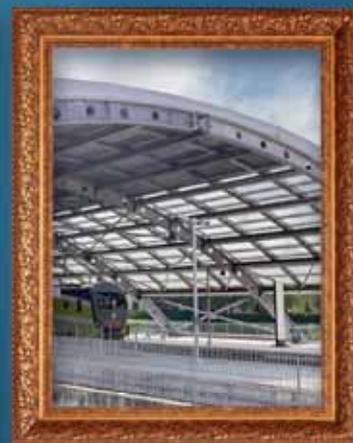
COSTRUZIONI METALLICHE

ANNO LXXII

LUG AGO 20

www.facebook.com/CMrivistacostruzionimetalliche@ctanet.itIn copertina: *il Ponte San Giorgio a Genova*

7	EDITORIALE	
	BRUNO FINZI	IL PONTE SAN GIORGIO A GENOVA
9	SPECIALE PONTE DI GENOVA	
	ANGELO VITTOZZI, FELICE BONIFACIO	IL PONTE SAN GIORGIO A GENOVA
	STEFANO ISANI, GUIDO CAMMAROTA, PAOLO BARRASSO	La storia del progetto dell'impalcato dalla concezione al collaudo
24	SPECIALE PONTE DI GENOVA	
	SIRO DAL ZOTTO, VITO CARDELLA, ANDREA MORBIN,	PONTE SAN GIORGIO DI GENOVA
	LORENZO SARTORI, MARCO RACCAGNI,	LA REALIZZAZIONE DI UN'OPERA ICONICA
	GIOACCHINO SARCINA, FRANCESCO POLTRONIERI	
36	SPECIALE PONTE DI GENOVA	
	A. ALIOTTA, E. PUPPO, A. TOMARCHIO, M. CADEMARTORI,	PROJECT MANAGEMENT, DIREZIONE LAVORI
	S. DELLACASAGRANDE, A. FIGUNDIO	E COORDINAMENTO SICUREZZA DEL NUOVO PONTE GENOVA SAN GIORGIO
51	SPECIALE PONTE DI GENOVA	
	FEDERICO BAIARDO, DANIELE CASTAGNOLA STERNINI	LA SALDATURA DI PREFABBRICAZIONE E MONTAGGIO DEL VIADOTTO SAN GIORGIO
64	SPECIALE PONTE DI GENOVA	
	MARCO SALSÌ	IL MONTAGGIO DEL NUOVO PONTE SAN GIORGIO CON MEZZI DI SOLLEVAMENTO SPECIALI
73	SPECIALE PONTE DI GENOVA	
	DARIO DOVERI, FLAVIA TARSILLA	PONTE SAN GIORGIO DI GENOVA: IL RUOLO CHIAVE DELLA COLLABORAZIONE BIM
76	SPECIALE PONTE DI GENOVA	
	FRANCESCO LIPARI	BARRE AD ADERENZA MIGLIORATA IN ACCIAIO INOSSIDABILE NEL NUOVO PONTE DI GENOVA



GIAMBARINI GROUP COLLECTION

LA ZINCATURA A CALDO PER PROTEGGERE AD ARTE I TUOI MANUFATTI:
DAL BULLONE ALLE TRAVI DI GRANDI DIMENSIONI.

LA NOSTRA GALLERY COMPLETA LA TROVATE SUI NOSTRI SITI:

OLFEZ.IT ODSTRASPORTI.IT ZITACSRL.IT
GALVAN.IT METALJUMBO.IT ZINCATURADICAMBIANO.IT



GIAMBARINI GROUP
IL FUTURO PER TRADIZIONE



Bruno Finzi

IL PONTE SAN GIORGIO A GENOVA

Questo numero della rivista è dedicato al Ponte San Giorgio di Genova.

Ho pensato che la maniera migliore per inquadrare la reazione di Genova e dell'Italia in generale ad una grande tragedia come quella del crollo del Ponte Morandi, sia quella di raccontare come si sia riusciti, in tempi impensabili per questo Paese, a rimettere in piedi una infrastruttura fondamentale per questo Paese.

Non si vuole qui entrare nel merito di comprendere cosa sarebbe stato meglio fare o di quale progetto sarebbe stato più meritevole, quanto invece di capire in che modo e grazie a quale ingegneria si sia riusciti a mantenere i tempi di consegna di questa opera.

Tante persone hanno profuso tempo e impegno notevole per raggiungere il risultato che comunque è un tributo alle realizzazioni in carpenteria metallica ed alla adattabilità e versatilità che queste strutture hanno.

La storia del progetto, della sua realizzazione ed esecuzione rappresentano un capitolo importante a cui questa rivista non poteva mancare di fornire il giusto tributo.

Il primo disegno architettonico del nuovo ponte è stato realizzato dall'architetto Renzo Piano ed è stato presentato ufficialmente il 7 settembre 2018.

Il 4 ottobre il sindaco di Genova Marco Bucci veniva nominato Commissario straordinario di Governo alla ricostruzione del ponte Morandi di Genova. Pochi giorni dopo, il 18 dicembre, le società Salini Impregilo (poi rinominata Webuild) e Fincantieri Infrastructure, riunite nel consorzio PERGENOVA S.C.p.A. si aggiudicavano l'appalto per la progettazione e costruzione del ponte, con l'impegno di completare l'opera entro un anno.

Lo sviluppo della progettazione esecutiva veniva allora affidato a Italferr, società del gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, con profonda esperienza nei grandi progetti infrastrutturali per il settore ferroviario convenzionale e per quello ad Alta Velocità, nel trasporto metropolitano e stradale, nella progettazione di porti e stazioni, sia in Italia che all'estero. Il progetto esecutivo, iniziato nel gennaio



2019 e finito ad aprile dello stesso anno. è stato sviluppato da Italferr con il supporto dello studio Matildi+Partners. La sinergia tra le due organizzazioni, lungi da risultare una fonte di lentezza, ha invece incrementato la produttività del progetto ed ha fornito un primo controllo del processo progettuale. In parallelo alla progettazione ed alla costruzione in officina del ponte, procedeva la demolizione delle parti restanti del ponte Morandi, affidata a un'associazione temporanea di imprese (ATI) formata dalle ditte Fratelli Omini, Fagioli e IREOS, e dallo studio IPE Progetti. L' 8 febbraio 2019 è stata tagliata e portata a terra la prima porzione del ponte Morandi, la trave tampono tra le pile 7 e 8. Il 28 giugno 2019 è stata demolita, con un'esplosione controllata, la parte di levante del ponte Morandi, le pile 10 e 11. Le operazioni di demolizione si sono concluse il 31 luglio 2019.

La costruzione in officina del ponte è stata eseguita da Fincantieri Infrastructure, utilizzando gli stabilimenti di Valeggio sul Mincio (VR), Castellammare di Stabia (NA) e Sestri Ponente (GE). Nel primo stabilimento sono stati realizzati gli elementi di vestizione dei macro-elementi e tutte le strutture superiori quali travi longitudinali, elementi trasversali e profili, mentre nei cantieri navali di Castellammare di Stabia e Sestri Ponente hanno preso vita i macro-elementi che formano il fondo dell'impalcato.

Dal mese di luglio 2019 sono stati portati a Genova i conci in acciaio del nuovo ponte, realizzati nel cantiere navale di Castellammare di Stabia e trasportati via mare con una chiatte ed infine portati al cantiere del ponte tramite trasporti eccezionali. I trasporti sono stati effettuati dalla ditta Fagioli, che ha pure realizzato i sollevamenti necessari per il montaggio. Dopo che nell'area di pre-assemblaggio allestita in cantiere è avvenuto il montaggio a terra dell'impalcato attraverso lavori di saldatura e bullonatura, il 1° ottobre 2019 è stato posato il primo impalcato tra le pile 5 e 6, e il 28 aprile

2020 è stata issata ed agganciata la diciannovesima e ultima campata, completando così la struttura del ponte.

Il 6 giugno 2020 è iniziata la gettata della soletta in calcestruzzo, operazione conclusa in una decina di giorni. Il 19 luglio 2020, finita la posa dell'asfalto, è iniziato il collaudo statico della struttura, eseguito dai tecnici dell'ANAS.

Importantissime le attività di coordinamento, tanto più delicate quanto più stretti sono stati i tempi di realizzazione e il numero di aziende coinvolte. La società di certificazioni RINA Consulting è stata incaricata di svolgere le attività di Project Management, Direzione Lavori e Coordinamento della Sicurezza in fase di demolizione del Ponte Morandi e di ricostruzione del nuovo ponte. RINA Consulting ha affiancato la Struttura Commissariale durante tutto l'iter progettuale e procedurale dell'appalto ed è stata pertanto presente durante tutte le attività di demolizione e ricostruzione del nuovo viadotto, dalla definizione del contratto, lo sviluppo della progettazione, dall'inizio dei lavori fino alla loro conclusione.

Molto importanti sono poi state le attività di sorveglianza, durante tutto l'iter di costruzione e montaggio dell'opera. Qualifica delle procedure di saldatura e dei saldatori, ottimizzazione dei dettagli costruttivi per garantire l'ispezionabilità nel tempo e l'affidabilità delle strutture, supervisione in fase di montaggio al fine di mantenere le tolleranze previste, controllo dello stoccaggio e conservazione dei materiali, controlli non distruttivi finali, sono solo alcuni dei compiti svolti dall'Istituto Italiano della Saldatura - IIS. Il 3 agosto 2020 l'opera, alla cui realizzazione hanno collaborato ben 330 imprese, è stata ufficialmente inaugurata, e il 4 agosto 2020, alle ore 22.00 circa, il ponte è stato aperto al traffico.

Fin qui la storia di quest'opera. Nel seguito di questo numero di Costruzioni Metalliche troverete oltre 70 pagine di articoli, curati da Italferr, RINA, Fincantieri Infrastructure, Fagioli, IIS Service, Harpaceas e Centro Inox, che illustrano gli aspetti tecnici salienti del ponte San Giorgio. Mi auguro che troverete la lettura interessante e, ne sono sicuro, emozionante.

Bruno Finzi

Direttore di Costruzioni Metalliche



IL PONTE SAN GIORGIO A GENOVA

La storia del progetto dell'impalcato dalla concezione al collaudo

THE GENOVA'S SAN GIORGIO BRIDGE

the history of the deck project from concept to testing

Ing. Angelo Vittozzi, Ing. Felice Bonifacio

U.O. Opere Civili Italferr S.p.A.

Ing. Stefano Isani*, Ing. Guido Cammarota, Ing. Paolo Barrasso

Studio Matildi+Partners

La ricostruzione del viadotto Polcevera è stata impegnativa ed ha riguardato tutti gli aspetti che caratterizzano un'opera nuova di grande impegno ma, soprattutto, è stata soggetta a vincoli temporali, operativi ed anche comunicativi, per non dire politici, non comuni nella costruzione di un viadotto pur di grandi dimensioni. La buona riuscita dell'intervento, nei tempi realmente contenuti che hanno stupito l'intero paese, è stata possibile grazie ad una effettiva collaborazione complessiva dei soggetti coinvolti, unitamente all'adozione esperta di ogni possibilità presente nelle metodiche di progettazione ed indirizzata a massimizzare la qualità dell'opera (figure 1-2). L'ingegnerizzazione della idea di Renzo Piano ha suggerito, anch'essa, alcune cautele non comuni nel mondo infrastrutturale e derivanti dalla richiesta di attenzione specifica agli aspetti architettonici di dettaglio, assieme ad una dotazione impiantistica completa e ben organizzata. Il presente articolo illustra, in estrema sintesi, l'intero processo progettuale dell'impalcato, elemento maggiormente caratterizzante. Anche le sottostrutture con le loro fondazioni sono state elementi di realizzazione non sempre agevole, sia per la frequente interazione con le vecchie opere del viadotto demolito, sia per la presenza di innumerevoli vincoli antropici contermini. L'attività di mera redazione del progetto esecutivo è iniziata nel gennaio 2019 ed è finita ad aprile 2019

This article illustrates, at a high level, the project of the new Genova's bridge rebuilt in record time after the collapse (14 August 2018) of the old "Morandi bridge" also known as "Ponte delle Condotte". The following description shows the performance requirements and construction criteria that determined the structural choices made in order to be compatible with the concept of the architect Renzo Piano. The viaduct constitutes the initial stretch of the Italian motorway A10, which in turn is part of the European road E80.

LA GEOMETRIA DELL'IMPALCATO

Il ponte San Giorgio è lungo 1.067 m e scorre a circa 40 m di altezza attraversando la valle del fiume Polcevera che assieme alla valle del fiume Bisagno, meno ampia, caratterizza l'abitato di Genova secondo la ben nota forma a π (figura 3).

L'asse stradale è sostanzialmente rettilineo, a meno di una stretta curva con raggio di 300 m, posta negli ultimi 250 m occidentali a raccordo con la galleria Coronata, tra la pila P5 e la spalla SpA.

Trattandosi di lavori di ricostruzione di un tracciato consolidato (tratto iniziale dell'autostrada A10, iniziata negli anni cinquanta ed aperta al traffico nel 1967, dopo il completamento del viadotto di Riccardo Morandi) e operativo da oltre 50 anni l'andamento dell'opera ha necessariamente

dovuto soggiacere ad una posizione delle spalle sostanzialmente immutabile e, pur essendo stato effettuato un millimetrico lavoro di adeguamento ai moderni criteri di progettazione stradale (in termini di rotazione delle falde, inserimento di clotoidi e di allargamenti per visibilità e arresto), non è stato possibile eliminare alcuni limiti preesistenti alla velocità di transito. L'indecisione tra la denominazione di "ponte" o "viadotto" è nel nostro caso estremamente reale; il fiume Polcevera è, infatti, un mero accidente nella sua ampia valle, pur non dimenticandone la violenza idraulica, e il termine viadotto sarebbe, pertanto, più adeguato, tuttavia la parola ponte è più nobile dal punto di vista storico mentre il viadotto è percepito spesso come semplice strumento della scorrevolezza della strada. Useremo, per questo, entrambi i termini con consapevole indifferenza.

*Corresponding author. Email: s.isani@matildi.com



Fig. 1 - Immagini del ponte Genova San Giorgio, durante le fasi di costruzione.



Fig. 2 - Immagini del ponte Genova San Giorgio, durante le fasi finali di costruzione e il collaudo.

Anche l'idea di Renzo Piano scaturisce, in fondo, da questo concetto avendo concentrato le poche luci maggiori, pari a 100 m, a cavallo dell'alveo e ponendo gli approcci su luci di soli 50 m a conferma evidente della centralità del fiume, sovrappassato dal "ponte" a fronte della valle attraversata dal "viadotto".

La sezione trasversale dell'impalcato, con la sua inconsueta bellezza, nasce dalla volontà di rendere l'opera, per quanto possibile, ugualmente percepita da ogni distanza, e ha un intradosso curvilineo policentrico (raggi 31,14 m e 26 m) con spessore massimo di 4,837 m (inclusa la pavimentazione stradale).

Su una larghezza di ben 29,8 m, comprensivi dei camminamenti laterali, l'interasse degli appoggi è di soli 7 m, contribuendo alla snellezza delle pile che hanno una sezione ellittica con assi di 4 m e 9,50 m.

In apparenza può sembrare che un impalcato così conformato rischi di ribaltarsi a causa delle azioni eccentriche, ma le sue dimensioni, e il conseguente peso, precludono questo rischio nonostante la soggiacenza ad un vento molto sostenuto; solo sulle spalle è stato necessario, e in ogni caso agevole, disporre gli appoggi con un interasse di 17 m per evitare dispositivi reagenti a carico negativo.

L'intero impalcato è in sistema misto acciaio-calcestruzzo e continuo su tutto lo sviluppo compresa la rampa di svincolo che sarà meglio descritta in seguito.

La sezione adottata, sempre di altezza costante, supera luci di 50 m e di 100 m; risulta evidente come questo implichi uno stato di sollecitazione flessionale sostanzialmente difforme, fino ad un quadruplicamento teorico delle sollecitazioni stesse.

Al tempo stesso la complessità geometrica della sezione limita, per contro, la possibilità di variare gli spessori delle lamiere in un ambito molto vasto. A tal fine si è contenuto il peso delle campate da 100 m, gettando una soletta di spessore ridotto (25 cm invece dei correnti 28 cm) su *predalle* metalliche collaboranti in sostituzione delle *predalle* in calcestruzzo impiegate altrove.

Nelle campate da 100 m, inoltre, si è adottato, per le parti maggiormente sollecitate, acciaio S460 (Secondo UNI EN 10025-1/2/3:2005).

La continuità dell'impalcato su oltre un chilometro ha imposto anche uno studio accurato di un sistema di vincolamento capace di assorbire le azioni sismiche (in ogni caso relativamente modeste a Genova) unitamente al vento (ben più rilevante) senza trasmettere alle esili pile azioni eccessivamente gravose neppure a causa delle variazioni termiche stagionali.

In aggiunta alle suddette necessità analitiche gli appoggi dovevano essere di ridottissime dimensioni per trovare spazio al di sotto delle appendici (che chiameremo "gambe") di interfaccia tra l'impalcato e le teste delle pile richieste dal concept architettonico.

L'impiego di FPS a singola superficie, con attrito nominale dell'1% ha risposto a tutte le esigenze presenti, contenendo l'ingombro pur con carichi fino a 60.000 kN e scorrimenti fino a +/-400 mm. In ogni caso, sulle spalle, sono state inserite guide prismatiche all'uopo di evitare gli spostamenti trasversali; esse associate a dispositivi multidirezionali sulle pile più prossime hanno efficacemente ottimizzato l'intero isolamento dell'impalcato anche ai fini della sua fruibilità viabilistica.

I CARICHI AGENTI E LA ROBUSTEZZA

L'eccezionalità dell'opera ha suggerito, prima che imposto, una analisi delle azioni sollecitanti estremamente accurata e anch'essa del tutto infrequente.

I normali carichi stradali da normativa, ad esempio, sono stati integrati dal transito contemporaneo di un mezzo per carichi speciali da 108 t ma, soprattutto, è stata approfondita la valutazione della azione eolica, sia con studi CFD sia con specifiche indagini in galleria del vento.

È, difatti, intuibile come, in prossimità del mare a 40 m di altezza e all'esordio di una lunga valle, la mera applicazione delle formulazioni

semplificate possa non fornire una entità delle pressioni agenti realistica. Anche in merito alle verifiche a fatica è stato applicato un principio di massima attenzione impiegando anche lo schema di carico 1 a vita illimitata; il corrente schema di carico 2, infatti, presenta alcuni limiti se utilizzato su sezioni autostradali e luci maggiori di 70 m, così come le verifiche a danneggiamento implicano assunzioni previsionali sullo sviluppo del traffico che ne possono limitare l'efficacia su assi viari importanti dopo alcuni decenni.

Oltre alle azioni principali il ponte San Giorgio è soggetto a carichi solo apparentemente marginali che ne definiscono, tuttavia, alcuni elementi in ragione significativa.

Ad esempio, la passerella di servizio esterna alla carreggiata è stata verificata per il carico derivante da un mezzo in svio che può insistere sul cavidotto e al tempo stesso porta il carico del robowash, che è un dispositivo automatico deputato alla pulizia delle barriere in vetro ed alla ispezione del fondo. Il cavidotto è quindi un ponticello a 3 luci con campate da 1,5 m.

In apparenza è un tema poco rilevante, ma la necessità architettonica di mantenere le mensole di supporto snelle e senza piattabande inferiori ha richiesto, anche in questo caso, uno studio di dettaglio.

Poi ci sono i pennoni, citati tante volte, che nell'idea iniziale di Renzo Piano dovevano ricordare le vittime della tragedia. Nel ponte San Giorgio costruito essi diventano elementi di illuminazione della sede stradale posti con passo di 50 m lungo lo sviluppo in asse alla struttura; 50 m è l'interasse delle pile a meno delle tre campate centrali da 100 m, nelle quali i pennoni hanno richiesto la definizione di elementi specifici di supporto essendo posti in mezzera della campata; con una altezza di 28 m questi elementi richiedono un ancoraggio flangiato che, superando la soletta si ancori direttamente ai diaframmi.

A parte questo, l'inserimento di elementi tra le due barriere spartitraffico ne ha limitato l'ingombro (per garantire la deformabilità richiesta alle barriere stesse) e lo sviluppo tronco-conico individuato ha permesso l'impiego di tubi fino ad un diametro esterno di 500 mm, imponendo l'adozione di tondi pieni torniti per la porzione superiore lunga circa 14 m. Una citazione specifica merita il tema della robustezza strutturale.

Essa è quasi sempre citata nelle progettazioni moderne al fine, specioso, di indurre un pensiero positivo anche se non realmente concreto.

Nel progetto del ponte San Giorgio si è inteso, al contrario, ipotizzare ed analizzare 5 scenari possibili di situazioni eccezionali che potessero indurre a crisi locali o generalizzate della struttura.

Poiché la ricostruzione del viadotto Polcevera scaturisce dalla tragedia del 14 agosto 2018, abbiamo voluto, ricordando Wittgstein, concepire una struttura che si piega ma non si spezza. Nella scelta degli scenari si è tenuto debito conto, pertanto, sia delle reali esigenze strutturali, sia delle richieste mediatiche (urto di aerei), sia dei dubbi sul crollo del ponte di Morandi (la bobina di acciaio).

Nel primo scenario si è ipotizzata la crisi di un appoggio, ovvero di un baggiolo o di una pila, nel secondo l'effetto dell'esplosione di una cisterna sulla sede stradale, nel terzo l'impatto di un aereo leggero, nel quarto la caduta di un coil da 35 t e infine il cedimento di un remo di sostegno della soletta.

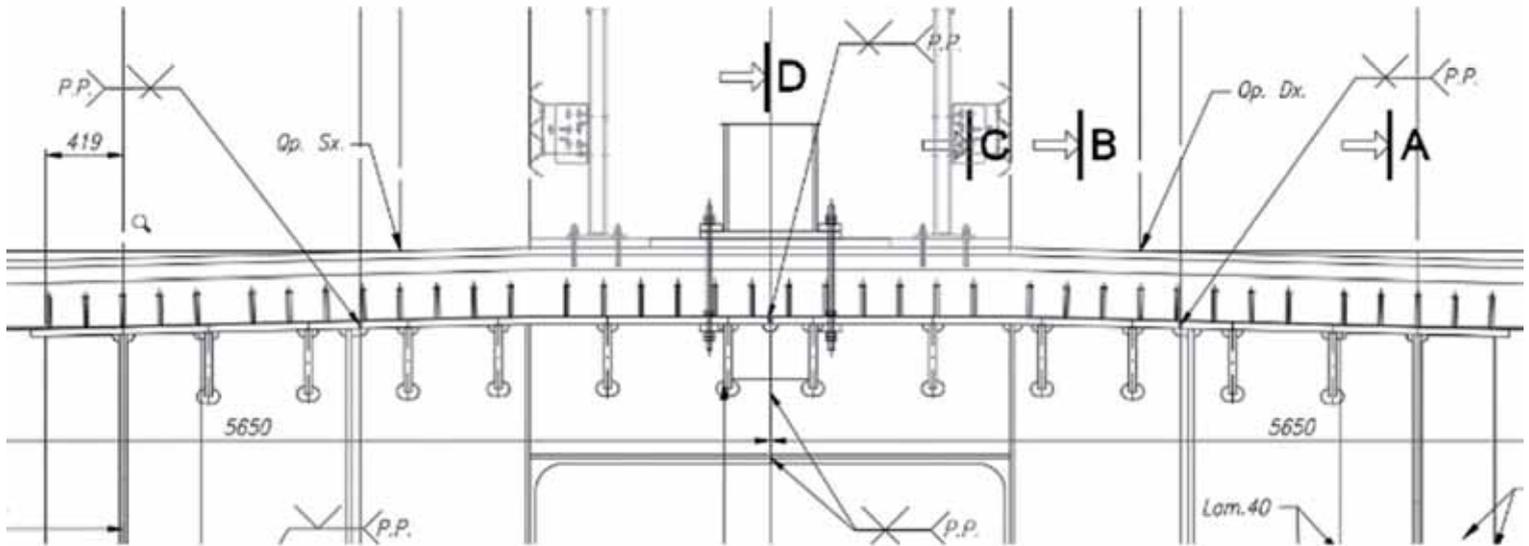
Tutte le verifiche ovviamente sono state condotte con coefficienti parziali unitari.

LA SEZIONE STRUTTURALE DELL'IMPALCATO

Una delle particolarità del ponte San Giorgio, come già ricordato, è la presenza di un impalcato largo 29,80 m ma sorretto da pile larghe solo 9,5 m.

Per ottemperare a ciò, ottenendo una struttura comunque di semplice realizzazione, si è scelto di costruire una cellula centrale portante costituita da un cassone unicellulare con lati di 7 m (larghezza) e 4,467 m

4a



4b

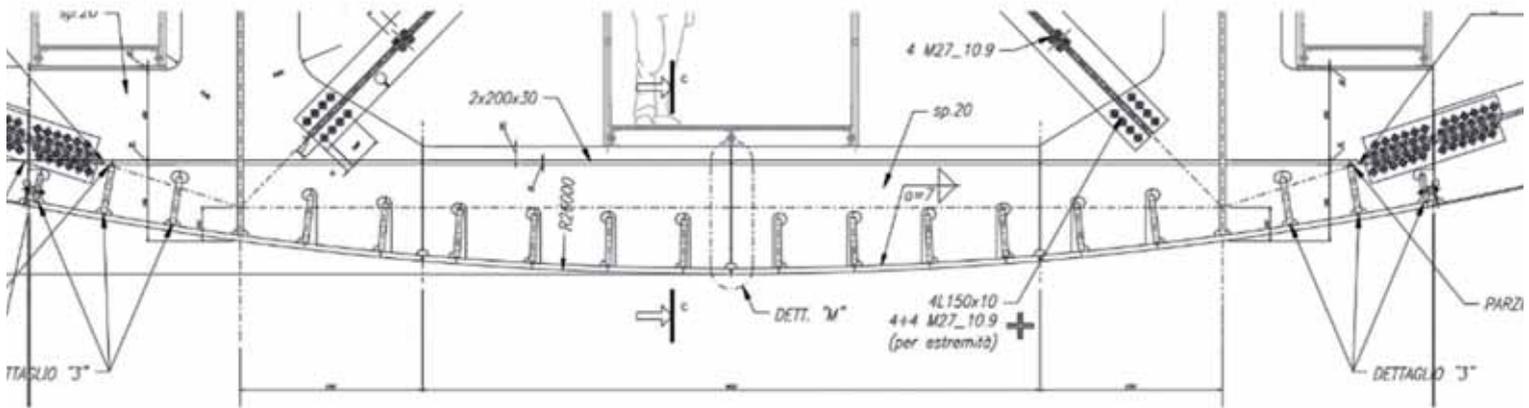


Fig. 4 - Ribb longitudinali saldati alla piattabanda superiore della trave metallica da 100 m nelle sezioni in asse pila e sul fondo del cassone in mezzeria

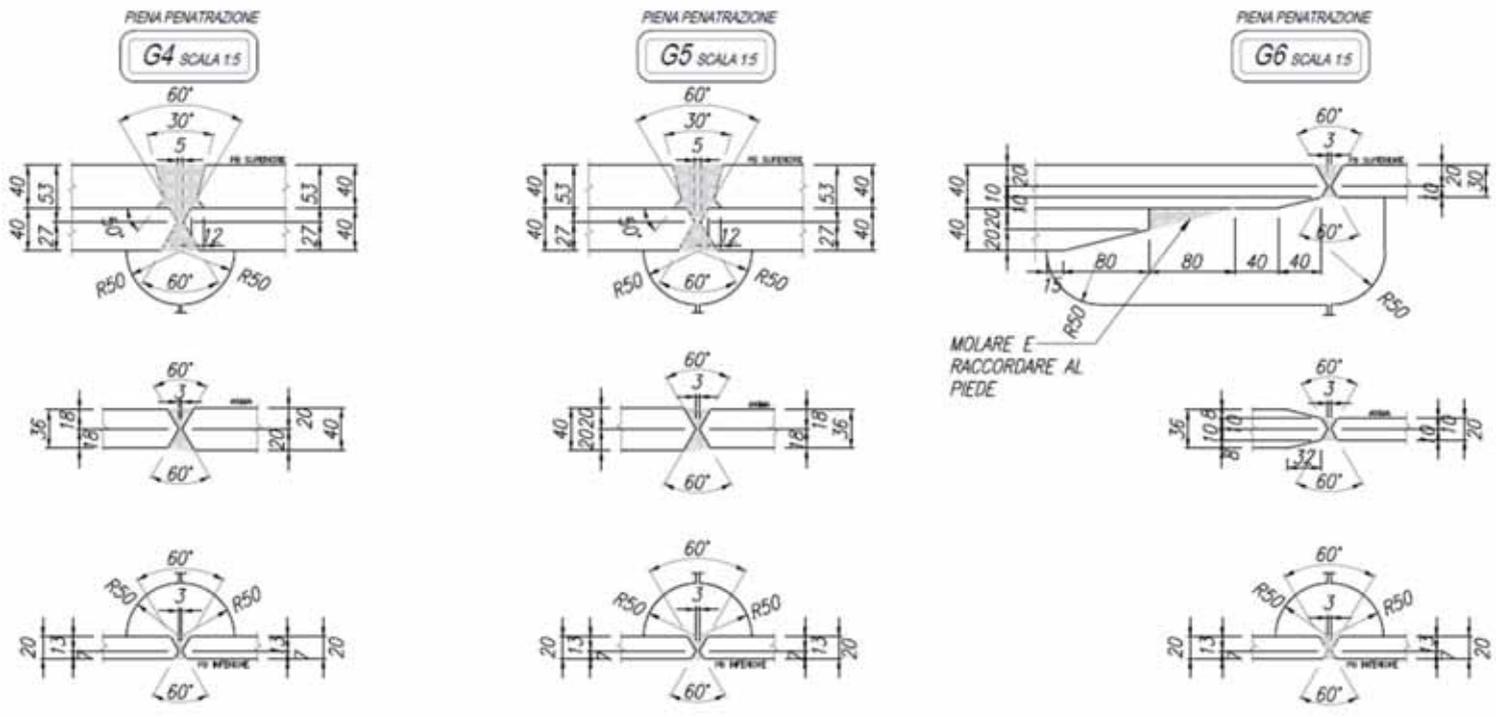


Fig. 5 - Dettagli di saldatura

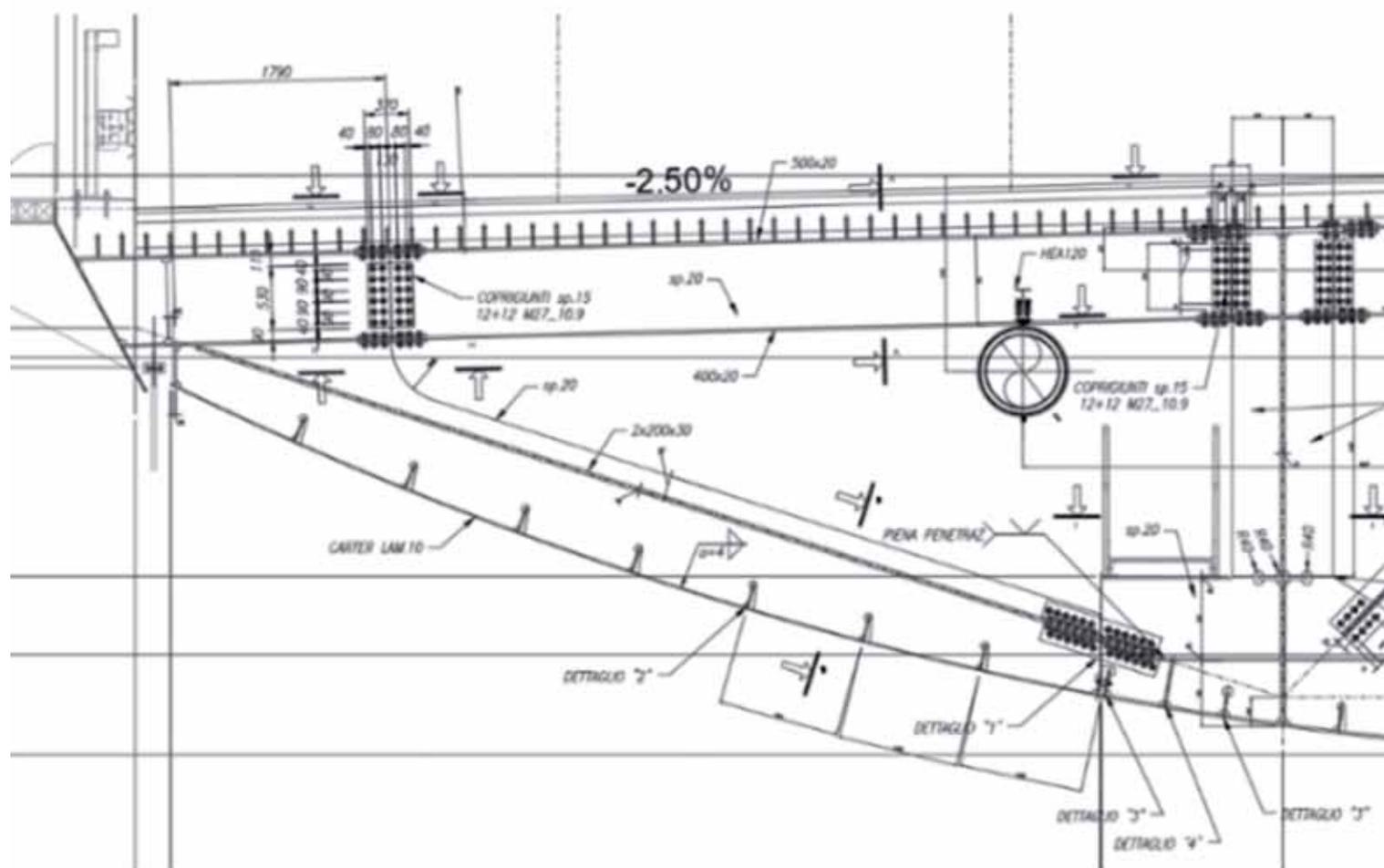


Fig. 6 – Remo laterale bullonato al cassone centrale

(altezza massima, della sola carpenteria metallica) con fondo curvilineo. Uno dei primi problemi connessi a questa soluzione, assieme alla già citata necessità di contenere il peso e utilizzare acciaio S460, è stata la necessità di contenere lo spessore delle lamiere del fondo del cassone entro un limite superiore di 40 mm al fine di poterle curvare secondo la geometria richiesta. Laddove l'area di acciaio risultava insufficiente sono stati rafforzati i *rib* longitudinali fino ad un valore di 40 mm, giungendo quasi ad un raddoppio della resistenza disponibile (figura 4).

L'assemblaggio a piè d'opera del cassone è stato agevolato dallo studio dettagliato della sua scomposizione in porzioni trasportabili, anche alla luce della costruzione suddivisa tra le officine "navali" di Fincantieri e officine di carpenteria pesante.

Di fatto la coppia di travi, con anime alte circa 4100 mm, è stata costruita in due sezioni e giuntata verticalmente con semplici cordoni d'angolo grazie al posizionamento di un *rib* longitudinale di appoggio (400x30 mm ricavato da lamiera Z35, unico nello sviluppo dell'anima con spessori variabili tra 20 e 40 mm).

Le piattabande superiori hanno spessore variabile tra 30 mm e 50+50 mm e, solo sulle pile P8, P9, P10 e P11, che sorreggono le campate da 100 m, degenerano in una unica lamiera larga 8000 mm per uno sviluppo di 34 m. Particolare cura è stata posta per la geometria dei cianfrini di tutti i giunti saldati testa-testa delle suddette piattabande costituenti i conci della travata principale. Ciò al fine di ottenere dettagli costruttivi ottimali soprattutto ai fini della durabilità, della manutenibilità e della fatica (figura 5).

La soletta collaborante (con i correnti pioli Nelson da 22x175 mm), come già scritto, ha uno spessore variabile tra 25 cm e 28 cm ed è gettata con

calcestruzzo C45/55; una particolare cura è stata disposta nello studio della fessurazione al fine di individuare le zone che potessero richiedere una armatura insensibile alla corrosione. L'armatura in acciaio inox è stata dunque predisposta nei cordoli laterali e nel cordolo centrale, essendo questi gli elementi della soletta in c.a. maggiormente esposti agli agenti atmosferici.

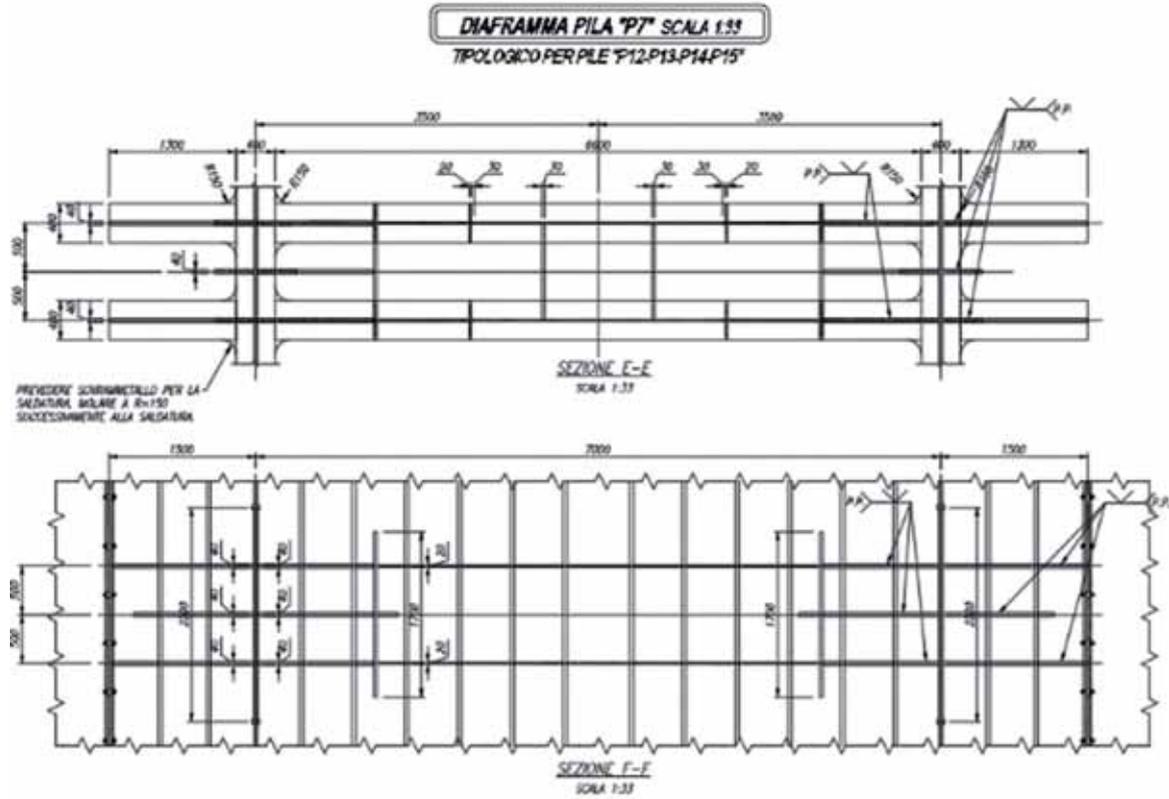
Se la cellula portante è ben identificata, alcune osservazioni devono essere approfondite in merito alle porzioni laterali dell'impalcato che sono sostenute da strutture triangolari, essenzialmente "strut and tie", con sbalzi di circa 10 m.

L'assemblaggio del cassone è stato ovviamente previsto mediante saldatura mentre per le strutture laterali sono stati implementati giunti bullonati in categoria B (secondo UNI EN 1993-1-8:2005); questo anche poiché la posa in opera, a 40 m di altezza, doveva essere più flessibile e libera possibile. Infatti, alcune campate sono state montate completate ed altre, invece, limitate al solo cassone, in base alla possibilità di disporre a terra le autogrù (figura 6).

La coppia di cellule laterali, specularmente omotetiche, ospita sia i tubi di convogliamento delle acque di piattaforma (non è stato neppure questo un tema agevole, in conseguenza della scelta di fare un viadotto piano lungo un chilometro) sia le passerelle continue che, in numero di tre, consentono l'ispezione di tutta l'opera.

Poiché le lamiere di fondo laterali, a meno delle sezioni in corrispondenza delle pile, non devono svolgere funzione portante (si tratta di una lamiera di 10 mm irrigidita solo al fine di mantenerne la forma), nei giunti tra i conci sono disposti collegamenti a baionetta in grado di trasferire il taglio, e quindi la continuità dei bordi affiancati, ma non lo sforzo

7a



7b

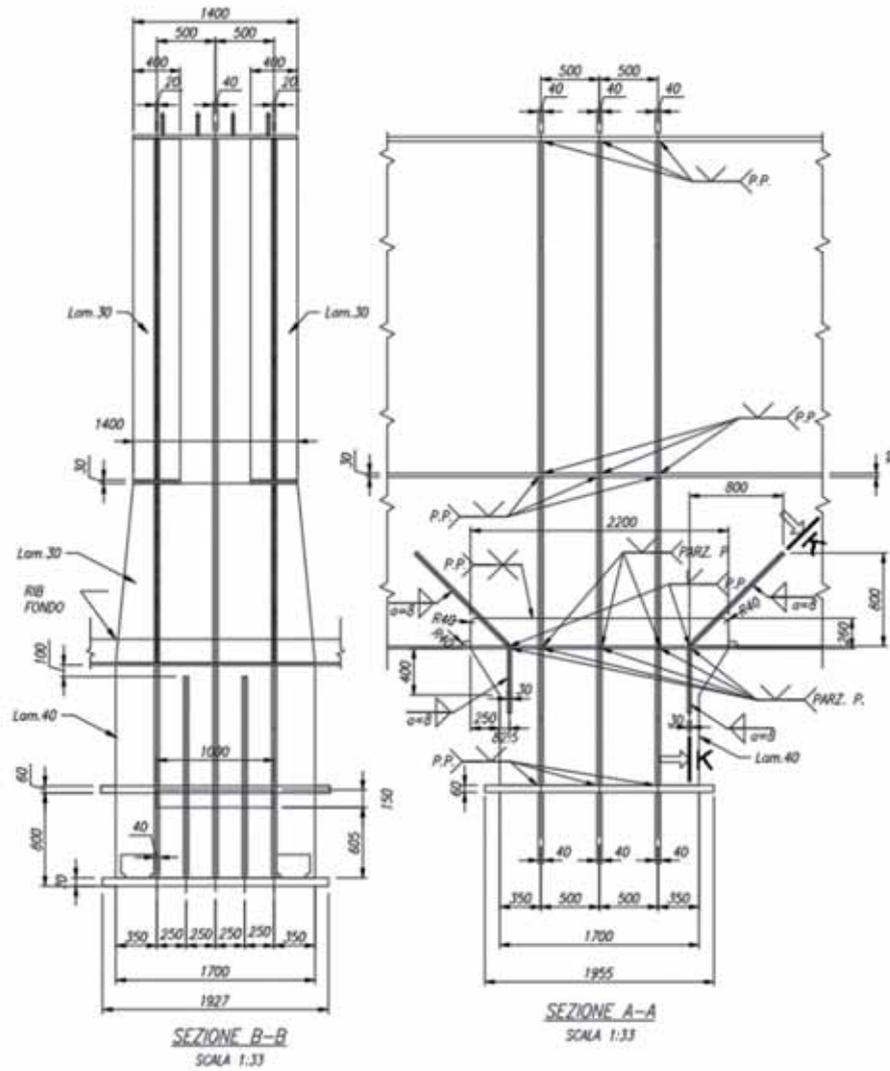


Fig. 7 - Dettaglio carpenteria gamba e piatti di rinforzo



Fig. 8 – Concio di pila con gambe saldate

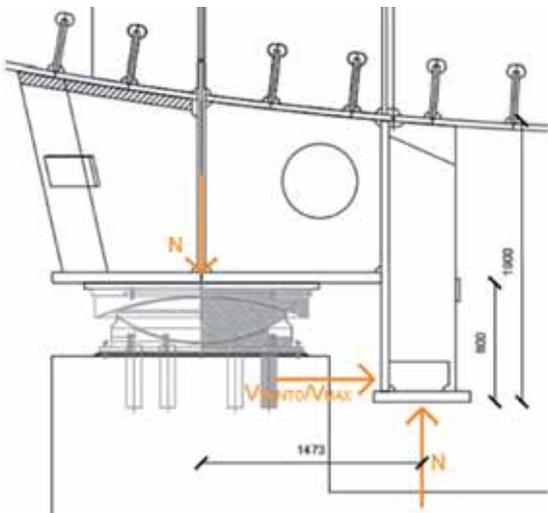
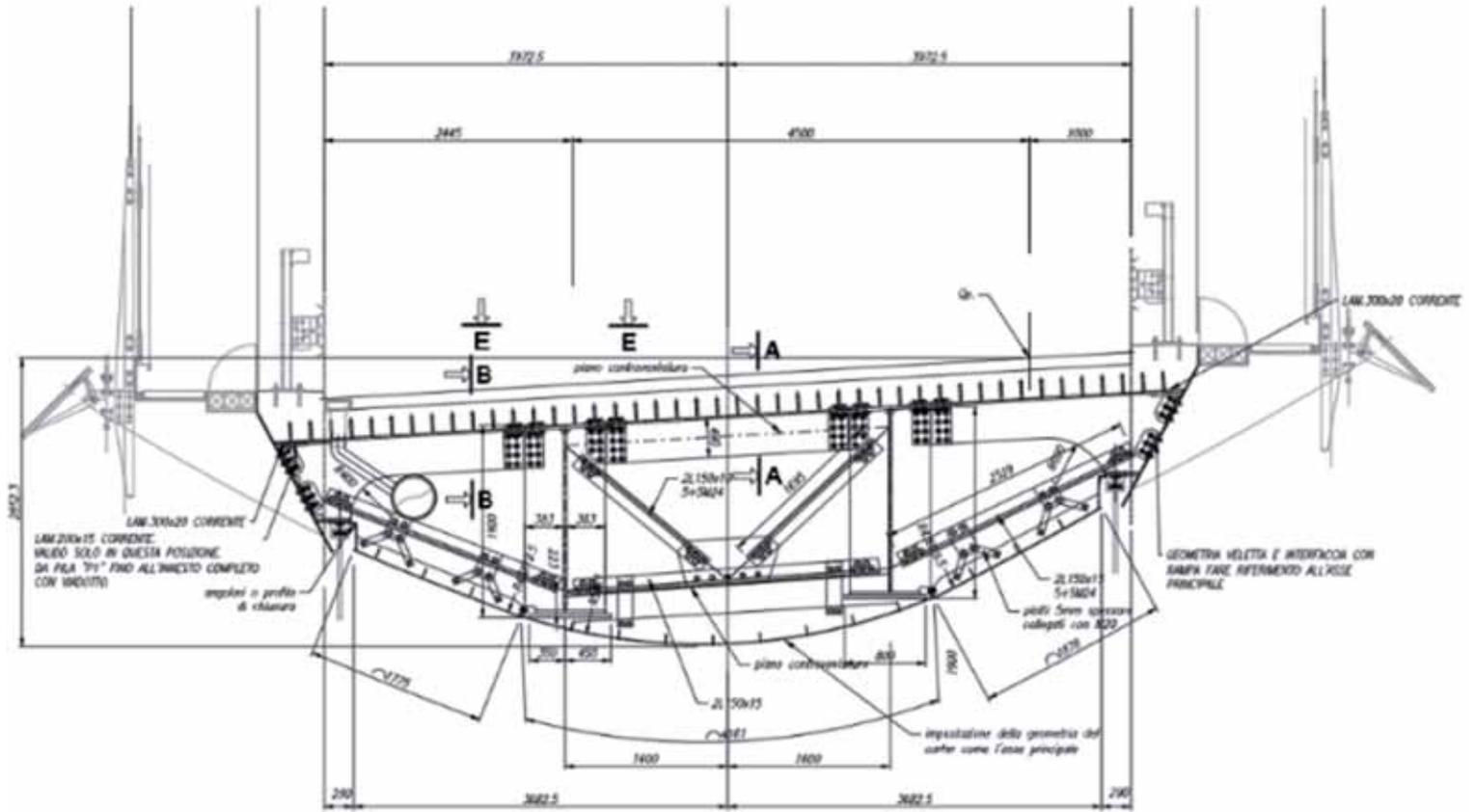


Fig. 9 - Schema delle azioni per la struttura della gamba



Fig. 10 - Zona di innesto rampa-impalcato principale

11a



11b

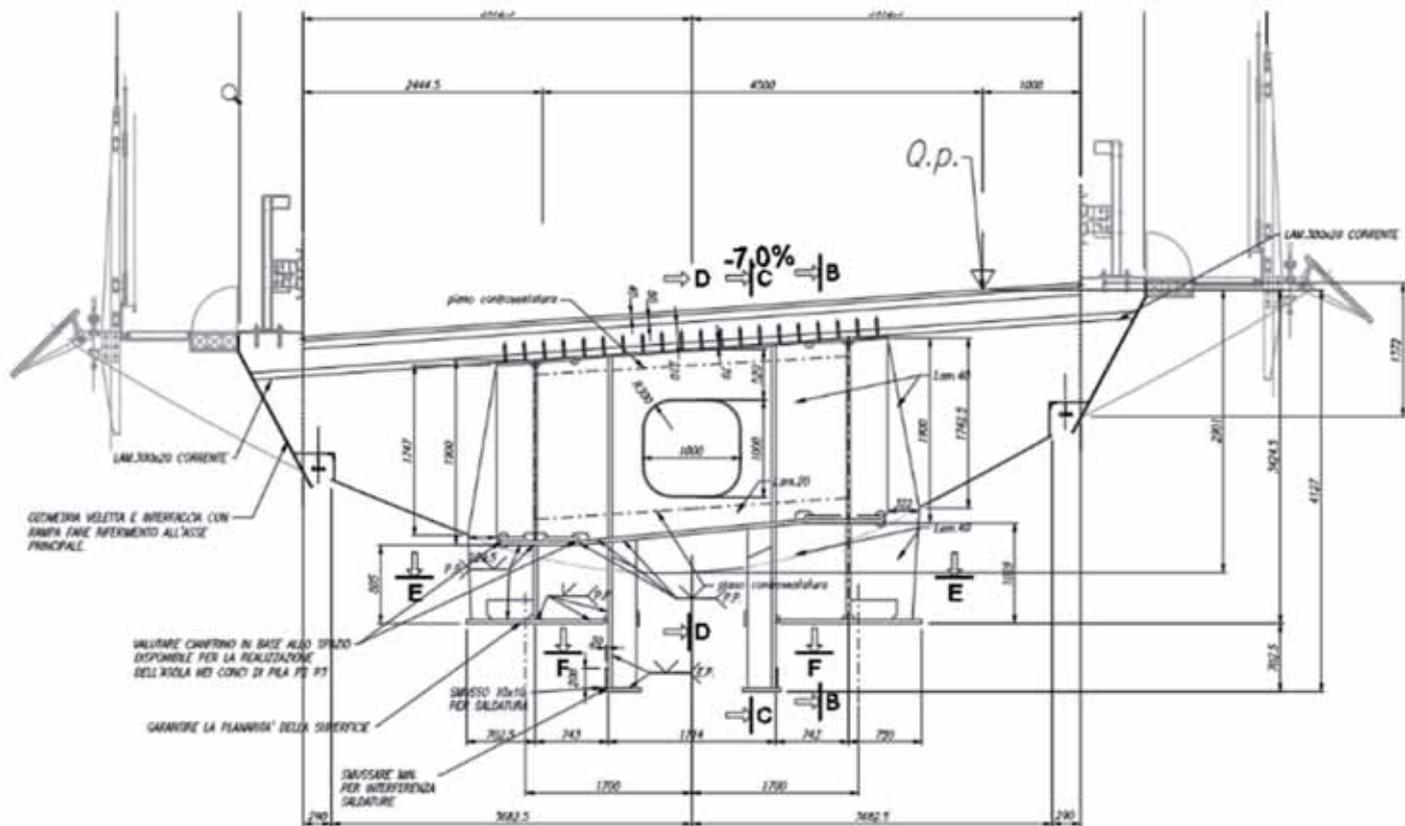


Fig. 11 - Sezioni impalcato rampa



Fig. 12 – Intradosso impalcato rampa e diaframma di spalla rampa

normale. A differenza dei ponti usuali il ponte San Giorgio non ha gli appoggi disposti sotto alle travi dell'impalcato ma presenta una serie di elementi di transizione, le cosiddette "gambe", alte circa 1,2 m, che ne enfatizzano la leggerezza percepita (figure 7-8).

Dal punto di vista dell'ingegnere la geometria di questi elementi in carpenteria metallica, poi caratterizzati secondo superfici a singola curvatura, è un tema complesso che è stato risolto considerando tutte le situazioni di spostamento, prima che di carico, possibili per gli appoggi.

Al medesimo tempo il raccordo tra i piatti di grande spessore (60 mm) indispensabili a raccogliere con eccentricità fino a 350 mm le reazioni vincolari con le strutture del cassone ha richiesto uno studio specifico delle transizioni poiché le lamiere inferiori del cassone non superano mai i 40 mm, e questo a favore di una riduzione del rischio di strappi lamellari

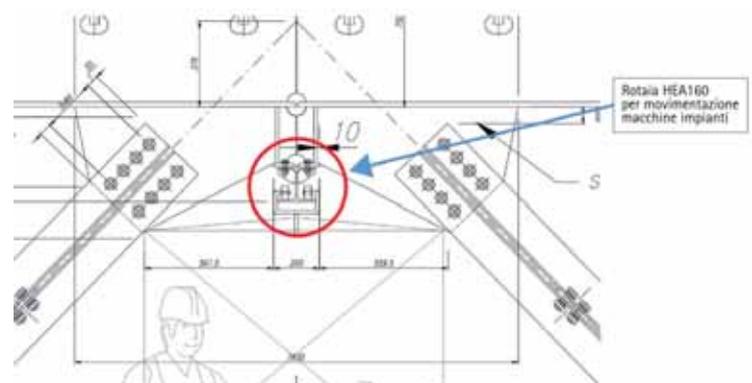


Fig. 13 – particolare profilo-rotaila HEA160



Fig. 14 - Modello di calcolo globale

legati allo spessore del materiale base, che influenza sia la costanza delle proprietà meccaniche al traverso corto, in particolare a centro lamiera, sia le condizioni di autovincolo dei giunti saldati.

Per tutti i diaframmi di pila, inoltre, coerentemente con la scelta della trave interamente continua e dei dispositivi di vincolo, è stata adottata la soluzione strutturale del “doppio diaframma” con distanza pari a 1 m tra le lamiere verticali costituenti le anime; nelle sezioni di pila, in ogni caso, non sono presenti i remi esterni, pertanto lo sdoppiamento dei diaframmi non ha implicato una variazione del passo degli stessi disposti in numero di dieci ogni 50 m.

La complessa struttura delle “gambe” comprende anche i dispositivi di battuta sismica che, visti i ridotti spazi a disposizione all’estradosso pila, hanno assunto anche la funzione di “castelletti” per il sollevamento dell’impalcato per la manutenzione e sostituzione dei dispositivi di vincolo, dimensionati con una azione massima di circa 30.000 kN (figura 9).

Non irrilevante è risultato pure lo studio geometrico indispensabile per definire la possibilità di accesso alle sezioni da saldare, nello spazio ridotto delle gambe, e la possibilità di ispezione futura a testimonianza dello stato di conservazione.

Alcune note vanno espresse in merito alla rampa di svincolo che consente a chi percorre la A7, venendo da Milano, di inoltrarsi nella riviera di ponente verso la Costa Azzurra.

Nel ponte concepito mirabilmente da Riccardo Morandi la rampa di svincolo si interfacciava a sbalzo con la grande struttura strallata.

Oggi le prestazioni desiderate, anche in questo caso, enfatizzano una riduzione di ogni discontinuità pernicioso, soprattutto se verticale.

In sede di progetto si è, pertanto, ritenuto ineludibile realizzare la continuità strutturale del piccolo impalcato della rampa (sviluppo 114,523 m e luce massima di 43.328 m) con il ponte principale; la complicazione

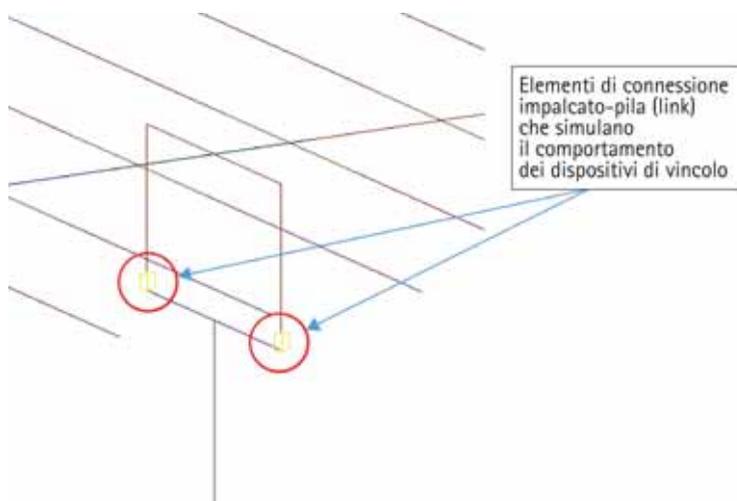


Fig. 15 - Connessione impalcato-pila

locale indotta dalla sovrapposizione di due solette con orditura difforme è stata risolta con l’adozione di *predalle* metalliche, mentre l’inserimento di un vincolo orizzontale quasi perpendicolare allo sviluppo del ponte, sulla spalla, è stato risolto con un isolatore elastomerico (figure 10-12).

L’impalcato della rampa, largo circa 11,70 m inclusi i camminamenti laterali, e caratterizzato da un raggio di curvatura minimo di 90 m circa, è stato realizzato, in piena conformità al progetto architettonico, con una coppia di travi carterizzate e collegate da una controventatura inferiore, secondo lo schema classico del cassone equivalente.

Il racconto di un ponte complesso come il ponte San Giorgio non si esaurisce con le sole notizie relative alla struttura portante che coniuga, come scritto, il tema innovativo alla migliore prassi progettuale al fine di raggiungere il risultato nei tempi più ridotti possibili; a integrazione si deve parlare succintamente della dotazione impiantistica, per esempio.

L’interno del ponte, realizzato ovviamente in acciaio laminato verniciato in classe C5 (“very high”, secondo EN 12944) è deumidificato grazie al posizionamento di 7 macchine dal peso di circa 500 kg ciascuna. Per movimentarle è stato necessario inserire un binario (HEA160, figura 13) all’interno del cassone portante.

La raccolta delle acque di piattaforma, inoltre, ha richiesto l’inserimento di una coppia di tubazioni in vetroresina Ø800 in entrambe le cellule laterali; la possibilità che un tubo si rompa è stata studiata sia come verifica dell’accumulo dell’acqua sul carter di fondo, sia come studio delle necessarie aperture di scolo.

LA MODELLAZIONE

Il progetto dell’impalcato è stato sviluppato da ITALFERR con il supporto dello studio MATILDI+PARTNERS; questo ha permesso di affrontare tutte le principali tematiche con un approccio critico duale e con software diversi (MIDAS CIVIL 2017 ver. 2.1 e SAP2000 ver.20.2.0), in contemporanea e con reciproco controllo.

Anche se apparentemente questo può apparire come una fonte di lentezza, la sinergia efficace implementata ha incrementato realmente la produttività del procedimento, assieme ad un primo controllo continuo dei risultati.

Per una analisi efficace di un impalcato in sistema misto è necessario approssiarsi in termini di caratteristiche della sollecitazione piuttosto che con una semplice valutazione degli stati tensionali, trovandosi in presenza di sezioni talora in classe 4, quindi la modellazione analitica globale è stata impostata con elementi finiti di tipo BEAM. I vincoli esterni, schematizzati con elementi BOUNDARY, rispecchiano il reale vincolamento della struttura. La struttura è stata modellata con lo scopo di dimensionare la trave principale a cassone. Pertanto si è considerata una trave principale di 361 elementi di tipo BEAM (da 1 a 361 a partire dalla spalla A) che costituisce la sezione resistente a cassone e degli elementi trasversali aventi la medesima scansione dei traversi d’impalcato con lo scopo di ripartire il carico. La rampa è costituita da 42 elementi di tipo BEAM (numerazione da 399 a 441 a partire dalla spalla).

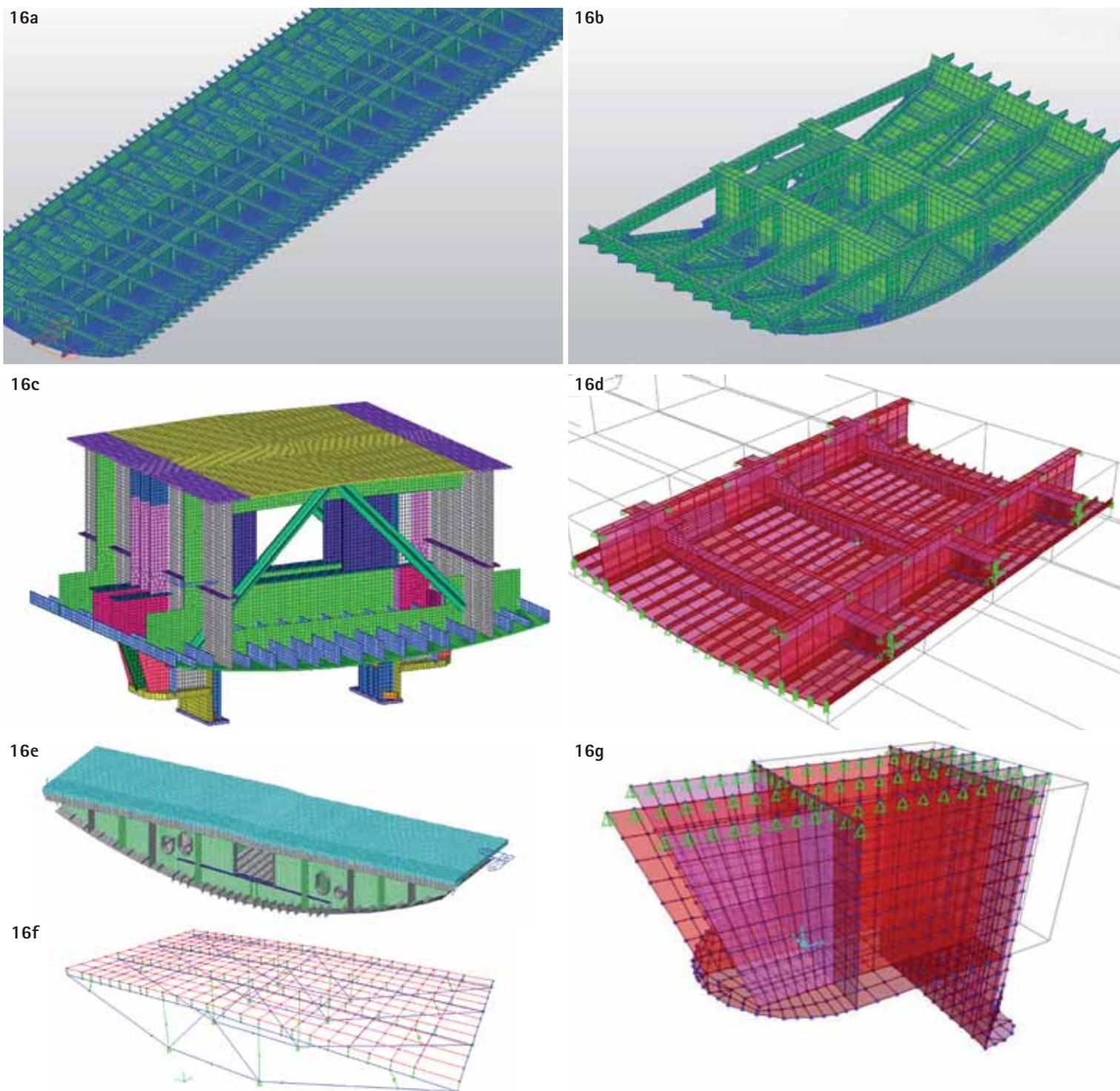


Fig. 16 - Alcuni esempi di modelli di calcolo implementati con differenti software

La trave principale è suddivisa in 47 sezioni strutturali, mentre la rampa è suddivisa in 15 sezioni strutturali. Per tener conto dell'altezza dell'impalcato, nel modello sono stati considerati dei bracci rigidi orizzontali con lunghezza pari alla distanza degli appoggi e verticali per avere la stessa eccentricità del baricentro della sezione dal piano di appoggio.

Il collegamento tra l'impalcato e la pila è stato effettuato tramite link in grado di simulare il reale vincolamento della struttura, realizzato prevalentemente con pendoli a basso attrito e assegnandone, tramite uno studio iterativo, la rigidità equivalente (figura 15).

Per lo studio ed il dimensionamento degli elementi secondari sono stati implementati modelli tridimensionali agli elementi finiti specifici per gli elementi indagati (figura 16).

Ad esempio, per l'analisi delle mensole esterne e del carter nonché per l'interazione tra gli stessi e l'impalcato è stato approntato un modello globale schematizzante due campate da 50 m, mediante elementi PLATE. Da modello così fatto si sono poi, di volta in volta, estrapolati dei sotto-modelli per le singole analisi di dettaglio. Ulteriori modellazioni di sono approntate per i diaframmi di spalla e di pila, comprensive degli elementi della gamba e del ritegno per il sollevamento.

Congiuntamente a questi modelli sono stati implementati modelli bi-dimensionali per i principali dettagli e per la soletta; sulla soletta, in particolare, le verifiche sono state condotte col metodo di Wood-Armer che considera l'effettivo comportamento dell'elemento, aggiungendo agli sforzi flessionali correnti anche l'effetto della torsione (figure 17-18).

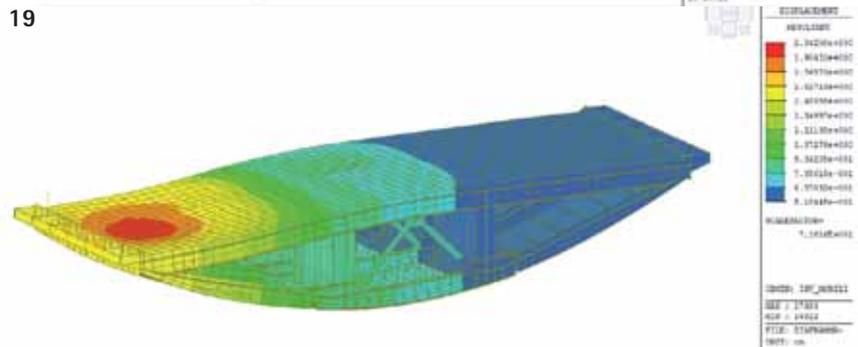
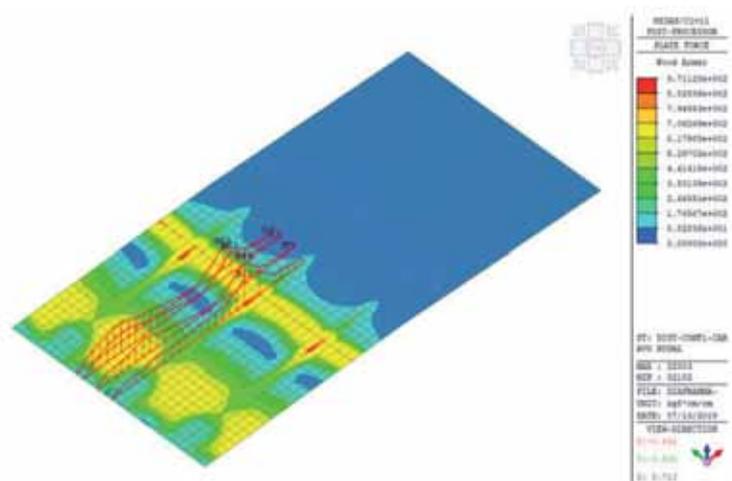
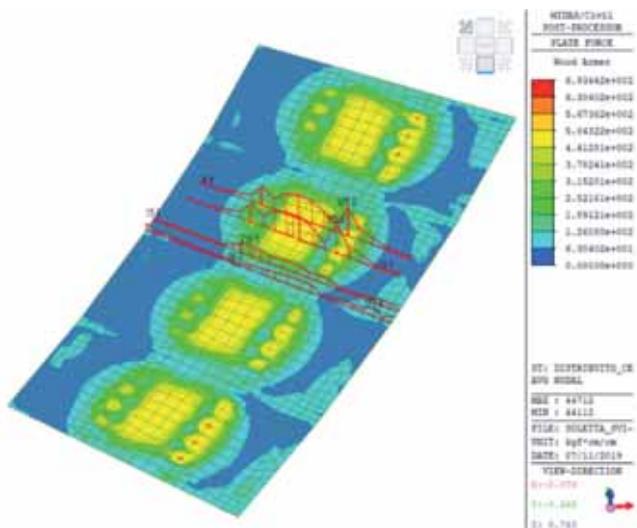


Fig. 17 - Momenti di Wood-Armer in direzione longitudinale. Figura 18 - Momenti di Wood-Armer in direzione trasversale. Figura 19 - Configurazione deformata per scenario cedimento remo

Gli effetti degli scenari previsti per le verifiche di robustezza, inoltre, sono stati coerentemente controllati anche per la soletta. Nella immagine di figura 19, ad esempio, è rappresentata la deformata di una porzione di impalcato, generata dal cedimento di un remo di sostegno della soletta.

IL COLLAUDO E IL MONITORAGGIO STRUTTURALE IN ESERCIZIO

Per il collaudo del ponte sono state previste, e successivamente eseguite, in opera 11 prove di carico statiche e due prove di carico dinamiche. Per le prove statiche sono stati disposti fino a 40 mezzi (bilici da 44-46 t) al fine di ottenere il 100% del carico di progetto, in combinazione SLE rara, nella mezzeria delle campate Spalla A-Pila 1 (P1), P3-P4, P4-P5, P9-P10, P14-P15 e, per i momenti negativi, in corrispondenza delle pile P4, P10 e P15. Inoltre, per la rampa, sono state verificati i momenti in mezzeria tra le pile P2r-P3r ed i momenti negativi in corrispondenza della pila P3r. Anche per la zona di innesto tra P16 e P1r è stata eseguita una specifica prova di collaudo.

Per ottenere i momenti flettenti suddetti (negativi e positivi), con la sagoma dei mezzi a disposizione, è stato necessario sfruttare tra circa l'80 ed il 100% dello spazio utile sulla piattaforma stradale delle campate da 50 m e tra il 40% ed il 60% nel caso delle campate da 100 m (figure 20-22).

Al fine della caratterizzazione dinamica è stata effettuata una prova OMA, indirizzata a rilevare i principali modi di vibrare e le frequenze delle campate di luce maggiore, ed una prova attiva di frenatura con 8 mezzi.

Il progetto del sistema di monitoraggio, che come noto viene predisposto per acquisire le informazioni fondamentali per gli elementi costituenti il ponte, nel caso in esame è stato pensato per consentire:

- Una verifica della congruenza tra il progetto e il costruito (verifica in fase di costruzione);
- Il controllo della variazione del livello di sicurezza nel tempo (supporto nella fase di vita);

- Un ausilio alla pianificazione razionale delle attività di manutenzione (supporto di gestione).

La verifica della congruenza è avvenuta con successo durante le fasi costruttive del ponte e durante le fasi di collaudo statico. La misurazione, in primis, degli stati deformativi e di conseguenza l'acquisizione indiretta delle grandezze tensionali, assieme alla misurazione degli spostamenti assoluti, definiscono il sistema di controllo.

I controlli della sicurezza avvengono, in seguito, in due fasi:

- una di lunga durata, che riguarda la valutazione della perdita di capacità dell'opera nel tempo come conseguenza del normale degrado delle strutture;
- una di breve durata che riguarda l'insorgenza di anomalie come conseguenza di eventi eccezionali (cedimento dei suoli, azioni sismiche) (figura 23).

CONCLUSIONI

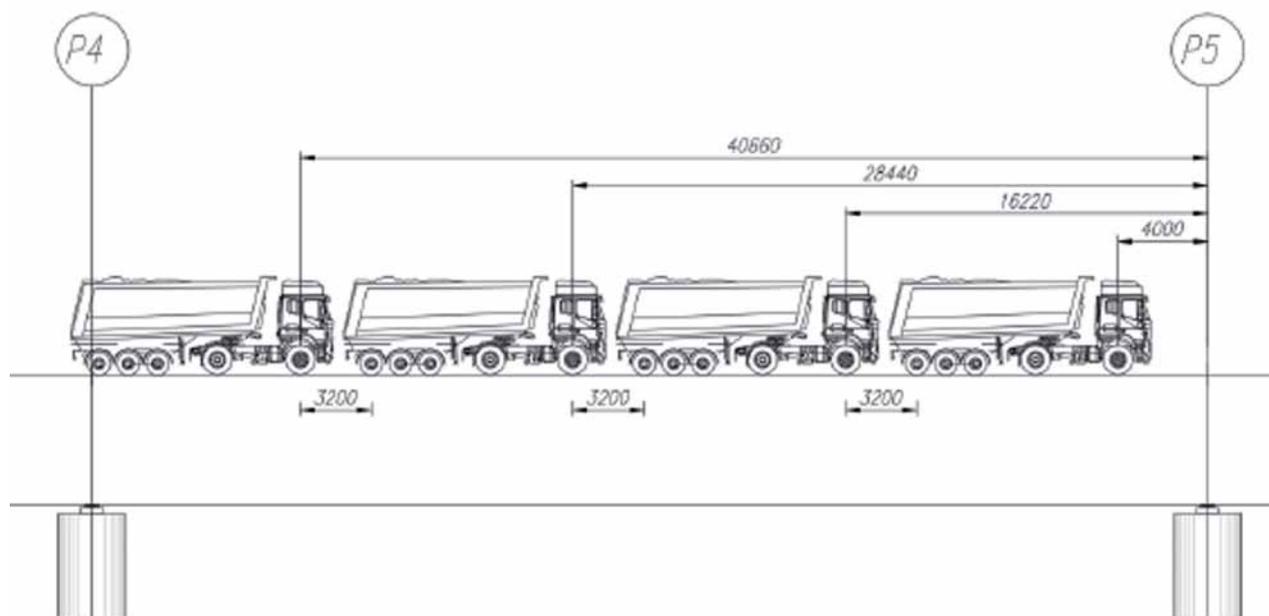
La realizzazione del ponte San Giorgio è stata frequentemente ravvisata come esempio virtuoso della capacità italiana di ottenere risultati apparentemente improbabili, in situazioni eccezionali.

Il progetto, in realtà, è stato affrontato, in buona sostanza, combinando solamente l'esperienza del gruppo di progettazione secondo le migliori possibilità operative e la migliore competenza presente.

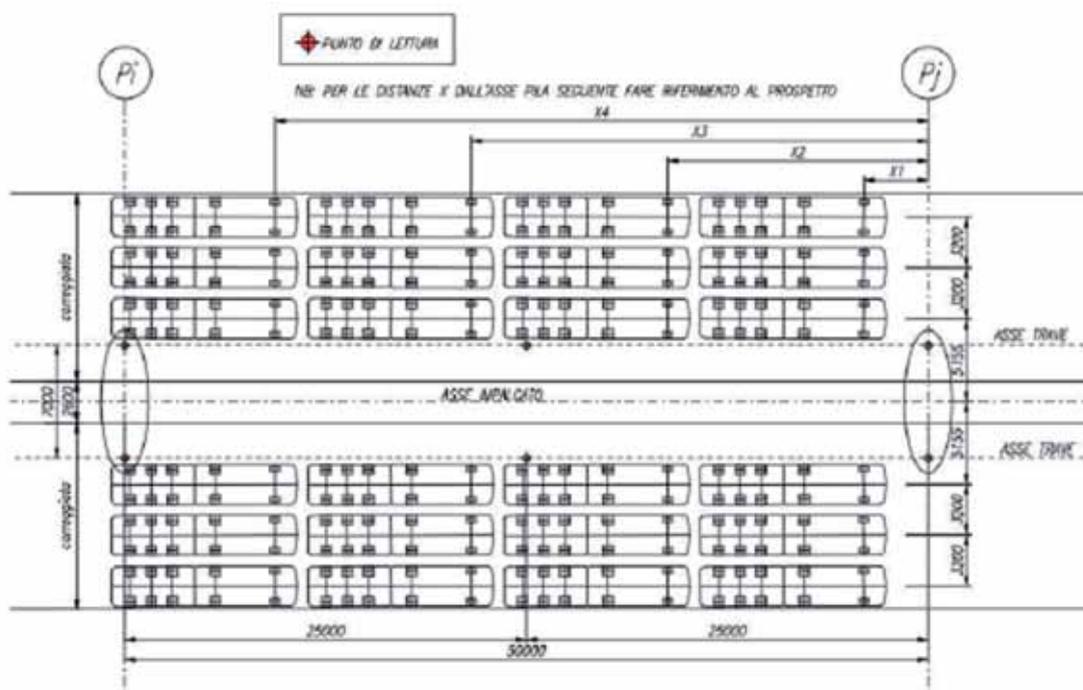
La collaborazione di tutti i soggetti coinvolti, pur con ruoli talora antagonisti, è stata fondamentale per la riuscita dell'intervento in tempi oggettivamente contenuti, a fronte di una qualità del costruito non comune, a cominciare dal significativo contributo architettonico di Renzo Piano.

Per gli autori, quindi, il "modello Genova" non è solo uno slogan facile e specioso ma, piuttosto, una occasione per ripensare l'intera filiera produttiva delle infrastrutture, senza invocare la specialità indotta dal crollo del viadotto Polcevera ma, invece, sviluppandone nel quotidiano l'esperienza proficua.

20a



20b



20c

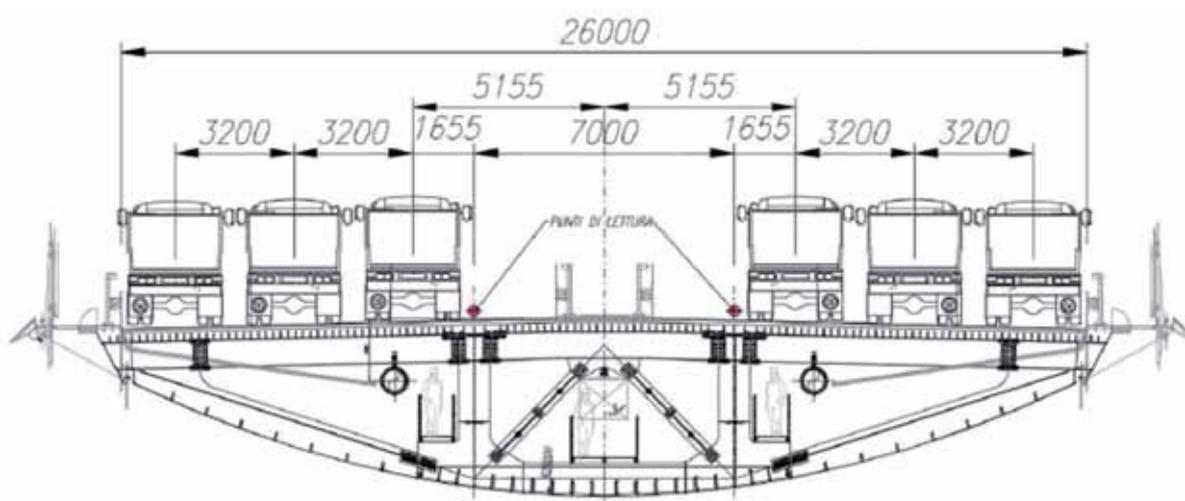
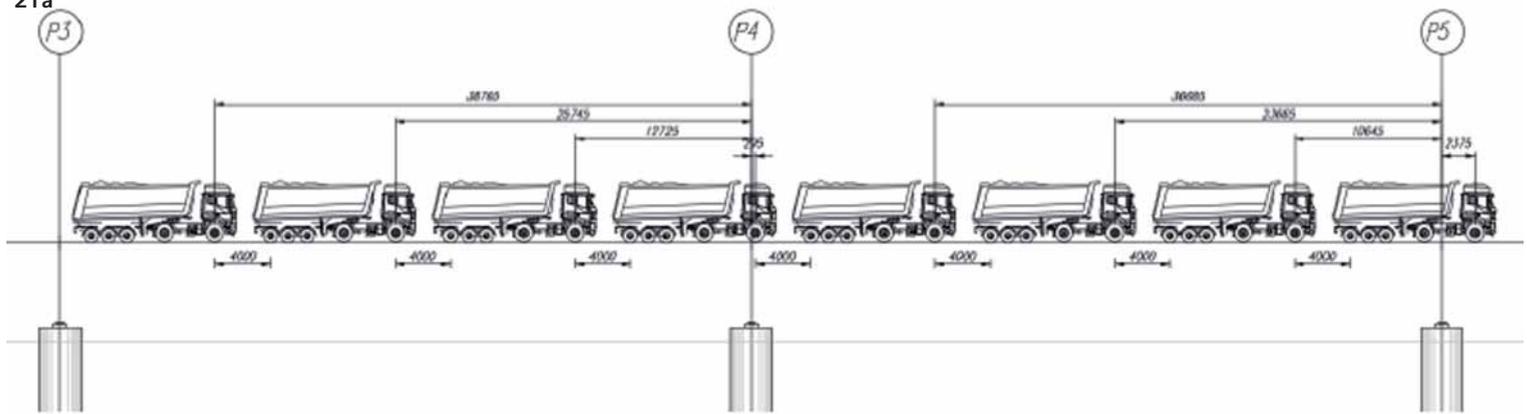


Fig. 20 - Configurazione dei camion per momenti flettenti in mezzeria di una campata 50 m

21a



21b

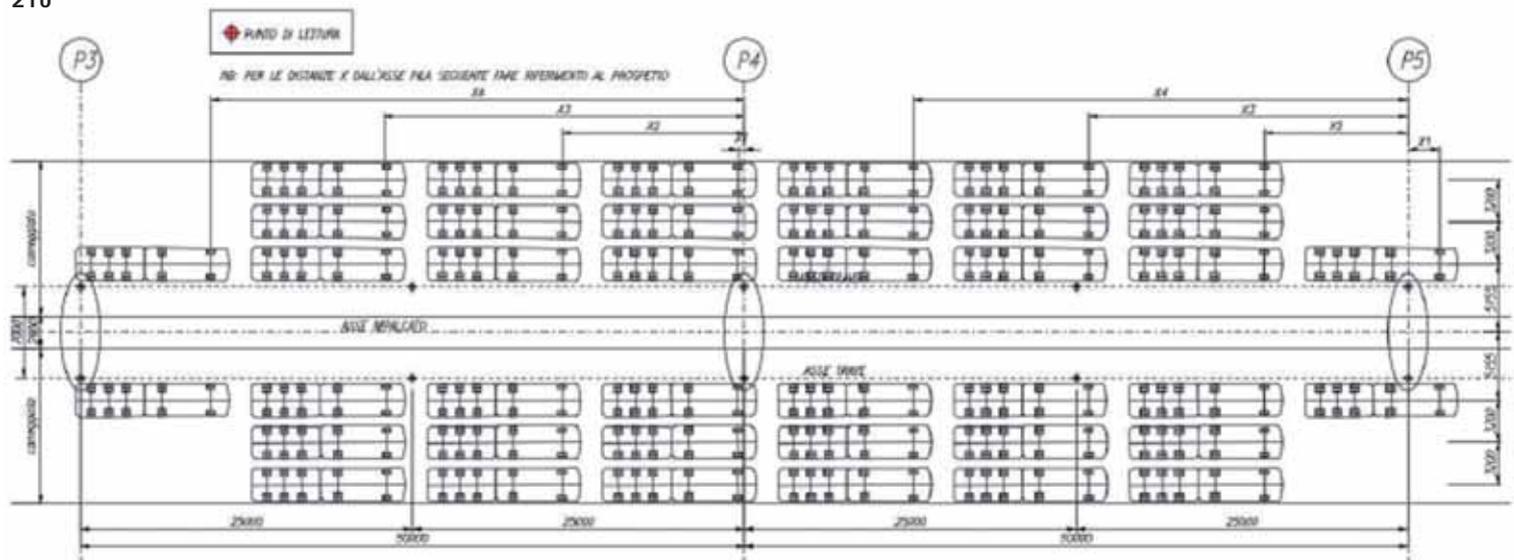


Fig. 21 - Configurazione dei camion per momenti flettenti negativi in corrispondenza della pila P4



Fig. 22 - Configurazione dei camion in cantiere, per momenti flettenti negativi

PONTE SAN GIORGIO DI GENOVA LA REALIZZAZIONE DI UN'OPERA ICONICA

GENOVA SAN GIORGIO BRIDGE THE REALIZATION OF AN ICONIC ARTIFACT

Ing. Siro Dal Zotto, Vito Cardella, Andrea Morbin, Ing. Lorenzo Sartori, Ing. Marco Raccagni,
Ing. Gioacchino Sarcina*, Ing. Francesco Poltronieri

Fincantieri Infrastructure S.p.A.

“Un ponte che attraversa piano piano la Val Polcevera, passo per passo, in silenzio, quasi chiedendo permesso; un ponte che sia una Nave, un grande Vascello bianco ormeggiato nella Valle, un ponte che nella sua semplicità non può essere banale, fatto da eccellenze italiane che attraverso una intensa attività di coordinamento, programmazione e specialisti del settore devono creare l'opera nel più breve tempo possibile”: è con le parole del suo ideatore, l'Architetto e Senatore a Vita Renzo Piano, che si vuole presentare il nuovo ponte Genova San Giorgio. L'approccio di Fincantieri alla realizzazione dell'Opera è riassunto nelle parole dell'A.D. Giuseppe Bono: “Il ponte deve essere una manifestazione, un simbolo del paese in tutto il mondo. Tutto questo è la Fincantieri, quello che abbiamo fatto e che faremo. Fincantieri rappresenta qualcosa di unico nel paese, introducendo un modello di integrazione unico.” Tutto ciò ha permesso che, appena due anni dopo il tragico evento del 14 agosto 2018 sia stato possibile sostituire l'ex Ponte Morandi, riportando alla normalità la viabilità lungo l'autostrada dei Fiori.

“A bridge that slowly crosses Polcevera Valley, step by step, in silence, almost asking for permission; a bridge that will be like a ship, a big white vessel moored in the valley; a bridge that can't be banal in its simplicity; a bridge made by Italian excellences who, through an intense activity of coordination, planning and the work of expert professionals, had to carry out the work as soon as possible.” It is through the words of its designer, Architect and Senator for Life Renzo Piano, that we want to introduce the new Genova San Giorgio Bridge. Fincantieri's approach to the realization of the work is summed up in the words of the CEO Giuseppe Bono: “The bridge must be an expression and a symbol of the country all over the world. All this is Fincantieri, what we have done so far and what we will do. Fincantieri represents something unique in our country, with introduction of its unparalleled integration model.” Fincantieri has made the replacement of former Morandi bridge possible only two years after the tragic events of 14 August 2018, bringing the road system of the Autostrada dei Fiori motorway back to normal.

1. INTRODUZIONE

L'associazione temporanea di imprese Fincantieri Infrastructure S.p.A, Salini Impregilo S.p.A. e Italferr S.p.A., sulla base dell'idea progettuale dell'Architetto Renzo Piano, si è aggiudicata l'appalto per la realizzazione di tutte le opere di costruzione necessarie al ripristino strutturale e funzionale del Viadotto Polcevera di Genova attraverso un incarico diretto ricevuto da parte del Commissario Straordinario per la Ricostruzione Marco Bucci, con assegnazione in data 18 dicembre 2018. Fincantieri Infrastructure S.p.A. ha quindi ricevuto l'incarico dalla costituenda Società Consortile per Azioni denominata PERGENOVA S.C.p.A. per l'esecuzione dell'analisi costruttiva e della realizzazione, assemblaggio e posa in opera delle opere strutturali metalliche. Il Commissario Straordinario per la Ricostruzione ha incaricato la so-

cietà Rina Consulting S.p.A. per l'attività di Direzione Lavori e quindi controllo della qualità del prodotto, della gestione e dei rischi legati all'esecuzione delle opere, mentre è stata affidata all'Arch. Renzo Piano la Direzione Architettonica. L'opera, per la finalità di utilizzo e le interferenze con gli ambiti ferroviari, è stata realizzata secondo le indicazioni dei capitolati:

- ANAS: Capitolato speciale di appalto – Norme Tecniche per l'esecuzione del contratto - Parte 2 IT. PRL.05.17 Rev. 1.0 – Opere d'arte maggiori Ponti e viadotti
- RFI, nell'ambito di pertinenza e per quanto richiesto: Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili Parte II – Sezione 6 RFI DTC SI PS SP IFS 001 C – Opere in conglomerato cementizio e in acciaio

*Corresponding author. Email: Gioacchino.Sarcina@fincantieri-infrastructure.it

2. DALL'IDEA AL PROGETTO

Il nuovo ponte è stato realizzato su un tracciato sostanzialmente parallelo a quello dell'ex Ponte Morandi, collegando la galleria Coronata sul versante di Ponente con lo snodo A10-A7 sul versante di Levante. È parte della nuova struttura la rampa di accesso al ponte per i mezzi transitanti sulla A7 provenienti da Milano.

L'opera ha uno sviluppo sull'asse principale di 1.067 m, costituita da 14 campate da 50 m, 1 da 41 m, 1 da 26 m e 3 campate centrali a scavalco del fiume Polcevera da 100 m; la rampa di accesso è costituita da 4 campate continue per complessivi 110 m. L'impalcato principale è sorretto da 18 pile, aventi tutte la medesima sezione ellittica con asse maggiore di 9,50 m e asse minore di 4,00 m; il tratto in rampa è sorretto da 3 pile di forma sempre ellittica ma con assi da 5,00 e 2,50 m. L'impalcato in esercizio ha una dimensione trasversale fuori tutto di 32,00 m e un'altezza in asse sezione di 4,82 m.

La sezione dell'impalcato e il suo andamento planimetrico, in particolare per la presenza della curva lato Ponente, impone l'utilizzo di una sezione torsio-rigida. In particolare, quest'ultima è stata ottenuta con 2 travi longi-

tudinali a interasse di 7,00 m, un fondo curvo calandrato (di spessore tipico pari a 20 mm, che cresce a 40 mm per le campate da 100 m) e completata superiormente dalla soletta in calcestruzzo collaborante. Il fondo non si limita ad essere un mero aspetto formale della struttura ma si configura come elemento portante, assolvendo la funzione di piano inferiore della sezione a cassone. Durante il montaggio, in assenza della soletta, la funzione portante di chiusura del piano superiore del cassone è svolta da una controventatura di piano con angolari accoppiati (figura 1). La continuità del nucleo centrale è garantita da giunti saldati a piena penetrazione. I conci di campata hanno lunghezze tipiche di 13,60 m e 15,20 m; i conci di pila una lunghezza standard di 6,00 m e presentano all'intradosso del fondo due robuste strutture metalliche aggettanti che collegano la travata di impalcato agli appoggi (figura 2).

Due appendici scendono a fianco dei baggioli della pila stessa con la duplice funzione di ritegno sismico e punto di contrasto ai martinetti necessari per il sollevamento dell'impalcato nelle operazioni di manutenzione durante l'esercizio dell'opera.

Le parti esterne al nucleo centrale, i "pannelli laterali" realizzano degli

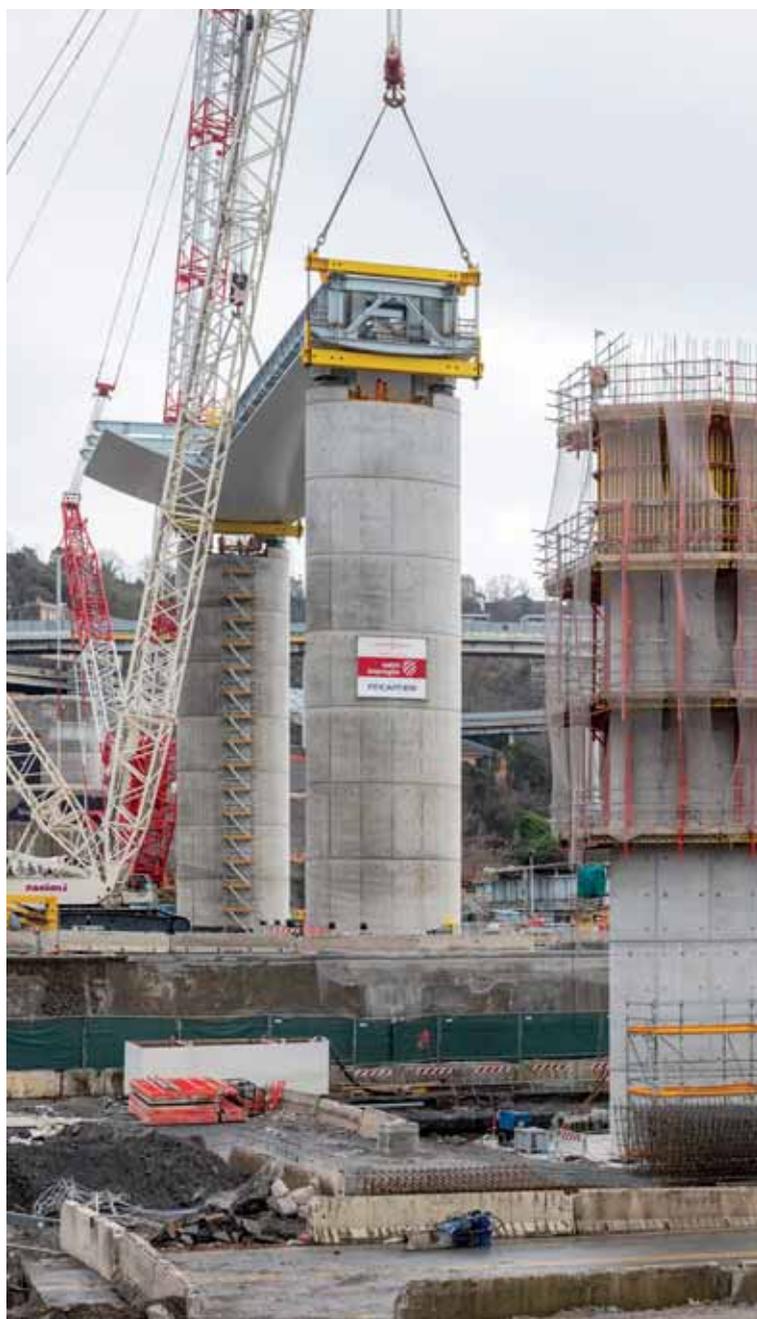


Fig. 1 - Sezione tipica dell'impalcato durante il sollevamento della campata.



Fig. 2 - Posizionamento dell'impalcato sugli appoggi definitivi.



Fig. 3 - La forma architettonica della chiglia della Nave voluta dall'Architetto Renzo Piano.



Fig. 4 - Struttura di bordo portante.



Fig. 5 - Vista generale dell'impalcato lato Levante.

elementi triangolari composti da coppie di elementi tirante-puntone ad interasse costante di 4,55 m; i puntoni inferiori sono saldati tra loro da una lamiera di fondo di spessore 10 mm che completa la forma architettonica della chiglia dell'impalcato. I pannelli laterali sono collegati al nucleo centrale mediante giunti bullonati ad attrito (figura 3).

Completano la sezione le “velette”, costituite da una lamiera continua, facente funzione di trave di bordo della soletta, e dalle lamiere aggettanti “triangolari” che supportano i camminamenti, i passaggi porta impianti, le vetrate e i pannelli fotovoltaici. Le velette sono continue lungo lo sviluppo del ponte, con giunti saldati a piena penetrazione, e collegate ai carter mediante giunzioni bullonate (figura 4).

È evidente quindi che la struttura dell'impalcato a sezione mista acciaio - calcestruzzo è caratterizzata da due differenti meccanismi resistenziali, ovvero quello torsio-rigido per il “nucleo centrale” e il meccanismo tirante-puntone per i “pannelli laterali”.

3. DAL PROGETTO ALLA PRODUZIONE

Il progettista Italferr S.p.A. ha prescritto che le strutture principali dell'opera venissero realizzate in accordo alle specifiche necessarie secondo il livello massimo di classe di esecuzione EXC4, secondo la norma di prodotto UNI EN 1090-2:2011 richiamata all'interno delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

Tutti i siti produttivi coinvolti hanno, oltre alla certificazione UNI EN ISO 9001:2015 “Sistema di gestione per la qualità”, anche le certificazioni UNI EN ISO 3834 Part 2 “Requisiti di qualità estesi per la saldatura per fusione dei materiali metallici” e EN 1090-1:2009 + A1:2011 EXC4 per l'Esecuzione di strutture di acciaio certificate CE. I prodotti base sono stati acquistati presso aziende primarie del settore, in accordo alle relative norme di prodotto Europee, certificati CE. I materiali utilizzati sono principalmente lamiere in acciaio UNI EN 10025-2:2005 S355J2+N, S355K2+N e acciaio UNI EN 10025-3:2005 S460N, S460NL.

Mentre in cantiere a Genova venivano demolite le opere esistenti e liberate le aree di lavoro per la successiva realizzazione delle opere di sottofondazione e di fondazione, presso i siti produttivi di Fincantieri S.p.A. venivano prodotte le strutture principali dell'impalcato metallico. La produzione è stata sviluppata secondo l'usuale strategia del gruppo Fincantieri S.p.A., che sviluppa la produzione sulla base della tempistica necessaria per la realizzazione dei singoli elementi amplificando le linee di lavoro per priorità e obiettivo, in modo da arrivare al completamento delle opere necessarie per la realizzazione di una intera campata nel più breve tempo possibile. La metodologia del “Percorso Veloce” ha inevitabilmente condizionato le operazioni di cantiere, ed è stato necessario

che anche le opere in cemento armato venissero realizzate in parallelo in modo tale da dare sufficiente anticipazione alla esecuzione della posa in opera dell'impalcato (figura 5).

Il gruppo Fincantieri ha utilizzato per la produzione del Ponte di Genova gli stabilimenti di Valeggio sul Mincio (VR), Castellammare di Stabia (NA) e Sestri Ponente (GE) per la realizzazione delle opere strutturali metalliche che costituiscono l'impalcato. Solo attraverso l'analisi preliminare delle potenzialità e delle competenze dei singoli stabilimenti è stato possibile focalizzare l'obiettivo di ogni stabilimento e massimizzare la produttività. Gli elementi di vestizione dei macro elementi e tutte le strutture superiori quali travi longitudinali, elementi trasversali e profili sono stati realizzati, saldati e controllati presso il sito produttivo di Fincantieri Infrastruttura S.p.A. di Valeggio S/M, dotato di impianti di saldatura automatica come il T-Master, con configurazione tandem, e manipolatori a una e due teste opposte saldanti; le tecnologie utilizzate massimizzano la ripetibilità del processo di saldatura, garantendone la qualità. Nei cantieri Navali Fincantieri di Castellammare di Stabia e Sestri Ponente i macro-elementi che formano il fondo dell'impalcato sono stati realizzati con una lamiera di fondo saldata in una unica soluzione attraverso l'utilizzo di attrezzature di saldatura automatica "Panel Line", per poi essere strutturati con travi longitudinali e irrigidimenti trasversali. In modo altrettanto strategico i conci di Pila, elementi strutturali di rilevante complessità costruttiva per la presenza di gravosi stati tensionali e saldature di particole importanza e dimensione, sono stati scorporati dalla produzione in linea. La scelta di realizzare i 18 conci di pila come elementi strutturali completi è stata fondamentale per ottimizzare i tempi di cantiere. Dopo il completamento delle operazioni di controllo geometrico e l'esecuzione dei Controlli Non Distruttivi (CND), gli elementi strutturali sono stati verniciati con un ciclo di pitturazione con alta durabilità (VH) in ambiente molto aggressivo (C5), in accordo alla UNI EN ISO 12994 - 2 e un colore di finitura deciso e voluto dalla Direzione Architettónica RAL Design 220 80 05 con un gloss superficiale del 30% (figura 6). I macro-elementi realizzati presso i siti produttivi di Castellammare di Stabia e Sestri Ponente sono stati trasportati per mezzo di chiatte che hanno risalito il mar Tirreno fino al molo in prossimità della foce del fiume Polcevera (figura 7); una volta sbarcati e posizionati su particolari trailer multi-assi ed elevata portanza sono stati trasportati in cantiere con trasporti eccezionali notturni (figura 8). La larghezza massima di 10 m dei macro-elementi è stata analizzata in fase progettuale per poter permettere il particolare metodo di trasporto, eseguito con pochi centimetri di scarto sui varchi di passaggio. Tutto l'impalcato metallico ha un peso totale di circa 17.500 t di cui circa il 77 % è stato lavorato presso il sito produttivo di Fincantieri Infrastruttura S.p.A. di Valeggio S/M. Parte di questo materiale è stato consegnato direttamente nel cantiere in val Polcevera mentre il 30 % è stato trasportato nei siti produttivi Navali dove gli elementi strutturali sono stati saldati alle lamiere del fondo carenato precedentemente predisposte. La realizzazione e la spedizione dei 262 macro-conci sulla base del programma gestionale predisposto e monitorato quotidianamente è stata essenziale per il rispetto delle sfidanti tempistiche realizzative del progetto.

4. ASSEMBLAGGIO E MONTAGGIO IN OPERA

Le campate sono state assemblate a partire dai fondi calandrati posati su opere provvisorie sui quali si imbastiva progressivamente ogni concio con i diaframmi, le travi principali, i pannelli laterali e, in ultimo, le velette (figura 9). Le travi principali superiori sono state saldate alle travi inferiori, solidali con il fondo del concio, per mezzo di saldatura longitudinale a cordone d'angolo, i conci sono stati saldati successivamente fra loro a piena penetrazione prima di essere movimentati per essere sollevati (figura 10). Le operazioni di controllo della preparazione del giunto, preriscaldamento e saldatura sono state supervisionate dai coordinatori delle saldature e sottoposte a verifica al completamento delle stesse in accordo al piano dei



Fig. 6 - Verifica della prima "carena" del ponte da parte della Direzione Artistica.

controlli con i metodi Visivo, Magnetico e Ultrasonoro. Tutto il personale utilizzato per le attività di saldatura a terra e in quota era in possesso di patentino emesso da ente terzo accreditato Accredia.

Gli elementi superiori trasversali e i diaframmi sono stati assemblati per mezzo di giunzioni bullonate ad attrito con l'utilizzo di bulloni HRC. Il particolare bullone permette di ridurre le tempistiche di controllo del serraggio previste dalle norme a garanzia dell'avvenuta applicazione della coppia di serraggio.

Tutte le movimentazioni dei conci e dei macro-elementi di campata sono state effettuate con carrelli SPMT (Self Propelled Modular Transport), in moduli da 4 o 6 assi componibili secondo le esigenze di trasporto. Il sistema ha offerto una grande versatilità negli spostamenti e ha consentito di muovere dai più piccoli macro-conci, del peso di una decina di tonnellate, fino alle campate da 100 m interamente assemblate del peso complessivo di 1800 t (figure 11 e 12).

Il cantiere ha fatto fronte a condizioni ambientali estremamente avverse, con quasi 100 giorni di allerta meteo idrogeologica nei mesi da settembre 2019 a giugno 2020 con intere giornate di pioggia intensa o forte vento. In aggiunta a ciò, in un parossismo di complicazioni, l'esplosione in Italia della Pandemia da Covid19. Le prime forti contromisure di contenimento che hanno pressoché fermato la Nazione sono state instaurate nel momento più importante dei montaggi, quando erano in corso i sollevamenti sopra il fiume ed era imminente il sollevamento della campata sopra la ferrovia. Alla tensione professionale per l'importanza della fase da superare, alla fatica fisica dei mesi precedenti, allo stress causato dall'incessante attenzione mediatica rivolta al cantiere, si è aggiunta l'umana preoccupazione per la propria salute. È stato in questo momento che tutte le persone coinvolte hanno dato il più grande segnale di forza e coesione,



Fig. 7 - Carico su chiatte dei macro conci a Castellammare di Stabia.



Fig. 8 - Trasporti a Genova.



Fig. 9 - Fase di assemblaggio a terra in cantiere.



Fig. 10 - Assemblaggio delle travi principali superiori ai fondi e collegamento ai traversi.



Fig. 11 - Spostamento con carrelli SPMT di una campata da 100 m.



Fig. 12 - Spostamento con carrelli SPMT di una campata da 100 m.

capaci di rimodulare il modo di lavorare per la comune sicurezza, riuscendo a mantenere lo stesso altissimo ritmo che era stato sostenuto fino a quel momento, con l'obiettivo collettivo di portare a termine l'opera.

5. VARO DEGLI IMPALCATI

I sollevamenti sono differenziati in due tipologie, con gru e sollevamenti con *Strand-Jack*. Per le campate da 50 m sono state utilizzate una coppia di gru in tandem. Per i sollevamenti in prossimità delle spalle (SA-P1, P1-P2, P17-P18 e P18-SB) e i sollevamenti della rampa è stata utilizzata una singola gru di grande portata. Per le campate da 100 m e i due sollevamenti in chiave di P2-P3 e P11-P12 sono stati utilizzati gli *Strand-Jack* (figure 13-15).

La tecnica del Tandem Lift ha previsto l'assemblaggio dei conci in due principali configurazioni:

- I due sollevamenti iniziali (P5-P6 e P14-P15) sono stati realizzati con un macroelemento costituito dai due conci centrali di Pila e la parte centrale della campata, in modo da creare una struttura autoportante;
- I sollevamenti successivi sono stati realizzati varando l'intera campata e il concio di Pila successivo, andando ad appoggiarsi al precedente elemento varato attraverso l'utilizzo di speciali mensole.

Le campate così configurate sollevate in tandem presentavano un peso compreso tra 400 e 600 tonnellate (figure 16 e 17).

Fagioli S.p.A. e Vernazza Autogru Srl hanno messo a disposizione complessivamente cinque gru cingolate, tutte operative contemporaneamente nella finestra tra febbraio e marzo 2020:

- Due Terex-Demag CC2800, portata massima 600 t;
- Una Terex-Demag CC3800, portata massima 650 t;
- Due Terex-Demag CC6800, portata massima 1250 t.

I sollevamenti in tandem sono avvenuti accoppiando una CC6800 con una CC2800 (o in alternativa la CC3800) configurate con bracci da 78 m, scegliendo i punti di presa in modo da massimizzare l'efficienza delle portate delle gru.

Per le zone di estremità dell'impalcato non si è potuto intervenire come descritto in precedenza, per l'impossibilità di creare spazi a ridosso delle spalle, per l'interferenza con le viabilità autostradali persistenti e per la complessa orografia con versanti acclivi. Per questi tratti è stata adottata la tecnica del Single lift con gru di grande portata e l'utilizzo di torri provvisorie per scomporre la campata in sotto-conci di peso idoneo alla portata della gru compatibilmente ai grandi sbracci necessari.

Per questi sollevamenti (SA-P1, P1-P2, P17-P18 e P18-SB) e i sollevamenti della rampa si è ricorso all'uso di una singola CC6800 con cambio di configurazione del braccio a 114 m per il versante di Ponente, 102 m per il versante di Levante e 78 m per la rampa.

Le campate da 100 m e le due campate di chiusura da 50 m (P2-P3 e P11-P12) sono state invece assemblate completamente a terra, complete di lastre predalle in acciaio, armatura lenta della soletta ed elementi di impianto interni all'impalcato, arrivando ad un peso complessivo massimo di circa 1800 t. Per i notevoli pesi in gioco per il sollevamento e per risolvere le interferenze con le sottostrutture è stato necessario ricorrere alla tecnica di sollevamento con *Strand-Jack* (figura 18).

Per ogni sollevamento sono state utilizzate quattro coppie di martinetti a recupero di cavo collegati all'impalcato da sollevare con golfari ed irrigidimenti dedicati.

Per sollevare le campate da 100 m dal lato dell'impalcato in quota un sistema di bilancini e golfari ha permesso di equilibrare le azioni del sollevamento, mentre dal lato opposto tale funzione è stata assolta da un blocco di zavorre. Ogni martinetto ha una capacità limite di 1400 t e una corsa di recupero del cavo di 450 mm, che si traduce all'atto pratico in una velocità di sollevamento dell'impalcato di circa 7 m/ora (figure 19 e 20). Prima di sollevare ognuna di queste campate, è stato necessario posizionare in quota il concio di Pila sull'allineamento successivo per poter



Fig. 13 - Quattro campate in quota lato Levante montate in sequenza.



Fig. 14 - Sollevamento in tandem della campata fra le pile 12 e 13 (1 di 2).



Fig. 15 - Sollevamento in tandem della campata fra le pile 12 e 13 (2 di 2).



Fig. 16 - Concio da 50 m pronto al sollevamento in tandem.



Fig. 17 - Sollevamento in tandem della campata fra le pile 3 e 4.



Fig. 18 - Spostamento con SPMT di una campata da 100 m e attrezzatura per sollevamento con Strand - Jack.



Fig. 19 - Fase di sollevamento della campata da 100m fra le pile 8 e 9 (1 di 2).



Fig. 20 - Fase di sollevamento della campata da 100m fra le pile 8 e 9 (2 di 2).



Fig. 21 - Campata da 100 m sopra la ferrovia pronta per il sollevamento.



Fig. 22 - Campata da 100 m a sbalzo sul fiume Polcevera durante la movimentazione.



Fig. 23 - Presa in carico della campata con carrelli SPMT in alveo del Polcevera.



Fig. 24 - Campata da 100 m sopra il fiume Polcevera pronta per il sollevamento.

installare gli *Strand-Jack* e il sistema di regolazione per l'inserimento della campata. Sotto i conci di P9, P10 e P11 sono state installate delle strutture che hanno consentito, grazie a coppie di martinetti orientati lungo i tre assi principali, di muovere il concio di Pila per poter allineare con precisione la campata in quota. Le campate sollevate, aventi una lunghezza complessiva di 94 m, sono state inserite in un varco di appena 5 cm più ampio. Questa precisione è stata raggiunta grazie al taglio in opera a terra delle estremità della campata secondo l'effettiva inclinazione dei lembi di pila, rilevati topograficamente, e con l'ausilio del sistema di regolazione che ha chiuso il varco una volta che i giunti sono stati correttamente allineati garantendo le tolleranze millimetriche necessarie per la realizzazione dei giunti a piena penetrazione in quota. Per le campate di scavalco del Polcevera e della ferrovia è stato necessario effettuare un sollevamento preliminarmente a causa dei dislivelli tra le aree dove gli SPMT dovevano muoversi e in ragione dell'altezza degli ostacoli da superare. (via 30 Giugno, via Perlasca e il sedime ferroviario) Questo sollevamento (altrimenti detto Jack-Up) ha alzato gli impalcati rispetto alla quota di appoggio per l'assemblaggio di circa 1,50 m per il varo sul Polcevera e di circa 3,00 m per il varo sopra la ferrovia, richiedendo l'utilizzo di apposite strutture provvisorie da interporre tra impalcato e carrelli SPMT (figure 21-24).



Fig. 25 - Sollevamento struttura di innesto della Rampa.



Fig. 26 - Sollevamento collegamento della struttura di innesto al ponte.



Fig. 27 - Sollevamento e completamento della Rampa.



Fig. 28 - Prove di carico durante il collaudo dell'opera.

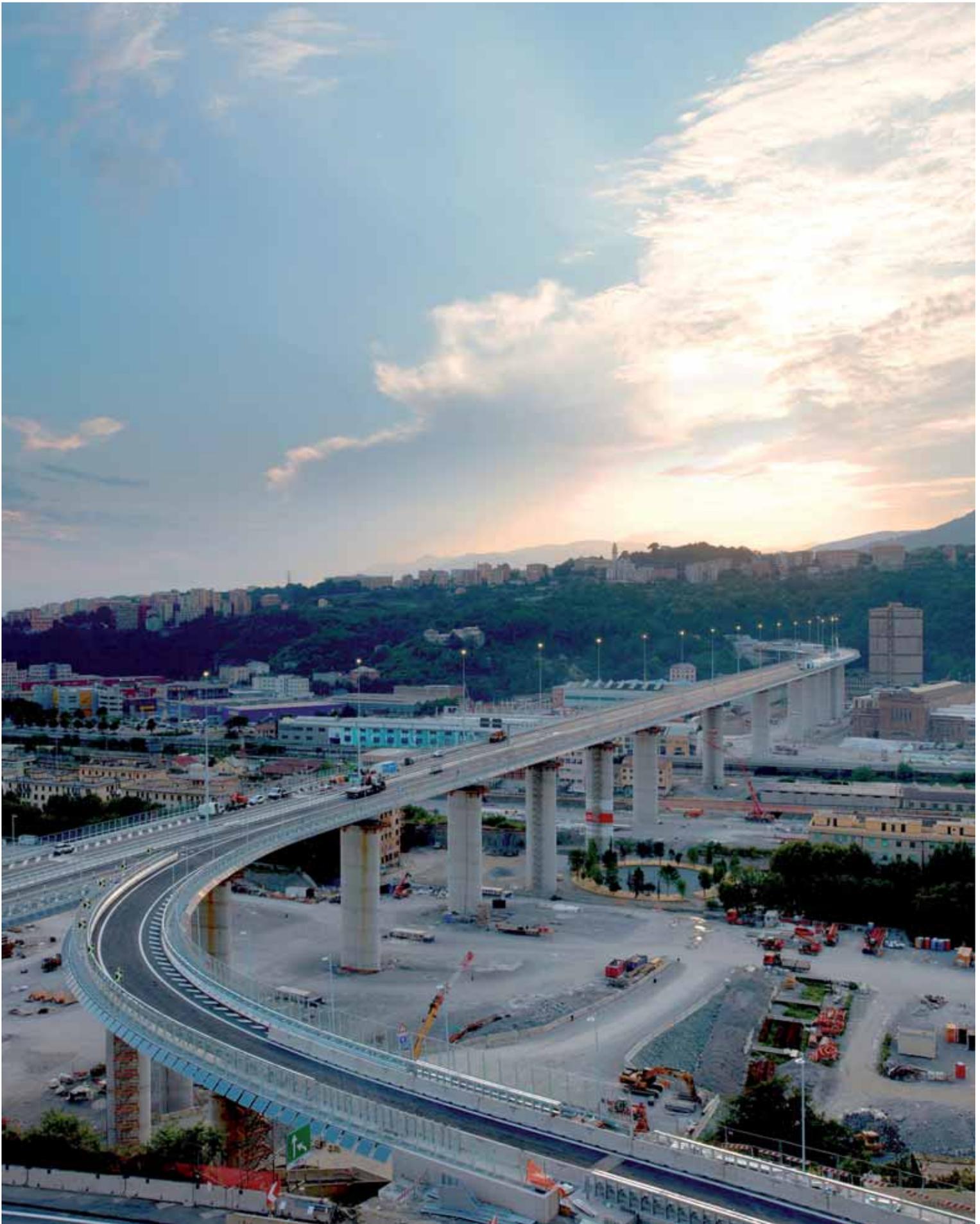


Fig. 29 - Vista generale del Ponte San Giorgio.

Il primo sollevamento è stato realizzato il 1 ottobre 2019 nella parte di cantiere di Ponente, mentre il primo sollevamento nella parte di cantiere di Levante è stato possibile realizzarlo il 15 dicembre 2019.

Il 28 aprile 2020, con la chiusura in chiave della campata P11-P12, le due sponde della val Polcevera sono state riunite. Le operazioni di sollevamento si sono definitivamente concluse con il varo dell'ultima campata della Rampa il 29 maggio 2020 a soli 333 giorni dall'arrivo del primo elemento strutturale in cantiere (figure 25-27).

6. ATTIVITA' FINALI E COLLAUDO

Una volta completato l'impalcato in quota, con il montaggio dei pannelli laterali, delle velette, la posa delle predelle e dell'armatura lenta, prima del getto della soletta rimanevano da eseguire la pesatura dell'impalcato e il calaggio fino alla quota di progetto.

Le campate sono state posate sulle pile ad una quota più alta di 265 mm rispetto alla quota di imposta di progetto, per consentire la pesatura dell'impalcato e l'applicazione delle coazioni di progetto, nonché per avere agio adeguato al montaggio degli appoggi provvisori e degli appoggi definitivi.

Gli appoggi definitivi dell'impalcato, isolatori a pendolo a doppia superficie, non potevano essere direttamente caricati nella fase transitoria di montaggio non essendo stati progettati per l'applicazione di spostamenti e rotazioni necessarie solo durante la fase di posa e allineamento delle campate.

Al termine delle operazioni di completamento in quota con accuratezza è stato eseguito il centraggio dell'impalcato sulle pile, sensibili per la loro snellezza ad eccessivi decentramenti che le variazioni termiche potevano portare durante il montaggio in quota. Per tale operazione sono stati realizzati degli elementi provvisori che hanno incapsulato, su ogni pila, due coppie di martinetti verticali e una coppia di martinetti orizzontali, appoggiati su una guida scorrevole in inox-teflon che ha consentito di ottenere gli spostamenti richiesti, longitudinalmente e verticalmente. I martinetti, attrezzati con manometri di precisione, hanno quindi permesso di misurare le reazioni vincolari e di regolare con piccole coazioni il valore misurato fino alla corrispondenza con i valori teorici. Al termine della pesatura, il ponte è stato abbassato passo - passo fino alla quota desiderata e si è quindi proceduto con l'inghisaggio degli appoggi. Raggiungendo così la continuità strutturale tra Impalcato, Appoggio e Pila, situazione che ha di fatto sancito la conclusione del montaggio dell'impalcato metallico.

Il getto della soletta in calcestruzzo, la stesura del manto stradale e la vestizione con barriere di sicurezza, pannelli fotovoltaici e vetrate protettive, nonché l'installazione dei mezzi robotizzati per il controllo e la pulizia dell'impalcato hanno permesso di avviarsi al collaudo statico e dinamico dell'opera.

Per il collaudo dinamico si è proceduto a una analisi modale operativa (OMA) con l'ausilio di tromografi triassiali Tromino® sincronizzati a velocimetri monoassiali opportunamente posizionati sulle campate. Grazie alla misura delle vibrazioni indotte dai microtremori naturali (vento, traffico, attività produttive nelle vicinanze) è stato possibile verificare la rispondenza dei modi di vibrare reali della struttura con quelli teorici. Un ulteriore test di tipo dinamico per verificare eventuali spostamenti orizzontali a carico degli appoggi o delle pile è stato eseguito con una prova di frenatura con 8 bilici a pieno carico che hanno percorso l'impalcato alla velocità di 50 km/h e, in corrispondenza di P9, hanno frenato sincronicamente fino all'arresto. La prova non ha evidenziato alcuno spostamento apprezzabile a carico dei trasduttori posizionati sugli appoggi. Per il collaudo statico sono stati utilizzati in tutto 56 bilici a 5 assi (motrice più rimorchio) caricati fino a 46 t e 4 moduli SPMT caricati a 130 t, per un totale di 12 prove (4 a momento negativo sulle Pile 4, 10, 15 e Pila 3 della rampa, 7 a momento positivo sulle campate SPA-P1, P3-P4, P4-P5,

P9-P10, P14-P15, P2-P3 della rampa e una prova sull'innesto tra rampa e asse principale), prove durante le quali è stato raggiunto il 100% della sollecitazione prevista in sede di progetto (figura 28). La singola prova tipica a momento positivo ha richiesto 24 mezzi, per un totale di più di 1000 t, mentre la prova a momento negativo della Pila 10 ha richiesto 44 mezzi ripartiti sulle due campate adiacenti. Gli SPMT sono stati utilizzati sulle campate della rampa dove la ridotta larghezza della piattaforma stradale avrebbe consentito di posizionare un numero di bilici insufficiente a raggiungere la sollecitazione da verificare. Gli abbassamenti misurati sono stati pienamente rispondenti ai valori attesi, pari a circa 2,00 cm di inflessione nelle campate da 50 m e 8,00 cm per quelle da 100 m.

Per le attività di collaudo e monitoraggio, completano il panorama delle strumentazioni utilizzate i sensori estensimetrici installati sulla carpenteria metallica in mezzeria delle campate P3-P4 e P9-P10 e delle pile 4, 10 e 15 e le barrette estensimetriche annegate nel calcestruzzo della soletta delle medesime Pile sopra riportate e sulla Pila 3 della Rampa. Questo insieme di sensori ha permesso di verificare in tempo reale l'evoluzione dello stato tensionale della sezione durante la progressione delle prove di collaudo e continueranno a misurare le deformazioni dell'impalcato nel corso della vita dell'opera, consentendo nel tempo di mantenere la struttura costantemente monitorata in maniera semplice ed affidabile (figura 29).

7. CONCLUSIONI

Un'opera unica, gestita da aziende leader del settore che sono riuscite ad alimentare in modo continuo un cantiere che è riuscito a rispettare le tempistiche promesse alla Città di Genova e soprattutto ai suoi cittadini. Un successo ottenuto solamente con una programmazione molto dettagliata delle operazioni e grazie al lavoro e alle competenze di persone che si sono sentite parte integrante di un Progetto caratterizzato da efficienza, sicurezza e qualità. Il ponte, oltre a cucire una ferita della città di Genova, deve tracciare un metodo con cui affrontare l'esecuzione delle Grandi Opere in Italia: Competenza – Efficienza – Programmazione.

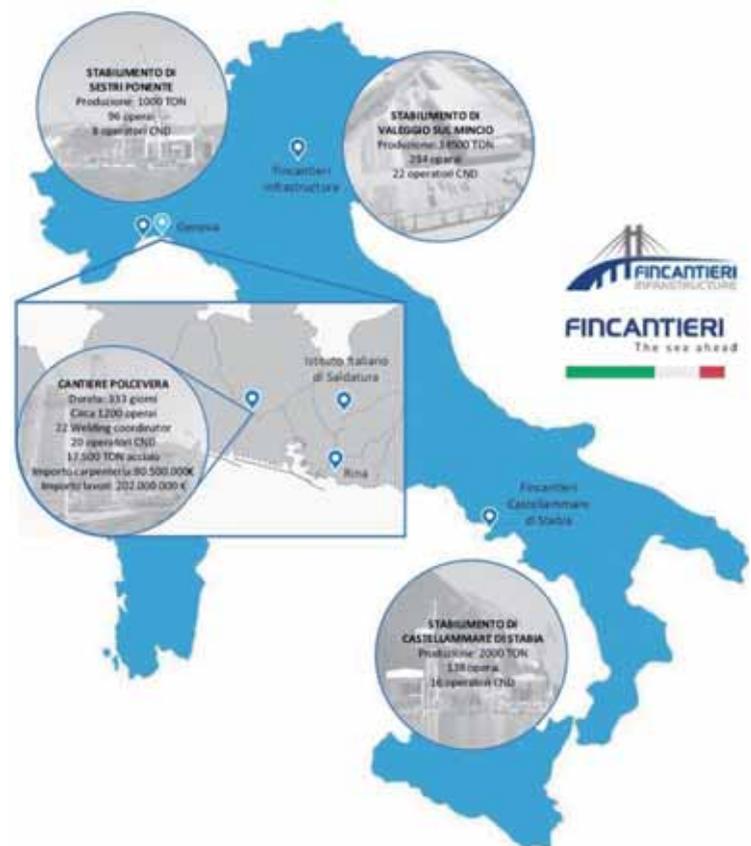


Fig. 30 - Organizzazione del progetto

PROJECT MANAGEMENT, DIREZIONE LAVORI E COORDINAMENTO SICUREZZA DEL NUOVO PONTE GENOVA SAN GIORGIO

PROJECT MANAGEMENT, WORKS SUPERVISION, HEALTH AND SAFETY MANAGEMENT OF THE NEW BRIDGE GENOVA SAN GIORGIO

A. Aliotta, E. Puppo, A. Tomarchio, M. Cademartori*, S. Dellacasagrande, A. Figundio

RINA Consulting S.p.A. - Genova

Il RINA nel dicembre 2018 è stato incaricato di svolgere le attività di Project Management, Direzione Lavori e Coordinamento della Sicurezza in fase di Esecuzione del contratto (comprendente progettazione ed esecuzione) di demolizione del Ponte Morandi (assegnato ad una RTI di impresa con Fratelli Omini mandataria) e di ricostruzione del nuovo ponte autostradale sul torrente Polcevera (assegnato al consorzio di imprese PERGENOVA S.C.p.A.), l'attuale viadotto Genova San Giorgio, progettato sulla base del *concept* dell'Arch. Renzo Piano.

RINA ha avuto l'incarico di affiancare la Struttura Commissariale durante tutto l'iter progettuale e procedurale dell'appalto ed è stata pertanto l'unica società presente durante tutte le attività di demolizione e ricostruzione del nuovo viadotto, dalla definizione del contratto, lo sviluppo della progettazione, all'inizio lavori fino alla loro conclusione. Nel presente articolo si illustrano brevemente le principali attività svolte che ben caratterizzano la peculiarità del servizio effettuato rispetto ad un approccio più tradizionale di Direzione Lavori e Sicurezza, nell'ambito della commessa, e in particolare:

- La gestione del progetto in tutte le sue fasi incluso il supporto tecnico-amministrativo e legale alla Struttura Commissariale;
- L'attività di revisione tecnica del progetto dalla fattibilità ai costruttivi;
- L'approccio "allargato", legato ai controlli sui materiali, che ha coinvolto la fase classica di cantiere, ma soprattutto ha previsto l'intervento di controllo della filiera presso tutte le aziende di prefabbricazione/stabilimenti;
- Il monitoraggio strutturale durante la costruzione.

On December 2018 RINA was encharged to develop the Project and Management, the Construction Supervision, the Health and Safety Management for the demolition of the Morandi Bridge and for the reconstruction of the Polcevera Viaduct, the Genova San Giorgio Bridge designed by the Arch. Renzo Piano.

RINA took the role of technical and administrative support of the Commissioner all along the design process and it has been present during all the activities of demolition and reconstruction from the beginning to the end. In this paper the main activities developed by RINA are described with particular emphasis to:

- *Management of the project in all the phases including technical, administrative and legal support to the Commissioner;*
- *Technical review of the design from the feasibility to the issue for construction phase;*
- *Quality assurance and control in the prefabrication factories and in the field;*
- *Structural monitoring during the bridge construction.*

*Corresponding author. Email: marcello.cademartori@rina.org

1. MANAGEMENT DELL'OPERA, INCLUSO SUPPORTO TECNICO AMMINISTRATIVO E LEGALE ALLA STRUTTURA COMMISSARIALE

Per la prima volta in Italia, nello sviluppo di un progetto infrastrutturale con un committente pubblico, si formalizza la figura del Project Management Consultant (PMC), affidato a RINA Consulting.

L'obiettivo è stato quello di supportare il Commissario Straordinario, garantendo il rispetto dei requisiti del progetto, la qualità, la pianificazione, la coerenza tra il progetto e la costruzione, i tempi e i costi.

Il supporto al committente ha riguardato tutti gli aspetti tecnici, gestionali, legali, amministrativi e finanziari, oltre ad includere la revisione e l'approvazione dei documenti di progetto (figura 1).

Il PMC si è occupato inoltre di supervisionare e monitorare tutte le

relative procedure approvative dei progetti prima, ed autorizzative dei lavori dopo, attraverso il dialogo costante con progettisti, appaltatori ed Enti interessati, grazie alla costante presenza sul territorio e grazie al rapporto con tutti gli stakeholder (come le autorità e gli organi governativi di alto livello).

La presenza del PMC sul progetto ha consentito:

- Velocizzazione dei processi;
- Rapidità nelle scelte;
- Chiarezza dei flussi informativi;
- Parallelizzazione dei processi operativi;
- Capacità di adattamento e gestione degli imprevisti.

Il team PMC, Direzione Lavori e Coordinamento Sicurezza della com-

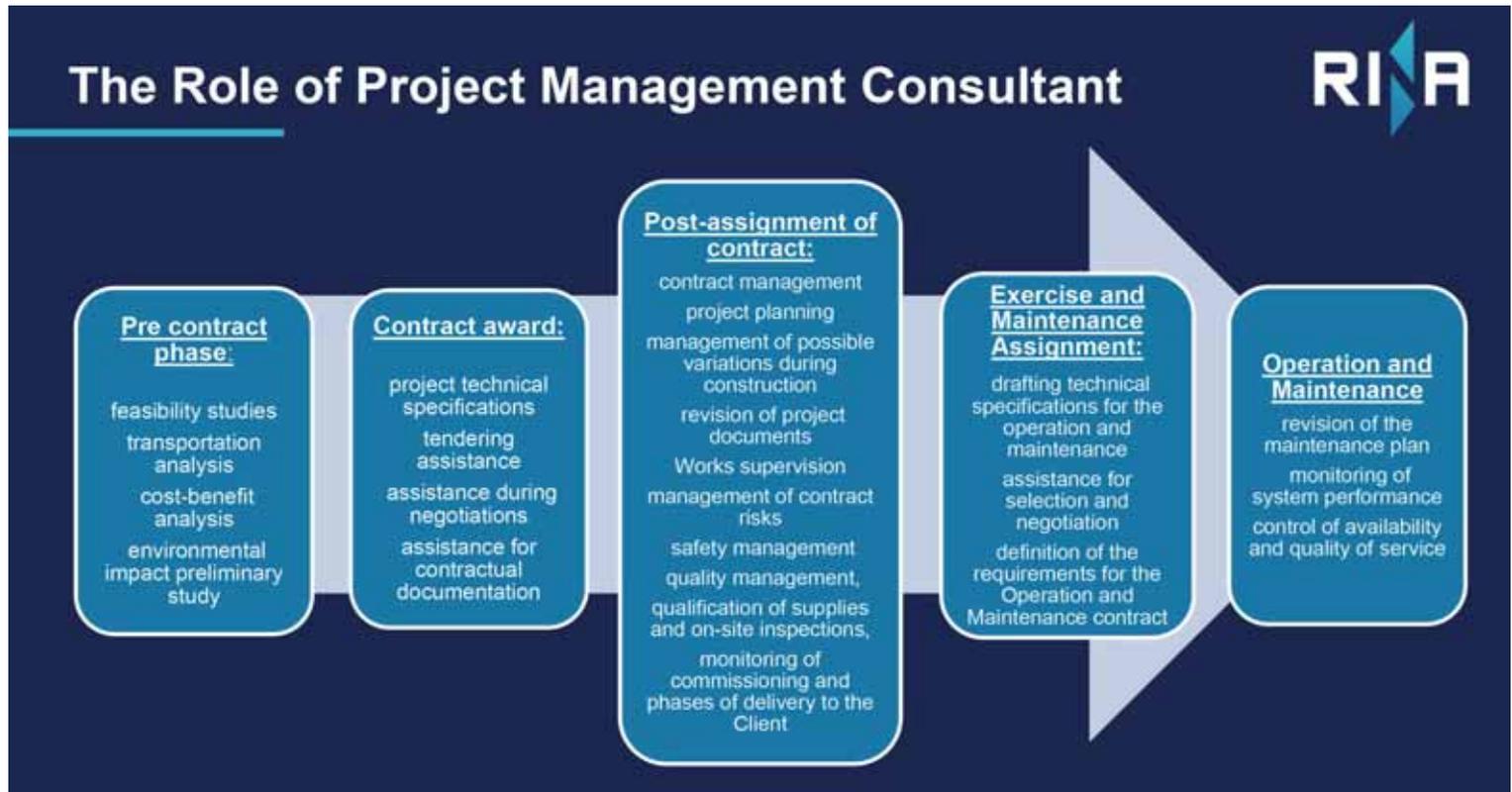


Fig. 1 - Ruolo del Project Management Consultant (PMC)

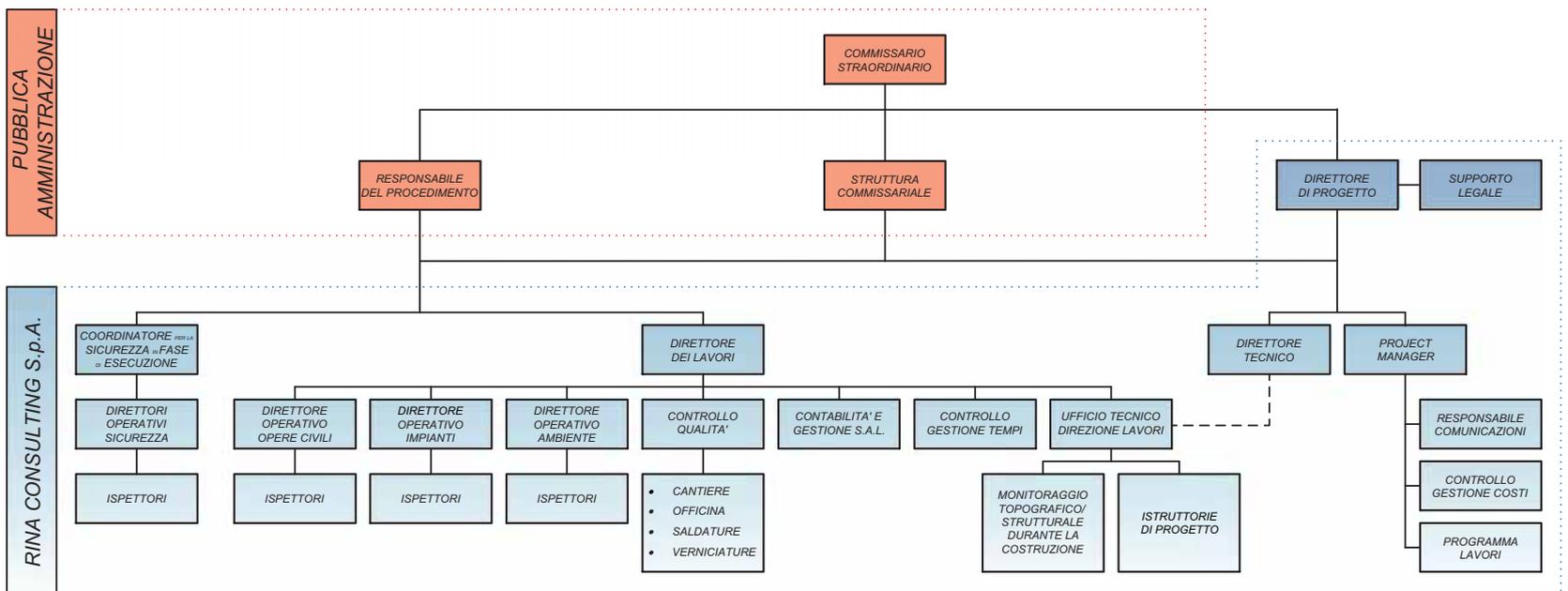


Fig. 2 - Organigramma

PMC, DIREZIONE LAVORI E COORDINAMENTO SICUREZZA IN NUMERI	
Valore totale del progetto	221 Milioni di Euro
Inizio della commessa	Gennaio 2019
Apertura al traffico dell'infrastruttura	4 agosto 2020
Team Project Management Consulting, Direzione Lavoro e Ufficio Coordinamento e Sicurezza	Tra le 45 e le 90 persone, tra ingegneri e tecnici. Il numero è variato nel tempo secondo le esigenze delle diverse fasi del progetto.
Totale ore di consulenza ingegneristica ad oggi (21 mesi)	Circa 200.000 ore.
Documenti tecnici fino ad ora emessi per le attività di Project Management, Direzione Lavori e Coordinamento della Sicurezza	Oltre 3000
Istruttorie tecniche di revisione, controllo e approvazione di documentazione relativa alla progettazione della demolizione e della ricostruzione del nuovo ponte, ai contenuti tecnici, alle verifiche, alla qualità, alla sicurezza e agli aspetti ambientali	Circa 600
Gestione e coordinamento	Oltre 250 riunioni tecniche sui contenuti progettuali ed esecutivi del progetto; più di 220 riunioni di coordinamento tecnico e operativo.
Ispezioni e sopralluoghi effettuati	Oltre 2000 presso stabilimenti/officine produttive relative a materiali ed elementi strutturali del nuovo ponte
Ispezione e verifica della congruità e qualifica impianti	Controllati oltre 15 impianti produttivi: <ul style="list-style-type: none"> • produzione lamiera e produzione di carpenteria metallica; • produzione calcestruzzo; • ferri d'armatura per calcestruzzo, • laboratori per esecuzione test su materiali.

Tabella 1 - PMC, Direzione Lavori e Coordinamento Sicurezza in numeri

messa ha coinvolto dalle 45 alle 90 persone, tra ingegneri e tecnici, a seconda dello stadio di evoluzione del cantiere (organizzato su turni di 24 ore, 7 giorni su 7) e delle relative esigenze di progetto secondo lo schema di organigramma riportato in figura 2.

Nella tabella 1 il dettaglio di alcune delle tematiche principali gestite da RINA Consulting nell'ambito del contratto di PMC, Direzione Lavori e Coordinamento Sicurezza ed una sintesi in numeri dell'impegno sul progetto.

Gestione aree di cantiere

Una delle prime criticità della commessa è stata la gestione e il coordinamento delle attività in parallelo di demolizione e di ricostruzione. L'ubicazione del cantiere in una zona densamente urbanizzata della città, che taglia le arterie principali di collegamento alla Val Polcevera, l'area di cantiere di dimensioni ridotte e frammentata, hanno richiesto un coordinamento e una massimizzazione dell'utilizzo della superficie disponibile e la necessità di trovare soluzioni alle continue esigenze di utilizzo, stoccaggio materiali e lavorazioni delle imprese coinvolte nel progetto.

La necessità di continui "passaggi" delle aree di cantiere dall' RTI Demolitori al Consorzio PERGENOVA e viceversa, dovuto alla quasi contemporaneità delle lavorazioni di demolizione e ricostruzione, e le ulteriori consegne di superfici ad enti pubblici coinvolti in lavorazioni secondarie, ma essenziali per il ripristino delle funzionalità dell'area per la gestione delle interferenze dei sottoservizi, ha richiesto un coordinamento settimanale delle esigenze di tutti gli attori coinvolti nel progetto.

Subappalti e subaffidamenti

Nell'ambito di un appalto articolato come quello della demolizione

e ricostruzione del Viadotto sul Polcevera dell'Autostrada A10, sono stati stipulati oltre 500 contratti di subappalto e subaffidamento, per un coinvolgimento complessivo di quasi 350 imprese.

RINA Consulting, avendo tra i propri compiti la gestione e la supervisione dell'iter autorizzativo dei subcontratti, ha svolto il controllo e la verifica documentale, per i soggetti terzi coinvolti, del possesso dei requisiti di qualificazione prescritti dal Codice in relazione alla prestazione subappaltata, interfacciandosi con l'impresa aggiudicataria e, successivamente, con la Struttura Commissariale per l'emissione dell'autorizzazione, necessaria all'avvio delle attività oggetto di subappalto/subaffidamento.

Approvazione e validazione del progetto e deposito delle opere strutturali

RINA Consulting ha svolto l'attività di controllo degli elaborati progettuali delle opere civili e impiantistiche del nuovo Viadotto Genova San Giorgio, assistendo la Struttura Commissariale nell'iter di approvazione e validazione delle opere del contratto di appalto.

L'esigenza del ripristino dell'infrastruttura in tempi contenuti ha reso necessaria la redazione del progetto esecutivo in itinere. Ciò ha comportato la suddivisione di quest'ultimo in "stralci di consegna", oggetto di oltre 400 istruttorie da parte dell'ufficio tecnico RINA: a seguito di valutazione positiva dell'istruttoria ne conseguiva comunicazione alla Struttura Commissariale, per la successiva emissione del verbale di approvazione e validazione da parte del Responsabile Unico del Procedimento.

Per tutte le parti d'opera "di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica" come previsto dal D.P.R. 380/2001, la Direzione Lavori si è occupata del confezionamento dei

singoli stralci progettuali per il primo deposito presso la Città Metropolitana di Genova e le successive integrazioni (più di 90). Per il dettaglio delle attività svolte nell'ambito della revisione del progetto si rimanda al punto 2.

Collaudo statico e tecnico amministrativo

Durante tutta la costruzione del viadotto sono state svolte diverse visite in corso d'opera da parte del Collaudatore Statico (10 visite) e della Commissione di Collaudo Tecnico Amministrativo (6 visite).

Ad ogni visita la Direzione Lavori ha fornito supporto tecnico e documentale, rispondendo alle richieste espresse dal collaudatore, al fine di facilitare la disamina dello stato di avanzamento dell'opera, secondo le indicazioni progettuali e della normativa vigente.

La Direzione Lavori inoltre, si è interfacciata con l'impresa per le richieste esplicitate dal Collaudatore Statico e dalla Commissione di Collaudo Tecnico Amministrativo, per quanto riguarda le prove di collaudo, i certificati delle prove sui materiali e i rapporti di verifica.

Iter Autorizzativo Ambientale

Considerata la natura dell'opera e della sua realizzazione, è apparsa subito evidente la necessità di garantire che fossero soddisfatti i principi di tutela dell'ambiente e della salute umana contenuti nella Direttiva 2011/92/UE, (come modificata da Direttiva 2014/52/UE) che, come stabilito dal D. L. 109/2018, risultavano elementi inderogabili durante la realizzazione del progetto.

Tramite il costante confronto con gli enti, nonché con le imprese coinvolte, sono stati individuati i seguenti documenti di valutazione di impatto ambientale (afferenti di fatto al Progetto Esecutivo di II Livello e quindi con esso approvati formalmente dal RUP):

- Corografia - individuazione siti di approvvigionamento, smaltimento e conferimento;
- Gestione materiali di risulta e siti di approvvigionamento e smaltimento - Relazione Generale;
- Gestione materiali di scavo in qualità di sottoprodotto ai sensi del D.P.R. 120/17 -Relazione Generale;
- Piano di Monitoraggio Ambientale - Relazione Generale;
- Progetto Ambientale della Cantierizzazione - Relazione Generale;
- Relazione Paesaggistica ai sensi D.P.C.M. 12/12/2005;
- Sistema di Gestione Ambientale;
- Studio Ambientale - Relazione Generale.

Tali documenti sono stati dapprima oggetto di una dedicata istruttoria da parte di tecnici competenti di RINA Consulting, e successivamente inviati a tutti gli enti di riferimento e in particolare a:

- Ministero dell'Ambiente e delle Tutela del Territorio e del Mare - Direzione Generale per le Valutazioni Ambientali (DVA), con il coinvolgimento della Commissione Tecnica di Verifica dell'Impatto Ambientale (CTVIA);
- Regione Liguria;
- Città Metropolitana di Genova;
- ARPA Liguria (ARPAL).

Inoltre, in accordo alla Convenzione di Aarhus "sull'accesso alle informazioni, la partecipazione dei cittadini e l'accesso alla giustizia in materia ambientale", la documentazione è stata resa disponibile on-line per la consultazione e commento della popolazione.

I commenti, le osservazioni e le raccomandazioni pervenute a valle del processo consultivo, sono quindi confluite, pur non a valenza di formali prescrizioni ostative, all'interno delle varie revisioni dell'istruttoria di progetto redatta da RINA Consulting, e trasmessi al progettista perché fornisse le dedicate risposte e garantisse la corretta implementazione degli stessi.

Il controllo dell'ottemperanza e dell'aderenza in fase esecutiva sono

quindi stati affidati alla Direzione Lavori di RINA Consulting - Direzione Operativa Ambiente, di concerto con gli istituzionali controlli degli enti (in primis ARPA Liguria e Città Metropolitana di Genova).

Si noti infine che complessivamente, con particolare riferimento alla tutela dell'ambiente, il progetto in toto, pur essendo stato autorizzato con un processo ad hoc (legge 109/2018), **non ha visto deroghe sui contenuti della normativa ambientale, ma esclusivamente sui tempi e le modalità di svolgimento delle procedure autorizzative.** Tale approccio, per la prima volta usato in Italia, riconosce la valenza straordinaria della nuova infrastruttura come rispondente ad una emergenza creatasi in seguito al crollo del Ponte Morandi.

Coordinamento sicurezza

Il gruppo sicurezza che ha seguito i lavori di ricostruzione del viadotto, composto da 9 professionisti a supporto del Coordinatore per la Sicurezza, ha dovuto affrontare molteplici criticità legate, da un lato, agli aspetti operativi (elevazione delle pile con cassero rampante, esecuzione dei completamenti in quota degli impalcati, attività in alveo, etc.), dall'altro, al contesto fortemente urbanizzato (presenza di un'area densamente popolata, presenza di infrastrutture stradali divenute cruciali a seguito del crollo, presenza di interferenze con i cantieri dei sottoservizi). In aggiunta, nel corso dei lavori sono emerse in particolare due criticità ambientali, aventi un forte impatto in materia di sicurezza dei lavoratori, quali il rischio legato alle polveri di amianto e il rischio di contagio da COVID 19.

La gestione di tali criticità è stata possibile attraverso:

- una stretta collaborazione con imprese ed enti per la ricerca di soluzioni tecnico-operative efficaci nel rispetto della sicurezza dei lavoratori, l'implementazione di procedure atte a verificare l'applicazione delle prescrizioni di sicurezza richieste;
- un'attenta verifica della documentazione trasmessa dalle imprese;
- una presenza continua in campo finalizzata a verificare l'applicazione delle misure di prevenzione e protezione indicate nei POS e di quelle previste dal Coordinatore;
- in generale una "pressione" costante finalizzata a mantenere alta la soglia di attenzione sulla sicurezza.

Controllo della pianificazione delle lavorazioni

Nell'ambito delle mansioni contrattuali di PMC e Direzione dei Lavori è stata condotta, durante l'intero svolgimento del progetto, l'attività di controllo e revisione della programmazione delle lavorazioni di demolizione e di costruzione. L'approccio all'attività è conforme alle più recenti normative internazionali sul EVMS (Earned Value Management System), ANSI EIA 748 ed europee ISO 21508:2018 (Earned value management in project and programme management) che stabiliscono i requisiti per una corretta gestione del contratto con particolare riferimento alla Pianificazione Temporale ed economica, al Controllo dell'avanzamento Temporale ed economico, alla reportistica e alla gestione delle Varianti. L'intero iter è stato svolto mediante l'impiego del software Primavera P6® - in grado di supportare l'intero processo, dalla definizione delle Strutture Principali di riferimento del Progetto (WBS, OBS) alla Programmazione e Controllo dell'avanzamento temporale e fisico di tutte le attività programmate - e del software TILOS® per l'acquisizione e visualizzazione delle informazioni temporali (date) e spaziali (progressive chilometriche) nelle diverse fasi di pianificazione.

Il programma dei lavori integrato delle attività di Demolizione e Costruzione - IMS: Integrated Master Schedule - ha rappresentato il baricentro del processo di programmazione ed il principale ambito dell'attività di collaborazione e di confronto tra l'Appaltatore ed il Committente. È il programma con il quale l'Appaltatore ha gestito l'integrazione di tutti gli obiettivi e milestone contrattuali, i punti decisionali ed i program-

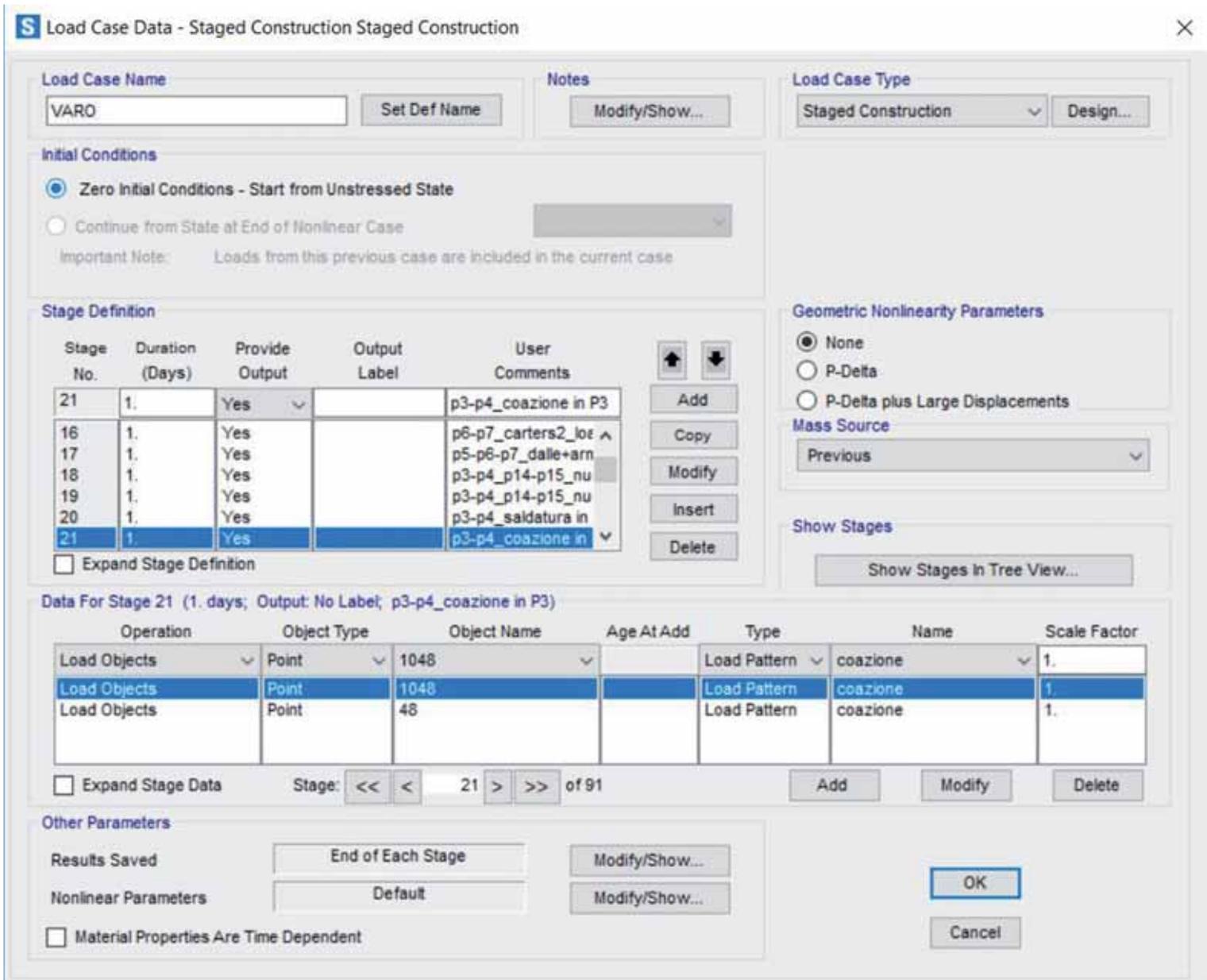


Fig. 3 - Scheda di input di una delle fasi intermedie di varo

mi operativi con i quali ha esplicitato il raggiungimento e il positivo adempimento dei propri obblighi contrattuali.

L'attività di confronto e verifica dei programmi si è svolta con continue interazioni tra le Parti, mediante riunioni di coordinamento settimanali e mensili finalizzate alla verifica della rispondenza della programmazione con l'effettivo avanzamento in sito, alla verifica della programmazione a breve e lungo termine e all'elaborazioni congiunta di piani di recupero, ove ritenuti necessari.

2. ATTIVITÀ DI REVISIONE TECNICA DEL PROGETTO ESECUTIVO E COSTRUTTIVO

L'attività di revisione tecnica del progetto è stata condotta durante tutto l'iter progettuale e costruttivo dell'opera, iniziando dalla fase di fattibilità e passando attraverso i progetti esecutivi di I Livello, II Livello, III Livello e i costruttivi di officina (secondo l'iter progettuale previsto dal Project Model predisposto da RINA Consulting e Struttura Commissariale). In ultimo ha riguardato la redazione delle Specifiche Tecniche di collaudo sulla base delle quali il progettista ha sviluppato le procedure di collaudo.

Il processo di revisione si è sviluppato sia nei confronti dei controlli

sulla conformità alle normative vigenti sia nel rispetto delle prescrizioni stabilite dai documenti a base di appalto.

I controlli sono stati eseguiti tramite schematizzazioni numeriche ritenute "semplici" ma comunque affidabili. Il RINA si è dotato degli strumenti necessari a sviluppare un livello di riscontro che si è ritenuto sufficientemente completo e adeguato all'attività di PMC. In molti casi, RINA Consulting ha lavorato in sinergia con gli uffici tecnici delle imprese per la risoluzione di dettagli costruttivi e la decisione sulle fasi costruttive più idonee.

Per effettuare l'attività di revisione tecnica RINA Consulting ha sviluppato in maniera indipendente tre tipologie di modelli di calcolo:

- Modello globale per lo studio del varo dell'impalcato, realizzato in aderenza alle singole fasi costruttive, al fine di avere un controllo indipendente del comportamento dichiarato dal progettista durante ogni singola fase di avanzamento della costruzione;
- Modelli globali per lo studio dell'impalcato e delle pile a struttura ultimata, al fine di ottenere risultati utili per il controllo del comportamento complessivo (sollecitazioni, tensioni nelle sezioni, reazioni sugli appoggi, deformazioni, modi propri di vibrare);
- Modelli locali per lo studio delle varie fasi costruttive e di montaggio,

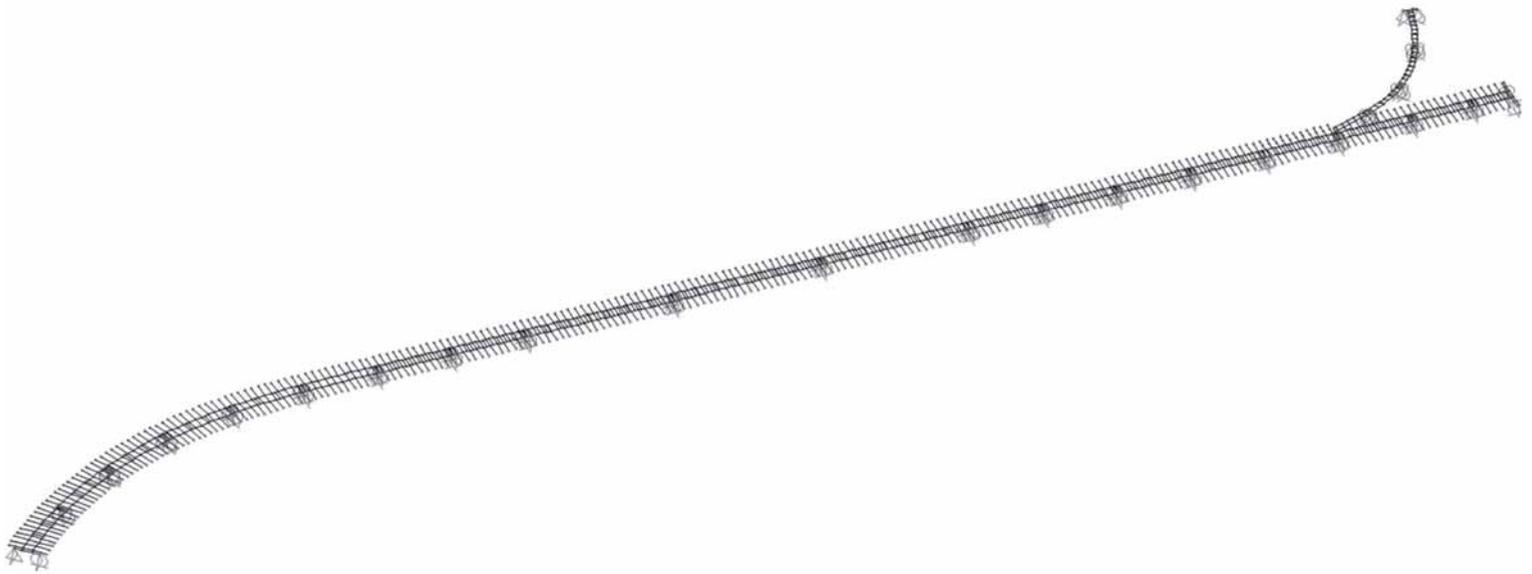


Fig. 4 - Modello globale impalcato

per la risoluzione di problematiche specifiche di cantiere, per la verifica dei dispositivi di vincolo e per la verifica di dettagli costruttivi. I modelli realizzati da RINA Consulting sono stati tutti eseguiti mediante il software SAP2000.

a) Modello globale per lo studio del varo dell'impalcato

Il progetto della struttura è stato svolto secondo analisi elastiche, di conseguenza le tensioni di ciascuna fase si sommano tra loro in maniera lineare: ciò significa che lo stato tensionale finale è dovuto alla sommatoria degli stati tensionali di ciascuna fase di vita della struttura. Il modello di calcolo ripercorre la sequenza costruttiva adottata in progetto, sia nelle geometrie delle sezioni sia nella rappresentazione dei vincoli esterni. Le porzioni di modello rappresentative delle campate sono state, quindi, inizialmente collegate a cerniera alle parti già in opera e, in uno step successivo, sono state rese solidali ai conci, simulando in tal modo l'ultimazione della saldatura tra conci successivi. La porzione varata inizierà ad essere sollecitata dalle azioni esterne solo a seguito dell'avvenuta solidarizzazione con le altre porzioni già presenti. Lo schema statico, quindi, si modifica nel tempo in funzione delle zone che a poco a poco vengono completate. Si riporta in figura 3 la scheda di input di una delle fasi intermedie di varo: in tale step, successivo alla solidarizzazione del concio di riva

della campata P3-P4 sul concio di pila P4, viene imposta la coazione prevista a progetto sugli appoggi della pila P3.

b) Modelli globali per lo studio dell'impalcato in esercizio

La struttura completa è stata modellata per le valutazioni dell'opera sottoposta alle condizioni di carico in condizioni statiche e dinamiche. Sono state analizzate dapprima le fasi di getto della soletta e poi l'applicazione dei successivi carichi permanenti portati e variabili. Le caratteristiche flesso-torsionali delle travi sono state di volta in volta adeguate alla fase studiata considerando, laddove presente, l'effettiva collaborazione della soletta. Le travi principali sono quindi state considerate a sezione mista, valutando la larghezza collaborante di analisi di ciascun concio. In particolare, i carichi variabili sono stati modellati considerando le diverse possibili disposizioni trasversali e longitudinali, in modo da massimizzare le varie caratteristiche di sollecitazione nelle singole zone. Gli elementi principali dell'impalcato, per i quali sono maggiormente significative le azioni verticali, sono stati analizzati e verificati utilizzando un modello su vincoli rigidi. Nella figura 4 si riporta la rappresentazione grafica del modello agli elementi finiti sviluppato da RINA per la revisione tecnica delle analisi e delle verifiche sugli elementi principali dell'impalcato.

I controlli sulle sottostrutture, sulle quali sono determinanti anche le azioni orizzontali di vento e di sisma, sono stati condotti su un

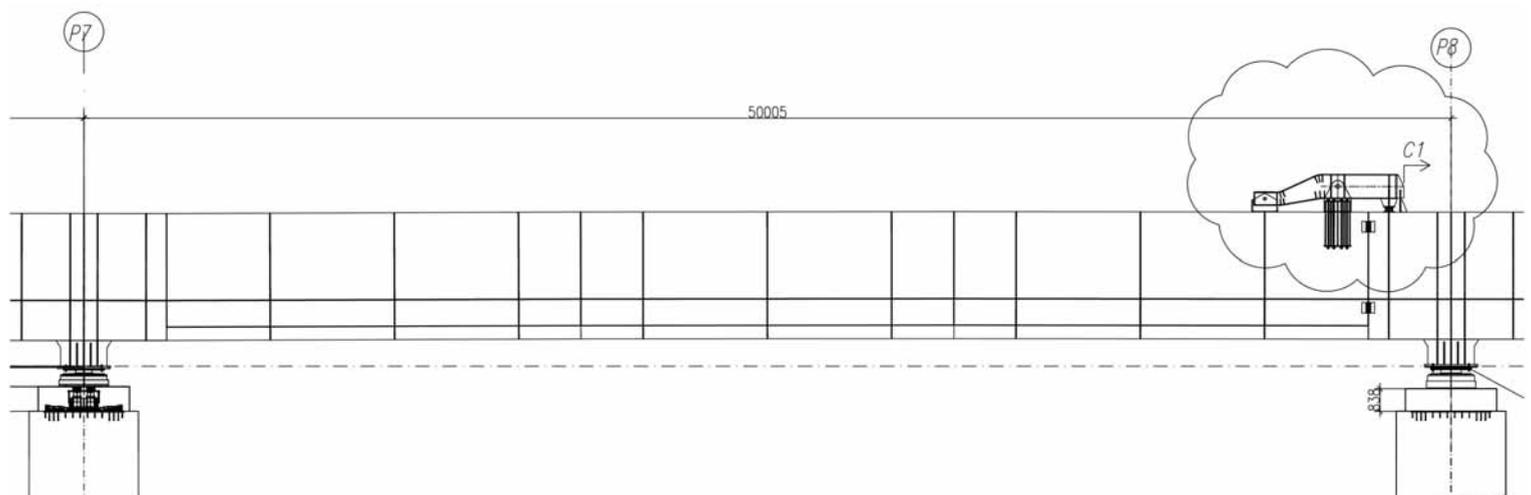


Fig. 5 - Clampa per appoggio provvisorio



(Fig. 6 - Controlli in Stabilimento Fincantieri Infrastructure - Costruzioni velette

modello comprendente gli elementi rappresentativi delle pile incastrate alla base. Quest'ultimo schema è stato considerato anche per ricavare i modi propri di vibrare della struttura e per i controlli sulle OMA (Analisi Modali Operative).

c) Modelli e calcoli locali

Durante le fasi di realizzazione dell'opera, sono state necessarie verifiche su specifici elementi locali, strutturali o di sollevamento.

Un esempio di calcolo locale è quello effettuato per i sollevamenti degli elementi metallici dell'impalcato, i quali sono avvenuti secondo diverse tipologie.

RINA ha seguito costantemente tutte le operazioni di varo degli impalcati. L'attività di revisione in questo caso ha comportato il ricontrollo indipendente sia delle metodologie adottate (sollevamento con gru o con *strand jack*) sia delle principali attrezzature utilizzate in campo. Nel caso di sollevamento con gru sono state ricalcolate, oltre alle pressioni massime scaricate a terra durante la manovra di movimentazione, anche le clampette utilizzate per la sistemazione provvisoria dell'impalcato: queste avevano lo scopo di fornire un appoggio provvisorio alla campata da 50 m appena varata, fino a che non erano eseguite e controllate le saldature di collegamento con i conci già in opera. Ogni campata sollevata in tandem presentava una propria distribuzione dei pesi, dovuta alle caratteristiche dei diversi conci di cui era composta e dovuta alla presenza di porzioni di carter laterali diverse per ciascun sollevamento. In questo caso è stato opportuno verificare la posizione

del baricentro di ogni campata rispetto ai due vincoli rappresentati dalle apparecchiature di sollevamento, per poter valutare le reazioni vincolari competenti a ciascuna gru e, di conseguenza, effettuarne la verifica rispetto alla propria capacità di sollevamento. Nella figura 5 viene rappresentato lo schema di sollevamento di una delle campate da 50 m tramite due gru ed è evidenziata la clampetta utilizzata su un estremo.

La procedura di sollevamento con *strand jack*, già risultata risolutiva durante le operazioni di demolizione del vecchio ponte Morandi, è stata adottata per tutte quelle situazioni in cui non era conveniente o possibile l'uso delle gru, ossia per le campate da 100 m e per i casi di varo in cui entrambe le campate adiacenti a quella sollevata fossero già presenti. In questi casi i controlli si sono concentrati su tutte le strutture di attacco (perni, piastre, barre di precompressione, nervature aggiuntive saldate alla trave da sollevare e relative saldature).

Tutte le suddette attività di controllo sono state svolte tramite calcoli manuali con schemi strutturali locali semplificati, ma efficaci a rappresentare il problema e comunque cautelativi.

RINA ha inoltre curato l'attività di revisione degli elaborati progettuali relativi a tutti i manufatti in c.a. di pertinenza dell'opera, quali, ad esempio, cordoli per barriere di bordo ponte, strutture in c.a. delle vasche di laminazione, fondazioni per pali di segnaletica.

Dal punto di vista strutturale, sono stati effettuati modelli locali delle sezioni esaminate tramite il software VASLU per quanto riguarda le verifiche a flessione, mentre sono stati utilizzati tools interni imple-

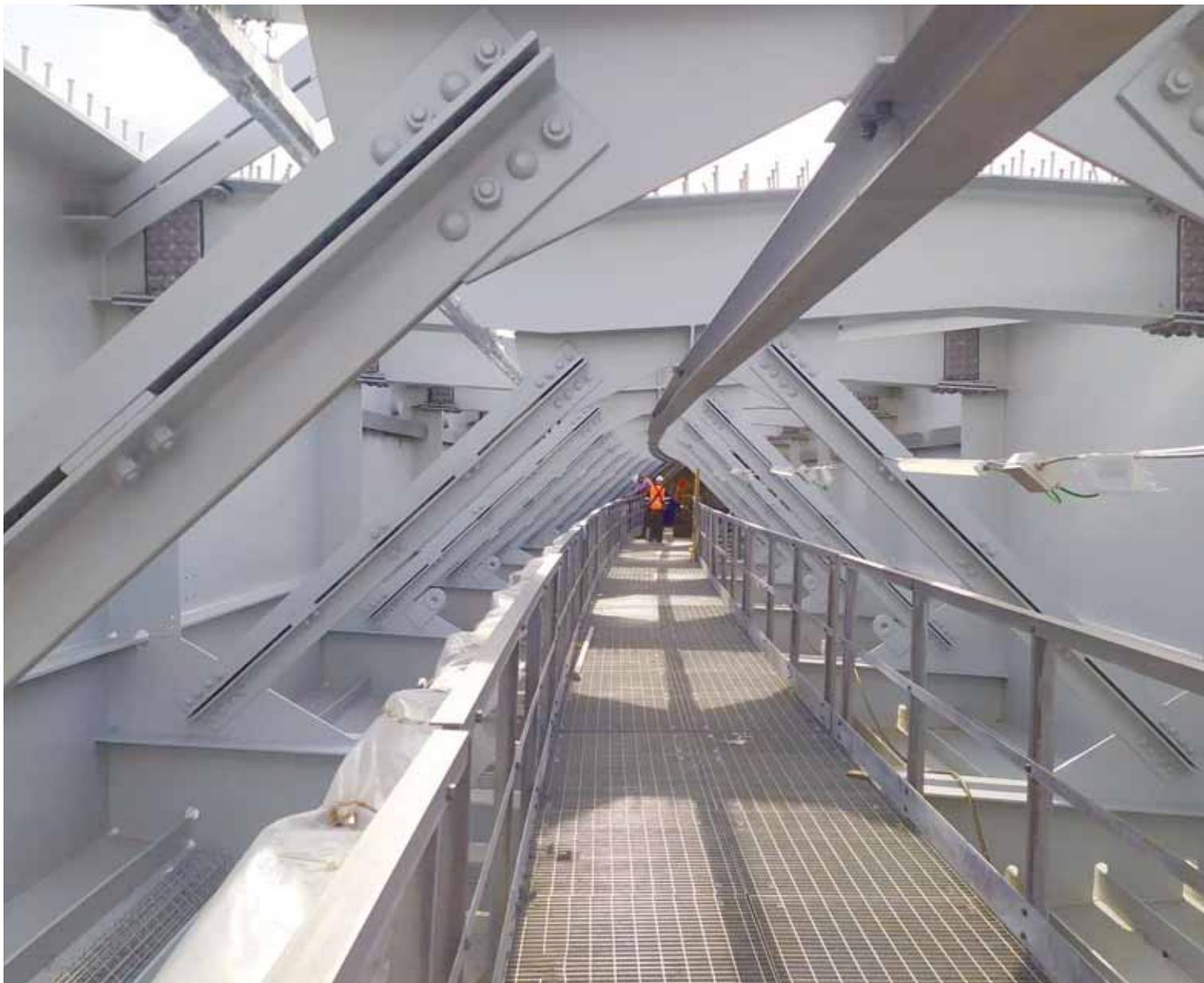


Fig. 7 - Controlli interno Impalcato

mentati in excel, per le verifiche a taglio e a fessurazione. Sono stati inoltre effettuati modelli ad elementi finiti per la valutazione indipendente delle sollecitazioni su alcuni elementi, tra i quali la piattaforma per la sostituzione in quota degli appoggi provvisori con i definitivi. Lo studio degli effetti del vento sulle antenne di illuminazione è un altro esempio di problema affrontato tramite modello locale.

Oltre alle valutazioni prettamente numeriche sopra descritte, che hanno comportato lo sviluppo di appositi modelli agli elementi finiti, l'attività di revisione tecnica di RINA è proseguita anche sugli aspetti costruttivi. In particolare, sono stati controllati i disegni di officina e di montaggio di tutta la struttura metallica: le verifiche in questo caso hanno riguardato la corretta corrispondenza di tutte le informazioni presenti in questi elaborati rispetto ai disegni propri del progetto esecutivo. In particolare, oltre al naturale controllo di coerenza delle sezioni e delle lunghezze dei singoli componenti della struttura, sono stati oltremodo importanti le verifiche sulla corrispondenza delle numerosissime saldature, sia ai fini della correttezza del dettaglio considerato nel suo insieme, sia ai fini dell'eventuale preparazione dei lembi, sia ai fini delle eventuali accortezze costruttive che dovevano essere considerate.

Questa fase del lavoro ha comportato il controllo di più di 2500 disegni,

molti dei quali sono stati soggetti ad una o più revisioni per rispondere alle necessarie richieste di correzioni o adeguamenti. In questa attività di revisione dei progetti costruttivi, l'ufficio tecnico della Direzione Lavori ha lavorato in stretta sinergia con i colleghi del controllo qualità al fine di valutare le soluzioni migliori adatte a risolvere i dettagli costruttivi più complessi da un punto di vista tecnologico.

L'attività di controllo tecnico dei progetti esecutivi e costruttivi tramite controlli indipendenti ha portato alla redazione di più di 400 istruttorie di progetto e alla raccolta di altrettanti fogli di calcolo con evidenza dei controlli effettuati.

3. APPROCCIO LEGATO AI CONTROLLI SUI MATERIALI IN CANTIERE E NEI CANTIERI DI PREFABBRICAZIONE

Assicurazione e Controllo Qualità negli stabilimenti produttivi

Il controllo sui materiali e sulle loro lavorazioni è previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018 - aggiornamento con D.M. del 17 gennaio 2018), al cap. 11.1 "Materiali e prodotti ad uso strutturale - Generalità".

In particolare, la norma recita:

- Sarà inoltre onere del Direttore dei Lavori, nell'ambito dell'accettazione



Fig. 8 - Prelievo campioni Pennoni presso stabilimento FAVER

dei materiali prima della loro installazione, verificare che tali prodotti corrispondano a quanto indicato nella documentazione di identificazione e qualificazione, nonché accertare l'idoneità all'uso specifico del prodotto mediante verifica delle prestazioni dichiarate per il prodotto stesso nel rispetto dei requisiti stabiliti dalla normativa tecnica applicabile per l'uso specifico e dai documenti progettuali, con particolare riferimento alla Relazione sui materiali, di cui al § 10.1.

- Al termine dei lavori che interessano gli elementi strutturali, il Direttore dei Lavori predispone, nell'ambito della Relazione a struttura ultimata di cui all'articolo 65 del DPR.380/01, una sezione specifica relativa ai controlli e prove di accettazione sui materiali e prodotti strutturali, nella quale sia data evidenza documentale riguardo all'identificazione e qualificazione dei materiali e prodotti, alle prove di accettazione ed alle eventuali ulteriori valutazioni sulle prestazioni.

In un ambito più generale di Assicurazione e Controllo Qualità, oltre al controllo documentale, diviene necessario controllare la corretta applicazione dei controlli di fabbrica a tutela del Cliente.

Quindi, il Responsabile Controllo Qualità della Direzione Lavori (RCQ), che è a tutti gli effetti un Direttore Operativo, si deve munire di ispettori e procedure per verificare quanto sopra.

Requisito fondamentale per la corretta gestione delle attività di Assicurazione e Controllo Qualità è il possesso della certificazione ISO 9001 del Contractor, che deve essere dimostrata in cascata anche da tutti i fornitori implicati nel processo di realizzazione dell'opera.

RINA Consulting, nelle fasi preliminari di organizzazione delle attività di Direzione lavori, si è data l'obiettivo di completare questo controllo. Pertanto, ogni lavorazione effettuata negli stabilimenti/officine e successivamente in Cantiere è stata autorizzata solo dopo una attenta analisi in sito del sistema di controllo qualità e, successivamente, la produzione è stata monitorata con ispettori residenti negli stabilimenti che hanno relazionato direttamente al RCQ circa l'efficacia dei controlli e dei loro risultati (figura 6).

Tale attività, pur se non espressamente richiesta dalle NTC 2018, è fortemente consigliata, in particolare per tutti gli elementi critici dell'opera. I risultati raggiunti per il cantiere Viadotto Genova San Giorgio hanno confermato la bontà dell'approccio seguito, risolvendo le problematiche più critiche già in officina con un risparmio consistente sui tempi di accettazione dei materiali e di rilavorazione sui semilavorati non accettati dalla Direzione Lavori in cantiere.

Gli ispettori del Controllo Qualità della Direzione dei Lavori hanno pre-



Fig. 9 - Mockup predalles in acciaio

sidiato tutte le principali sedi produttive, garantendo un monitoraggio costante delle attività.

Controllo Qualità di Cantiere

La struttura ispettiva del Controllo Qualità della Direzione dei Lavori ha altresì assicurato una copertura costante di controllo delle attività di saldatura, assemblaggio, verniciatura e varo eseguite in cantiere a Genova dai subappaltatori di Fincantieri Infrastructure e di PERGENOVA. Per quanto riguarda le attività di varo degli impalcati, il team di Qualità ha verificato inoltre la completezza di tutta la documentazione prodotta necessaria a garantire che tutti i controlli fossero stati certificati da tutte le parti interessate.

I controlli sulle unioni bullonate e sulle carpenterie metalliche sono stati effettuati in accordo alla sezione 1.3 del documento "ANAS - Capitolato speciale di appalto - Norme tecniche per l'esecuzione del contratto - Parte 2 - Opere d'arte maggiori - Ponti e viadotti". Inoltre, per le campate interferenti con la ferrovia, è stata presa come riferimento la sezione 6.6 del documento "RFI - Capitolato generale delle opere civili - Parte II - Sezione 6 - Opere in conglomerato cementizio e in acciaio".

Per i bulloni è stato effettuato il controllo di serraggio tramite ispezione

visiva atta alla verifica del distacco dei codoli, condizione che garantisce il raggiungimento della coppia di serraggio per i bulloni di tipo HRC.

Nel caso delle carpenterie metalliche è stato eseguito un controllo, per tutte le campate e per tutti gli elementi strutturali, al fine di verificare il corretto posizionamento degli elementi strutturali (figura 7).

Per quanto riguarda l'identificazione dei materiali è stata garantita la rintracciabilità totale di ogni singolo elemento del viadotto; gli elementi sono stati identificati tramite le rispettive marche, presenti sulle apposite targhe in fase di assemblaggio. È stato effettuato un controllo dimensionale degli elementi al fine di verificare la loro rispondenza al progetto, sia in uscita dallo stabilimento sia all'ingresso in cantiere.

Di seguito qualche numero sulle attività di Controllo Qualità dei siti produttivi e di cantiere:

- Numero di documenti di controllo qualità di stabilimento verificati: circa 15.000;
- Numero di documenti di controllo qualità di cantiere verificati: circa 5.000;
- Numero di giornate di monitoraggio eseguite: oltre 900;
- Numero di rapporti emessi: oltre 1.100.

Prove sugli acciai in laboratorio

Il controllo sugli acciai da parte della Direzione Lavori è prevista da NTC 2018 al cap. 11.3.4 “Acciaio per Strutture Metalliche e per Strutture Composte”.

Tutte le tipologie di acciaio (lamiera, pioli, profilati, bulloneria) utilizzate per la costruzione del Viadotto sono state campionate secondo i criteri indicati nella norma e inviati presso laboratori qualificati secondo UNI EN 17025:2018 per l'effettuazione di prove meccaniche e chimiche (figura 8).

L'accettazione dei materiali da parte della Direzione Lavori è avvenuta a valle del positivo controllo dei risultati ottenuti confrontati con le normative di riferimento.

Di seguito qualche numero sui campionamenti di laboratorio riferiti agli acciai costituenti l'impalcato metallico:

- Totale lettere di richiesta prove per laboratori: 200
- Campioni di lamiera: 1.331
- Campioni di profilati: 214
- Campioni di pioli: 56
- Campioni di bulloneria (bulloni, dadi, rondelle): 1.701
- Campioni di saldatura: 206
- Campioni di acciaio per le *predalles* metalliche: 32
- Campioni di acciaio per appoggi, isolatori, guide prismatiche, giunti di dilatazione e ritegni antisismici: 165

Casi particolari: connettori barre armatura

La qualifica dei manicotti per il prolungamento di barre di armatura ha avuto un iter particolare, in quanto non esiste una norma armonizzata comunitaria, né esiste un “Certificato di Valutazione Tecnica” da parte del Servizio Tecnico Centrale (STC).

La valutazione dell'idoneità è stata fatta dalla Direzione Lavori, prendendo come riferimento i requisiti riportati nel Certificato “Roads and bridges agrément certificate n. 98/R102 third issue 9th December 2005” del British Board of Agrément.

A tal riguardo è stato richiesto al Laboratorio di eseguire le prove previste dalla norma UNI EN 11240-1:2018 che specifica i requisiti per le giunzioni meccaniche delle barre di acciaio per cemento armato e ne definisce le modalità per la valutazione della conformità.

Le modalità di prova (metodi di prova) sono state eseguite in accordo alla norma 11240-2:2018. Questa Direzione Lavori ha disposto un set di prove su n. 3 tipologie di manicotti, rispettivamente Ø16, Ø26 e Ø30, eseguendo prove di trazione a rottura su tre provini per ciascuna tipologia di manicotto, secondo la UNI EN 11240-2:2018.

Le prove hanno dato esito positivo, sia in termini di rottura, in quanto la rottura è avvenuta sulla barra per i Ø16, Ø26, esternamente al manicotto, sia in termini di deformazioni/allungamento, risultati minori di quelli massimi ammissibili previsti dalla norma.

Per il Ø30 si è verificato lo sfilamento, ma mantenendo le deformazioni/allungamento entro i limiti dettati dalla norma.

Casi particolari: *Predalles* metalliche

Per le tre campate da 100 m e le adiacenze, erano previste da progetto delle *predalles* in acciaio costituite da una lamiera di acciaio S355J2+N, di 5 mm di spessore, e tralacci longitudinali di armatura in acciaio B450C. Particolare attenzione è stata posta nella saldatura del traliccio alla lamiera del fondo, in quanto si trattava di saldare due acciai diversi: B450C per il traliccio e S355J2+N per il fondo.

Allo scopo, il fornitore delle lamiere ha approntato una specifica Welding Procedure Specification (WPS) per una saldatura che fosse al contempo affidabile e di rapida esecuzione.

Successivamente sono stati allestiti dei mockup (figura 9) che sono stati portati a rottura confermando la bontà della soluzione scelta, in quanto tutte le rotture sono avvenute in corrispondenza del tondo del

traliccio, piuttosto che sulla saldatura.

Le prove di laboratorio hanno riguardato campioni di lamiere, tralacci e saldatura traliccio-lamiera.

Sui campioni di lamiera e barre costituenti il traliccio sono state effettuate prove meccaniche (snervamento, rottura e allungamento) e di composizione chimica (per verificare la saldabilità degli stessi).

È stata eseguita una visita preliminare allo stabilimento del fornitore prima dell'inizio della produzione, verificando i requisiti dichiarati nel dossier di presentazione dell'azienda. Successivamente i controlli sono continuati periodicamente con un ispettore DL, che effettuava sia il monitoraggio della produzione che l'assistenza al prelievo dei campioni.

Gestione dei risultati non conformi

In alcune occasioni, poche per la verità, si sono verificati dei valori non conformi di alcune grandezze misurate durante le prove di accettazione delle lamiere, anche a dispetto dei controlli effettuati al laminatoio “Metinvest Tramel”.

Qualche dato statistico su risultati di laboratorio non conformi:

- Percentuale di provini non conformi di lamiera = 0,45% (6 su 1.331)
- Percentuale di provini non conformi di profilati = 6% (13 su 214)
- Percentuale di provini non conformi di pioli = 5,3% (3 su 56)
- Percentuale di provini non conformi di bulloneria = 0% (0 su 1.701)
- Percentuale di provini non conformi di *predalles* metalliche = 0% (0 su 32)
- Percentuale di provini non conformi di saldature = 0% (0 su 206)
- Percentuale di provini non conformi di acciaio per appoggi, isolatori, guide prismatiche, giunti di dilatazione e ritegni antisismici: 1,8% (3 su 165)

Di fronte a tali evenienze sono state aperte le relative non conformità e questa Direzione Lavori ha adottato la seguente strategia, in accordo alle indicazioni al cap. 8.3.4.3 della UNI EN 10021:2007 – “Condizioni tecniche generali di fornitura dei prodotti di acciaio”:

- ✓ Verifica della possibilità di ricavare ulteriori due provini dal tassello inviato al laboratorio.
- ✓ In caso positivo, riprova e verifica dei risultati ottenuti. In questo caso, le riprova ci hanno consegnato valori congruenti con le specifiche, considerando i primi valori come anomalie statistiche dovute a fattori esterni alle proprietà meccaniche della lamiera.
- ✓ In caso negativo, solo uno, sono stati prelevati due tasselli dalla marca e su questi sono stati ricavati i campioni per le riprova. Anche in questo caso le riprova hanno dato esiti positivi.

L'esperienza avuta per questi casi ha evidenziato l'importanza della rintracciabilità del processo produttivo che ha consentito di individuare subito le lamiere appartenenti alla stessa colata e le marche in cui i pezzi ricavati da queste lamiere erano stati impiegati.

Questa rintracciabilità così accurata è stata possibile grazie alle richieste preliminari che questa Direzione Lavori ha fatto in sede di qualifica, richiesta che in qualche caso ha comportato leggere modifiche ai processi interni di rintracciabilità dell'Officina.

La lezione acquisita è stata l'efficacia e quindi la valorizzazione del processo di qualifica che ha rivestito un ruolo fondamentale nel progetto: processo non considerato come una mera formalità ma tarato sulle specifiche esigenze della commessa.

4. MONITORAGGIO STRUTTURALE DURANTE LA COSTRUZIONE: CONTROLLI TOPOGRAFICI E STRUMENTALI COMPRESA L'ATTIVITÀ DI PESATURA DELL'IMPALCATO

Durante la fase di realizzazione dell'impalcato, sono stati effettuati controlli propedeutici alla verifica delle caratteristiche geometriche e del comportamento strutturale dell'opera e della loro rispondenza al progetto. I controlli in corso d'opera effettuati sull'impalcato avevano lo scopo di:

SL5: Confronto tra valori ricavati da estensimetro e AS BUILT



Fig. 10 - Diagramma Estensimetri

- Verificare il corretto posizionamento in opera dell'impalcato con riferimento agli elaborati progettuali (allineamento trasversale, allineamento longitudinale e posizione in quota);
- Verificare il comportamento dell'impalcato sottoposto ai carichi imposti durante il varo e al getto della soletta.

Sulla base dei criteri sopra elencati, le valutazioni di verifica sono state effettuate per mezzo di misurazioni topografiche e di dati dedotti da monitoraggio estensimetrico, sia durante la fase di varo delle campate metalliche, sia durante la fase di getto della soletta e di completamento dell'impalcato.

L'articolazione di ciascun controllo è avvenuta, pertanto, attraverso lo svolgimento di due fasi: una prima fase di acquisizione dei valori di rilievo ed una seconda fase nella quale i dati ottenuti sono stati confrontati con i valori previsti dal progetto.

Monitoraggio topografico prima, durante e dopo il varo.

Durante il montaggio dell'impalcato metallico i controlli atti a garantire il corretto posizionamento dell'impalcato hanno riguardato le quote dei baggioli ed il tracciamento su di essi degli assi per il posizionamento degli appoggi definitivi, la verifica delle monte a terra di ciascuna campata precedentemente al proprio varo in quota, il corretto posizionamento planimetrico dell'impalcato successivamente al varo di

ciascuna campata, l'applicazione della coazione a ciascun concio per la quale essa è stata prevista e il controllo delle distanze tra i lembi dei giunti di saldatura presenti tra i conci. A tal fine, di concerto con Fincantieri Infrastructure, è stata predisposta una procedura di "Monitoraggio topografico in fase di Costruzione" che servisse come linea guida per tutte le attività da svolgere. Le attività elencate sono state svolte tramite misurazione delle coordinate di appositi target, posti in opportune posizioni dell'impalcato, mediante letture effettuate con stazione totale.

A livello di risposta strutturale in fase di varo, sono stati valutati il valore di inflessione tramite misurazioni topografiche e i valori di deformazione corrispondenti ad alcuni punti dell'impalcato tramite misurazioni estensimetriche.

L'inflessione è stata determinata misurando, tramite stazione totale, le quote di tre prismi posti all'intradosso di ciascuna campata: due prismi sono stati posti alle estremità ed uno in mezzzeria di ciascuna campata. Il valore di monta residua è stato determinato come differenza tra la quota del prisma in mezzzeria e la quota media dei due prismi in estremità. Successivamente, tenendo conto della monta iniziale, è stato possibile ottenere il valore di inflessione.

Tramite prismi posizionati in testa alle pile e target posizionati agli appoggi della parte in acciaio, sono stati monitorati anche gli sposta-

EMAIL CORREZIONE COAZIONI IMPOSTE SU ALTRE PILE E REAZIONE PESATA SUI CILINDRI	Allineamento	Totale NORD da modello AS BUILT corretto con incremento o decremento per armatura effettivamente posizionata l'atto della pesatura	Tolleranza massima da Allegato 1 di 8105-B F 1106 00	Tolleranza massima da Allegato 1 di 8105-B F 1106 00	Valore massimo da modello corretto con tolleranza	Valore minimo da modello corretto con tolleranza	Correzione per coazioni imposte su altre pile	Reazione pesata sui cilindri	Reazione trasportata agli appoggi	Reazione pesata Nord (somma della colonna M e O)	Reazione pesata Nord	Δ%	
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[N]	[N]	[N]	[N]	[kN]		
		F	G	H	I	L	M	N	O	P	Q	R	
B4853	SPA NORD	3072	296.9	-126.3	3369	2945.74	16	318	287	303	2971	97%	SPA
	P1 NORD	5585	283.64	-111.99	5849.08	5473.45	-9	627	568	559	5488	98%	P1
	P2 NORD	4993	863.66	-4152.31	5856.972	841.002	14	458	482	496	4866	97%	P2
	P3 NORD	5300	588.85	-3057.95	5889.162	2242.362	-42	654	584	542	5319	100%	P3
	P4 NORD	5152	649.16	-3564.31	5801.384	1587.914	-7	575	572	565	5542	108%	P4
P5 NORD	5322	1037.68	-2784.86	6359.928	2537.388	25	568	537	562	5518	104%	P5	
B4899	P6 NORD	4810	720.68	-3320.04	5530.68	1489.96	-15	425	462	447	4388	91%	P6
B4910	P7 NORD	5506	955.96	-4834.57	6461.829	671.299	110	400	425	535	5248	95%	P7
	P8 NORD	6831	4884.94	956.73	11716.071	7787.861	-127	864	824	697	6836	100%	P8
	P9 NORD	9721	4305.44	2079.86	14026.207	11800.627	79	827	872	951	9329	96%	P9
	P10 NORD	9805	4353.55	2389.27	14158.591	12174.311	-20	1018	1018	998	9787	100%	P10
	P11 NORD	6317	4931.7	1111.13	11249.135	7428.565	6	626	617	623	6111	97%	P11
	P12 NORD	4644	1113.25	-4320.77	5757.291	323.271	-67	576	544	477	4677	101%	P12
	P13 NORD	4680	720.53	-3555.3	5400.459	1124.629	43	385	406	449	4404	94%	P13
	P14 NORD	5074	1067.68	-3499.21	6142.025	1575.135	34	435	453	487	4778	94%	P14
P15 NORD	4836	1594.34	-3532.06	6429.851	1303.451	-26	519	518	492	4831	100%	P15	
B4909	P16 NORD	2903	2542.69	-14753.39	5445.84	-11850.24	7	231	287	294	2881	99%	P16
	P17 NORD	2500	3024.06	-18668.23	5523.96	-16168.33	-78	351	356	278	2727	109%	P17
	P18 NORD	3438	3693.63	-19243.69	7131.52	-15805.8	83	274	287	370	3632	106%	P18
	SPB NORD	1298	1932.57	-10073.2	3230.12	-8775.65	-28	190	175	147	1445	111%	SPB

Fig. 11 - Pesatura Impalcato

menti relativi impalcato/pile durante le fasi di costruzione.

Misure estensimetriche

Il monitoraggio estensimetrico è stato utilizzato a partire dal varo dei conci metallici, fino al getto della soletta, ed è stato utilizzato per il collaudo dell'impalcato. Le misure di strain, tramite l'installazione di estensimetri in corrispondenza delle sezioni di misura previste, avevano lo scopo di monitorare il livello deformativo delle fibre degli elementi strutturali e confrontarlo con quello atteso in fase di progetto (figura 10). L'operazione di misura delle campate metalliche è stata effettuata in due fasi: fase 0 e fase 1. La prima, prevede la deduzione dei valori di deformazione nella condizione in cui le campate sono poste in quota, ma l'impalcato metallico non risulta completato, ossia senza che tutte le porzioni laterali della sezione trasversale dell'impalcato metallico fossero poste in opera. Viceversa, la seconda è stata effettuata successivamente al completamento di tutta la struttura metallica dell'impalcato.

Per ciascuna sezione di misura sono stati installati 5 sensori estensimetrici e, in corrispondenza di ciascuno di essi, sono stati ricavati i valori di temperatura e deformazione dell'impalcato.

Le misurazioni estensimetriche hanno lo scopo di rilevare lo stato tensionale nelle varie fasi di assemblaggio dell'impalcato e naturalmente lo stato finale delle tensioni ad impalcato ultimato. I valori delle deformazioni, acquisiti durante la fase di varo, hanno permesso di allineare i valori misurati attraverso il sistema di monitoraggio definitivo costituito dai sensori ottici e di avere quindi il valore iniziale da sottrarre al valore misurato dai sensori di deformazione permanenti, ottenendo la taratura del sistema.

Il procedimento di calcolo per la determinazione del valore di tensione a partire dalle letture estensimetriche è stato svolto secondo i passaggi illustrati qui di seguito.

Sono state ottenute letture dei valori di temperatura e di deformazione a intervalli di circa 2 ore ed il primo valore ottenuto in ordine temporale per ciascun estensimetro è stato considerato come riferimento per i successivi.

Per ciascuna lettura temporalmente successiva alla prima, è stata calcolata la variazione rispetto alla misura di riferimento, ottenendo $\Delta\varepsilon$: tale valore rappresenta la deformazione, per ciascuna lettura, dovuto alla sola variazione di temperatura rispetto alla prima lettura (lettura di riferimento), perciò è stata calcolata la media delle letture e ad essa è stata sottratta la media delle variazioni di deformazione $\Delta\varepsilon$.

Le letture di deformazione assoluta ottenute non hanno di per sè alcun significato fisico; solo le differenze tra i valori misurati in diverse occasioni d'interesse assumono il significato fisico di $\mu\varepsilon$, ossia la deformazione che assume la struttura nella condizione di misura rispetto alla condizione precedente, a seguito della variazione di condizioni al contorno (carico, vincolo, temperatura).

Al valore di lettura deve quindi necessariamente essere sottratto il "valore di zero" che era stato letto al momento dell'installazione dell'estensimetro, nel momento in cui la campata risultava appoggiata a terra sui calaggi, in assenza di sollecitazioni agenti.

A tal fine, al valore ottenuto precedentemente tramite correzione termica, è stato sottratto il "valore di zero" letto all'installazione dell'estensimetro, ottenendo la deformazione reale in quel punto;

Dal valore di ε così ottenuto si è ricavato il valore di tensione, tramite la formula seguente:

$$\sigma = E_a \times \varepsilon$$

dove:

σ è il valore di tensione da determinare;

E_a è il valore del modulo elastico dell'acciaio;

ε è il valore di deformazione determinato in precedenza.

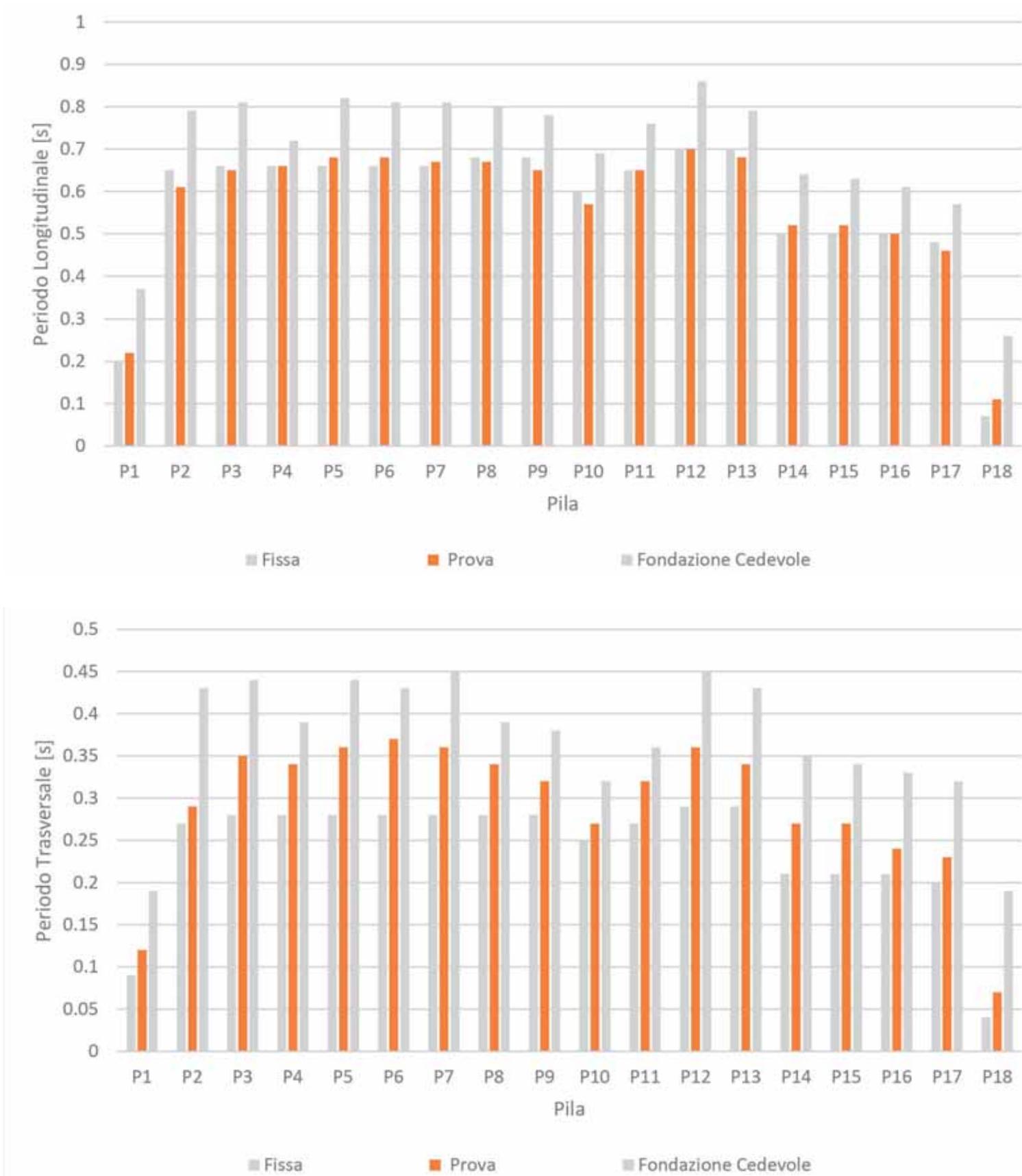


Fig. 12 - Risultati Analisi OMA: a) periodo longitudinale; b) periodo trasversale

Le letture estensimetriche sono state ripetute nella cosiddetta fase 2, ossia quella relativa al completamento delle operazioni di getto della soletta sull'impalcato. In questa fase, oltre agli estensimetri presenti in corrispondenza dell'impalcato metallico, sono state valutate misurazioni

ottenute mediante ulteriori estensimetri posti in corrispondenza della soletta.

Controlli per inghisaggio appoggi, centraggio e calaggio impalcato
Successivamente al varo di tutte le campate metalliche, sono state

effettuate diverse operazioni previste a progetto costruttivo, vale a dire:

- l'inghisaggio degli appoggi;
- il centraggio dell'impalcato;
- il calaggio dell'impalcato.

Per queste operazioni si è resa necessaria una serie di nuovi controlli puntuali per tutti gli elementi critici e in tutte le sotto-fasi di lavorazione.

Sono state verificate le quote altimetriche degli appoggi, la loro planarità e la planarità dei dischi di compensazione posti tra appoggi e piedi dell'impalcato, nonché la posizione definitiva dei relativi assi precedentemente al loro inghisaggio sui baggioli.

Al fine di procedere al corretto centraggio dell'impalcato rispetto ai ritegni trasversali, è stata controllata la sua posizione planimetrica in direzione trasversale.

Infine, prima di procedere al calaggio dell'impalcato, si è proceduto ad effettuare la "pesatura" del viadotto, al fine di verificare la correttezza delle reazioni vincolari sugli appoggi (figura 11).

La pesatura è avvenuta tramite l'utilizzo di gruppi di cilindri posti ad interasse pari a 7,0 m in corrispondenza delle spalle e 4,31 m in corrispondenza delle pile intermedie.

Durante tale procedura, è stato tenuto conto anche del valore di reazione, dovuto a tutte le coazioni applicate, per ciascun appoggio, ottenuto tramite sovrapposizione degli effetti.

I valori di pesa letti sui gruppi di cilindri sono stati analiticamente trasportati negli assi degli appoggi reali e sono stati algebricamente sommati al corrispondente valore di reazione dovuto alle coazioni applicate.

L'operazione di pesatura è importante per validare lo schema statico utilizzato nei modelli di calcolo e quindi per avere una risposta strutturale aderente a quanto ipotizzato in fase di progetto.

Altre misurazioni durante le fasi di getto della soletta e di collaudo

Nel corso delle fasi di getto della soletta, sono stati monitorati ulteriori aspetti ai fini della validazione del comportamento strutturale.

La verifica della coerenza tra inflessione reale e inflessione attesa è stata nuovamente effettuata per ciascuna campata a seguito della realizzazione del getto su di essa.

In particolare, durante il getto della campata da 100 m compresa tra le pile P8 e P9, è stato testato il sistema di misurazione interferometrico: tale sistema è composto da un radar portatile montato su un supporto. Lo strumento registra in continuo la sua distanza rispetto ad un punto individuato sulla struttura, fornendo quindi una serie di dati numerici, restituiti immediatamente in forma grafica. La misurazione dell'inflessione può considerarsi conclusa quando il grafico prodotto assume un andamento stabilmente orizzontale. La verifica delle misurazioni ottenute col sistema interferometrico è stata condotta, in contraddittorio con PERGENOVA, con due strumentazioni topografiche di seguito descritte:

- Sistema tradizionale topografico, tramite stazione totale Leica MS60 (strumento in dotazione alla DL);
- Sistema tradizionale topografico, tramite stazione totale Leica TS15 (strumento in dotazione a PERGENOVA).

Le misurazioni topografiche hanno sfruttato il sistema di prismi ventrali presenti lungo lo sviluppo della campata. Nel caso della campata P8-P9 i prismi erano posizionati in mezzzeria e nelle zone estremali, in prossimità dei giunti saldati tra i conci di pila e i primi conci intermedi. I valori di inflessione ottenuti con i tre sistemi hanno fatto registrare differenze massime pari a 0,7 mm, valore contenuto all'interno della precisione della strumentazione topografica utilizzata: la concordanza dei valori ha permesso di poter sfruttare il sistema interferometrico anche per le letture delle inflessioni nella fase di collaudo dell'impalcato,

come supporto alle misurazioni tradizionali topografiche. Le prove di collaudo sono state realizzate, partendo dalla condizione di campata completamente scarica, a *step* incrementali di carico: al termine di ogni *step* è stata valutata l'inflessione tramite il sistema interferometrico. Il passaggio allo *step* di carico successivo è avvenuto solo dopo che si era consolidata la stabilità della freccia. Il sistema tradizionale è stato utilizzato, quindi, solo per le letture di zero, per quelle a pieno carico e per quelle di ritorno elastico a scarico avvenuto. La velocità e l'immediatezza della lettura del sistema hanno consentito un risparmio di circa tre giorni nell'esecuzione delle prove di collaudo.

Misurazioni dinamiche

Durante la fase di costruzione delle pile sono state effettuate misurazioni del periodo proprio della pila ultimata ma senza impalcato soprastante tramite metodologia OMA (Operational Modal Analysis). Tale procedura ha permesso di verificare il rispetto dei modelli di interazione suolo struttura utilizzati nel progetto dell'opera. Le misurazioni dinamiche sono state utilizzate anche a getto soletta ultimato con lo scopo di avere prime misurazioni dei periodi fondamentali di vibrazione dell'impalcato (verticali, orizzontali e torsionali) da confrontare con i risultati delle analisi modali. Queste misure hanno permesso di verificare, nel regime a bassi spostamenti, la corrispondenza tra il costruito e le attese progettuali in termini di comportamento dei dispositivi di vincolo (figura 12).

Le analisi modali operative, congiuntamente a un'analisi modale per impulso indotto da frenatura dei camion, sono state utilizzate anche durante le operazioni di collaudo.

RINA Consulting ha pertanto effettuato un monitoraggio accurato di tutte le attività di costruzione dell'impalcato, pianificando le attività partendo dall'attento studio del progetto esecutivo, costruttivo e di varo. Le fasi di monitoraggio strutturale sono state sempre condivise con le imprese e questo ha portato a un'ottimizzazione delle fasi costruttive e a un costante controllo del processo costruttivo. L'impostazione data ai controlli strumentali durante la costruzione, di cui RINA Consulting ha mantenuto la regia operativa, ha portato l'ufficio tecnico della direzione lavori a lavorare in sinergia con i progettisti e con gli uffici tecnici delle imprese coinvolte.

5. CONCLUSIONI

Dopo oltre 150.000 ore di consulenza ingegneristica, RINA guarda oggi al nuovo viadotto Genova San Giorgio. L'azienda, unico soggetto a seguire dal primo all'ultimo giorno il progetto insieme alla Struttura Commissariale, ha coordinato tutte le operazioni che hanno portato alla demolizione dei resti del ponte Morandi fino all'apertura del Viadotto. Per la prima volta in Italia, nello sviluppo di un progetto infrastrutturale con un committente pubblico, si è formalizzata la figura del Project Management Consultant (PMC), affidato a RINA Consulting. L'obiettivo è stato quello di supportare il Commissario Straordinario, assicurando che i requisiti del progetto, la qualità, la pianificazione, la coerenza tra il progetto e la costruzione, i tempi e i costi fossero garantiti.

RINGRAZIAMENTI

Quanto descritto in questo lavoro è stato possibile grazie a tutti gli attori coinvolti. RINA Consulting ringrazia tutta la Struttura Commissariale, le imprese coinvolte nella demolizione (OMINI, IREOS, FAGIOLI e IPE PROGETTI), le imprese coinvolte nella ricostruzione (il Consorzio PERGENOVA con WeBuild e Fincantieri Infrastrutture), il progettista ITALFERR, lo studio RPBW dell'Architetto Renzo Piano, la Commissione di Collaudo Statico e Tecnico Amministrativo di ANAS.

LA SALDATURA DI PREFABBRICAZIONE E MONTAGGIO DEL VIADOTTO SAN GIORGIO

NEW SAN GIORGIO VIADUCT IN GENOA WORKSHOP AND SITE WELDING OPERATIONS

Dott. Ing. Federico Baiardo*, Dott. Ing. Daniele Castagnola Sternini
IIS SERVICE, Genova



*Corresponding author. Email: Federico.Baiardo@iisservice.it

L'articolo descrive le attrezzature e le tecnologie impiegate per la realizzazione delle strutture metalliche del nuovo viadotto sul torrente Polcevera lungo l'Autostrada A10, e gli aspetti di qualità ad esse connessi. La costruzione e il montaggio dell'impalcato sono durati circa un anno durante il quale 40 tecnici dell'Istituto Italiano della Saldatura, ingegneri e ispettori, hanno impiegato le loro competenze nelle attività di assistenza tecnica, controllo e certificazione. Il Gruppo IIS ha curato in particolare:

- la scelta dei materiali di apporto più idonei per garantire le prestazioni meccaniche richieste alle giunzioni;
- la qualifica delle procedure di saldatura
- la formazione e certificazione dei saldatori; loro selezione in base alle capacità e alla difficoltà operativa che ha caratterizzato i vari tipi di saldatura da realizzare;
- ottimizzazione dei dettagli costruttivi, per garantire l'ispezionabilità nel tempo e l'affidabilità delle strutture, in termini ad esempio di resistenza alla fatica meccanica;
- supervisione delle fasi di montaggio, affinché fossero rispettate le tolleranze dimensionali prescritte;
- controllo dell'efficienza delle attrezzature, lo stoccaggio e conservazione dei materiali, il controllo dei parametri di saldatura, al fine di garantire la costanza della qualità durante la costruzione;
- controlli non distruttivi finali delle saldature visivi e strumentali.

L'esperienza del nuovo viadotto sul torrente Polcevera ha rappresentato per IIS una sintesi dei servizi attraverso i quali il nostro gruppo dal dopoguerra ad oggi ha contribuito allo sviluppo dell'industria e delle infrastrutture del paese.

The paper describes technologies and equipment adopted for the construction of the new highway viaduct on Polcevera creek. Quality related issues are discussed as well. Fabrication and erection of steel structures took about one year, during which 40 technicians from Italian Institute of Welding, both engineers and inspectors, used their competences in the field of technical assistance, certification, inspection and testing. IIS group was especially involved in:

- *filler material selection according to mechanical properties requirements*
- *welding procedure qualifications*
- *welders' training and certification; welders' selection basing on their capabilities and skills required by operating conditions for different types of joints*
- *welding details' optimization, in reference to inspection and reliability of structures, with particular regard to fatigue resistance*
- *assembly supervision, check of dimensional tolerances*
- *check of equipment efficiency, materials handling and storage*
- *compliance with welding procedure specifications*
- *final visual examination and non-destructive testing*

San Giorgio Viaduct project well summarizes IIS' expertise and services applied over seven decades for the development of industry and infrastructures in Italy and abroad.

DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA

L'impalcato del viadotto consta di un asse principale a trave continua in struttura mista acciaio-calcestruzzo, di lunghezza circa 1065 m, formato da 19 campate (di cui 16 di luce circa 50 m ciascuna e 3 con luce di 100 m) e una rampa con ulteriori 4 campate (figura 1).

Il materiale base dell'impalcato è costituito prevalentemente da acciaio di grado S355 secondo EN 10025-2 e, per le parti maggiormente sollecitate delle campate da 100 m, da S460 secondo EN 10025-3. La sezione della parte metallica (figura 2) è schematizzabile in una porzione centrale, che costituisce la travata propriamente continua lungo tutto lo sviluppo del viadotto, e due porzioni laterali, formate da conci di lunghezza tra 6 e 15 m, collegati ciascuno alla trave centrale, ma senza continuità longitudinale, ovvero privi di giunti trasversali.

La sezione centrale è a sua volta formata da:

- una porzione inferiore, costituita da un fondo curvo irrigidito da nervature longitudinali e trasversi (figura 3);

- una porzione superiore, rappresentata da due travi parallele a "T", connesse da traversi a doppia "T" (figura 4);
- in corrispondenza delle pile dalla numero 8 alla 11, che sostengono le tre campate da 100 m, i traversi superiori a doppia "T" sono sostituiti da pannelli continui, di lunghezza circa 32 m irrigiditi in maniera analoga al fondo curvo (figura 5).

Le sezioni laterali sono invece formate da travi secondo uno schema mensola-puntone (figura 6); i puntoni sono collegati tramite pannelli (figura 7), anch'essi irrigiditi longitudinalmente, con funzione di controventatura delle sezioni laterali e che donano continuità alla curvatura del fondo centrale.

GIUNZIONI SALDATE

La prefabbricazione e il montaggio di grandi opere metalliche ad uso infrastrutturale sono tipicamente caratterizzate da tipologie di saldature ben distinte. In prefabbricazione vengono generalmente eseguite le saldature di composizione, ovvero le unioni che servono a rendere collaboranti le

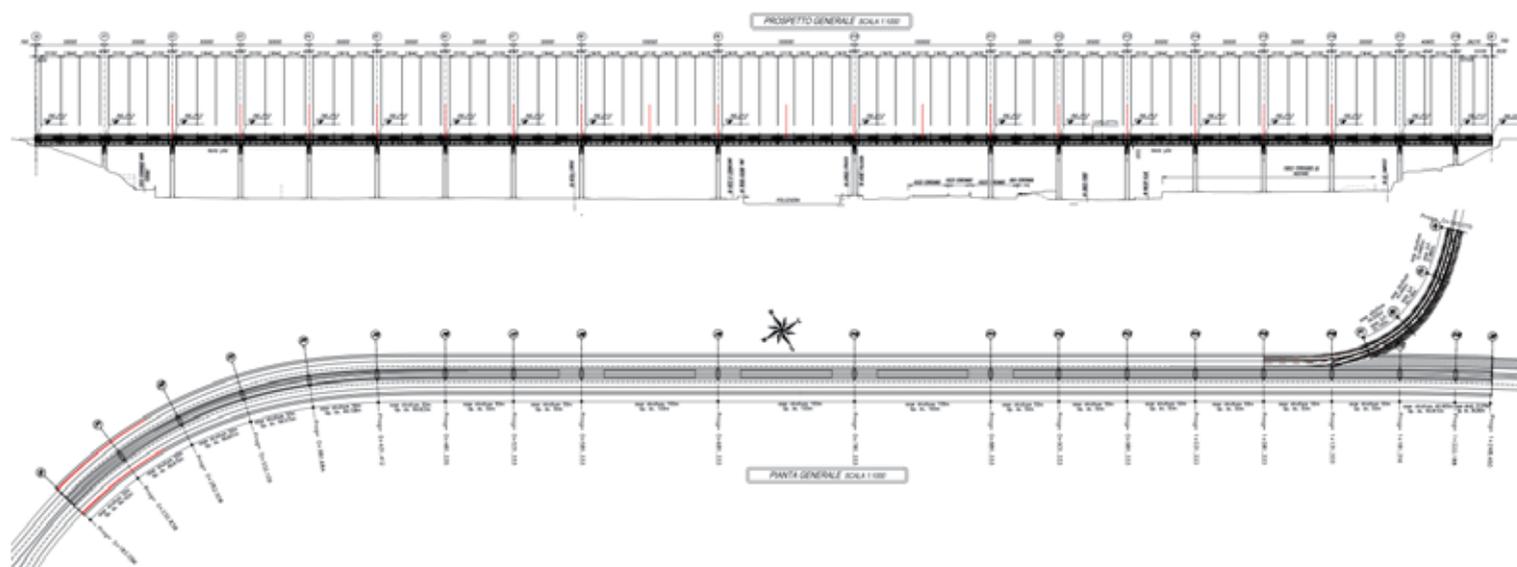


Fig. 1 - Prospetto e pianta del viadotto

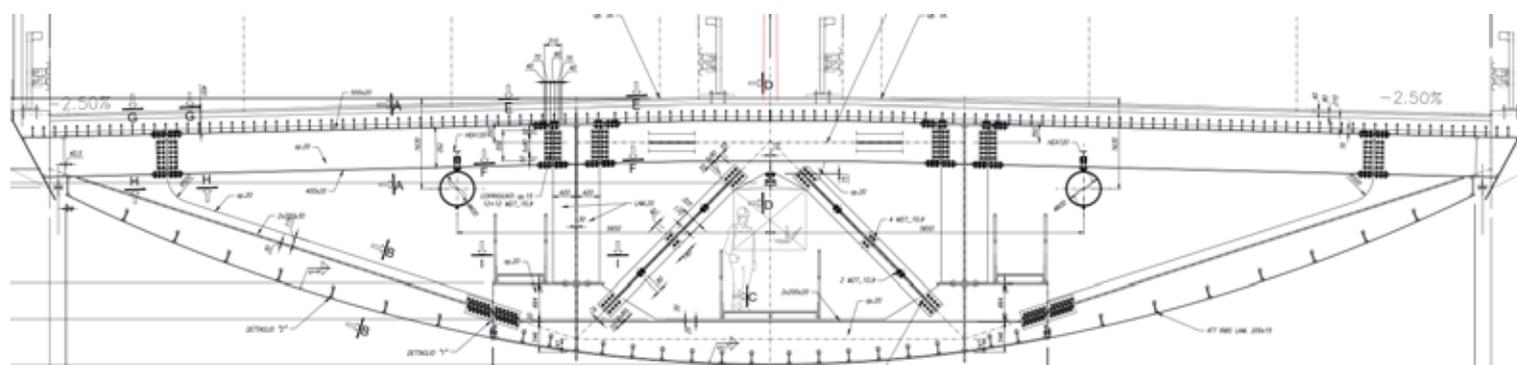


Fig. 2 - Sezione tipica dell'impalcato metallico

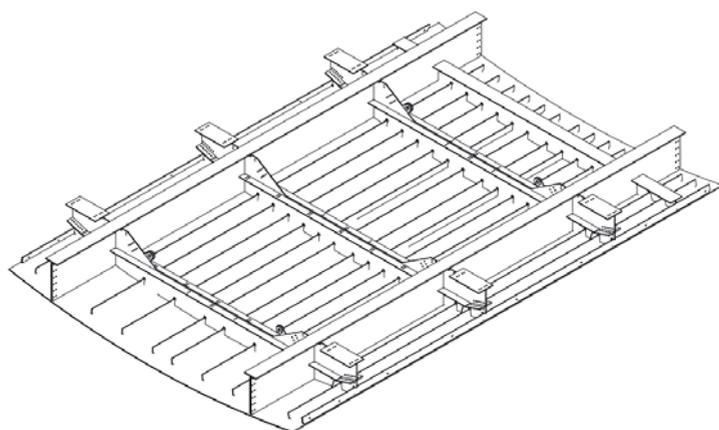


Fig. 3 - Fondo della sezione centrale

membrature principali della struttura e che sono soggette prevalentemente a sforzi di taglio, ovvero prevengono lo scorrimento fra le parti. In prefabbricazione vengono inoltre effettuate la maggior parte delle saldature di elementi secondari di irrigidimento. In cantiere si realizzano invece le giunzioni di forza necessarie a trasmettere le tensioni principali, ossia le saldature trasversali a piena penetrazione, ed i giunti bullonati. Con questa logica si è operato anche per il Viadotto San Giorgio. Nelle officine e nei cantieri navali dove sono stati costruiti i moduli precedentemente descritti, sono state realizzate le saldature longitudinali degli elementi di fondo e delle sezioni delle travi (anima-piattabanda), e delle nervature. In cantiere invece sono state eseguite le saldature di forza, ossia i giunti fra i concetti centrali, ai

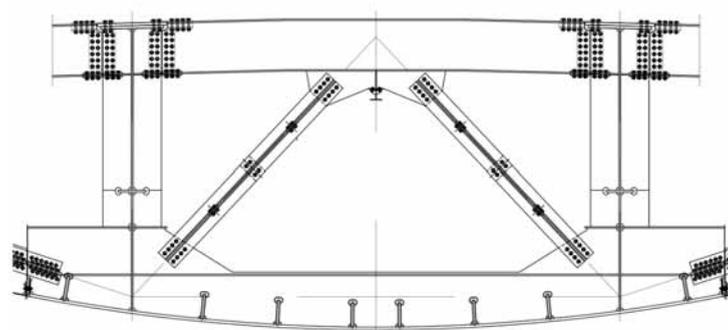


Fig. 4 - Sezione centrale corrente

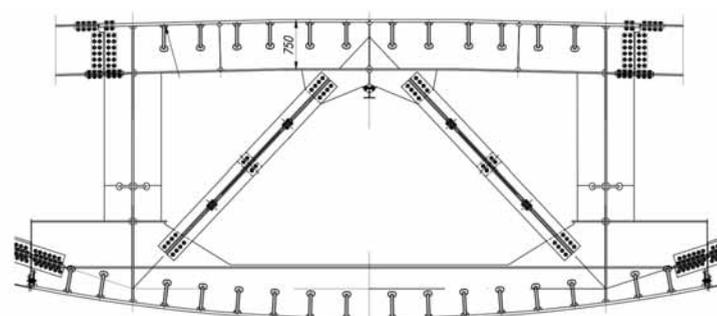


Fig. 5 - Sezione centrale delle pile P8-P11

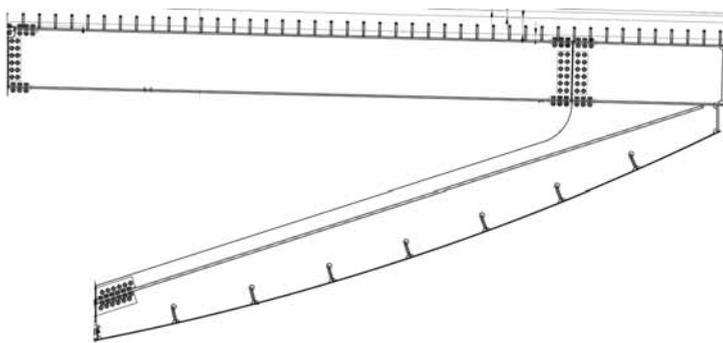


Fig.6 - Sezione laterale

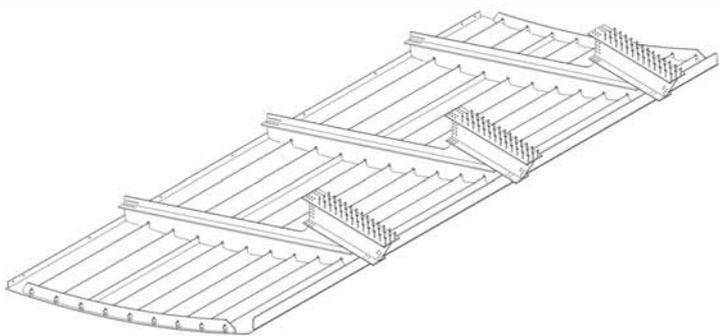


Fig. 7 - Carter e puntoni laterali

quali è demandata la trasmissione degli sforzi lungo la travata del viadotto (in rosso in figura 8). Per ragioni legate alle dimensioni ed all'economicità dei trasporti, le porzioni superiori ed inferiori dei conci centrali sono state prefabbricate separatamente ed in cantiere sono state completate le ultime due saldature di composizione necessarie, ovvero quelle di unione delle travi a T longitudinali con i fondi (in verde in figura 8).

Lo sviluppo lineare dei giunti saldati del viadotto è di circa 200 km. Dato che la maggior parte ha richiesto un'esecuzione con tecnica multipassata, la lunghezza complessiva dei cordoni di saldatura necessari per la costruzione dell'opera è dell'ordine di migliaia di km. Considerati i tempi imposti per ultimare il lavoro, la massimizzazione della produttività è stata pertanto un'esigenza imprescindibile. A tal fine, le saldature longitudinali di prefabbricazione, che costituiscono più della metà del totale, sono state realizzate con impianti automatici in arco sommerso. Tale processo risulta particolarmente privilegiato quando si è in presenza di lunghe giunzioni rettilinee e quando si ha la possibilità di operare in posizione piana, vista la possibilità di movimentare agevolmente i conci con i mezzi di officina. La vestizione dei sottoassiemi con nervature e traversi di irrigidimento è poi avvenuta con procedimenti semiautomatici a filo continuo sotto protezione gassosa. Nel cantiere di Genova si è invece lavorato integralmente con processo semiautomatico a filo continuo animato, in considerazione delle seguenti esigenze:

- poter operare in tutte le posizioni. Per questo scopo è fondamentale il supporto del metallo fuso fornito dal processo scorificante;
- garantire la massima protezione (data quindi sia dalla miscela di gas sia dalla scoria) al bagno di saldatura, maggiormente esposto alle condizioni atmosferiche.

In particolare sono stati adottati:

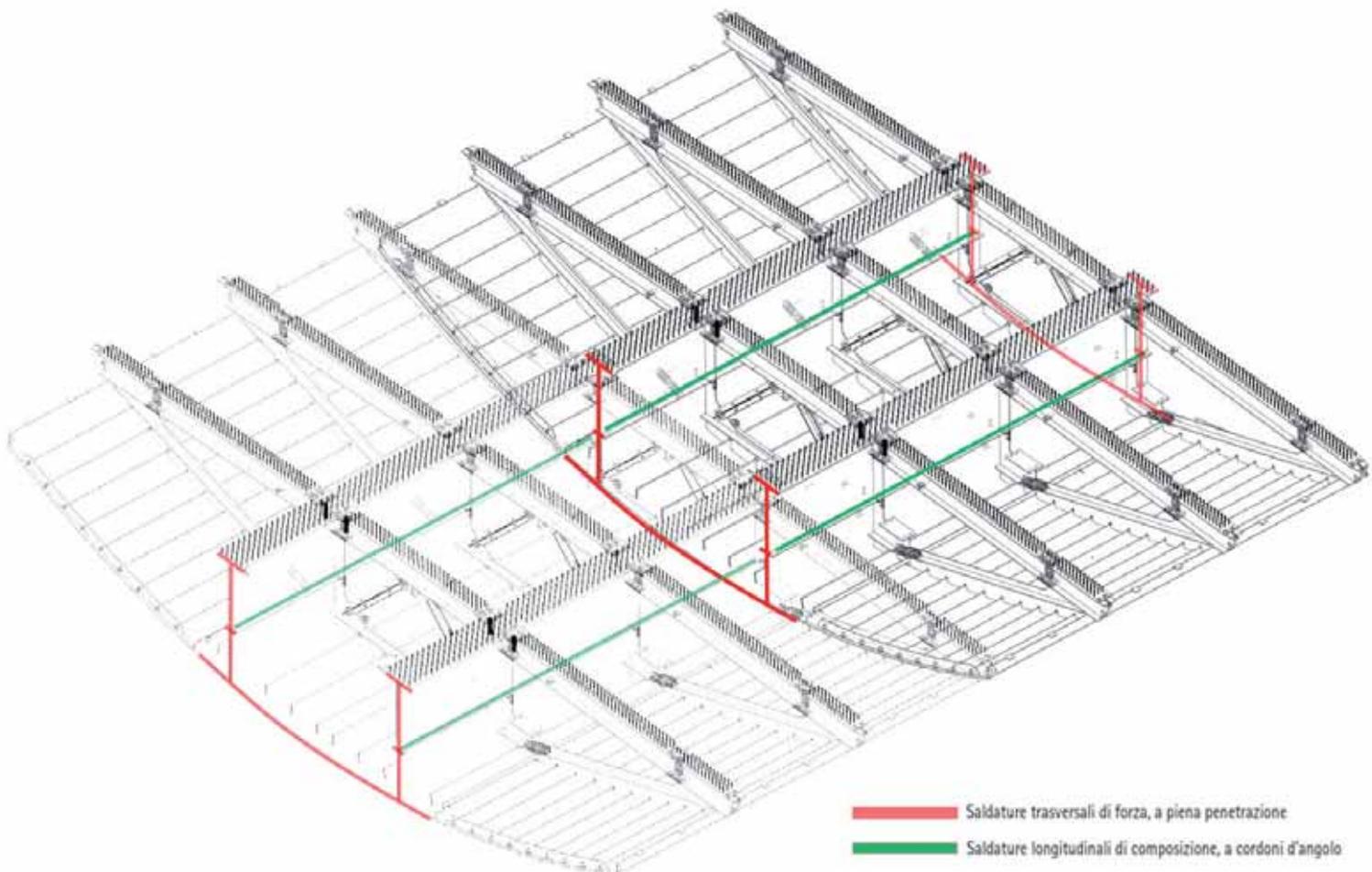


Fig. 8 - Giunti di cantiere

- per saldare in piano, fili basici, che hanno superiore capacità desolfurante e disossidante, a vantaggio delle proprietà meccaniche, ed in particolare della resilienza;
- fili rutilici per le posizioni verticale e sopratesta, per privilegiare la lavorabilità del bagno di saldatura.

Inoltre nelle giunzioni a piena penetrazione eseguite con processi a filo si è fatto sistematico ricorso a supporti ceramici rimovibili per limitare le operazioni di scricatura e ripresa al rovescio, sia nel caso di preparazioni con cianfrini a "V" (supporti piatti) sia ad "X" (supporti tondi) (figura 9).

FABBRICAZIONE DEI PANNELLI

Gli elementi a pannello, ovvero i fondi centrali e i carter laterali, che sono la parte visibile dell'impalcato e che hanno voluto richiamare, da un punto di vista architettonico, la carena di un'imbarcazione, sono stati realizzati da Fincantieri a Castellammare di Stabia e Sestri Ponente proprio con la tecnologia che è comunemente adottata per la fabbricazione degli scafi di grandi navi, ovvero per mezzo di un sistema automatizzato chiamato "Linea pannelli piani" (o "Panel line", figura 10), che consta di due stazioni produttive, rispettivamente per l'assieme delle lamiera e per il montaggio degli irrigidimenti longitudinali, usualmente denominati "rib". La prima stazione, denominata "One Side Welder", realizza le saldature longitudinali testa a testa fra le lamiera; nel caso del Viadotto di Genova tre per ogni pannello dei conci centrali e due per i carter laterali. Una rulliera (figura 11) alimenta un banco di bloccaggio (figura 12) dotato di pressori idraulici che consentono di allineare con grande precisione i lembi da unire e di mantenerne costante la luce durante la saldatura. La giunzione avviene con processo ad arco sommerso, a più teste saldanti, con una passata continua su tutta la lunghezza della lamiera (circa 12 m). Una barra di rame raffreddata, posizionata al rovescio del giunto, accoglie un letto di flusso che garantisce il sostegno della passata al vertice, la protezione del bagno e la finitura della saldatura, evitando di dover ribaltare il pannello per lavorare dal lato opposto.

La seconda stazione della linea è costituita da due portali, uno per il posizionamento dei rib ("Posa-profili", figura 13) che sono prelevati tramite magneti da una rastrelliera e posti sul pannello appositamente tracciato, ed uno per il bloccaggio e la saldatura ("Salda-profili", figura 14). Anche in questo caso il bloccaggio idraulico consente l'ottimale accoppiamento, minimizzando il distacco fra rib e lamiera ai fini della corretta realizzazione dei cordoni d'angolo, eseguiti ancora in arco sommerso e sui due lati contemporaneamente. La messa a punto di questo procedimento è stata particolarmente delicata in quanto la saldatura di elementi montati da un solo lato, quindi con un apporto termico asimmetrico e relativamente elevato dato dall'arco sommerso, tende a far insorgere deformazioni puntuali, a fronte di un requisito architettonico di curvatura uniforme. Si è reso quindi necessario minimizzare l'effetto indesiderato di superficie poligonale calibrando opportunamente i parametri energetici di saldatura (velocità di avanzamento, tensione e corrente elettrica).



Fig. 9 - Applicazione di supporto ceramico su un cianfrino ad "X"



Fig. 10 - Linea pannelli



Fig. 11 - Rulliera di ingresso



Fig. 12 - One Side Welder



Fig. 13 - Portale posa-profili



Fig. 14 - Portale salda-profili



Fig. 15 - Posizionamento dei pannelli sulle selle



Fig. 16 - Montaggio dei traversi



Fig. 17 - Saldatura dei traversi con processo semiautomatico



Fig. 18 - Formatura delle lamiere da 40 mm



Fig. 19 - Assemblaggio sulle selle



Fig. 20 - Saldatura dei pannelli di spessore 40 mm



Fig. 21 - Tractor in arco sommerso e termoresistenze

I pannelli irrigiditi, ancora piani, sono stati poi spostati su selle di supporto sagomate e completati con gli elementi trasversali, conferendo in questo modo la curvatura finale (figure 15 e 16).

La modalità descritta sopra è stata impiegata per fabbricare circa il 90 % dei pannelli del viadotto, con lamiere di spessore 10 (i carter laterali) e 20 mm (i fondi centrali delle campate da 50 m). I restanti, impiegati per il fondo delle campate da 100 m, non sono stati prefabbricati sulla linea pannelli piani, per via dello spessore da 40 mm, bensì prima sagomati su una calandra navale di grosse dimensioni (figura 18), e quindi assemblati direttamente sulle selle (figura 19), adottando comunque, per le saldature longitudinali di composizione, un processo di saldatura automatico, per mezzo di carrelli ("tractor") con teste ad arco sommerso posizionati su

binari (figure 20 e 21). In questo modo è stato anche possibile applicare e mantenere correttamente il preriscaldamento delle lamiere, attraverso le termoresistenze che si notano nelle immagini, necessario in considerazione del maggior spessore e, nei casi di impiego di acciaio S460, del superiore tenore di carbonio equivalente.

FABBRICAZIONE DELLE TRAVI

Le travi a "T" e doppia "T", costituenti sia gli elementi strutturali principali della porzione superiore della travata metallica sia gli elementi di collegamento trasversale delle sezioni dell'impalcato, sono state prefabbricate presso l'officina di Fincantieri Infrastructures a Valeggio sul Mincio, in provincia di Verona, anche in questo caso avvalendosi di una linea di



Fig. 22 - Concio ultimato



Fig. 23 - Linea di produzione travi



Fig. 24 - Dettaglio teste saldanti e sistemi di guida



Fig. 25 - Assemblaggio conci centrali



Fig. 26 - Assemblaggio conci centrali



Fig. 27 - Clamp di imbastitura



Fig. 28 - Clamp di imbastitura

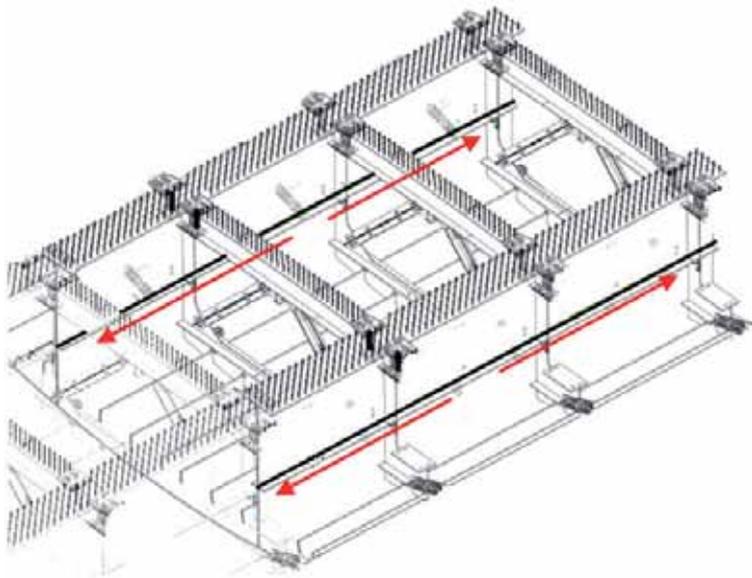


Fig. 29 - Esecuzione giunti longitudinali

produzione automatica, denominata "T-Master" (figure 23 e 24).

Su questo impianto gli elementi di anima e piattabanda vengono allineati da una serie di rulli guida e tenuti a contatto da un rullo pressore durante la saldatura, che avviene contemporaneamente sui due lati con due o quattro teste ad arco sommerso contrapposte. Le eventuali deformazioni della trave, dovute all'apporto termico concentrato, vengono controllate sia con rulli eccentrici in uscita dal portale (in primo piano in figura 24), che agiscono alle estremità della piattabanda, sia con bruciatori che riscaldano la parte superiore dell'anima per contrastare l'"imbananamento" longitudinale della trave.

MONTAGGIO IN CANTIERE

Le attività di saldatura in cantiere, come si è già detto, hanno interessato la sezione centrale, che costituisce la travata continua del viadotto. La prima fase di lavoro è stata il preassemblaggio dell'intera campata, compresi i traversi e i controventi (figure 25 e 26). Il posizionamento dei conci rappresenta una fase particolarmente delicata perché deve tenere in conto e soddisfare due distinte esigenze:

- rispettare la forma (soprattutto la premonta) e le dimensioni finali complessive che dovrà assumere la struttura (ad esempio il raggio di curvatura

della strada), considerando anche i ritiri che vengono introdotti dalla successiva fase di saldatura;

- garantire localmente le tolleranze geometriche dei giunti per permetterne la corretta eseguibilità.

La provenienza dei sotto assiemi da diversi siti produttivi ha costituito un'ulteriore complicazione ed ha reso possibile la verifica dell'effettivo accoppiamento solo a piè d'opera. In particolare è stato molto importante il controllo puntuale dei cianfrini e delle preparazioni. Nel caso dei cordoni d'angolo, impiegati per le unioni tra fondo e travate, è opportuno che le membrature siano il più possibile a contatto (gap 0÷2 mm), mentre per le piene penetrazioni fra i conci la luce prevista dalla specifica di saldatura va mantenuta uniforme lungo lo sviluppo del giunto (ad esempio, nel caso di impiego del supporto ceramico, circa 5 mm). Caso per caso è stata quindi valutata la necessità di eseguire attività preliminari alla saldatura quali:

- allineamento delle travi tramite utilizzo di martinetti e cunei;
- taglio parziale di cordoni d'angolo eseguiti in officina fra anime e piattabande (le cosiddette "scuciture") in corrispondenza delle testate delle travi, per permettere una maggiore flessibilità nell'allineamento indipendente delle membrature;
- in presenza di gap eccessivi, l'"imburratura", ovvero riporto di materiale saldato sui cianfrini, oppure modifica di giunti da cordoni d'angolo a piena penetrazione;
- in caso di gap insufficienti, rifilatura dei lembi.

Una volta assicurata la corretta geometria complessiva e locale, gli elementi sono stati imbastiti con cavallotti temporanei ("clamp", figure 27 e 28).

È stato quindi poi possibile intraprendere la saldatura dei giunti, adottando accorgimenti tali da non modificare la configurazione geometrica impostata col preassiemaggio e rendere comunque il più omogenei possibile i ritiri. In particolare la sequenza di saldatura è stata la seguente:

- 1) Giunti longitudinali, saldando in parallelo le due travate con il fondo (figura 29).
- 2) Giunti trasversali di forza, impiegando contemporaneamente 4 saldatori che hanno proceduto come di seguito (figura 30):
 - saldatura delle piattabande superiori e della parte centrale del fondo;
 - saldatura della metà superiore delle anime e intermedia del fondo;
 - saldatura della metà inferiore delle anime e delle estremità del fondo.
- 3) Ripristino della continuità delle nervature verticali e degli irrigidenti longitudinali. Questi ultimi sono stati ripristinati tramite inserti (figura 31) in quanto lasciati volutamente più corti per facilitare l'accessibilità e l'esecuzione del giunto trasversale principale.
- 4) Completamento sulle piattabande superiori del montaggio dei pioli di

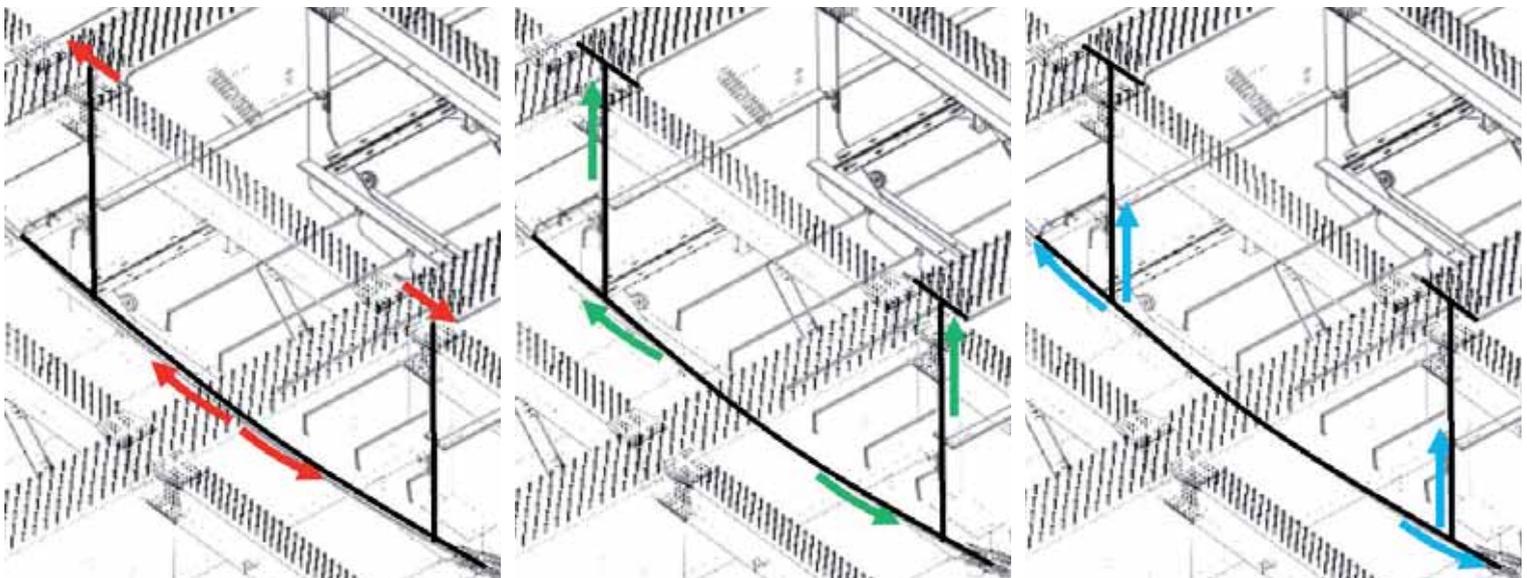


Fig. 30 - Esecuzione giunti trasversali



Fig. 31 - Ripristino rib



Fig. 32 - Ripristino piolatura

connessione a taglio con la soletta in calcestruzzo (figura 32). L'accuratezza dimensionale della campata ultimata è stata fondamentale soprattutto per le campate di lunghezza 100 m, che sono state sollevate utilizzando martinetti a trefolo ("strand jacks", figura 36) ancorati sui concetti di testa già posati sulle pile¹⁾ (figura 35), dotati comunque di una possibilità di aggiustamento in senso longitudinale per riportare la corretta luce tra i cianfrini. Le giunzioni trasversali in quota sono state quindi effettuate con la medesima sequenza descritta ai precedenti punti 2 e 3.

CONTROLLI DI QUALITÀ

Durante la realizzazione del Viadotto è stata data massima attenzione al sistema di qualità ed alla rintracciabilità di tutte le operazioni e del personale in esse coinvolto. Le verifiche messe in campo sono schematizzabili in:

- Controlli indiretti;
- Controlli in corso d'opera;
- Controlli non distruttivi finali.

La attività da svolgere a tutti i livelli di controllo sono state impostate sulla base delle prescrizioni delle normative applicabili, ed in primo luogo le Norme Tecniche per le Costruzioni, i Regolamenti di RFI per le opere infrastrutturali (il viadotto scavalca la linea ferroviaria) e la EN 1090.

CONTROLLI INDIRETTI

Con questo termine si intende l'insieme delle attività, propedeutiche alle fasi produttive, intraprese a supporto delle verifiche in campo, che sostanzialmente consistono nel sistema di qualifica delle procedure e degli operatori. Nell'ambito della saldatura il documento fondamentale è rappresentato dal "quaderno di saldatura", che è stato redatto per tutti i siti produttivi e per il cantiere; in tale documento, per ogni tipologia di giunto da eseguire, sono stati predisposti e raccolti:

- i dettagli geometrici relativi all'accoppiamento fra le parti, verificando la corretta preparazione dei cianfrini e l'effettiva possibilità di realizzazione sulla base ad esempio dell'accessibilità per il saldatore e della sequenza di montaggio delle membrature;
- la specifica di procedimento di saldatura (WPS), da rendere disponibile in campo ai saldatori ed ai supervisori, contenente tutti i parametri necessari per operare, ad esempio i materiali consumabili da utilizzare, la posizione di saldatura, le indicazioni delle temperature di preriscaldamento e di interpass, le impostazioni della saldatrice, la necessità di adottare un supporto ceramico oppure di procedere alla solcatura e ripresa a rovescio del giunto;
- la qualifica del procedimento (WPQR), contenente gli esiti delle prove di laboratorio e dei controlli non distruttivi eseguiti su saggi campione, come richiesto dalla normativa allo scopo di verificare che la WPS adottata ripristini le proprietà meccaniche e metallurgiche dei materiali base e non ci sia un decadimento delle stesse durante il processo di saldatura.

Meritano un accenno le ulteriori prove di qualifica che sono state condotte per questo cantiere, in previsione della necessità di ripristini a seguito di difettosità rilevate dai controlli non distruttivi, circostanza connotata ai processi produttivi speciali come è quello di saldatura. In particolare è stato scelto di concerto con la Direzione Lavori di simulare la possibilità di effettuare una doppia riparazione in un tratto della giunzione più importante dell'opera, ovvero in corrispondenza di una saldatura trasversale a piena penetrazione.

A tale scopo è stato realizzato uno specifico saggio di prova, sul quale, in aggiunta alle prove standard richieste dalla normativa (ovvero le prove meccaniche di trazione, resilienza e piega) ed a maggiore garanzia circa la non alterazione degli acciai, sono state eseguite anche indagini microstrutturali, previa estrazione di repliche metallografiche e misure della durezza locale (figure 37 e 38).

Per quanto riguarda il personale, in cantiere è stata allestita un'area dedicata alla verifica e certificazione di circa 90 saldatori che hanno lavorato durante l'esecuzione dell'opera. Tali figure, oltre ad essere testate sulle loro capacità operative per i vari tipi di giunzione, processi e posizioni di lavoro, sono stati anche istruiti sulle sequenze e procedure da adottare specificatamente per quest'opera, inseriti in un apposito elenco riportante le caratteristiche della loro qualifica e dotati di un proprio punzone per consentirne la rintracciabilità. In tale modo è stato possibile utilizzare

¹⁾ I concetti di pila sono stati prefabbricati presso l'officina San Giorgio Seigen adiacente all'area di cantiere.



Fig. 33: Campata ultimata



Fig. 34: Sollevamento della campata da 50 m



Fig. 35 - Posizionamento concio di pila



Fig. 36 - Sollevamento della campata da 100 m con "strand jacks"

ciascuno al meglio, in base alle sue capacità ed alla difficoltà dei giunti da realizzare, misurare l'efficienza e la qualità, ottimizzando in sostanza l'utilizzo delle risorse a disposizione.

CONTROLLI IN CORSO D'OPERA

In tutti i siti produttivi le attività sono state condotte sotto la responsabilità di un coordinatore di saldatura qualificato, come peraltro previsto

dalle Norme Tecniche per le Costruzioni. In sito sono stati coinvolti due coordinatori (uno per ciascuna area di cantiere a levante e a ponente del torrente Polcevera). Squadre di ispettori hanno coadiuvato i coordinatori supervisionando costantemente, nell'arco delle 24 ore in più turni di lavoro, l'esecuzione delle saldature. In particolare ogni giunto è stato contrassegnato con un codice di rintracciabilità univoco in base al quale sono stati monitorati:



Fig. 37 - Zona di prelievo della replica

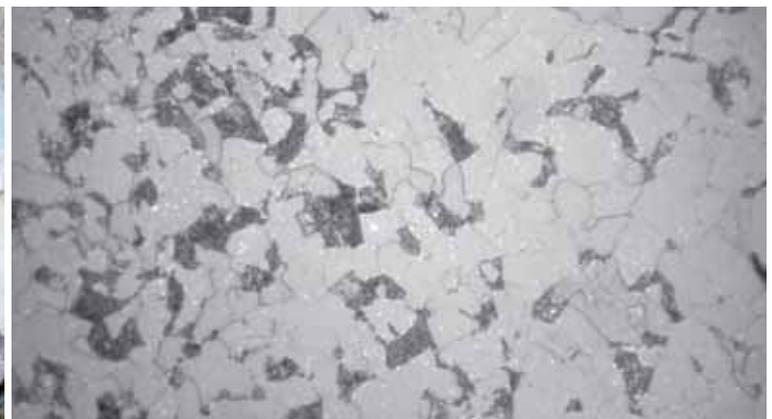


Fig. 38 - Microscopia



Fig. 39 - Sistema di preriscaldamento



Fig. 40 - Mantenimento del preriscaldamento durante la saldatura



Fig. 41 - Controllo magnetoscopico



Fig. 42 - Controllo ultrasonoro

- il rispetto delle condizioni iniziali di accoppiamento geometrico dei cianfrini;
- il saldatore impiegato;
- i materiali consumabili;
- la temperatura di preriscaldamento e di interpass;
- i parametri di saldatura secondo WPS;
- l'esecuzione dei controlli ed eventuali riparazioni.

Grande attenzione è stata posta al controllo e mantenimento delle temperature dei materiali base prima, durante e dopo la saldatura. Per questo sono state predisposte attrezzature dedicate come batterie di torce ossipropaniche (figura 39). Ad esempio, per i giunti più spessi, caratterizzati da una maggiore dispersione termica attraverso le lamiere e quindi soggetti a un raffreddamento più rapido con il conseguente rischio di criccabilità da idrogeno, le torce di preriscaldamento sono state mantenute durante la saldatura e fino al completamento del giunto (figura 40).

TIPO DI GIUNTO	PENETRAZIONE	TIPO CONTROLLO	SOGGETTO A CONTROLLO RFI	NON SOGGETTO A CONTROLLO RFI	
BW, TJ, FW	PARZIALE	VT	100%	100%	
		MT	100%	20%	
BW, TJ	PIENA	VT	100%	100%	
		MT	100%	20% su giunti longitudinali	100% su giunti trasversali
		UT	100%	25% su giunti longitudinali	100% su giunti trasversali

Fig. 43 - Estensione degli NDT finali

CONTROLLI NON DISTRUTTIVI FINALI

Tutte le giunzioni, trascorso il tempo di stasi dopo saldatura previsto dalla EN 1090, sono state sottoposte ad accurati test non distruttivi visivi e strumentali (magnetoscopia ed ultrasuoni, figure 41e 42). In particolare per tutti i giunti trasversali di forza e per l'intera porzione di viadotto che interessa lo scavalco della ferrovia, i test superficiali e volumetrici applicabili sono stati condotti con estensione del 100% (figura 43).

Oltre a soddisfare i requisiti di qualità più severi imposti dalla normativa applicabile, la EN ISO 5817, le saldature, e più in generale tutte le superfici, sono state verificate anche nell'ottica della successiva buona riuscita della verniciatura, fondamentale ai fini della durabilità delle strutture metalliche. Pertanto la finitura superficiale ha dovuto soddisfare anche i criteri di preparazione della norma EN ISO 8501-3 che prevedono, ad esempio, la

raggiatura degli spigoli, la molatura delle incisioni di qualsiasi entità e la raccordatura del piede dei cordoni di saldatura (figure 44 e 45).

Mediamente, per opere di carpenteria pesante ad uso infrastrutturale, una costruzione di buona qualità è comunque affetta da un'incidenza di riparazioni fino al 3% dell'estensione delle saldature. La statistica rilevata alla chiusura del cantiere di Genova ha rilevato un tasso di circa lo 0,8%, ad attestazione dell'efficacia del sistema predisposto per il controllo dei giunti saldati del Viadotto San Giorgio.

Data la specificità ed il dettaglio delle verifiche da condurre, l'Istituto Italiano della Saldatura è stato coinvolto direttamente durante tutto il processo di qualità, a garanzia, nei confronti della Direzione Lavori, del Progettista e dei Costruttori, del rispetto dei requisiti imposti dal progetto e dal contesto normativo.



Fig. 44: Preparazione delle saldature al grado P3



Fig. 45: Preparazione delle saldature al grado P3



IL MONTAGGIO DEL NUOVO PONTE SAN GIORGIO CON MEZZI DI SOLLEVAMENTO SPECIALI

THE ASSEMBLY OF THE NEW SAN GIORGIO BRIDGE WITH SPECIAL LIFTING EQUIPMENT

Ing. Marco Salsi*

Fagioli SPA – Sant’Ilario d’Enza (RE)

La Fagioli, società leader a livello internazionale nel settore dei trasporti eccezionali e dei sollevamenti, ha preso parte a ogni singola fase della ricostruzione del nuovo Ponte San Giorgio su commissione della joint venture PERGENOVA S.C.p.A. (società consortile per azioni costituita da Fincantieri Infrastructure e Webuild per la progettazione e la costruzione del nuovo viadotto). I conci realizzati dalla Fincantieri sono stati trasferiti in cantiere via mare e via terra grazie alle tecnologie e ai mezzi dell’Azienda di Sant’Ilario d’Enza (RE). Qui gli impalcati di carpenteria metallica sono stati portati in quota sopra le pile, con mezzi di sollevamento speciali, con attività che si sono svolte in parallelo, 7 giorni su 7, H24, per ottemperare al cronoprogramma imposto dal Commissario Straordinario Marco Bucci. Prima il personale dell’ufficio Tecnico, poi il personale qualificato di Cantiere, ha condotto attività impegnative, mantenendo sempre alta la concentrazione, in condizioni di stress elevato causato dalla forte attenzione mediatica e, nell’ultima fase, fronteggiando anche l’emergenza sanitaria legata a Covid-19. Il presente articolo vuole descrivere le attività di montaggio e i mezzi di installazione utilizzati, ma vuole altresì essere il mezzo per trasmettere un ringraziamento a tutto il personale coinvolto di tutte le Imprese, per il lavoro svolto con professionalità e tenacia. È in questo modo che è stato possibile restituire alla città di Genova e al Paese in tempi brevissimi questa importante e strategica opera colossale.

Fagioli, a leading international company in the sector of heavy transport and lifting, was involved in each single phase of the construction of the new San Giorgio bridge, contracted by the joint venture PERGENOVA S.C.p.A. (a listed consortium company established by Fincantieri and Webuild, to design and build the new viaduct). The bridge sections built by Fincantieri were transported to the construction site by sea and by land thanks to the engineering and equipment of the Company of Sant’Ilario d’Enza (RE). At construction site, the metal carpentry sections were raised above the pilons, with special lifting means, with activities that took place in parallel, 7 days a week, H24, to comply with the time schedule imposed by the “Commissario Starordinario” (Special Commissioner), Mr. Marco Bucci. Both the staff of the Technical Department, and the Specialized site operators of Fagioli, executed demanding activities, always keeping high concentration, under a high pressure due to the pushy media attention and, in the last phase, also under the sword of Damocles of the health emergency related to Covid-19. This article aims to describe the assembly activities on site and Fagioli heavy lifting equipment involved in the whole operation, and, last but not least, it also becomes a way of express our gratitude to all the personnel involved in this operation, including the operators from all the other companies, for the work done with professionalism and tenacity. Operating in this way, it has been possible to give back to the city of Genoa and to the Italian country an important, colossal and strategic work in a very short time.

*Corresponding author. Email: m.salsi@fagioli.coms

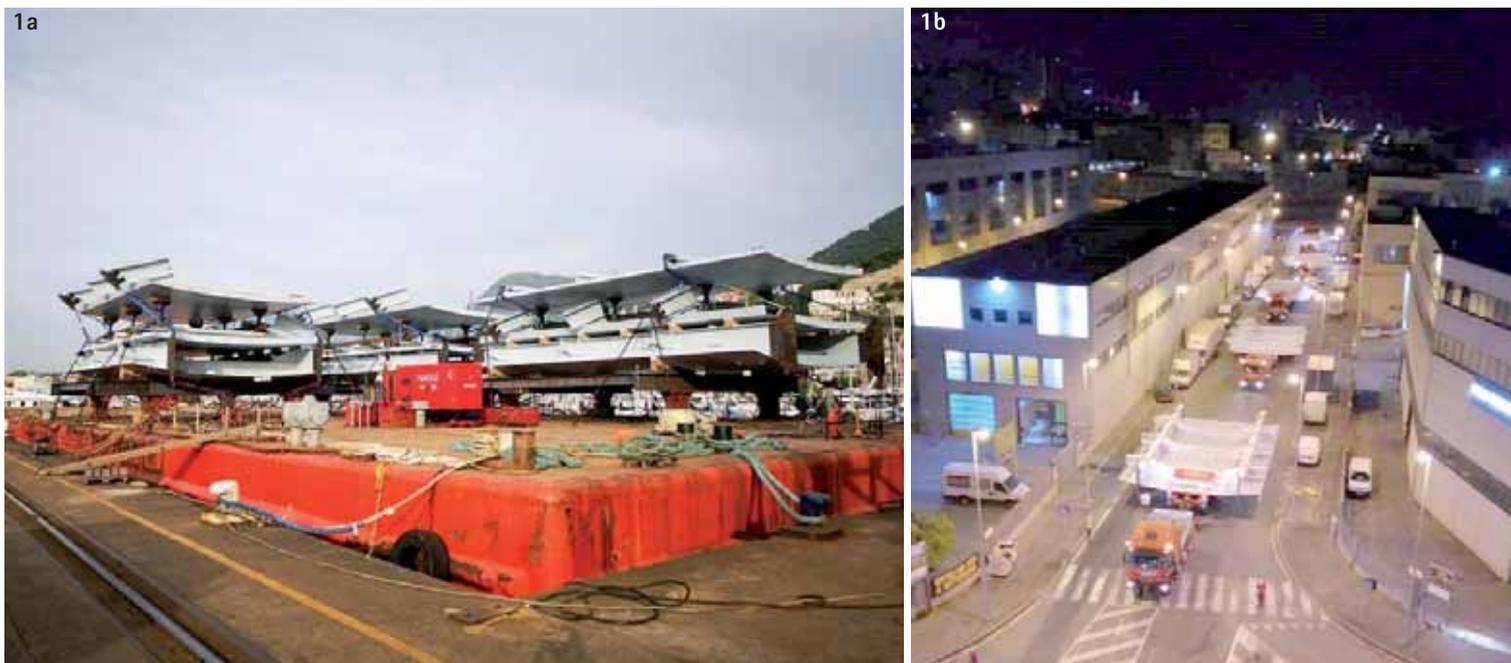


Fig. 1 – Trasporto “megablocchi” in chiatta e in strada

1. INTRODUZIONE

La costruzione e il montaggio del Nuovo Ponte San Giorgio sono iniziati subito dopo la demolizione del viadotto esistente “Morandi”, senza soluzione di continuità, con la stessa intensità e volontà di restituire in tempi rapidi alla città di Genova un nuovo Ponte che potesse sostituire lo storico Ponte Morandi, oggetto del crollo improvviso del 14 agosto 2018. Lo smontaggio, che ha visto riunite in ATI (Associazione Temporanea di Imprese) la Omini SPA, la Fagioli SPA, la IREOS SPA e lo studio IPE Progetti srl, sono iniziate il giorno 8 febbraio 2019 e si sono concluse il 31 luglio 2019, con un susseguirsi di lavori compresi in una finestra temporale continuativa di soli 168 giorni. Quelle di montaggio in sito hanno impegnato la Fagioli nelle attività di trasporto e sollevamenti speciali per il Cliente Fincantieri Infrastructure e sono iniziate il 1° agosto 2019. Le attività si sono concluse con l’ultimo sollevamento in quota il giorno 28 aprile 2020, poco prima dell’inaugurazione del Viadotto avvenuta il giorno 3 agosto.

2. IL CONCETTO DI MODULARIZZAZIONE APPLICATO ALLE ATTIVITA’ DI MONTAGGIO

Il nuovo viadotto sul Polcevera è stato progettato nell’ottica della sua installazione e quindi gli elementi modulari sono stati dotati già in officina di adeguati rinforzi e di punti di aggancio per il sollevamento, in accordo alla metodologia condivisa con i Progettisti dell’opera e quelli specialistici di varo. Questo ha reso il montaggio certamente più semplice dello smontaggio. Durante quest’ultimo infatti i progettisti si sono dovuti scontrare con un manufatto in calcestruzzo in equilibrio precario, che non presentava punti di sollevamento, progettato dall’ingegner Morandi con armatura idonea alla sola fase di esercizio che difficilmente è risultata idonea anche per le fasi transitorie di smontaggio.

Le difficoltà più grandi riscontrate durante le fasi di ingegneria e di montaggio sono collegate, oltre al cronoprogramma, alla morfologia del cantiere e ai ridotti spazi concessi dall’arredo urbano. I progettisti hanno dovuto considerare la presenza di sottoservizi quali fognature e condotte del gas, di opere civili esistenti quali lo Stabilimento Ansaldo, la presenza di corso Perrone, via Perlasca e via Fillak e, in particolare, la presenza del torrente Polcevera e della Ferrovia, che hanno spezzato l’area in due cantieri separati. Le aree idonee al posizionamento delle attrezzature di sollevamento e movimentazione sono state ridotte e hanno richiesto lo svolgimento delle attività di varo addirittura dentro l’alveo del torrente

Polcevera e all’interno dell’area della Ferrovia.

Entrambi i progetti di decostruzione e di montaggio sono stati impostati ispirandosi al concetto di *modularizzazione*, un modello che è contrapposto al metodo “*stick built*” e che prevede, nel caso del montaggio, la prefabbricazione completa o parziale delle strutture presso cantieri secondari ed il loro trasporto e installazione nel cantiere primario. Le parti di impalcato in carpenteria metallica sono state prefabbricate in “megablocchi”, più grandi possibili, negli Stabilimenti di Fincantieri Stabia, Sestri Ponente e Valeggio sul Mincio, e trasportati in loco con mezzi Speciali Fagioli marittimi e terrestri. La modularizzazione ha permesso agli Stabilimenti Fincantieri di lavorare in parallelo, riducendo al minimo le ore lavorative in Cantiere, con un relativo aumento della Sicurezza sul Lavoro.

I trasporti marittimi e lo sbarco presso la banchina di Genova sono stati eseguiti impilando i “megablocchi” a gruppi di tre, mentre i trasporti urbani, per limitare gli ingombri, sono avvenuti singolarmente (figura 1). Da giugno 2019 a marzo 2020, sulle strade urbane sono transitati in totale 237 “megablocchi” con dimensioni medie (LxWxH) 15 x 10,2 x 2 m e 6 x 10 x 3,8 m e fino a 100 t di peso per un singolo trasporto, per un totale di 70 trasporti eccezionali. I trasporti sono stati eseguiti in ore notturne, per non gravare ulteriormente sul traffico cittadino genovese, già appesantito dalla chiusura di alcune strade urbane ed extraurbane, compreso ovviamente il tratto autostradale A10.

I “megablocchi” sono stati assemblati ai piedi delle pile in calcestruzzo fino al completamento delle campate. Successivamente quest’ultime sono state trasportate nella posizione del sollevamento per il loro varo in quota, per un totale di 3 campate aventi lunghezza 100 m, 14 campate aventi lunghezza 50 m, una campata da 41 m e una da 27 m. Complessivamente il peso totale trasportato è stato circa 17.500 t di carpenteria metallica, costruita in conformità alle Norme UNI EN 1090 in Execution Class 4.

Il modello di modularizzazione ha così richiesto mezzi di trasporto eccezionali che hanno transitato per le vie urbane e in cantiere, e attrezzature di sollevamento con portate elevate, in grado di sollevare in un solo giorno gli impalcati da terra alla quota finale di +50,6 m, sopra le pile in calcestruzzo gettate in opera dall’azienda appaltatrice delle opere civili Salini Impregilo.

La potenza di sollevamento messa a disposizione è stata costituita da:

- 2 gru Demag Fagioli CC2800, cingolate tralicciate, capacità massima 600 t, per il sollevamento da terra in tandem lift delle campate minori



Fig. 2 – Sollevamento di una campata L=100 m tipica con Strand Jack System

- aventi lunghezza 50 m;
- 1 gru Demag Fagioli CC6800 e 1 gru demag CC6800; cingolate tralicciate, capacità massima 1.250 t, per il sollevamento da terra in tandem lift delle campate minori aventi lunghezza 50 m;
- 1 gru Demag CC3800, cingolata tralicciata, capacità massima 650 t, per il sollevamento da terra delle campate minori aventi lunghezza 50 m;
- 4 macchine speciali di sollevamento Fagioli (*Climbing Jacks*), capacità totale 2.400 t, per il pre-sollevamento fino a 5 m delle campate maggiori aventi lunghezza 100 m, per permetterne la movimentazione con carrelli semoventi superando il torrente Polcevera e la Ferrovia, fino in posizione di sollevamento tra le pile;
- 238 assi SPMT's, mezzi semoventi speciali multi-ruota per la movimentazione a terra degli impalcati, dalle aree di montaggio alle aree di sollevamento, in alcuni casi attraverso l'alveo del torrente Polcevera e la Ferrovia;
- 4 macchine speciali di sollevamento Fagioli (*Strand Jacks System - martinetti a recupero di cavo*), capacità totale 2.400 t, per il sollevamento delle campate maggiori aventi lunghezza 100 m, fino alla quota di varo sopra le pile;
- 1 Gru LTM450, idraulica stabilizzata, capacità 450 t per il montaggio delle attrezzature Fagioli e il montaggio di parti secondarie dell'Impalcato.

3. L'INSTALLAZIONE DELLE CAMPATE DI LUNGHEZZA 100 M

Il sollevamento delle tre campate comprese tra le pile 8 e 11, aventi luce 100 m, è stato eseguito mediante quattro martinetti di sollevamento a recupero di cavi (*Strand Jacks Fagioli Lifting System*), con capacità pari a 600 t, per una capacità di sollevamento totale di 2.400 t. Il fascio di cavi di sollevamento per ogni martinetto è costituito da 37 trefoli conformi alla Norma BS 5896:2012, diametro 18 mm, con carico ultimo a rottura pari a

1.440 t e peso 67 kg/m. Durante il sollevamento, il fascio di cavi passante attraverso il martinetto strand jack può essere raccolto in "recoilers" oppure guidato da "strand guides" e fatto scendere a terra per gravità. Altri mezzi di sollevamento come gru sono stati scartati in fase progettuale. I mezzi standard di sollevamento avrebbero potuto sollevare pesi molto più leggeri, campate alleggerite prive di parti strutturali pesanti e avrebbero richiesto spazi di manovra al momento non disponibili, con fondazioni impegnative atte a distribuire i carichi di stabilizzatori e di cingoli su un terreno che non ammette pressioni superiori a 25 t/m² (2,5 kg/cm²). La campata sollevata in quota è stata la porzione di impalcato continuo in sola carpenteria metallica posta tra i conci di pila precedentemente installati (Figura 2)

Le caratteristiche delle campate sono le seguenti:

- Lunghezza = 93,9 m;
- Larghezza = 27 m;
- Altezza = 4,9 m;
- Peso = 2.000 t circa.

In particolare, per tutte le tre campate, il concio di pila lato ponente era continuo con l'impalcato precedentemente installato, mentre il concio di pila lato levante era singolo e avente dimensioni (LxWxH) 6,0 x 27 x 4,9 m. Il varco attraverso i conci di pila era sufficientemente aperto per permettere la salita dell'impalcato e il passaggio attraverso gli stessi, senza rischio di collisione e deterioramento dei lembi precedentemente preparati per le successive attività di saldatura. Il varco teorico è stato aumentato di 50 mm rispetto alla luce dell'impalcato per ammettere eventuali variazioni termiche, imperfezioni di montaggio, oscillazioni per vento etc. Il varco è stato controllato in fase operativa con rilievi topografici prima di ogni sollevamento e al momento dello stacco da terra, per controllare l'effettivo comportamento delle strutture sotto carico e le rotazioni relative dei lembi. Il gap di 50 mm si è rivelato idoneo già durante il primo sollevamento, come conferma dei risultati delle modellazioni eseguite in fase progettuale.

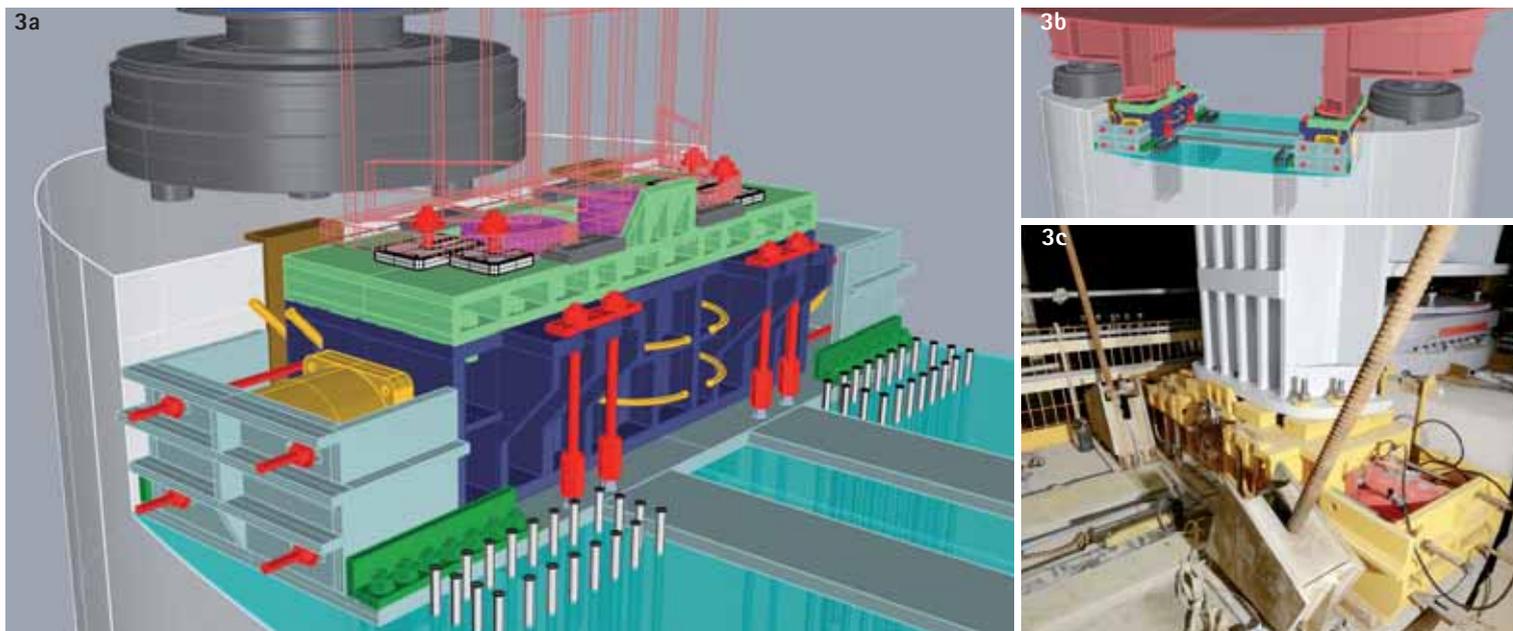


Fig. 3 – Rendering del sistema di slitta del concio di pila singolo

Quando è stato completato l'allineamento altimetrico delle parti, il gap è stato annullato mediante lo spostamento longitudinale del concio di pila singolo lato levante, grazie ad un sistema di skidding costituito da due slitte idrauliche.

Ogni slitta (figura 3) è stata interposta tra il concio di pila singolo e la sommità della relativa pila ed era dotata dei seguenti accessori:

- Quantità = 2 martinetti verticali, capacità = 600 t ciascuno, che durante le attività di sollevamento si sono sostituiti agli appoggi finali dell'Impalcato, per sorreggere il concio di pila in corrispondenza delle appendici che scendono ai fianchi dei baggioli, e che, in esercizio, serviranno per la presa in carico dell'impalcato durante le operazioni di manutenzione degli appoggi definitivi; i martinetti avevano capacità di sollevamento totale pari a 2.400 t; gli stessi martinetti sono stati utilizzati per rilasciare il peso dell'impalcato sugli appoggi definitivi, dando le coazioni all'impalcato continuo previste dal Progettista dell'Opera;
- Quantità = 2 martinetti longitudinali per lato, capacità = 300 t ciascuno, che hanno permesso lo spostamento del concio di pila longitudinal-

mente e la rotazione in pianta, al fine di annullare il gap di 50 mm e chiudere longitudinalmente il pacchetto costituito dai conchi di pila e dall'impalcato;

- Quantità = 2 martinetti trasversali, capacità = 200 t ciascuno, che hanno permesso lo spostamento trasversale del concio di pila singolo, al fine di aumentare i gradi di libertà del concio per assecondare i requisiti di allineamento trasversale tra le campate da 100 m e il concio di pila.

Lo scivolamento interno alla slitta tra concio di pila singolo e pila è avvenuto tra uno strato di Teflon (superficie inferiore fissa) e Acciaio Inox AISI 316L (superficie mobile), per garantire un basso coefficiente di attrito che, in fase operativa al momento del primo stacco, è stato misurato pari a $\mu = 0,085$.

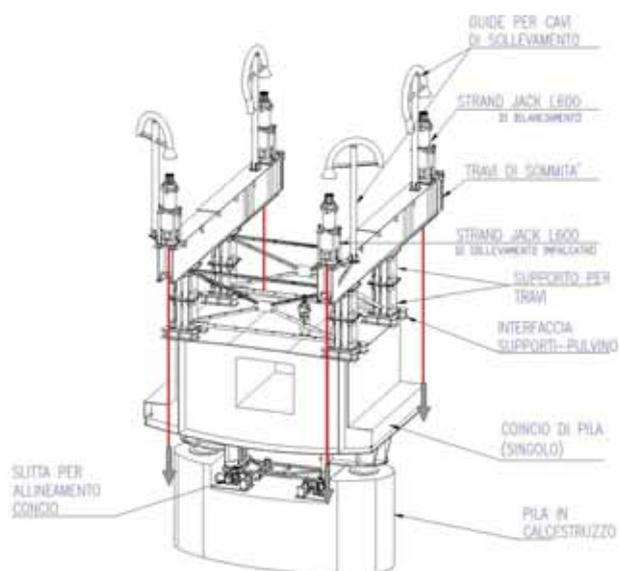
Il calcolo della forza di spinta orizzontale necessaria per lo spostamento longitudinale del concio di pila singolo è stato condotto in relazione ai seguenti carichi ed effetti:

- Peso proprio dell'impalcato (carico verticale);
- Peso del concio di pila singolo (carico verticale);



Fig. 4 – Sistema di bilanciamento di un concio di pila e contrappeso

5a



5b



Fig. 5 – Strutture temporanee di supporto alla Macchina di Sollevamento “strand jack system”

- Fuori verticalità, seppure minima, dei cavi di sollevamento durante lo spostamento longitudinale, e pertanto componente orizzontale di contrasto al movimento (carico orizzontale);
- Eventuale *unbalance load* (differenza di carico) nei cavi di sollevamento,
- Sovrappinta del vento sull’impalcato, relativa ad un vento massimo operativo pari a 12 m/sec, raffica, alla quota dell’impalcato (carico verticale);
- Forza verticale di bilanciamento del concio di pila singolo (carico verticale).

In particolare, quest’ultimo effetto ha contribuito in maniera sostanziale al valore di spinta orizzontale necessario al movimento longitudinale del concio di pila singolo. La forza di bilanciamento è il carico verticale che è stato applicato al concio di pila contestualmente e opposto al carico verticale di sollevamento. Infatti, per mantenere in equilibrio il concio di pila, si è dovuto applicare un tiro opposto al peso dell’impalcato mediante 2 martinetti *Strand Jacks* a recupero di cavi, con trefoli collegati ad un contrappeso posto ai piedi della pila, posizionato opposto all’impalcato sollevato (figura 4).

Il bilanciamento continuo ha permesso di ridurre i momenti flettenti alla

base del concio di pila e sulla pila stessa. Il tiro è stato mantenuto durante tutto il proseguo delle attività e, soprattutto, durante le attività di presa in carico dell’impalcato. L’incremento di carico graduale dei martinetti di sollevamento è stato condotto a step di 10% del carico finale previsto ed è stato sempre proporzionato con l’incremento di carico dei martinetti di bilanciamento, in relazione ai bracci delle forze rispetto al punto di appoggio del concio di pila singolo. Il carico di bilanciamento è stato mantenuto costante durante tutto il sollevamento da terra fino alla quota finale, e garantito da un contrappeso posato a terra, costituito da billette e zavorre, aventi complessivamente un peso di 850 t.

Nella fase transitoria di montaggio del concio di pila singolo senza i carichi di bilanciamento, la sua stabilità è stata assicurata da tiranti inghisati nella *testa pila* che lo hanno rigidamente collegato e messo in sicurezza contro carichi instabilizzanti quali vento e carichi accidentali. I tiranti, a seguito dell’applicazione dei carichi stabilizzanti dei martinetti *strand jacks*, sono stati allentati, per togliere iperstaticità al sistema e affidare la stabilità unicamente ai cavi.

I martinetti di sollevamento *strand jacks* e i martinetti di bilanciamento, sono stati installati sui conci interponendo delle strutture temporanee in

6a



6b



Fig. 6 – Sollevamento di 5 m dell’impalcato e inserimento dei mezzi di trasporto

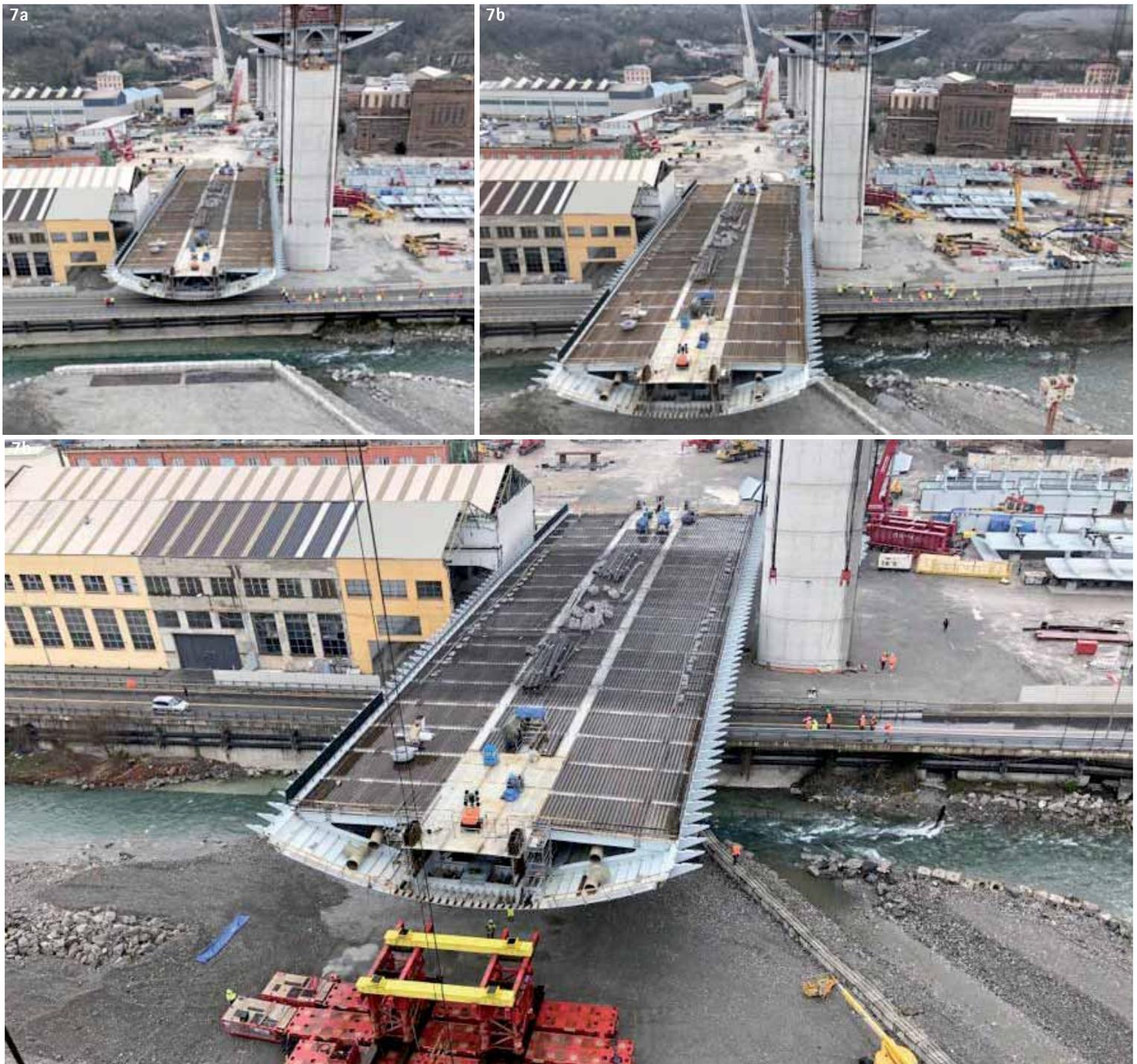


Fig. 7 – Movimentazione dell’impalcato di 100 m sul Polcevera

carpenteria metallica in acciaio S355J0 (figura 5); queste strutture hanno ripartito il peso dell’impalcato e gli effetti dinamici e del vento, sulle ossature strutturali presenti nel concio di pila, sulle due travi longitudinali poste ad interasse di 7 m.

Due girder longitudinali a cassone di lunghezza 12 m circa, altezza 1500 mm e larghezza 900 mm, distanti 7 m l’una dall’altra, sono state appoggiate a due colonne ognuna aventi altezza 2400 mm e base quadrata 1200 x 1200 mm. Una tralicciatura di parete ha irrigidito le colonne contro carichi agenti nel piano orizzontale, dovuti principalmente alla pressione del vento. L’attività di sollevamento dell’impalcato è stata definita come “*weather restricted*”; la durata del sollevamento - dal momento dello stacco da terra alla posizione finale incluso il centraggio e la traslazione longitudinale del concio di pila singolo - è avvenuta in un arco temporale inferiore alla finestra di previsione meteo di 72 h, con quindi la certezza di

iniziare e ultimare le attività con un vento inferiore a quello di progetto, pari a 12 m/sec. Il sollevamento è durato mediamente 10 ore e, a seguito del centraggio e dell’allineamento dei lembi, è avvenuta una prima messa in sicurezza meccanica dell’impalcato rispetto ai concetti di pila, progettata considerando un possibile peggioramento del tempo e un aumento dei venti di raffica come da normativa vigente.

Il trasporto delle campate dalla zona di montaggio di Cantiere alla zona di sollevamento, e il loro inserimento all’interno delle pile di calcestruzzo fino al sotto gancio, sono stati in generale molto impegnativi.

In due casi gli spazi di manovra sono stati particolarmente singolari: successivamente all’installazione della prima campata da 100 m lato ponente, è stata la volta della campata da 100 m sopra il torrente Polcevera, e poi della campata da 100 m sopra la Ferrovia. Per quest’ultime due campate, è stato necessario un pre-sollevamento fino a 5 m da terra, per portare



Fig. 8 – Movimentazione dell'impalcato di 100 m in corrispondenza della Ferrovia

gli impalcati dalla quota di assemblaggio in cantiere ad una quota di trasporto maggiore rispettivamente dell'argine di via 30 Giugno e del rilevato ferroviario (figura 6).

Il sistema di sollevamento, denominato *Fagioli Climbing Jack CJ600*, è costituito da 4 martinetti a spinta, aventi capacità 600 t ognuno, per un totale di 2.400 t. Il mezzo di sollevamento ha permesso di montare



Fig. 9 – Sollevamento tipico in tandem della campata da 50 m

l'impalcato a terra ad una quota "standard" di 1,5 m circa, con normali supporti temporanei, e di sollevare in poche ore l'impalcato poco prima del varo. Vista la quota finale dell'impalcato, i carrelli di trasporto sono stati dotati di strutture temporanee di carpenteria metalliche alte circa 3 m, disposte in posizioni strutturalmente idonee, allineate alle nervature interne trasversali dell'impalcato e alle travi longitudinali distanti 7 m l'una dell'altra.

La movimentazione della campata sul Polcevera ha richiesto una manovra di avvicinamento alle pile con un primo convoglio costituito da SPMT's (*Self Propelled Modular Trailer*) il quale, in corrispondenza delle sponde del torrente, ha dovuto interrompere la propria corsa e trasferire il carico di 2.000 t ai mezzi precedentemente posizionati in alveo. È con questi carrelli che è stato possibile raggiungere la posizione finale, con una serie di trasferimenti di carico da un mezzo all'altro, ogniquale volta il corso d'acqua ne impediva la marcia avanti (figura 7). Il corso d'acqua è stato opportunamente deviato per ottimizzare le manovre dei mezzi, i quali non hanno richiesto particolari fondazioni ma solo una compattazione del terreno con riporto di inerti scelti. Il mezzo SPMT's è un mezzo multiruota che, mediante il sistema idraulico di cui è dotato, permette di ripartire il carico trasportato in maniera uniforme su tutti gli assi e sulle ruote, con una pressione uniformemente distribuita sotto l'impronta del mezzo che non supera le 10 t/m² (1 kg/cm²).

Anche la presenza della Ferrovia ha reso le attività di movimentazione impegnative, non solo per il vincolo geometrico ma anche per il vincolo temporale dovuto alla richiesta della Committente di interrompere il traffico ferroviario per una finestra temporale più ridotta possibile. La movimentazione con carrelli semoventi SPMT's (figura 8) è risultata proficua da entrambi i punti di vista, con il risultato seguente:

- Tempo totale necessario alla movimentazione dall'area di stoccaggio all'area sotto "gancio" = 12 ore;
- Tempo totale di interdizione traffico ferroviario, comprese le attività di smontaggio e rimontaggio alimentazione elettrica = 9 giorni.

4. L'INSTALLAZIONE DELLE CAMPATE DI LUNGHEZZA 50 M

Il sollevamento delle campate aventi lunghezza 50 m è stato eseguito mediante gru cingolate tralicciate Demag CC2800, CC3800 e CC6800, armate nella seguente configurazione:

- Demag CC2800:
 - Braccio principale: 78 m;
 - Mast: 48 m;
 - Contrappeso: 300 t (massimo) superlift + 250 t su corpo macchina;



Fig. 10 – Sollevamento tipico in singola di un conco con l'ausilio di torri temporanee

- Sbraccio massimo operativo: 25 m.
- Demag CC3800:
 - Braccio principale: 78 m (114 m);
 - Mast: 48 m;
 - Contrappeso: 300 t (massimo) superlift + 250 t su corpo macchina;
 - Sbraccio massimo: 60 m.
- Demag CC6800:
 - Braccio principale: 78, 102, 114 m;
 - Mast: 48 m;
 - Contrappeso: 450 t (massimo) superlift + 250 t su corpo macchina;
 - Sbraccio massimo: 60 m.

L'oggetto del sollevamento è stato un tratto di impalcato continuo in sola carpenteria metallica, con annesso un conco di pila e alcuni carter laterali. La parte di impalcato, al momento della posa in quota, è stata appoggiata ad una estremità sugli appoggi temporanei in *testa pila*, ed

all'altra estremità all'impalcato precedentemente installato, mediante un avambecco dotato di guide per facilitarne il centraggio trasversale e longitudinale (figura 9). Due bilancini di sollevamento, uno per gru, hanno permesso l'imbrago dell'impalcato, sorreggendolo dall'intradosso, per non far lavorare a strappo l'estradosso dello stesso.

La posizione dei punti di sollevamento è stato oggetto di studi approfonditi, per cercare di ottimizzare le portate delle gru, per aumentare il più possibile il peso del sollevato, con più carter possibili.

Le caratteristiche delle campate "corte" sollevate sono state:

- Lunghezza = 50m;
- Larghezza = 27 m (larghezza maggiore con inclusi i carter laterali);
- Altezza = 4,9 m
- Peso medio = 650 t (a seconda del numero di carter laterali installati).

In alcuni casi non è stato possibile posizionare l'impalcato sotto gancio in una zona prospiciente le pile; in questi casi, dopo la presa in carico,



le gru hanno dovuto cingolare sotto carico, compiendo manovre in tandem che hanno richiesto un coordinamento preciso e un movimento sincrono delle due Macchine, per evitare sovraccarichi e, soprattutto, fuori piombo dei ganci con conseguente carico orizzontale instabilizzante nel braccio.

Alcuni impalcati, in particolare quelli di estremo Levante e Ponente, a causa della presenza delle scarpate non accessibili dalle gru, non sono stati installati in un pezzo unico, ma sono stati suddivisi in parti più piccole, in modo tale da essere installati con una singola gru CC6800

(Levante e Ponente). A tal fine sono state predisposte torri temporanee in grado di sostenere temporaneamente e strutturalmente i tronchi di impalcato e di garantire l'accesso al Personale per le operazioni di centraggio e di saldatura finale (figura 10).

Le torri in oggetto sono state dotate di martinetti di sollevamento a spinta, in modo tale da poterne controllare la quota di impostazione millimetrica. I martinetti hanno permesso di scaricare le torri per essere rimosse dopo l'ultimazione dei collegamenti longitudinali con il resto dell'impalcato.

CREDITS

Progettazione esecutiva specialistica di attrezzature temporanee in carpenteria metallica e sistemi di sollevamento:

Assistenti alla progettazione esecutiva specialistica di attrezzature in carpenteria metallica e sistemi di sollevamento:

Site Manager per attività di sollevamenti:

Ing. Loris Giovannini (Direttore Tecnico Fagioli EMEA), Ing. Marco Salsi (Ingegnere di progetto Home Office e Site - Fagioli SPA), con l'ausilio dell'Ufficio Tecnico Fagioli SPA (Sant'Ilario d'Enza, RE).

Ing. Martina Bertorelli, per. ind. Gianpiero Mosco (Fagioli SPA) con l'ausilio dell'Ufficio Tecnico Fagioli SPA (Sant'Ilario d'Enza, RE) Geom. Manuel Capelli (Fagioli SPA).

PONTE SAN GIORGIO DI GENOVA: IL RUOLO CHIAVE DELLA COLLABORAZIONE BIM

PONTE SAN GIORGIO IN GENOVA: THE KEY ROLE OF BIM COLLABORATION

Dott. Dario Doveri

C.E.O. di Stici Group srl – Pontedera (PI)

Con il contributo della Dott.ssa Flavia Tarsilla

Harpaceas – Milano

Il processo di realizzazione del Ponte San Giorgio, il nuovo viadotto sul Polcevera, ha richiesto tempi di progettazione e costruzione molto stretti. Le nuove tecnologie a disposizione degli operatori hanno permesso, tuttavia, che i lavori proseguissero in maniera spedita, anche durante il periodo di lockdown. Stici Group Srl, società specializzata nella progettazione di strutture industriali e civili in acciaio, è stata coinvolta all'interno di questo progetto dal committente Fincantieri. Attraverso l'adozione del BIM, l'utilizzo degli strumenti Tekla Structures e Tekla Model Sharing e lo sviluppo ad hoc di applicativi in collaborazione con Harpaceas, Stici Group ha seguito le attività di progettazione delle strutture ed ha collaborato in modo efficace e veloce con gli altri attori coinvolti, traendo i principali benefici della collaborazione BIM.

The design and construction process of San Giorgio Bridge, the new viaduct over the Polcevera, required very short planning and construction times. However, the project continued quickly, even during the lockdown period, thanks to the new technologies. Stici Group Srl, a company specialized in the design of industrial and civil steel structures, was involved in this project by Fincantieri. Thanks to BIM adoption, the use of Tekla Structures and Tekla Model Sharing tools and the development of specific applications in collaboration with Harpaceas, Stici Group has been able to manage the design activities related to the structures and to effectively and quickly collaborate with other companies involved, taking advantage of BIM collaboration main benefits.

IL PONTE SAN GIORGIO, il nuovo viadotto sul Polcevera, è stato inaugurato il 3 agosto 2020.

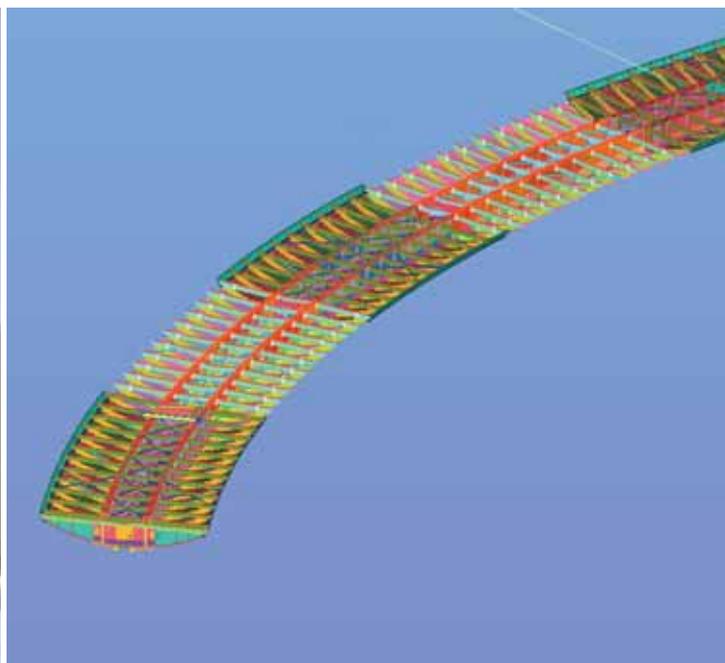
Il provvedimento che ha disciplinato le misure necessarie per la sua costruzione è contenuto nel Decreto Legge 28 settembre 2018, n. 109 coordinato con le modifiche introdotte dalla Legge di conversione n. 16 novembre 2018, n. 130, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale 19 novembre 2018, n. 269.

Il processo di realizzazione dell'opera ha richiesto tempi di progettazione e costruzione molto stretti. Le nuove tecnologie a disposizione degli

operatori hanno permesso, tuttavia, che i lavori proseguissero in maniera spedita, anche durante il periodo di lockdown. Inoltre, è stato deciso di adottare la procedura di appalto prevista dalla Direttiva 2014/24/UE, direttiva europea sugli appalti pubblici che regola gli appalti in casi di estrema urgenza nella massima trasparenza.

Stici Group Srl è una società, con sede a Pontedera (PI), specializzata nella progettazione di strutture industriali e civili in acciaio, coinvolta all'interno di questo progetto dal committente Fincantieri, con il loro coordinamento / supervisione.

*Corresponding author Fabrizio Ferraris. Email: ferraris@harpaceas.it



LA PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE: STRUMENTI E PROCESSI

Come tutti gli altri operatori del progetto, anche Stici Group ha introdotto una serie di strumenti e processi per poter affrontare al meglio questa sfida. Innanzitutto, l'Ufficio Tecnico della società ha ampliato la propria forza collaborativa, inserendo nel progetto anche altre figure professionali con esperienza ultratrentennale nella progettazione di ponti. Inoltre, la disponibilità dell'azienda nei confronti di Fincantieri e dell'opera

stessa è stata totale; lo Studio ha dedicato l'intera forza lavoro a questo progetto, rinunciando a qualsiasi altra commessa per tutta la durata dell'attività. Lo strumento scelto per sviluppare il progetto assegnato a Stici Group è stato il software BIM Tekla Structures. Questo ha consentito, grazie all'utilizzo della piattaforma Tekla Model Sharing, di coordinare tutti i professionisti dedicati alla commessa in maniera molto efficace. Il vantaggio principale, lavorando in tempi molto stretti, è stata la possibilità di collaborare contemporaneamente su un unico modello BIM, ottimizzando i tempi di progettazione costruttiva e riducendo gli errori derivanti dall'eventuale utilizzo di più modelli.



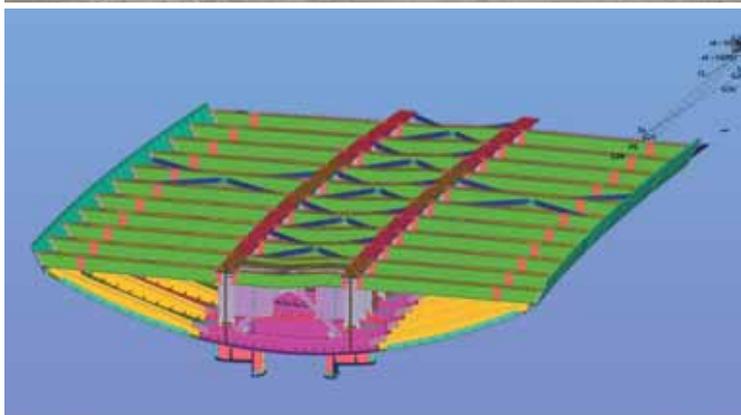
Per il team è stato quindi possibile portare avanti il progetto in modo costante e continuativo, in qualsiasi orario, giorno (feriale o festivo) e luogo. Il Tekla Model Sharing si è rivelato uno strumento essenziale anche per affrontare il periodo di lockdown; la commessa si è svolta infatti in parte durante questo particolare periodo emergenziale. Grazie alle nuove tecnologie di collaborazione, si è potuto proseguire con i lavori, con qualche inevitabile disagio ma senza particolari problemi.

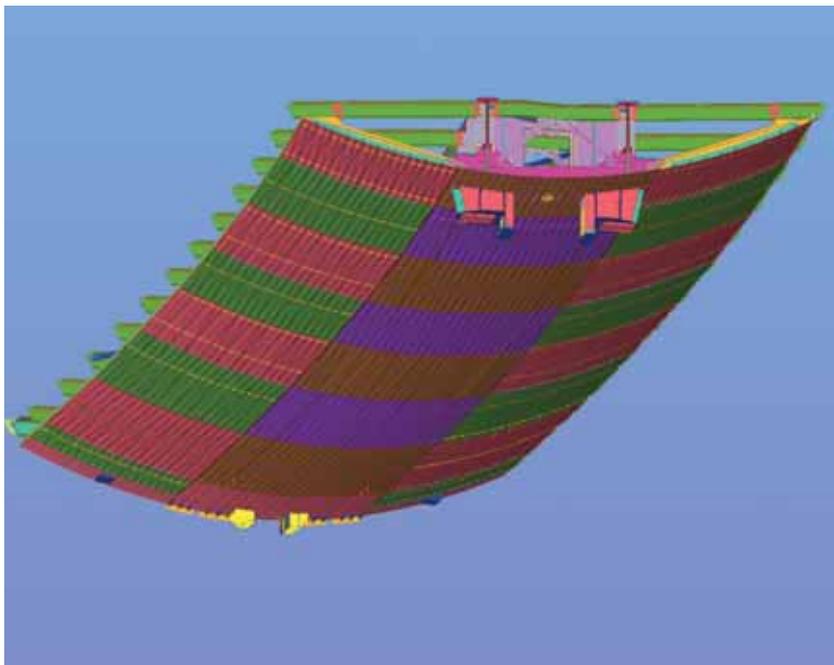
La sinergia tra Tekla Model Sharing e una video conferenza attiva e continuativa tra tutte le persone dedicate al progetto, ha contribuito positivamente alla continuità operativa nel periodo di chiusura.

ADOZIONE DEL BIM: SFIDE E VANTAGGI

Per una sfida molto complessa come la realizzazione del ponte sul Polcevera di Genova, l'adozione del BIM è stata definita come una scelta indispensabile. "È stato pressoché necessario lavorare con questo metodo, dato il notevole numero di persone e imprese coinvolte su questo progetto. L'esigenza di fornire in tempo reale tutte le diverse informazioni richieste da progettisti, architetti, costruttori e altri operatori, sempre in maniera univoca ed aggiornata, è stata la principale esigenza lavorativa da soddisfare. In questo contesto, il BIM ha mostrato uno dei suoi vantaggi fondamentali" dichiara l'Ing. Dario Doveri, Amministratore Unico di Stici Group.

Più in dettaglio sulle attività di progettazione, l'utilizzo di Tekla Structures ha dato un ottimo apporto in termini di efficientamento nella gestione e nella collaborazione del team che ha preso parte alla realizzazione del ponte. In particolare, ad inizio lavori, lo Studio Tecnico ha dovuto realizzare ex novo una modellazione particolarmente complessa, finalizzata a fornire velocemente e facilmente tutte le informazioni necessarie alle varie officine di costruzione di Fincantieri. La metodologia BIM adottata è stata poi condivisa con gli altri attori coinvolti.





BIM E TEKLA STRUCTURES: IL SUPPORTO DI HARPACEAS A STICI GROUP

Stici Group ha collaborato con Harpaceas in alcune fasi della realizzazione dell'opera. Questa collaborazione è stata molto importante; Harpaceas ha fornito un supporto costante e continuativo per l'intera durata del progetto, dedicando una parte del personale in esclusiva a Stici Group.

L'attività di supporto si è mostrata fondamentale in alcuni momenti critici della progettazione; Harpaceas, in collaborazione con il cliente, ha sviluppato degli applicativi che, integrati a Tekla Structures, ne hanno esteso le funzionalità per rispondere ad esigenze straordinarie, prettamente legate alla commessa. Si è verificata una collaborazione diretta tra Stici Group ed Harpaceas, dove il team tecnico dello Studio ha testato gli applicativi sviluppati da Harpaceas.

Questo tipo di supporto è stato essenziale per garantire la continuità operativa in alcuni momenti critici del progetto.

STICI GROUP

Stici Group Srl è una società con esperienza trentennale nella progettazione di strutture in acciaio, industriali e civili, in grado di fornire servizi di ingegneria per qualsiasi tipo di costruzione in acciaio: capannoni industriali, impianti petrolchimici, forni e caldaie, ponti stradali e ferroviari, centrali elettriche, aeroporti, acciaierie etc.

La grande esperienza acquisita, collaborando con le maggiori società di costruzione italiane ed internazionali, permette alla società di sviluppare con professionalità tutte le fasi della progettazione: dalla relazione di calcolo sulla base degli input di impianto, sviluppa i disegni di progetto e tutta l'ingegneria di dettaglio con l'emissione dei disegni per l'officina, corredati delle liste materiali e le tavole di insieme per il montaggio in cantiere.

HARPACEAS E TEKLA STRUCTURES

Harpaceas è stata fondata a Milano nel 1990 da un gruppo di ingegneri che precedentemente avevano maturato una significativa esperienza presso lo studio Finzi & Associati e la CEAS.

Oggi presentiamo al mercato un portfolio che comprende software BIM tra i più diffusi a livello mondiale per tutta la filiera delle costruzioni, oltre che software per il calcolo strutturale e geotecnico. La nostra proposta si completa con i servizi per l'implementazione del BIM e di formazione specialistica per tutti coloro che operano nel settore delle costruzioni.

Con più di 7000 clienti in tutta Italia, ci poniamo come partner tecnologico

per tutto l'arco del processo ideativo e costruttivo: dalla progettazione, alla costruzione, alla gestione. Nel nostro parco clienti sono presenti le più importanti realtà appartenenti alla filiera delle costruzioni.

Harpaceas è distributore esclusivo di Tekla Structures per l'Italia.

Tekla Structures è il software BIM (Building Information Modeling) leader al mondo per la progettazione costruttiva di strutture in acciaio, in cemento armato prefabbricato e gettato in opera, prodotto da Trimble Solutions, società finlandese del gruppo Trimble.



BARRE AD ADERENZA MIGLIORATA IN ACCIAIO INOSSIDABILE NEL NUOVO PONTE DI GENOVA

STAINLESS STEEL REBAR IN THE NEW GENOVA BRIDGE

A cura dell'Ing. Francesco Lipari*

Centro Inox - Associazione italiana per lo sviluppo degli acciai inossidabili.

Lo scorso 3 agosto è stato inaugurato il nuovo Viadotto Genova San Giorgio (o viadotto Polcevera), progettato dal noto architetto Renzo Piano. Nel suo rifacimento, si è deciso di avvalersi dell'acciaio inossidabile in barre ad aderenza migliorata in EN 1.4307 (AISI 304L), per le zone più delicate dal punto di vista della resistenza alla corrosione, ossia in prossimità dei passaggi pedonali. Il loro impiego è stato pensato "in accoppiamento" con armature per calcestruzzo armato in acciaio al carbonio. Il *rebar* in acciaio inox pone rimedio alle problematiche che possono affliggere le armature in acciaio al carbonio (carbonatazione e presenza di cloruri), garantendo non solamente tenuta strutturale, ma anche resistenza ai fenomeni corrosivi e quindi durabilità della struttura.

The new Genoa San Giorgio Bridge, designed by the famous architect Renzo Piano, was inaugurated last 3rd August. In its rebuilding, it was decided to use EN 1.4307 (AISI 304L) stainless steel rebar, for the most sensitive areas from the corrosion resistance point of view, i.e. near pedestrian crossings. Its use was designed "in combination" with carbon steel rebar. Stainless steel remedies the problems that can afflict carbon steel rebar (carbonation and presence of chlorides), guaranteeing not only structural strength but also resistance to corrosive phenomena and therefore durability of the structure.

LO SCORSO 3 AGOSTO è stato inaugurato il nuovo Viadotto Genova San Giorgio (o viadotto Polcevera): progettato dall'architetto Renzo Piano, è stato realizzato a tempo di record (poco più di un anno) in seguito al tragico crollo del vecchio ponte (il viadotto Polcevera appunto, noto ai più anche come ponte Morandi), avvenuto nell'agosto del 2018.

Nel rifacimento del nuovo ponte, si è deciso di avvalersi dell'acciaio inossidabile in barre ad aderenza migliorata o nervate (altresi dette in inglese *rebar*, da *reinforcing bars*) Reval® prodotte e fornite da Acciaierie Valbruna, al fine di poter garantire, nelle parti dove questo materiale è stato utilizzato, non solamente tenuta strutturale, ma anche resistenza ai fenomeni corrosivi e quindi durabilità.

Non è certamente il primo caso in cui, nel settore edile, vengono utilizzate barre ad aderenza migliorata in acciaio inossidabile. Uno dei primi esempi riportati riguarda un pontile costruito negli anni '40 a Progreso, città nello stato dello Yucatán in Messico, per il quale

sono state impiegate barre nervate in acciaio EN 1.4301 (AISI 304). Nonostante l'ambiente marino nel quale si trova, la struttura risulta essere integra ancora oggi, a differenza di un pontile analogo costruito successivamente (anni '70) nelle immediate vicinanze, per il quale fu previsto l'utilizzo di barre per calcestruzzo armato in acciaio al carbonio: oggi, di questo pontile rimangono solamente i resti. Per quanto concerne applicazioni più recenti, è da menzionare sicuramente il Ponte Hong Kong-Zhuhai-Macao, il più lungo del mondo, inaugurato ad ottobre 2018. Anche in questo caso, una parte della fornitura del *rebar* in acciaio inox è stata effettuata sempre dalle Acciaierie Valbruna. Ritornando al nuovo ponte di Genova, durante la sua progettazione, le barre ad aderenza migliorata in acciaio inox sono state adoperate nelle zone più delicate dal punto di vista della resistenza alla corrosione, ossia in prossimità dei passaggi pedonali, ed il loro impiego è stato pensato "in accoppiamento" con armature per calcestruzzo armato in acciaio al carbonio. La connessione tra acciaio al carbonio ed inossi-

*Corresponding author. Email: francesco.lipari@centroinox.it

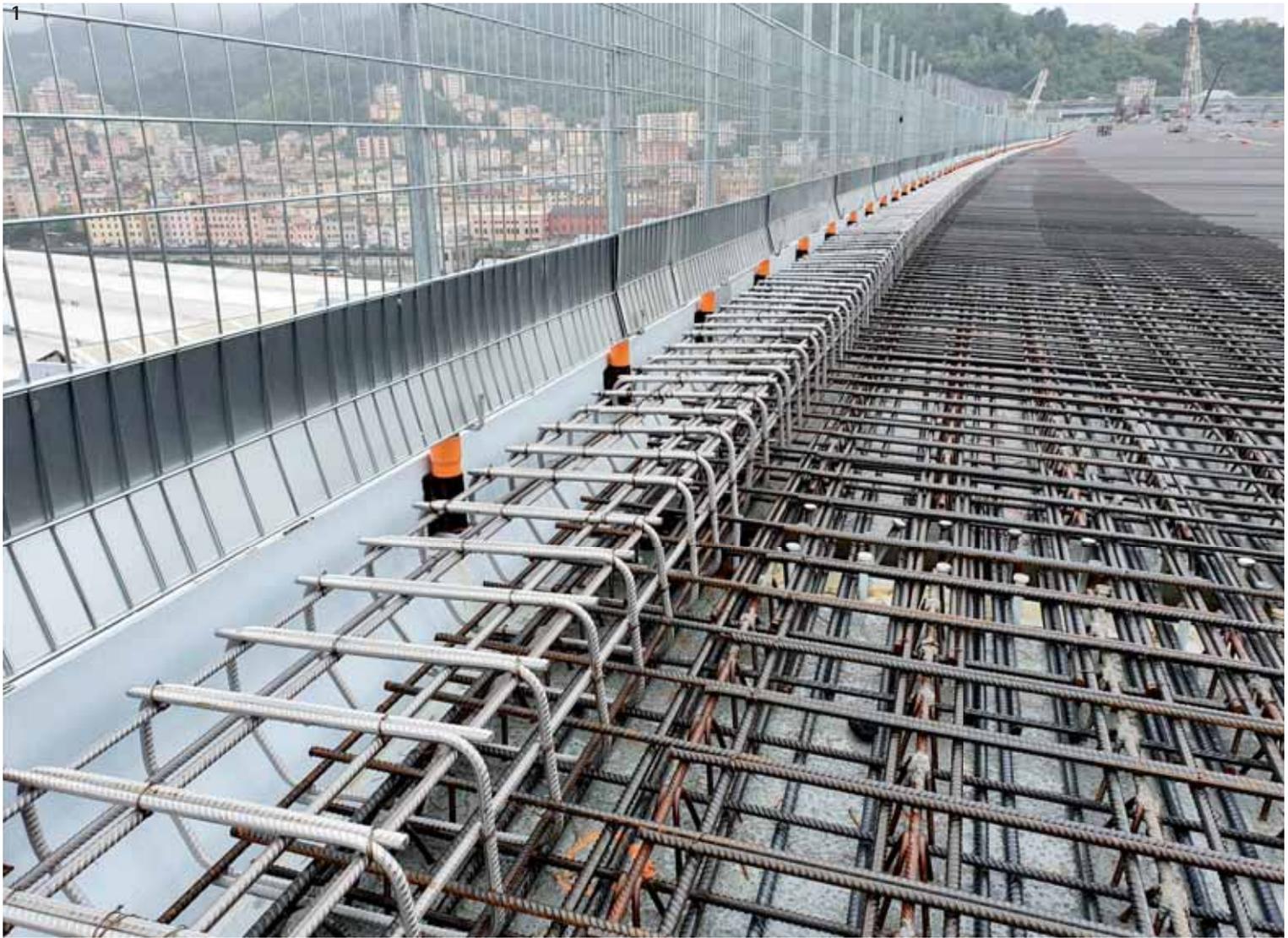


Fig. 1 e 2 – Disposizioni delle armature inox e in acciaio al carbonio

dabile, che si vede chiaramente dalle figure 1 e 2, una volta effettuata la gettata, non comporta assolutamente nessun fenomeno di corrosione galvanica ai danni del materiale meno nobile, ossia l'acciaio al carbonio; quindi non esiste un aumento della velocità di corrosione delle barre in acciaio comune connesse, con continuità metallica, alle barre inox. L'acciaio inox fornito è l'EN 1.4307 (AISI 304L) in diversi diametri ed il *rebar* inox è stato posizionato come armatura di "pelle", ossia in quelle zone che presentano un copriferro più sottile e che inevitabilmente sono più esposte all'azione aggressiva causata dall'ambiente esterno, in questo caso marino. Questo per evitare qualsiasi fenomeno di corrosione che potrebbe innescarsi nel caso in cui venissero usate armature solo di acciaio al carbonio.

Adoperando quindi barre ad aderenza migliorata in acciaio inossidabile, si è riusciti a garantire una adeguata sicurezza strutturale ed una vita di servizio superiore ai 100 anni.

PERCHÉ UTILIZZARE REBAR IN ACCIAIO INOSSIDABILE?

Il calcestruzzo è caratterizzato in generale da un ambiente alcalino, con valori di pH superiori a 13. In tali condizioni l'acciaio al carbonio, che costituisce le normali armature di rinforzo, si trova in condizioni di passività: anche in presenza di acqua e ossigeno che diffondono all'interno del calcestruzzo dall'ambiente circostante, non si producono fenomeni corrosivi. Questi però possono manifestarsi col passare del tempo, come conseguenza di due fattori: la carbonatazione e la presenza di cloruri.



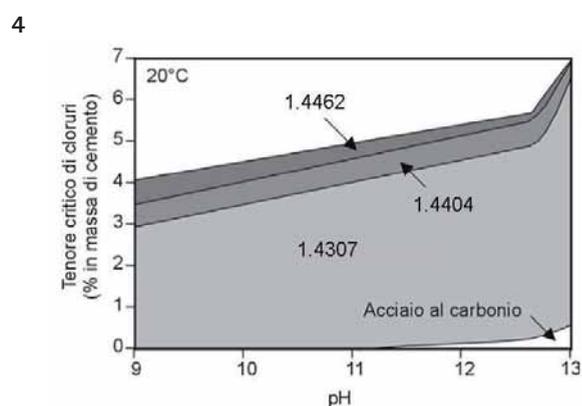


Fig. 3 - Andamento qualitativo della corrosione delle armature di acciaio al carbonio e di acciaio inox, nei confronti della vita utile del componente in calcestruzzo armato.
Fig. 4 - Il diagramma illustra le fasce di passività di diversi materiali in funzione del pH e dei cloruri alla temperatura di 20°C.

La **carbonatazione** è quel fenomeno per cui, in virtù dell'azione neutralizzante dell'anidride carbonica che dall'atmosfera si diffonde nel materiale a causa della sua intrinseca porosità, il valore del pH del calcestruzzo scende a valori attorno a 9. Non sussistono più quindi le condizioni per la passività dell'acciaio al carbonio, cosicché acqua e ossigeno possono innescare i fenomeni di corrosione tipici dell'acciaio. Questi ultimi procederanno uniformemente su tutta la superficie con una velocità dell'ordine di qualche decina di micrometri all'anno. I **cloruri**, presenti ad esempio nelle atmosfere marine o provenienti dai sali disgelanti, hanno invece la possibilità di penetrare nel calcestruzzo fino ad arrivare all'armatura in acciaio. Tali ioni agiscono rompendo localmente il film protettivo dell'acciaio al carbonio, lasciando, anche in questo caso, campo libero all'azione corrosiva di acqua e ossigeno. In tali condizioni la corrosione, localizzata nei punti di rottura del film, penetra molto più velocemente rispetto al caso esposto in precedenza.

In entrambe le situazioni, lo spessore del copriferro, la qualità del calcestruzzo e le condizioni ambientali hanno ovviamente un'influenza notevole sulle condizioni di innesco e di propagazione dei fenomeni corrosivi.

In ogni caso il risultato è, oltre alla riduzione di sezione dell'armatura stessa con relativa perdita delle funzionalità strutturali, la formazione di prodotti di corrosione che, a causa del loro elevato volume (maggiore rispetto a quello del materiale base), generano sforzi interni con conseguente fessurazione e distacco del calcestruzzo (effetto "spaccapietra"). Alle due problematiche sopra citate l'acciaio inossidabile pone sicuramente rimedio in virtù di un film di passività molto stabile anche a pH inferiori a 9 e immune agli attacchi di cloruri fino a condizioni di concentrazione che difficilmente si raggiungono sulla superficie delle armature nel calcestruzzo durante il ciclo di vita della struttura.

In termini generali è ormai assodato che i tipi austenitici al cromo-nichel (es. EN 1.4301 - AISI 304 ed EN 1.4307 - AISI 304L) offrono sufficienti garanzie nella maggior parte dei casi. Solo in strutture con forti sollecitazioni (tali da indurre fessurazioni nel copriferro) o in cui

le armature sono esposte ad ambienti molto aggressivi (es. con elevate concentrazioni di cloruri), è consigliabile ricorrere ai tipi austenitici al cromo-nichel-molibdeno (es. EN 1.4404 - AISI 316L) o, per condizioni ancora più estreme, a tipologie ancor più nobili (es. il duplex EN 1.4462 - type 2205).

Come menzionato precedentemente, l'accoppiamento di acciaio inox e acciaio al carbonio all'interno del calcestruzzo, come avviene anche nel nuovo ponte di Genova, non comporta alcun fenomeno di corrosione galvanica. Questo è stato dimostrato negli anni da diversi studi ed esperienze sul campo: il contatto di barre inox con quelle di acciaio al carbonio genera, nelle strutture in calcestruzzo, effetti del tutto trascurabili.

Una considerazione importante da rilevare è anche che la scelta dell'acciaio inossidabile, grazie alle sue proprietà intrinseche, consente di ottenere notevoli risparmi sui costi di manutenzione per le strutture che, come in questo caso, sono esposte ad ambienti aggressivi. Pertanto, a fronte di un investimento iniziale maggiore per l'acquisto del materiale, nel tempo, l'inox risulta la soluzione più economica in un'ottica di costo del ciclo di vita (LCC - *Life Cycle Cost*), non comportando ulteriori costi di monitoraggio e manutenzione.

Altre caratteristiche rilevanti delle armature inox sono la loro elevata resistenza meccanica, l'alta duttilità e l'ottima capacità di assorbire energia in occasione di eventi sismici. Da non trascurare anche alcune altre importanti caratteristiche fisico-meccaniche, per matrici austenitiche come nell'esempio riportato, quali la bassa permeabilità magnetica (utile per esempio nelle strutture ospedaliere dove le proprietà magnetiche dei materiali costituenti le armature per calcestruzzo armato potrebbero "disturbare" i vari macchinari) ed un migliore comportamento al fuoco, rispetto agli acciai al carbonio.

Per concludere, l'utilizzo di barre ad aderenza migliorata in acciaio inossidabile è, per quanto esposto, certamente un'opzione da percorrere durante la realizzazione di opere edili, soprattutto se inserite in un contesto potenzialmente aggressivo.

RIFERIMENTI

Tutte le immagini sono state tratte dalla rivista INOSSIDABILE (N° 149, N° 175, N° 220), redatta e pubblicata da Centro Inox, l'Associazione italiana per lo sviluppo degli acciai inossidabili.

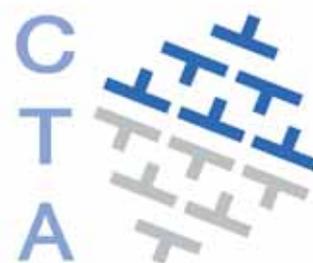
Armature in acciaio inox prodotte e fornite da: Acciaierie Valbruna SpA - 36100 Vicenza VI - Viale della Scienza 25, tel. 0444 968211, costruzioni@valbruna.it, www.valbruna-stainless-steel.com

XXVIII GIORNATE ITALIANE DELLA COSTRUZIONE IN ACCIAIO

FRANCAVILLA A MARE

PESCARA

16-18 SETTEMBRE 2021



COLLEGIO
DEI TECNICI
DELL'ACCIAIO

SAVE THE DATE!!!

GLI ABSTRACT DELLE MEMORIE VANNO INVIATI A CTA@CTANET.IT
ENTRO IL 28/02/2021

Il CTA, nato nel 1966, è una associazione culturale senza scopo di lucro, nata per creare occasioni di confronto tecnico, di studio e approfondimento, e di diffusione della cultura dell'acciaio.

Il CTA ha al suo interno tre componenti paritetiche:

- Professori universitari
- Liberi professionisti
- Tecnici del mondo dell'industria

Il CTA svolge la sua missione di divulgazione della cultura delle costruzioni metalliche mediante:

- Congresso biennale
- Corsi e workshop di formazione
- Attività editoriale



COSTRUZIONI METALLICHE
La più autorevole rivista del settore, si occupa da oltre settant'anni, della cultura del costruire con l'acciaio. In formato digitale e cartaceo.



I Quaderni del CTA
Monografie su temi specifici, sviluppate da esperti del settore.
In formato cartaceo.



Vantaggi per i soci CTA

- Abbonamento rivista Costruzioni Metalliche (cartaceo e digitale)
- Ricezione pubblicazioni tecniche CTA
- Sconti per la partecipazione agli eventi CTA
- Accesso all'area riservata del sito CTA e download gratuito del materiale disponibile
- Possibilità di far parte di commissioni/gruppi di lavoro CTA

collegiotecniciacciaio.it



[c-t-a-collegio-dei-tecnici-dell-acciaio](https://www.linkedin.com/company/c-t-a-collegio-dei-tecnici-dell-acciaio)



[CollegioTecniciAcciaio](https://www.facebook.com/CollegioTecniciAcciaio)



collegiotecniciacciaio.it/costruzionimetalliche



[CMrivista](https://www.facebook.com/CMrivista)

IDEE E SOLUZIONI GLOBALI PER PROGETTI INFRASTRUTTURALI NEL MONDO



(foto © Webuild)

Italferr, società di ingegneria del **Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane**, è leader sul mercato italiano e internazionale in progettazione, direzione lavori e project management di opere infrastrutturali. Grazie al know-how altamente specializzato, acquisito in oltre trent'anni di esperienza nel settore, Italferr è stata scelta dal Consorzio Pergenova per sviluppare la progettazione esecutiva del nuovo viadotto Genova - San Giorgio. Un progetto realizzato in tempi record e attraverso le più avanzate tecnologie a garanzia di un'opera sostenibile, innovativa e con i più alti standard di sicurezza.



ITALFERR
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

ingenio

Informazione
tecnica e progettuale



Abbiamo creato un sistema di informazione globale per gli appassionati di ingegneria

- **INGENIO** è una Testata tecnica che nasce dalla volontà di rispondere alle esigenze di informazione e aggiornamento tecnico nel settore delle costruzioni.
- Il cuore del sistema di informazione è il portale: www.ingenio-web.it, integrato da un Magazine digitale e cartaceo, una Newsletter tematica di approfondimento e un'area video.
- Il motore di INGENIO è la diffusione delle conoscenze tecniche, per questo ha puntato sulla pubblicazione di articoli tecnici di approfondimento, e non solo sulle news del settore.
- Oggi INGENIO conta su una banca dati di oltre 10.000 articoli, tutti disponibili gratuitamente sul portale.



EDIZIONI
VREADY

Pubblicizza la tua azienda su

COSTRUZIONI METALLICHE

C
T
A
COLLEGIO
DEI TECNICI
DELL'ACCIAIO



AGICOM
ADVERTISING SALES & COMMUNICATION AGENCY

Concessionaria
di pubblicità
per questa rivista

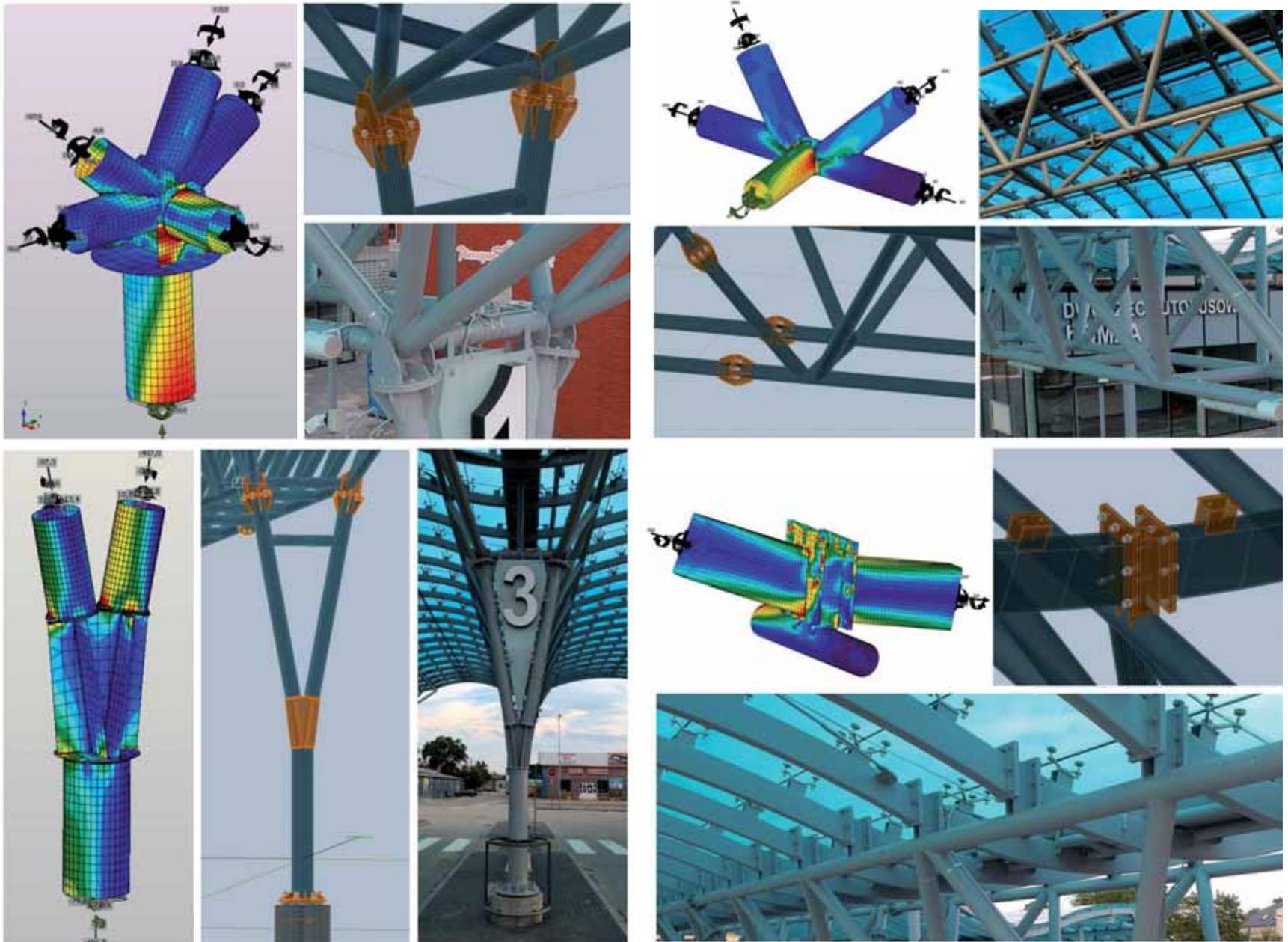
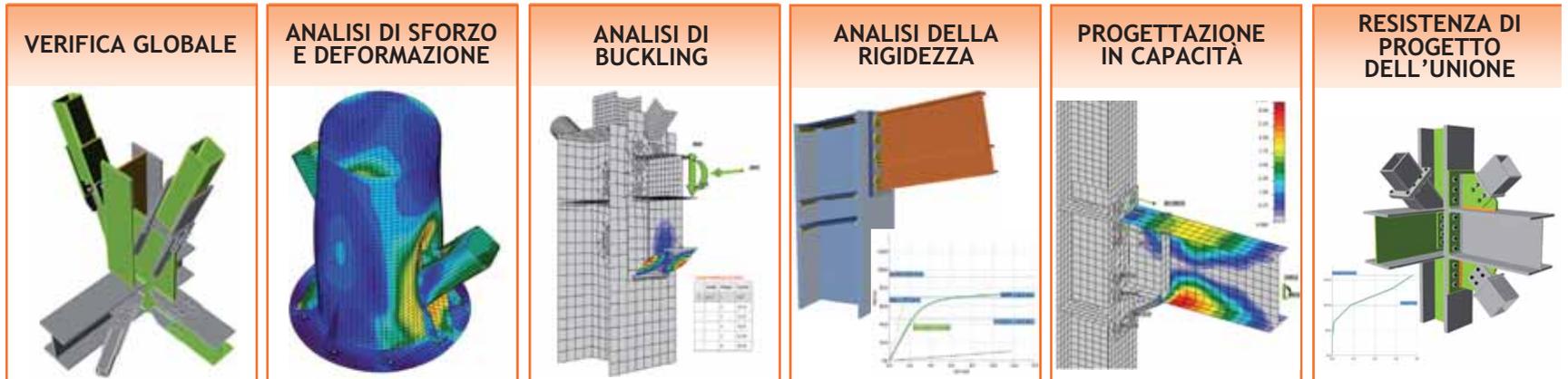
Tel 06.9078285 - Cell 346.7588821
comunicazione@agicom.it
www.agicom.it

APPROFITTA DEL
BONUS PUBBLICITÀ
INSERITO NEL DL RILANCIO*
CHE PERMETTE DI RECUPERARE
IL 50% DEL TOTALE INVESTIMENTO
PUBBLICITARIO 2020.

*Dl 19 maggio 2020 n.34 art. 186

IDEA StatiCa® CONNECTION

LEADER MONDIALE PER LA VERIFICA DI CONNESSIONI IN ACCIAIO GENERICHE
BIM - ANALISI NON LINEARI - MULTILINGUA - NORME: 



PROVA LA VERSIONE COMPLETA PER 14 GIORNI

EISEKO COMPUTER S.R.L. Viale del Lavoro 17 - 37036 San Martino B. A. (VR)

posta@eiseko.com

+39 045 80 31 894

www.eiseko.com

NUOVO, POTENTE, AFFIDABILE, COMPLETO...
RIVOLUZIONARIO!

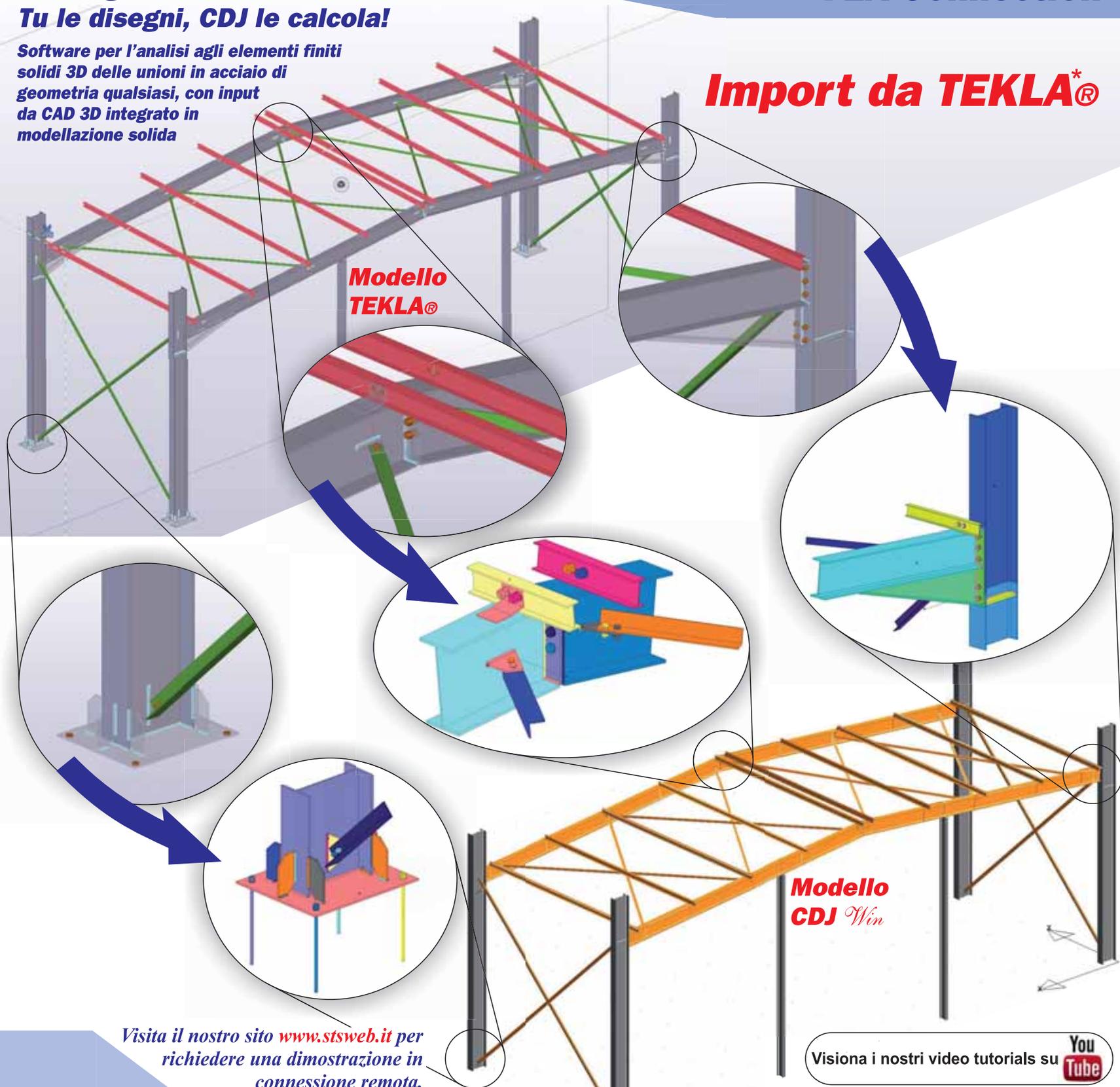
CDJ *Win*

Computer Design of Joints
2020 Edition **FEA Connection**

**Niente più problemi
con le giunzioni metalliche...
Tu le disegni, CDJ le calcola!**

Software per l'analisi agli elementi finiti
solidi 3D delle unioni in acciaio di
geometria qualsiasi, con input
da CAD 3D integrato in
modellazione solida

Import da TEKLA®



Visita il nostro sito www.stsweb.it per
richiedere una dimostrazione in
connessione remota.

Visiona i nostri video tutorials su 

Software Tecnico Scientifico®

Via Tre Torri, 11 - 95030 Sant'Agata Li Battiati (CT)
e-mail: sts@stsweb.it
tel. 095/7252559-7254855 fax 095/213813

Corso Gelone, 39 - 96100 Siracusa
e-mail: sts.siracusa@stsweb.it
tel. 0931/66220

*Modulo a Pagamento

