La precompressione esterna di impalcati in acciaio-cls

IL RIPRISTINO DEL PONTE SUL TORRENTE MARRO, SULLA STRADA PROVINCIALE N° 29, NELLA PROVINCIA DI REGGIO CALABRIA.

*Domenica Catalfamo**
*Bruno Polifroni***
*Francesco Zanghì****
*Francesco Fedele*****

Le alluvioni del 2008

Gli eventi meteorologici che hanno colpito la Calabria e la Sicilia, nel periodo compreso tra Dicembre 2008 e Gennaio 2009, sono stati assolutamente eccezionali: in alcune località di queste due regioni non aveva mai piovuto così tanto da quando esistono i rilevamenti pluviometrici. La Calabria è stata colpita in modo esteso con piogge abbondanti e intense su gran parte del territorio, con esclusione delle due estreme punte meridionali e Nord-occidentali.

Tra i tanti ingenti danni provocati da tali fenomeni, senza dubbio uno dei più significativi è stato il crollo del ponte sul torrente Marro, sulla S.P. n° 29, nella provincia di Reggio Calabria.

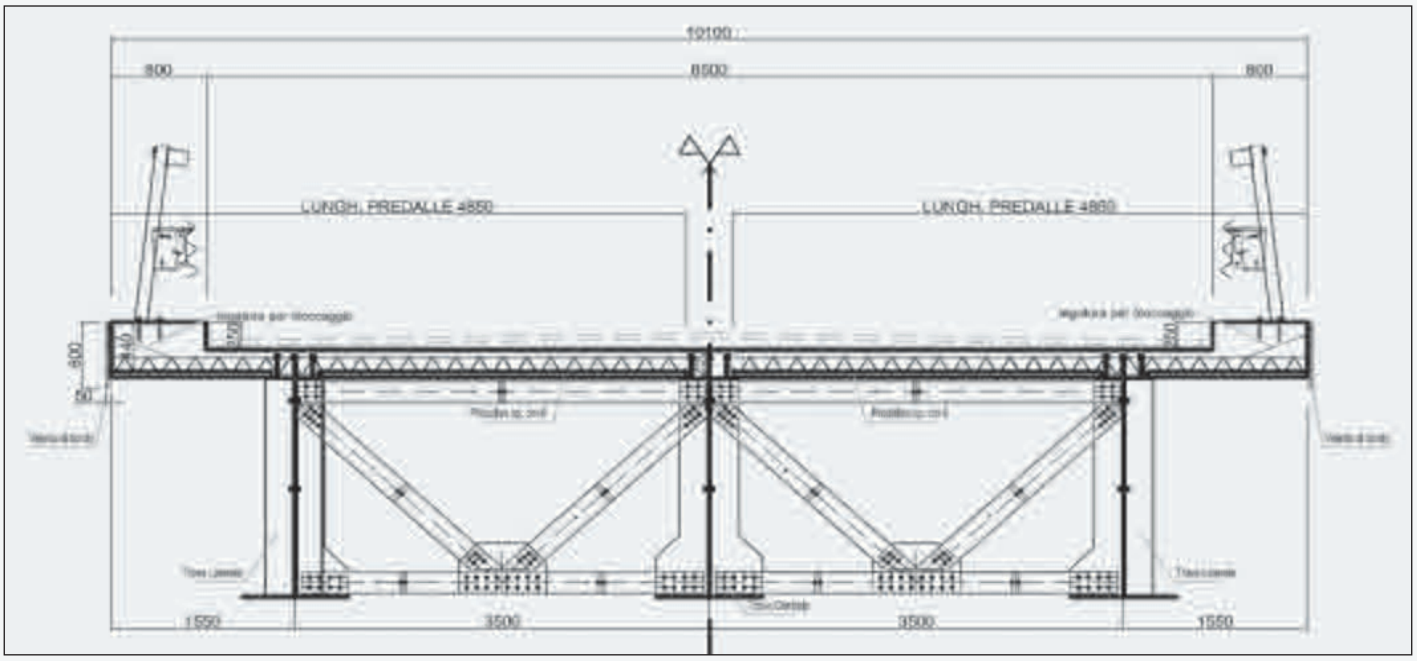
L'Amministrazione Provinciale, su progetto esecutivo delle Società di ingegneria Pro-Gineer Srl e ST Global Srl di Varapodio (RC), ha affidato i lavori di ripristino dei danni infrastrutturali all'ATI AVR SpA e Poliedil Sas.

Il progetto del ponte sul torrente Marro

Il progetto esecutivo dell'opera ha previsto un impalcato a campata unica, di luce pari a 52 m e larghezza trasversale di 10,10 m, costituito da tre travi longitudinali portanti in acciaio di altezza complessiva pari a 2 m, poste ad interasse di 3,50 m. I trasversi di testa sono realizzati con profili commerciali del tipo HE1000M mentre quelli correnti con profili, sempre tratti dai profilari commerciali, del tipo HE800M. La soletta di completamento, dello spessore pari a 25 cm e gettata su predalles autoportanti staticamente attive, è del tipo collaborante in calcestruzzo armato.

Le travi principali sono vincolate come segue: una cerniera sferica in corrispondenza della spalla fissa al disotto della trave centrale, due vincoli mobili unidirezionali trasversali sempre in corrispondenza della spalla fissa al disotto delle travi di bordo, un vincolo fisso unidirezionale longitudinale in corrispondenza

1. *Il ponte Marro danneggiato poco prima del crollo*



2. *La sezione trasversale dell'impalcato*

della spalla mobile al disotto della trave centrale e due vincoli mobili multidirezionali in corrispondenza della spalla mobile al disotto delle travi di bordo.

Le alluvioni del 2010

Nel Novembre 2010, durante i lavori di ricostruzione del ponte, l'intera provincia di Reggio Calabria veniva nuovamente spazzata da straordinari fenomeni piovosi. Il cantiere del ponte Marro veniva pesantemente danneggiato, in quanto la piena del torrente omonimo scardinava una delle tre travi in acciaio, in fase di assemblaggio,trasportandola a valle (Figura 3).
I lavori erano in piena attività e consistevano nel varo delle travi portanti longitudinali, due delle quali erano già state posizionate sugli appoggi temporanei, ubicati sulle due spalle opposte. La terza trave, quella di riva lato valle, era temporaneamente in fase di assemblaggio in quanto posizionata su altrettanti appoggi temporanei, a circa 2 m dal pelo libero del torrente. La trave, trascinata dal fiume, è stata sottoposta a sollecitazioni straordinarie non previste in fase progettuale. La necessità della Direzione dei Lavori e dell'Impresa, era divenuta quella di sopperire all'evento imprevisto recuperando la trave e riadattandola a costi contenuti.

3. *La trave trasportata dalla corrente*

4. *La fase di installazione degli appoggi*

Gli interventi di recupero

Il recupero della trave coinvolta nell'alluvione

Recuperata la trave che in precedenza il torrente aveva divelto (Figura 5), diveniva cruciale operare una scelta tecnica, solo basandosi su considerazioni visive del manufatto recuperato. Il dubbio era che l'acciaio potesse, durante gli spostamenti indotti dalla corrente, aver raggiunto e superato, in qualche sezione strutturale importante, il limite elastico.
L'esame visivo, l'unico possibile in quelle circostanze, evidenziava alcune deformazioni plastiche circoscritte, ma nulla propendeva a far ritenere che le caratteristiche meccaniche e inerziali della trave potessero essere state compromesse.
La Direzione dei lavori e l'Impresa concordavano, pertanto, nel proseguire le operazioni di varo anche della terza trave, programmando comunque un fitto piano di monitoraggio topografico della risposta, in funzione dei carichi progressivi che an-

5. *La fase di recupero della terza trave dopo il danneggiamento (le altre due sono già varate)*

6. *La fase di varo delle travi*

davano applicandosi in fase di completamento (posa predalles, montaggio acciaio da c.a., getto del solaio collaborante in cls). Se il comportamento sotto carico dell'impalcato (che rappresentava un vero e proprio collaudo in corso d'opera) fosse stato perfettamente in linea con quanto previsto in progetto, i risultati avrebbero dato conferma della piena efficienza strutturale del ponte nel suo complesso.
Le prime due fasi in programma (predalles + acciaio da c.a.) e anche il 90% della successiva (getto del cls), dimostravano un comportamento perfettamente elastico della struttura in quanto carichi e cedimenti erano perfettamente fra loro correlati dalle note leggi fisiche.

Il rinforzo tramite precompressione

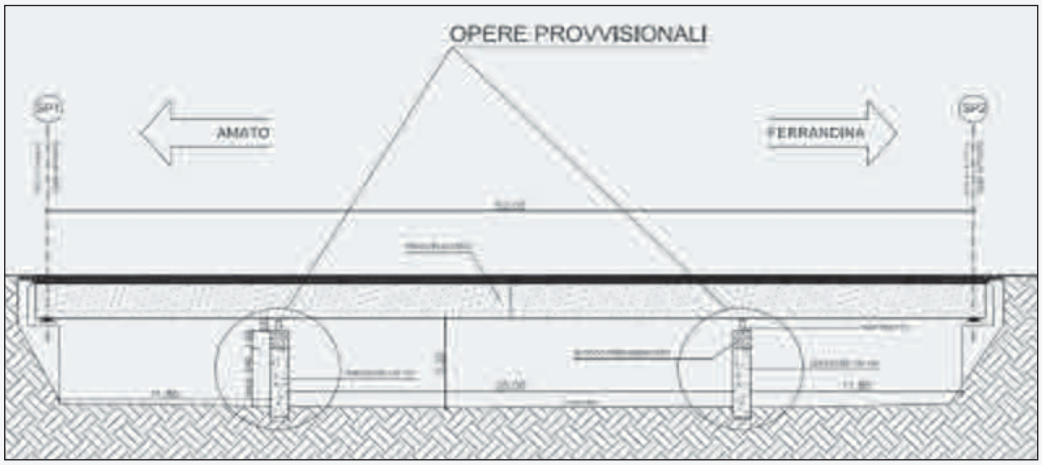
Verso la fase finale del getto, accadde però che le frecce delle travi, pur mantenendosi entro limiti di sicurezza, pervennero a valori non accettabili, dal punto di vista della funzionalità dell'opera.
Questo comportamento, giunto nella fase finale del getto,ha portato a ritenere che la trave coinvolta nell'alluvione fosse stata danneggiata (i monitoraggi continui hanno registrato che la stessa ha iniziato ad inflettersi prima delle altre), e solo un adeguato dimensionamento dei traversi, ha consentito un'efficace ripartizione dei carichi sulle altre due travi, che comunque a loro volta, si sono dovute sobbarcare azioni non previste, con un conseguente incremento delle frecce in mezzeria.
Si è deciso, a questo punto, di effettuare uno studio ingegneristico basato sull'ipotesi (alquanto cautelativa), che le tre piattabande inferiori delle travi avessero raggiunto uno stato tensionale tale da non garantire sufficienti garanzie di sicurezza.

Le fasi e le modalità del recupero

Il progetto di ripristino dell'impalcato è stato essenzialmente concentrato sulle travi in acciaio, ovvero sulla necessità di elevarne la capacità prestazionale fino consentirne il regolare esercizio della struttura. Per fare ciò, gli studi effettuati hanno portato ad agire su due aspetti progettuali:

- rinforzo delle travi costituito da irrigidimenti dei pannelli d'anima e aumento dello spessore della piattabanda;
- precompressione delle travi mediante tre coppie di cavi del tipo 19 trefoli, posti a una distanza dall'intradosso variabile da 25 cm all'ancoraggio a 70 cm in mezzeria della trave (Figure 10, 11 e 13).

Per studiare lo stato tensionale della trave durante le varie fasi dell'intervento sono stati sviluppati due modelli di calcolo col software agli elementi finiti SOFiSTiKFEA della tedesca SOFiSTiK AG. Con il primo modello si sono valutati gli effetti globali longitudinali nelle diverse fasi mentre con il secondo modello sono state essenzialmente studiate le azioni locali prodotte dalla precompressione e dimensionati tutti i dettagli necessari.
Le operazioni previste per il completo recupero del manufatto, possono brevemente riassumersi nelle seguenti:



7. *Le opere provvisionali temporanee da demolire dopo la fase 2*

- fase 0 - stato iniziale: configurazione deformata. In questa prima fase è stato effettuato un parziale scarico tensionale sulle travi, mediante la costruzione di due pile temporanee in alveo (Figura 7), dotate di sei martinetti idraulici, mediante i quali è stato applicato un carico concentrato di –20 t cadauno; le pile sono state realizzate in calcestruzzo di classe C25/30, leggermente armato (30 kg/m^3), delle dimensioni complessive di 900x100x400cm, compreso il tratto in fondazione diretta. Le pile sono state demolite subito dopo il completamento degli interventi di rinforzo (fase 2).

8. *I martinetti in fase di tesatura dei cavi*

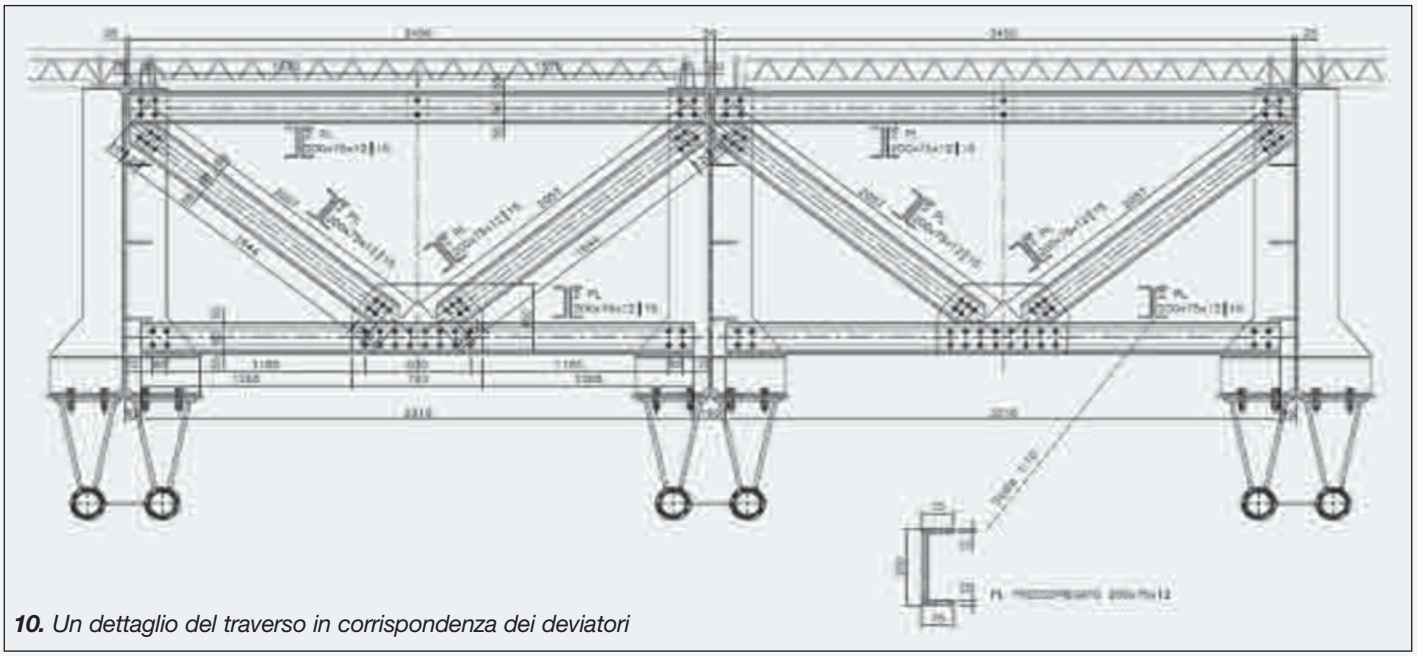
9. *I cavi già pronti per la tesatura*

- fase 1 - ultimata la fase 0, che ripristina nell'impalcato le condizioni tensionali antecedenti alla realizzazione della soletta (già realizzata), si è sezionata la stessa con 35-40 tagli simmetrici e raffittiti verso la mezzeria, in modo da renderla non reagente. Successivamente si è proceduto con l'applicazione di un ulteriore carico concentrato di –20 t per martinetto. Prima di questo secondo sollevamento, sono stati applicati tutti i rinforzi sui pannelli deformati e tutti i rinforzi verticali previsti dal progetto di recupero;
- fase 2 - si sono applicati tutti gli altri rinforzi sulle travi: piattabande inferiori, costole longitudinali, ancoraggi, deviatori, inserimento e leggera tesatura dei cavi, opere di finitura e completamento delle carpenterie. Successivamente si è proceduto con l'applicazione della precompressione esterna, che verrà descritta poco più avanti, in modo molto graduale e controllato. I controlli hanno riguardato la rispondenza degli spostamenti in funzione dello sforzo normale applicato ed anche, il monitoraggio estensimetrico nell'acciaio delle singole travi, mediante un sofisticato sistema computerizzato con sensori elettronici applicati diffusamente lungo le travi;
- fase 3: questa fase è relativa al completamento delle operazioni di recupero, dopo il sollevamento del ponte per effetto della precompressione. Sono stati infatti sigillati i tagli prodotti sulla soletta, mediante l'utilizzo di un cls opportunamente additivato espansivo e a rapida presa ed indurimento.

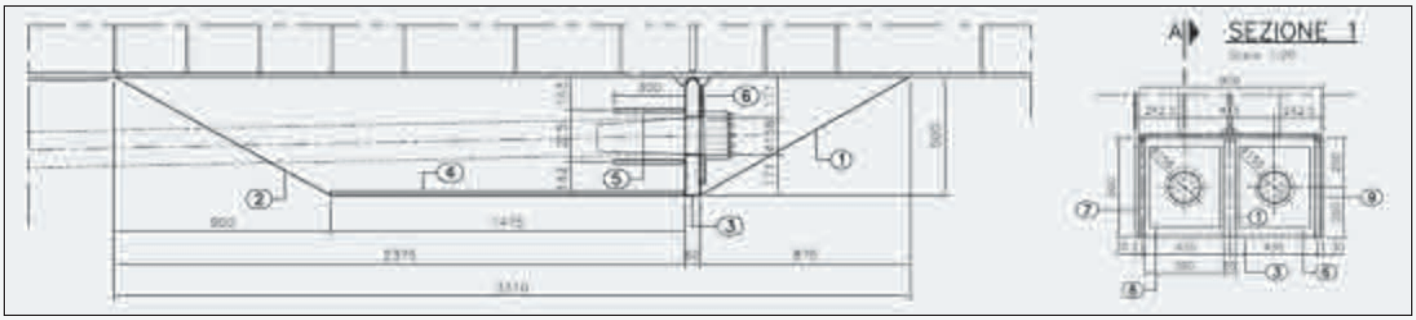
Superate queste tre fasi, la costruzione del ponte si è sviluppata nel rispetto del precedente programma lavori, ovvero completando i due cordoli laterali e applicando in successione, tutti gli altri carichi permanenti fino al completamento dell'opera.

Il sistema di precompressione

L'adozione della precompressione [5], come sistema di rinforzo dell'acciaio, è una moderna concezione ormai diffusa in tutti gli interventi simili.



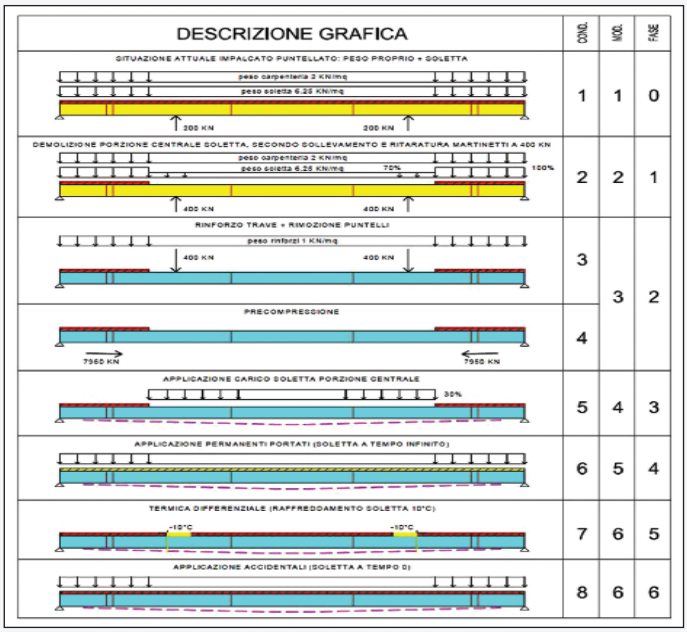
10. *Un dettaglio del traverso in corrispondenza dei deviatori*



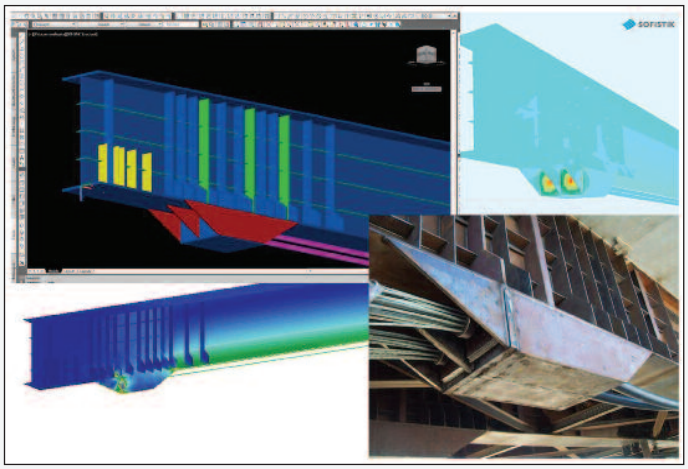
11. *Particolari costruttivi del sistema di ancoraggio dei cavi di precompressione*

Nella progettazione del sistema di precompressione come quello in esame, è stata prestata la maggiore attenzione alle seguenti problematiche tipiche:

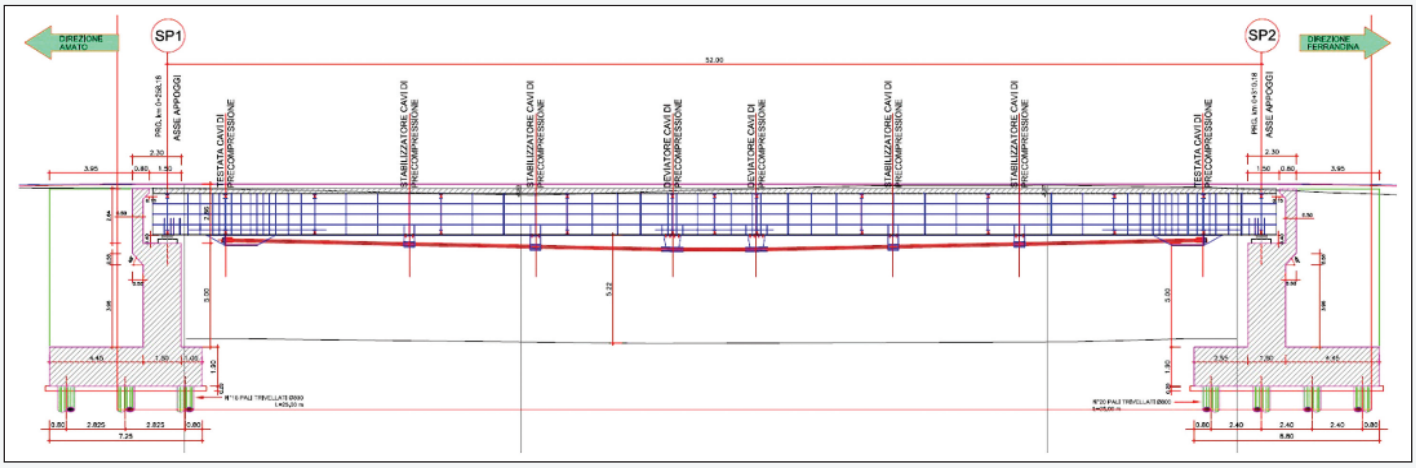
- necessità di realizzare una zona di ancoraggio dei cavi molto robusta (Figura 13). In tale zona la forte concentrazione di tensioni prodotta dal tiro del cavo rende necessario l'irrigidimento di tutte le lamiere che, a seguito della predetta azione, potrebbero altrimenti subire fenomeni di instabilità;
- irrigidimento generalizzato dei pannelli d'anima. A valle della zona di ancoraggio l'azione di precompressione si distribuisce uniformemente sulla sezione d'acciaio che risulta quindi compressa oltre che inflessa. Ciò ha comportato un infittimento generalizzato (ma mai casuale e sempre controllato con opportune simulazioni di calcolo) degli irrigidimenti d'anima della trave anche nelle zone lontane dall'ancoraggio.



12. *Lo schema riepilogativo delle fasi di calcolo*



13. *Un dettaglio della zona d'ancoraggio dei cavi - modello FEM con SOFiSTiK*

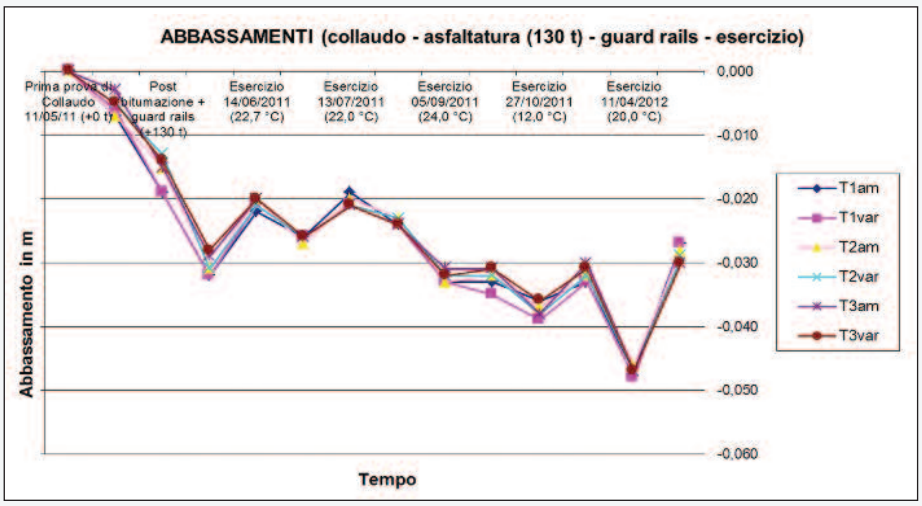


14. *Il profilo longitudinale del ponte nella configurazione finale rinforzata*

Gli effetti locali

Come detto in precedenza è stato sviluppato un secondo modello di calcolo rappresentativo di un'intera trave rinforzata con l'applicazione della sola precompressione.
Il modello riproduce, con elementi bidimensionali tipo Shell, tutte le piastre che compongono sia la sezione propriamente detta che tutte quelle parti delicate in cui sono previste forti concentrazioni di tensione.
Particolare attenzione è stata posta, per ovvie ragioni, alla zona in cui si ancorano i cavi di precompressione, riportata qualitativamente in Figura 13. Il modello di calcolo con elementi Shell è stato confrontato con quello ad elementi Beam al fine di tararne l'affidabilità.
A tal scopo, la deformata della trave per effetto della precompressione è pari a circa 385 mm contro i 400 mm risultanti dal modello Beam. Il confronto è da considerarsi soddisfacente.

16. *La prova di carico*



15. *I dati sperimentali di monitoraggio*

I risultati di calcolo del modello locale hanno confermato come l'azione della precompressione sia prevalentemente assorbita dai piatti longitudinali saldati alla piattabanda inferiore. In corrispondenza del pannello d'anima una fitta costolatura trasversale e longitudinale irrigidisce un'ampia zona, incrementando localmente l'area di acciaio preposta a portare la forte azione concentrata.Man mano che le isostatiche di tensione si allontanano dalla testata viene decrementata la costolatura di irrigidimento e l'azione si trasferisce uniformemente all'interno della sezione di acciaio.

Conclusioni

L'articolo affronta le principali problematiche riscontrate negli interventi di recupero di un impalcato da ponte, a struttura metallica, realizzato sul torrente Marro, in sostituzione del vecchio ponte crollato in concomitanza degli eventi alluvionali del 2008, coinvolto in un evento eccezionale di massima piena avvenuto, nel 2010, durante le fasi di costruzione del ponte stesso.
L'intervento, combinando tecniche di rinforzo tradizionali, come irrigidimenti dei pannelli d'anima e aumenti di piattabanda, con una precompressione esterna mediante una coppia di cavi a 19 trefoli per ciascuna trave principale dell'impalcato, ha permesso di recuperare interamente le strutture danneggiate dall'alluvione, con un notevole risparmio di costi e tempi, considerata, fra l'altro, l'estrema urgenza del tempestivo ripristino della viabilità.
L'ottimizzazione dei costi, come ampiamente dimostrato dai modelli numerici, dai monitoraggi effettuati in corso d'opera e dalle prove di carico finali (Figura 15) e da ulteriori controlli periodici (per circa un anno) in fase di esercizio, ha dimostrato che l'intervento ha portato addirittura ad un miglioramento della risposta strutturale dell'opera, senza dunque riduzione dei parametri di sicurezza e prestazionali rispetto all'originario progetto esecutivo. ■

** Ingegnere Dirigente del Settore Viabilità, Trasporti e Catasto Strade della Provincia di Reggio Calabria*
*** Ingegnere Direttore Tecnico della Pro-Gineer Srl*
**** Ingegnere Consulente per la progettazione strutturale e geotecnica della Pro-Gineer Srl*
***** Architetto Direttore Tecnico della ST Global Srl*

DATI TECNICI

Stazione Appaltante: *Provincia di Reggio Calabria - Settore 12 Viabilità - Trasporti - Catasto Strade*
Progetto preliminare: *Pro-Gineer Srl e St Global Srl*
Progetto definitivo: *Pro-Gineer Srl e St Global Srl*
Progetto esecutivo: *Pro-Gineer Srl e St Global Srl*
Collaudo: *Ing. Antonino Casile*
RUP: *Ing. Domenica Catalfamo*
Direzione dei Lavori: *Ing. Francesco Lamberto*
Responsabile Sicurezza: *Ing. Francesco Lamberto*
Direzione Cantiere: *Ing. Giuseppe Amante*
Esecutori dei Lavori: *Ati AVR SpA - Poliedil Sas*
Consegna: *Ottobre 2010*
Ultimazione: *Maggio 2011*