

Impiego di malte duttili e armatura non metallica per la riparazione ed il rinforzo di ponti - il caso del Ponte sul fiume Morto SS1 - Pisa

A. Mazzeo*, A. Primicerio, V.Saldutti***, M. Arduini******

Sommario

Le infrastrutture viarie realizzate negli anni '50 mostrano i segni evidenti di degrado per la corrosione delle armature interne. Queste situazioni sono dovute quasi esclusivamente ad errori e negligenze in fase di costruzione dell'opera. Dettagli importanti come la garanzia di adeguato copriferro, la compattezza delle superfici di calcestruzzo e la corretta posa delle armature sono stati trascurati e trattati come "inutili" nella fase di costruzione. In questa memoria si presenta il caso del "ponte sul fiume Morto" situato sulla SS1 Aurelia in prossimità della città di Pisa, opera recentemente ristrutturata con il decreto "del fare" (D.L. 69/2013 del 21 giugno 2013) voluto dal governo di allora per rimettere in marcia l'economia del paese. Le metodologie scelte per la riparazione dell'opera coinvolgono malte speciali ad elevata duttilità ed armature non metalliche FRP. Nella memoria si descrivono i benefici dell'intervento di riparazione.

DESCRIZIONE DELL'OPERA

Il ponte si trova a nord della città di Pisa esso è composto da una doppia campata simmetrica con sella Gerber centrale, a sovrappassare il fiume, subito dopo è presente una struttura scatolare trapezoidale in calcestruzzo armato a raccordo con il cavalcavia che sovrappassa la linea ferroviaria tirrenica Genova-Roma.

La prima opera di scavalco del fiume risale agli anni della prima guerra mondiale. Verso la fine della seconda guerra mondiale il ponte fu parzialmente distrutto per opera di guastatori, particolarmente pesante fu l'esplosione attorno alla pila trapezoidale posta tra la ferrovia ed il fiume, tanto da spaccare completamente la struttura fondale.

Le due pile a cavallo del fiume morto furono polverizzate o gravemente lesionate, ma, a quanto risulta dagli atti della perizia del 1945-1946 la struttura fondale non fu compromessa dall'esplosione.

La ricostruzione venne realizzata tra il 1946 e il 1947, fu approvata una variante avente per approccio la creazione di una struttura di impalcato leggera per evitare sovraccarichi eccessivi sul terreno particolarmente insidioso della pianura pisana, ricco di argille e sabbie imbibite di modesta portanza. Si realizzò così l'opera attuale con uno schema a travata Gerber per scavalcare il fiume Morto supportata da due stilate sottili spiccanti dal blocco fondale originario. Anche l'asfalto fu ridotto di spessore sempre per porre particolare attenzione a non incrementare le masse dell'opera.

Sulla campata a scavalco della ferrovia fu adottata una soluzione particolare. Si ri-utilizzarono le 8 travi metalliche a doppio T esistenti trasformando l'altezza da 60cm a 100cm semplicemente tagliandole secondo la costola e collegando le due estremità a T mediante traliccio di angolari a formare una trave reticolare. Le travi metalliche così trasformate sono state annegate in un getto di calcestruzzo a formare una sorta di soletta nervata.

Le fondazioni della pila trapezoidale furono completamente ricostruite con palificazioni in c.a. e solettone di base nervato sul quale spicca la struttura trapezoidale della pila.

Negli archivi ANAS sono stati recuperati alcuni disegni e alcune relazioni della variante del primo dopoguerra.

L'ANALISI DELLO STATO DI FATTO ED OBIETTIVI DELL'INTERVENTO

Dopo circa settanta anni di vita la struttura del ponte sul fiume Morto mostra vari segni di degrado.

La Figura 1 riporta una vista dell'intradosso. Si notano riquadri di soletta con armatura affiorante e distacchi di calcestruzzo dalle pareti delle travi con messa in luce quasi ovunque del primo strato di armature principali delle travi. Precedenti interventi di restauro del copriferro presentano ampie sfogliature e distacchi.



Figura 1 - Stato attuale dell'opera

L'obiettivo del provvedimento "del fare" (D.L. 69/2013), voluto dal governo di allora per ridare slancio all'economia del paese, ha coinvolto in prima persona gli uffici ANAS di tutti i compartimenti italiani. Diverse opere necessitanti urgenti interventi di riparazione e/o rinforzo attendevano già da tempo il via libera dalle Autorità di controllo. Il caso del ponte sul fiume Morto è uno di questi, le situazioni di degrado riscontrate erano divenute preoccupanti e non si poteva più attendere oltre.

Considerato il carattere di manutenzione conservativa dell'opera alla consegna dei lavori l'Impresa ha eseguito, come da capitolato, un'attenta analisi dello stato di dettaglio delle parti d'opera conclusosi con la presentazione alla D.L. del progetto costruttivo di dettaglio derivante dall'aver effettuato le seguenti indagini: carotaggio sulla soletta, campagna SONREB, operazioni di demolizione sui cordoli e delle copertine che impedivano il controllo degli organi di appoggio, nonché una serie di prove chimiche per valutare la profondità del degrado da carbonatazione del calcestruzzo.

Le acquisizioni chimiche e meccaniche hanno mostrato che il calcestruzzo impiegato per l'impalcato ha una buona resistenza a compressione cubica $R_{ck}=35\text{MPa}$ (a dimostrare che il mix design operato settanta anni fa fu di tutto rispetto), ma si presenta molto permeabile e lo spessore del copriferro è limitato a 1-2cm. Purtroppo questa situazione è comune alla gran parte delle infrastrutture italiane, la mancanza di questi semplici ma basilari accorgimenti ha comportato la penetrazione in profondità dell'acqua, dell'ossigeno e dei sali con la conseguenza che oggi le armature metalliche si trovano avvolte da calcestruzzo completamente carbonatato, questa situazione provoca la formazione di abbondante ruggine sulle armature, con spacco del copriferro ed incremento della velocità del degrado.

Precedenti interventi di restauro, incuranti della verifica della profondità del degrado, hanno cercato di porre rimedio apponendo una rasatura cementizia protettiva di pochi millimetri di spessore. Questo intervento si è dimostrato inutile e nel giro di pochi anni si è abbondantemente sfogliato.



Figura 2 - Le tre campate sul fiume faccia est sopra e faccia ovest sotto



Figura 3 - Il degrado nelle selle



Figura 4 - Viraggio della carota estratta dalla soletta. I 5cm inferiori sono carbonatati



Figura 5 - Nessun viraggio fino a 6cm sulla zona inferiore trave di bordo 1° campata lato est



Figura 7 - Viraggio a 7cm di profondità sulla pila zona inferiore

La Statale Aurelia è una arteria importantissima per la rete stradale italiana, l'infrastruttura deve essere adeguata con sicurezza con gli standard attuali e la capacità resistente ai carichi stradali deve essere mantenuta.

L'adeguamento delle barriere implica la presenza di un carico d'urto stradale maggiore, questa situazione richiede il ringrosso e l'ampliamento leggero del cordolo.

Il recupero dell'originaria capacità resistente implica alcune importanti scelte progettuali che riguardano la garanzia di durabilità dell'opera, la presenza del traffico stradale durante i lavori e la necessità di non aumentare le masse dell'opera, vista la duplice limitazione imposta dalla normativa vigente e dalla indicazioni del progetto originario.

I criteri che hanno guidato l'attività di restauro sono, pertanto, i seguenti:

PER L'INTRADOSSO IMPALCATO:

- Applicazione di passivante migrante per aumentare l'impermeabilità del calcestruzzo originario attorno alle armature
- Rifacimento di tutto il copriferro, con impiego di malte compatte e prestazionali
- Placcaggio di tessuti in filo di carbonio ad alto modulo elastico CFRP-HM per il recupero ed il rinforzo a flessione e a taglio

PER L'ESTRADOSSO DELL'IMPALCATO:

- rimozione della crosta degradata e carbonata
- creazione di fori "radice" per migliorare l'aderenza del ripristino
- posa di armatura in rete con potenziamento della stessa nella zona di sbalzo
- colaggio di malte speciali duttili HPFRC (High Performance Fiber Reinforced Concrete) per uno spessore di 8-10cm
- Rifacimento del manto stradale con minimo spessore per non aumentare la massa complessiva dell'opera

PER LE PILE

- rimozione del copriferro ed immediato inserimento di staffature pre-tesate provvisorie per evitare i fenomeni di instabilizzazione dei correnti verticali esposti
- pulitura accurata
- posa di protettivo passivante migrante
- sabbiatura
- posa di nuova armatura di acciaio sul perimetro
- cassetatura e colaggio di betoncino Self Compacting Concrete per uno spessore complessivo di 7-8cm

Per garantire la durabilità dell'intervento e la capacità resistiva sono necessarie tre condizioni:

- Adesione al supporto della malta di ripristino
- Adesione tra armatura di rinforzo e malta di ripristino

- Compattezza della superficie esterna

La scelta della malta di ripristino gioca un ruolo fondamentale e decisivo per la buona riuscita di un intervento di restauro. In questa particolare situazione, per il rinforzo della soletta la scelta è stata indirizzata sulla malta premiscelata fibrorinforzata "duttile" espansiva, anche con stagionatura in aria.

Adatta a spessori variabili da 4 fino a 15cm, questa malta soddisfa i requisiti di durabilità (elevata compattezza superficiale e costanza di prodotto), i requisiti di adesione al supporto, grazie alla capacità di espansione contrastata entro cassero per eliminare il ritiro a tempo infinito, a quelli di resistenza (elevata resistenza a compressione e, soprattutto, elevata resistenza a trazione con spiccato comportamento elasto-hardening).

La verifica della duttilità di queste malte viene svolta con prove di flessione su prisma intagliato: si misura il diagramma carico - apertura di lesione tra le labbra dell'intaglio. Al contrario dei provini di calcestruzzo tradizionale, la formazione della lesione non corrisponde ad un'improvvisa rottura del campione. La presenza di fibre corte nella miscela garantisce la tenuta sostanziale del carico fino ad aperture di lesione molto elevate.

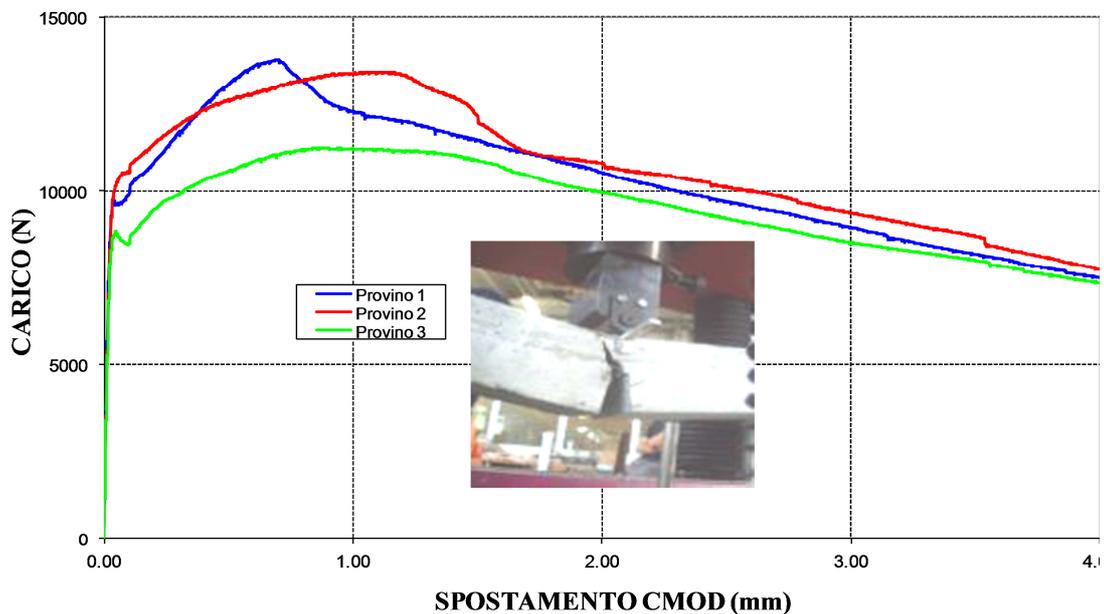
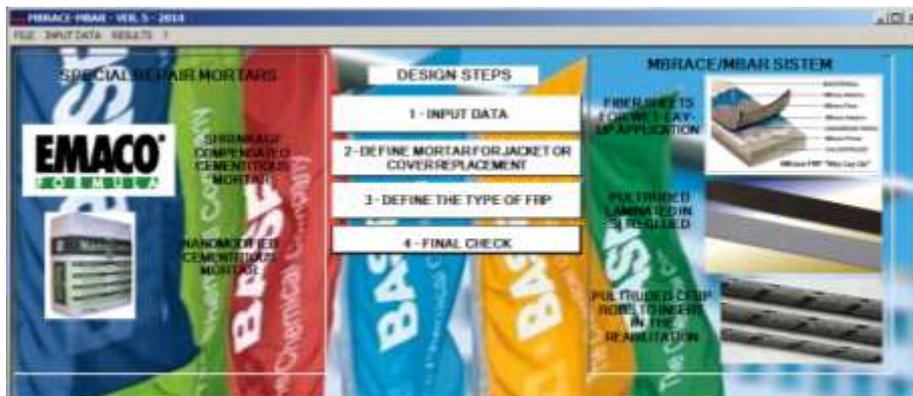


Figura 8 - Comportamento su provino intagliato

Il progetto del rinforzo a flessione e a taglio con tessuti FRP si svolge secondo i dettami del CNR DT 200, documento redatto nel 2005 e riconosciuto dalla normativa vigente Testo Unico 2008 per il rinforzo di elementi esistenti in calcestruzzo armato o precompresso.

I software di calcolo forniti dal Produttore sono testati con prove sperimentali e comparazioni dirette con la normativa, si veda al proposito i documenti [1] e [2], attraverso alcune schermate di semplice e diretto utilizzo si ottiene la verifica finale per tentativi successivi.



HBRACE-HBAR - VER. 5 - 2014 - 1 - INPUT DATA

B1 [mm] = 2200
 H1 [mm] = 160
 B2 [mm] = 400
 H2 [mm] = 550
 B3 [mm] = 400
 H3 [mm] = 550

ACCIAIO/STEEL 1
 ha1 [mm] = 1100
 N° rods Na1 = 5
 Diameter [mm] = 30

ACCIAIO/STEEL 2
 ha2 [mm] = 1170
 N° rods Na2 = 5
 Diameter [mm] = 30

ACCIAIO/STEEL 3
 ha3 [mm] = 1240
 N° rods Na3 = 5
 Diameter [mm] = 28

ACCIAIO/STEEL TYPE
 f_{yk} [MPa] = 120
 γ_{sc} < 1.35 = 1

CONCRETE TYPE
 f_{cm} [MPa] = 20
 γ_{cc} < 1.35 = 1

AZIONI DI PROGETTO / DESIGN ACTIONS
 ULS bending M_{ed} [N°mm] = 310000000
 ULS Axial load (>0 compression) N_{ed} [N] = 0
 ULS Axial load (<0 tension) N_{ed} [N] = 0
 SLS (frequent bending action) M_{eq} [N°mm] = 150000000
 Bending action active at the FRP reinforcement Momento collettante al rinforzo M_{op} [N°mm] = 600000000

Steel: $f_{ytd} = f_{yk} / \gamma_s$, $E_s = 200GPa$
 Concrete: $f_{cd} = 0.85 f_{ck} / \gamma_c$, $E_c = 0.0035$, $\alpha_{cu} = 0.05$

HBRACE-HBAR - VER. 5 - 2014 - 2 - DEFINE REINFOR FOR JACKET OR COVER REPLACEMENT

Emaco mortar
 Check existing RC section
 CHECK INPUT VALUES
 Bending action active during the FRP reinforcement M_{op} [N°mm] = 6.000E+08
 Top concrete stress [MPa] = 1.0
 Crack width at M_{op} [mm] = 0.05
 Bottom steel stress [MPa] = 51.5
 Bottom strain = 3.165E-04

TOP CONCRETE RECOMMENDATIONS
 Le condizioni della riparazione sono accettabili. Le tensioni nel filo di estrazione < 0.3 f_{ctd}. I ingressi di estrazione potrebbero non servire.

BOTTOM CONCRETE RECOMMENDATIONS
 Le condizioni della riparazione sono accettabili. I crack < 0.1 mm non è visibile. Il tensione nell'acciaio è modesta. OK.

Top Concrete Rehabilitation
 Emaco Nanocrete R4F 1-He1-5cm
 Emaco F-Flow Fiber 1-He1-5cm
 Emaco F-Resin M181 1-He1-10cm
 Emaco Iso Fiber 1-He1-5cm
 Concrete Mast Seal 1-He1-10cm
 Emaco SFN 1-He1-10cm
 Emaco Fast Fiber 1-He1-10cm

Bottom Concrete Rehabilitation
 Emaco Nanocrete R4 1-He2-5cm
 Emaco R955 1-He2-5cm
 Emaco Formula Top 1-He2-5cm
 Emaco F-Top Fiber 1-He2-10cm
 Emaco F-Resin B1 1-He2-10cm
 Emaco SFN 1-He1-10cm
 Emaco Fast Fiber 1-He2-10cm

Top thickness He1 [mm] = 120
 Bottom thickness He2 [mm] = 0

NEXT STEP

HBRACE-HBAR - VER. 5 - 2014 - 3 - DEFINE THE TYPE OF FRP REINFORCEMENT

FRP reinforcement:
 HFR [mm] = 0
 HFR [mm] = 0
 N° lateral layers or rods NGL = 0
 HFR [mm] = 1300
 N° bottom layers or rods NGB = 3
 HFR [mm] = 250

Ambient:
 Internal
 External
 Aggressive

Load type / tipo di carichi:
 Use standard / normal
 Fatigue or long permanent

FRP / FRP reinforcement
 Fibernet AR Glass / AR Vetro: E=80GPa, ϕ=0.05mm
 Sheet AR Glass / AR Vetro: E=80GPa, ϕ=0.43mm
 Fibernet Mesh o CF Quadri: E=230GPa, ϕ=0.05mm
 Alta Resistenza CFRP sheet: E=230GPa, ϕ=0.10mm
 Alta Modulo, CFRP sheet: E=300GPa, ϕ=0.10mm
 Laminato LM 50mm: 100mmx1 Area, E=180GPa
 Laminato HM 50mm: 1 Area, E=200GPa
 Mesh GAS HTG, rods 5mmxϕ10-20mm, E=400GPa
 Galileo SHTG, CFRP rod, 8mm, E=180GPa
 Galileo 10 HTG, CFRP rod, 10mm, E=180GPa
 Laminato SHTG, CFRP rod, 8mm, E=200GPa

A₁ = B₁ × N₁ × x₁
 A₂ = (H₁ - H₂) × N₂ × x₂
 A₃ = (H₁ - H₃) × N₃ × x₃

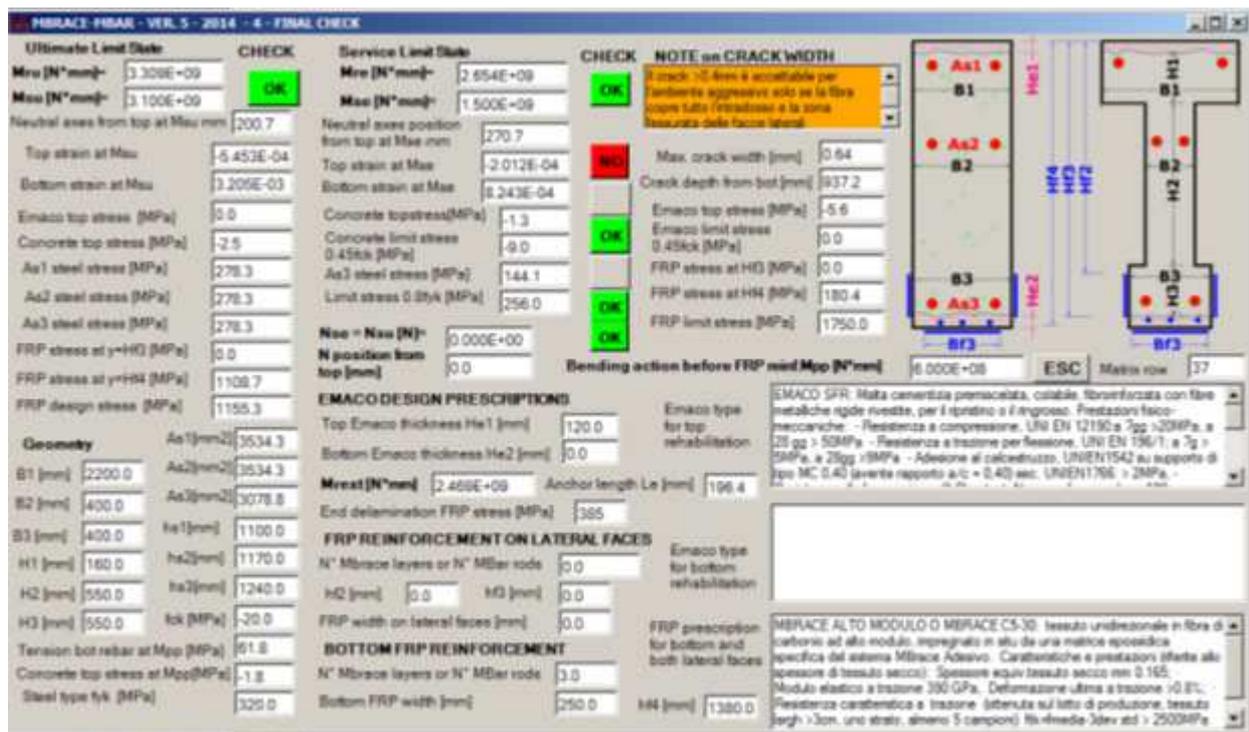


Figura 9 - Le schermate di input e di output per il progetto a flessione.

CONTROLLI IN CORSO D'OPERA

L'attività di controllo in corso d'opera è fondamentale per la buona riuscita del rinforzo.

Per l'opera in oggetto si sono eseguite prove non distruttive e distruttive:

Non distruttive:

- propagazione superficiale di impulsi ultrasonici all'interno della nuova malta
- propagazione diretta di impulsi ultrasonici all'interno dell'elemento ringrossato e nell'elemento scarificato prima del ringrosso

Distruttive:

- prove di compressione sui getti di malta duttile e sui getti di betoncio
- prove di pull-off di inserti metallici applicati sulla superficie esterna dei tessuti FRP a confinamento
- prelievo e prova di trazione, con e senza sovrapposizione, dei tessuti FRP impiegati

I metodi non distruttivi consistono nell'esame della velocità di propagazione, dell'energia dispersa e della forma d'onda acquisita dal passaggio di segnali ultrasonici all'interno del ripristino e del supporto. Con questo test è possibile verificare sia la situazione pre-ringrosso, sia quella post-ringrosso.

Nella situazione pre-ringrosso questa misura è utile per stimare la resistenza a compressione, verificare l'assenza di lesioni interne e fenomeni di frattura prodotti da carichi eccessivi o fenomeni di reattività interna (ad es. la reazione alcali - aggregati). Questa misura, inoltre, rappresenta la soglia di riferimento; l'intervento successivo di ringrosso dovrà ottenere una velocità di propagazione dei segnali maggiore o uguale alla soglia minima del materiale originario.

L'esame delle forme d'onda, inoltre, permette la stima della compattezza del percorso esaminato, vedi Figura 10. A parità di energia immessa nella forzante per centimetro di percorso, onde che presentano forma regolare in ampiezza e intensità sono evidenza di un materiale compatto, privo di lesioni, omogeneo. Forme d'onda non regolari in ampiezza e in intensità sono sintomo di un materiale non omogeneo, lesionato, fratturato (F). Il difetto può essere localizzato all'interfaccia o all'interno del materiale di ringrosso (ad esempio un nido di ghiaia); con una serie di percorsi di propagazione è anche possibile individuare la posizione precisa del difetto. Forme d'onda intermedie alle precedenti rappresentano situazioni veniali di disomogeneità, piccole cavità, piccole lesioni (tipo onda FR).

Il placcaggio di tessuti FRP è operato nel nostro paese da circa 15anni; pur essendo una tecnica rapida e semplice, richiede il rispetto di due parametri fondamentali: impregnazione dei fili ed adesione al supporto. Senza questi fondamentali requisiti l'intervento è inutile.

Per verificare il rispetto di queste proprietà esistono specifiche indicazioni nella norma CNR DT 200.

In primo luogo, è utile scegliere un "sistema di rinforzo tipo A"; questa particolare famiglia di sistemi di rinforzo, così identificati dalla norma CNR DT 200, è soggetta a certificazione esterna per lotto di produzione, il Produttore, inoltre, è tenuto a fornire una certificazione di "sistema", cioè una serie di dati sperimentali su elementi simili a quello in esame sì da conoscere a priori le reali capacità ottenibili sulla struttura, ed una serie di strumenti progettuali che validano il progetto in comparazione con i predetti riferimenti sperimentali.

In secondo luogo, si svolgono test di controllo in situ, preliminari alla stesa del rinforzo, e durante l'applicazione dello stesso, per assicurare impregnazione ed adesione. La Figura mostra il risultato della prova di adesione ottenuto sull'applicazione preliminare (campo prova) svolta dalla squadra di tecnici autorizzata alla posa dell'FRP. Il giudizio della adesione è fornito dalla tensione di strappo, il giudizio sulla impregnazione è ottenuto osservando le tipologie di crisi, la eventuale presenza di filamenti liberi di carbonio all'interno del provino e svolgendo prove di trazione con sovrapposizione.



Figura 10 - Le prove di pull-off per verificare l'adesione del sistema FRP

Anche i ringrossi sono stati oggetto di controllo mediante propagazione di onde ultrasoniche per trasparenza tra il betoncino di ripristino ed il calcestruzzo originario scarificato e ringrossato secondo le indicazioni del progetto. Lo scopo è quello di valutare la bontà dell'intervento di ripristino analizzando le forme d'onda registrate sull'oscilloscopio, la velocità di propagazione del segnale e l'energia spesa nel percorso attraversato.



Figura 11 - Verifica ultrasonica dopo 28gg di stagionatura del ringrosso della colonna lato mare della pila lato nord









Figura 12 - Viste dell'opera completata

Conclusioni

Nell'ambito del Decreto del Fare si è dato corso ad un intervento di riparazione e rinforzo delle strutture del ponte sul fiume Morto sulla SS1, nonché si è proceduto all'installazione di barriere stradali conformi agli standard H3 della normativa vigente.

L'opera su cui si è intervenuti mostra tutti i segni del degrado superficiale innescati dalla mancanza di adeguato copriferro e da un mix design del calcestruzzo che comporta sì elevati valori di resistenza ma scarsa compattezza superficiale.

Per evitare incrementi di peso, non sostenibili dalle fondazioni, si è proceduto con tre differenti tecniche di riparazione:

- -all'estradosso con impiego di malta duttile in trazione ed espansiva nei primi giorni di stagionatura
- all'intradosso dell'impalcato con rifacimento totale del copriferro, impiego di passivante migrante e placcaggio di tessuti in filo di carbonio CFRP-HM

- sulle pile con il ricorso al rifacimento totale del copriferro e all'impiego di passivante migrante nonché con il ringrosso modesto con betoncini SCC.

La combinazione di queste tecnologie ha permesso di: non modificare le dimensioni e la massa dell'opera, apporre materiale resistente, ma inerte all'azione aggressiva dell'ambiente per aumentare la resistenza a flessione e a taglio della struttura emersa grazie alle doti dei materiali impiegati.

L'articolo, infine, descrive alcuni metodi di controllo posti in essere durante la fase di realizzazione aventi il fine di verificare il rispetto dei tre requisiti che sono alla base di un intervento di restauro: adesione al supporto, compattezza superficiale e resistenza meccanica.

* Capo Compartimento ANAS S.p.A. Toscana

** Dirigente Tecnico Esercizio e Responsabile del Procedimento ANAS S.p.A. Toscana

***Direttore dei Lavori ANAS S.p.A. Toscana

****Progettista

Ringraziamenti:

L. Bortone - IGEA APPALTI S.R.L. Impresa appaltatrice dei lavori.

Bibliografia

- [1] Arduini M., Nanni A., "Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets", Journal of Composites for Construction, ASCE, May 97, vol. 1, n. 2, 1997.
- [2] Arduini M., Nanni A., Romagnolo M., "Performance of one-way reinforced concrete slabs with externally-bonded FRP strengthening", ACI Structural Journal, May, 2004
- [3] M. Arduini, M. Romagnolo, G. Camomilla e A. Nanni, "Influence of concrete tensile softening on the performance of FRP strengthened RC beams: Experiments" - Proceedings 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures – Calgary, 2004
- [4] Arduini M., Nicoletti A, Corrado P., "Il rinforzo con materiali compositi fibrosi FRP " – Maggioli Ed. 2010