

Consolidamento con materiali compositi fibrorinforzati di strutture in calcestruzzo difettose o deteriorate

Andrea Benedetti ⁽¹⁾, Riccardo Di Nisio ⁽²⁾, Martina Montesi ⁽²⁾, Elisa Steli ⁽²⁾

⁽¹⁾ Dipartimento DISTART, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, Bologna

⁽²⁾ Benedetti & Partners, Via Orioli 23, Bologna

INTRODUZIONE

Il problema del mantenimento dell'efficienza statica di una costruzione esposta ad azioni ambientali presenta molti aspetti non del tutto chiariti, soprattutto per la grande varietà di combinazioni tra materiali da costruzione, inquinanti chimici, umidità e fattori geometrici che si possono avere in pratica.

L'eurocodice EN 1992-1.1 (2002) presenta nelle sue appendici molte indicazioni di tipo progettuale, ma come appare dalla conoscenza che abbiamo dei meccanismi di degrado del calcestruzzo e corrosione delle armature, la densità del calcestruzzo ed il copriferro adottato per le armature sono i fattori preminenti per ottenere un manufatto destinato a durare nel tempo (Si veda il manuale AFGC, 2003).

Tuttavia, dall'esame di strutture esposte deteriorate, non sempre appare chiaramente se lo stato di danno che si rileva è da ascrivere a eccesso di sollecitazione ambientale o mancanza di resistenza del materiale. E' comunque facile rendersi conto che in molti casi di penetrazione profonda del deterioramento possono essere invocati difetti esecutivi che hanno aumentato in modo esponenziale la sensibilità del manufatto all'aggressione elettrochimica.

I difetti più comuni di strutture in calcestruzzo gettate in opera sono relativi all'omogeneità di distribuzione del getto e al posizionamento della gabbia d'armatura, per cui in generale può risultare una ridotta capacità del copriferro a resistere alla penetrazione di anidride carbonica e di sali, con una precoce attivazione dei meccanismi di corrosione delle armature metalliche.

La penetrazione di anidride carbonica e di sale può assumere velocità molto diverse a seconda delle condizioni in cui avviene il fenomeno; in generale una velocità media di riferimento può essere assunta pari a 1 mm per anno, per cui ci si può attendere che per le strutture maggiormente esposte un copriferro di 50 mm unito ad una classe di calcestruzzo sufficientemen-

te elevata possa prevenire almeno per 50 anni l'innesco della corrosione (Pedefferri, 2001).

In tempi recenti, per realizzare una protezione di strutture insufficienti, sono stati sperimentati sistemi di differente concezione e contenuto tecnologico. Da un lato, la protezione classica è di tipo passivo e consiste nella realizzazione di una pellicola di protezione costituita da un materiale elastico e poco permeabile. Ad oggi, la soluzione più diffusa è l'impiego di malte elasticizzate con resine organiche (ad esempio stirolo butadiene o poliuretano) o l'impiego diretto di polimeri protettivi (ad esempio poliurea).

SOMMARIO

Nella nota si descrivono alcuni dei possibili difetti delle strutture in calcestruzzo armato derivanti da cattiva esecuzione o da fenomeni accidentali quali urti o incendi. Tali difetti in generale incidono pesantemente sulla durabilità delle costruzioni e necessitano di accurata valutazione e cura nella rimozione. Le possibilità offerte dai nuovi materiali cementizi e dalle tecniche di rinforzo basate sull'impiego di materiali compositi consentono una efficace soluzione dei problemi indicati. La presentazione di alcuni esempi consente di chiarire la pratica applicazione delle tecnologie illustrate.

SUMMARY

The paper presents some of the defects which can appear in reinforced concrete structures as a consequence of bad execution or accidental situations as fire or impact. These defects in general limit the durability of the construction and owe for a careful evaluation and accurate removal works. The possibilities offered by new cement compounds and fiber reinforced composite strengthening materials allow solving these problems in an easy and effective way. The presentation of some solved examples issues the practical application of the discussed restoration techniques.



1



2

In alternativa la protezione attiva catodica può essere ottenuta mediante una differenza di potenziale elettrico delle armature metalliche che concentra la corrosione su di un elemento di sacrificio appositamente aggiunto al circuito (Pedferri, 2001).

Una variazione di schema concettuale si è verificata con l'introduzione dei materiali compositi FRP (fiber reinforced polymers). In particolare tali elementi, essendo installati per incollaggio esterno mediante resina epossidica, sono in grado di realizzare oltre all'incremento di resistenza meccanica della struttura, anche una sorta di barriera alla penetrazione degli aggressivi chimici, proteggendo l'armatura metallica interna dalla de-passivazione acida (*fib*, 2001).

In tale ottica i metodi oggi più diffusi per la riabilitazione di strutture deteriorate da agenti chimici e corrosione prevedono la ricostruzione delle sezioni perse e la loro protezione con sistemi di rinforzo esterni in FRP (Benedetti et Al., 2007).

Nella nota si illustrano numerosi casi recenti di riparazione strutturale, evidenziando i fattori progettuali dei sistemi di riparazione adottati.

DURABILITÀ DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ARMATO

Una compiuta discussione del degrado chimico del calcestruzzo e della corrosione elettrochimica delle barre di acciaio esula dagli scopi della presente nota. In una nota recente gli autori hanno presentato annotazioni e spunti di riflessione sul fenomeno in generale (si veda INARCOS, n°682). Per una compiuta analisi del fenomeno della corrosione si rimanda a (Basheer, 1996).

In quanto segue ci si limiterà a presentare una casistica di esempi atti a individuare i fattori geometrici e costruttivi che possono favorire l'insorgere della corrosione e produrre il distacco del calcestruzzo. Come è noto, quest'ultimo è solo l'ultima manifestazione evidente dell'avve-

nuta riduzione di basicità del copriferro, in quanto una volta che la conversione in ruggine del ferro ha preso piede, questa avviene in modo fortemente espansivo con espulsione del copriferro per trazione.

Effetti delle acque meteoriche

Ovviamente il primo e più importante fattore di degrado è legato ai cicli di bagnatura – asciugatura della superficie, che possono essere anche aiutati da cicli di gelo – disgelo dell'acqua. Tale situazione è in generale conseguente a errata progettazione o carente manutenzione del sistema di raccolta e smaltimento delle acque meteoriche, sia per coperture che per impalcati di ponti e viadotti. In questi ultimi, la presenza di giunti di dilatazione è in generale un fattore di rischio assai elevato, in quanto gli elementi flessibili di raccolta dell'acqua nei giunti possono essere danneggiati in molti e differenti modi sia durante la costruzione, sia nell'esercizio dell'opera.

L'effetto devastante della bagnatura è in generale molto evidente nelle solette a sbalzo dei ponti, in quanto in molti casi le velette esterne e i gocciolatoi per il distacco delle colature sono insufficienti o inefficienti.

Opere in calcestruzzo con difetti di esecuzione

I principali difetti di esecuzione di getti in calcestruzzo sono legati a difetti di compattamento del getto e a difetti di presa del materiale.

Quando il getto viene effettuato in condizioni particolari di temperatura o con miscele che non hanno i giusti rapporti acqua/cemento, o sono caratterizzati da una granulometria degli inerti non correttamente graduata, il calcestruzzo dopo la presa può mostrare ridotta resistenza o addirittura mancanza di monoliticità. In questi casi però, non vi è in generale un maggior pericolo di corrosione, a meno che anche la densità e la distribuzione dei pori non sia compromessa (*fib*, 2002).



3



4

Diverso è il discorso per i difetti di compattazione, per i quali si manifestano zone in cui i getti sono privi di legante o addirittura il getto è mancante. In questo caso le armature possono essere protette da un copriferro ridotto o addirittura essere scoperte, ed in questo caso in presenza di aggressione chimica la ruggine è sviluppata assai rapidamente.

Dal punto di vista della pericolosità, la mancanza di legante è assai più problematica in quanto può non essere facilmente identificabile, anche se il grado di basicità può essere localmente anche molto basso.

Sullo stesso piano può essere posto l'errato posizionamento dell'armatura. In passato i copriferri erano sempre fissati su valori minimi di norma e il distanziamento dei ferri dai casseri veniva fatto con sistemi improvvisati e difficili da mantenere nel corso del getto. Si trovano quindi numerosi esempi di strutture di 30 o 40 anni che hanno le armature in pelle, e il modesto strato di boiaccia che le copre lascia trafilare il rosso della ruggine in via di formazione. Per questi casi l'intervento, qualora si intenda ricostruire un copriferro affidabile, è sempre molto difficile e costoso e richiede materiali e sistemi di connessione adeguati per mantenere nel tempo l'adesione tra i due calcestruzzi.

Opere in calcestruzzo deteriorate da azioni accidentali

Tra i fattori di possibile riduzione della vita utile di strutture in calcestruzzo vi sono infine da considerare gli effetti delle azioni accidentali, quali urti, incendi ed esplosioni.

In questi particolari casi, la struttura è cimentata fin quasi alla sua capacità limite di resistere ai pesi permanenti, ed in generale gli interventi di riabilitazione e rinforzo necessari sono molto complessi e necessitano di una generale integrazione delle strutture danneggiate con nuove armature o addirittura con nuove sezioni resistenti.



5

L'argomento è troppo vasto per poter essere discusso in dettaglio in questa sede; per una più approfondita analisi dei metodi di valutazione del danno e di progettazione degli interventi si rimanda a (Benedetti, 2003 e CNR, 2005). Nelle foto successive sono illustrati casi di strutture deteriorate da incendio (figure 6 a e b) e da urto (figura 7).

TECNICHE DI RIPARAZIONE DEL CALCESTRUZZO E DELLE ARMATURE DETERIORATE

La riparazione del danno causato dall'aggressione elettrochimica richiede la ricostituzione del giusto grado di passivazione dell'armatura metallica e la ricostruzione della sezione di calcestruzzo mancante. Qualora l'armatura metallica sia stata ridotta ad una sezione residua insufficiente a garantire la staticità dell'opera, è necessario procedere anche alla integrazione dell'armatura stessa con sezioni in acciaio o in materiali fibrorinforzati (Aprile, 2004, Aprile et Al. 2007).

In dettaglio, le fasi di riparazione di un elemento danneggiato possono essere indicate nell'elenco seguente:

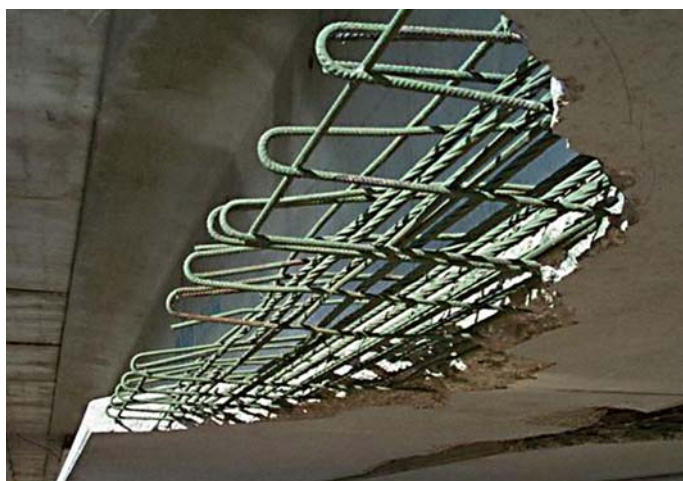
- demolizione delle zone di calcestruzzo distaccate e sabbatura della superficie residua;
- spazzolatura delle armature, taglio delle armature



6a



6b



7

insufficienti, e integrazione per saldatura con barre metalliche aggiuntive delle sezioni rimosse;
 c) passivazione delle armature esposte con apposita resina ossido riducente;
 d) aspirazione della polvere sulle superfici di calcestruzzo da ricostruire e spennellatura di un primer esaltatore di adesione;
 e) stuccatura delle cavità o ricostruzione dei copriferri mancanti mediante micro calcestruzzo epossidico tixotropico messo in opera a spruzzo o a cazzuola;
 f) mediante tubicini di iniezione lasciati all'interno del volume di calcestruzzo ricostruito, si procede all'iniezione finale di saturante composto da boiaccia di cemento addizionata di resina idrosolubile;
 g) eventuale stesa di malta elasticizzata a pennello o a spruzzo a copertura e protezione del calcestruzzo.
 Qualora il copriferro da ricostruire sia di forte spessore, o siano presenti cavità molto pronunciate come nel caso dell'incendio, è talvolta necessario promuovere l'adesione tra il calcestruzzo esistente e il nuovo strato ricostruito mediante connettori meccanici installati nella superficie di unione. In generale detti elementi sono realizzati con tasselli o spezzoni di barre ad aderenza migliorata installati con resina di fissaggio.

Nelle successive figure si illustrano le fasi di lavorazione indicate.

RIPARAZIONE E PROTEZIONE CON MATERIALI COMPOSITI FRP

La riparazione e il consolidamento di strutture in calcestruzzo e di muratura mediante l'impiego di materiali fibrorinforzati incollati esternamente sulla superficie di strutture esistenti è ormai una tecnica sufficientemente compresa e di buona diffusione (*fib*, 2001).

A questo ha contribuito lo sforzo profuso dal Gruppo degli Estensori che ha prodotto il pregevole documento tecnico CNR DT 200/2004 contenente le linee guida per l'utilizzo dei materiali FRP nella riparazione di strutture in calcestruzzo e muratura (CNR, 2005).

La vasta sperimentazione effettuata in tutto il mondo ha mostrato la grande potenzialità del metodo ma anche le sue peculiarità, che consigliano una grande cautela nell'incrementare la capacità portante di strutture mediante tale tecnica.

Un fattore positivo spesso non considerato è legato alla protezione superficiale che gli strati di rinforzo esercitano sulla costruzione oggetto di consolidamento. Oltre a ciò, la limitazione nell'apertura di fessure che può essere ottenuta con un'armatura disposta in modo diffuso sulla superficie esterna, aumenta ancora il grado di protezione delle armature poste all'interno delle sezioni strutturali.

Le regole di dimensionamento sono state illustrate in forma sintetica in note pubblicate su questa stessa rivista (si veda INARCOS n°680 e 682) e quindi per brevità non si forniscono ulteriori dettagli. Preme solo ricordare che la tensione limite di progetto degli strati di rinforzo è in generale quella di delaminazione, ovvero quella a cui si manifesta il distacco del materiale FRP per rottura del superficiale strato di calcestruzzo che funge da supporto per gli elementi incollati all'esterno. Come è noto, la tensione di delaminazione decresce con la

Nelle pagine precedenti:

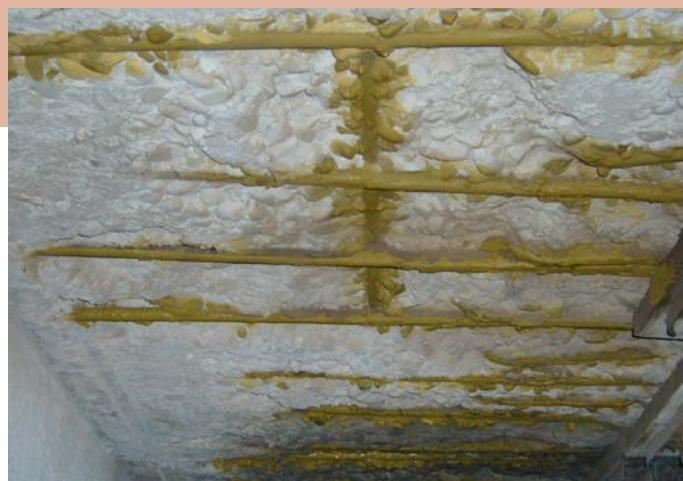
- 1 - Vista della veletta laterale del ponte sull'Ombrone della S.R. 435 - Lucchese.
- 2 - Vista di un giunto di costruzione del Cavalcavia di via Dante a Cremona.
- 3 - Vista della soletta del sottopasso sulla superstrada Rimini - San Marino.
- 4 - Vista della parete del sottopasso sulla superstrada Rimini - San Marino.
- 5 - Vista delle pile del viadotto "Bebresh" sull'autostrada "Hiemus" vicino a Sofia in Bulgaria. Si notino le armature instabilizzate in compressione.

In queste pagine:

- 6a - Solaio a Lido degli Estensi.
- 6b - Copertura della Diavia a Molinella.
- 7 - Ponte sulla S.S. Romea danneggiato da un camion fuori sagoma.
- 8a - Sabbatura della superficie.
- 8b - Passivazione delle armature.
- 8c - Spennellatura del primer.
- 8d - Ricostruzione del copriferro.
- 8e - Stuccatura della cavità.
- 8f - Riempimento dei vuoti.



8a



8b



8c



8d



8e



8f



9a



9b

radice quadrata dello spessore del rinforzo stesso, e quindi la forza che può essere utilizzata per equilibrare azioni flettenti s'incrementa solo in proporzione alla radice quadrata dell'incremento di spessore (ma proporzionalmente alla larghezza trasversale delle strisce utilizzate).

Per quanto attiene alla protezione dall'aggressione ambientale, lo spessore complessivo del rinforzo non è determinante, mentre invece lo è il grado di copertura della superficie con resina e rinforzo, che come è noto sono del tutto non permeabili a gas e acqua.

Ulteriore fattore importante per la durabilità dell'opera è la capacità di rinforzi e colle di favorire la permanenza in perfetto contatto dell'eventuale copriferro ricostruito con il sottostante calcestruzzo originale dell'opera. In particolare, in elementi compressi o qualora si voglia contrastare il distacco della nuova crosta per effetto di tensioni di ritiro, si possono realizzare cerchiature di FRP in grado di generare una pressione trasversale sulla crosta stessa che ne garantisce l'ingranamento con il nucleo interno rimasto.



10a



10b

Lavori di rinforzo strutturale con fibre in carbonio del sottopasso di via XXVII Luglio - Borgo Maggiore - Stato della Repubblica di San Marino (RSM)

Nel caso sottopasso di via XXVII Luglio - Borgo Maggiore - Stato della Repubblica di San Marino (RSM), lo stato di conservazione delle armature della soletta superiore appariva molto compromesso, e non era economicamente accettabile procedere alla reintegrazione dell'armatura con tecniche tradizionali. Allo scopo di garantire la vita utile della costruzione, si è deciso allora di sostituire la funzione statica dell'armatura interna con quella di una armatura posizionata all'intradosso e di minor sensibilità alla corrosione.

L'analisi è stata svolta per i carichi relativi a transito di veicoli su strada a quattro corsie di prima categoria. In relazione alla presenza di una massicciata di spessore variabile, si è dovuto svolgere un'analisi mediante situazioni limite, in modo da cogliere il fenomeno all'interno del campo di variabilità delle condizioni al contorno del problema.

In particolare si sono svolte due analisi, ipotizzando differenti meccanismi di diffusione delle impronte di carico degli pneumatici dei veicoli:

- a) Superficie di impronta 0,4 x 0,4 m senza considerare la diffusione del carico attraverso il pacchetto stradale;
- b) Superficie di impronta 1,55 x 1,55 m, considerando la

9a - Struttura della traversa mobile sul fiume Reno privata del copriferro degradato.

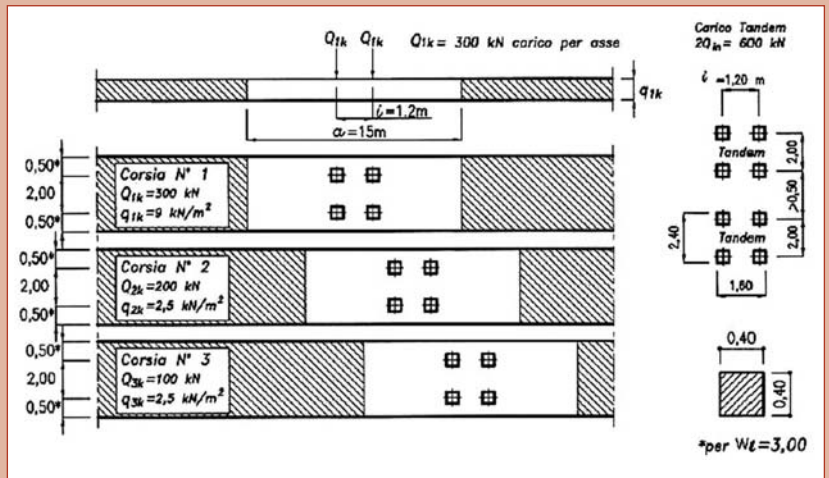
9b - Struttura della traversa mobile sul fiume Reno riparata.

10a - Posa delle armature FRP nel sottopasso della superstrada Rimini – San Marino.

10b - Griglia dei rinforzi per il sottopasso della superstrada Rimini – San Marino.

11 - Schema di distribuzione del carico sulla sede stradale.

12 - Sezione trasversale e dettaglio del rinforzo per il sottopasso della superstrada Rimini – San Marino.



11

diffusione come previsto dalla normativa vigente per lo spessore di massiciata presente.

E' stato preparato un modello ad elementi finiti della lastra di copertura del sottopasso; a favore di sicurezza tale lastra è stata considerata appoggiata sulle pareti verticali.

Nelle figure 13.a e 13.b i risultati delle due assunzioni possono essere confrontati; come si può notare la riduzione più forte si ha per il momento allineato con l'asse della soletta, per il quale considerare la diffusione del carico corrisponde a ridurre alla metà il momento di progetto.

Si sono dunque progettati i rinforzi per i momenti medi di 70 kNm/m e 35 kNm/m. Con uno spessore di soletta di circa 350 mm, l'armatura esterna deve resistere sforzi di circa 220 e 110 kN/m rispettivamente. Con tale situazione si devono diversificare le tipologie di rinforzo in quanto la trazione trasversale non può essere sostenuta se non con aree di fibra consistenti.

Per la direzione trasversale si adottano allora lamine di spessore 1,2 mm, e sulla base di una tensione di delaminazione interna di circa 590 MPa, sono necessarie lamine da 100 mm disposte a passo di 300 mm. Nella direzione longitudinale, essendo la risultante delle trazioni circa dimezzata, è possibile introdurre una soluzione più efficiente: adottando tessuti unidirezionali di spessore 0,22 mm la tensione di delaminazione vale 1370 MPa circa, che consente di disporre strisce di larghezza 250 mm a passo di 600 mm (CNR, 2005).

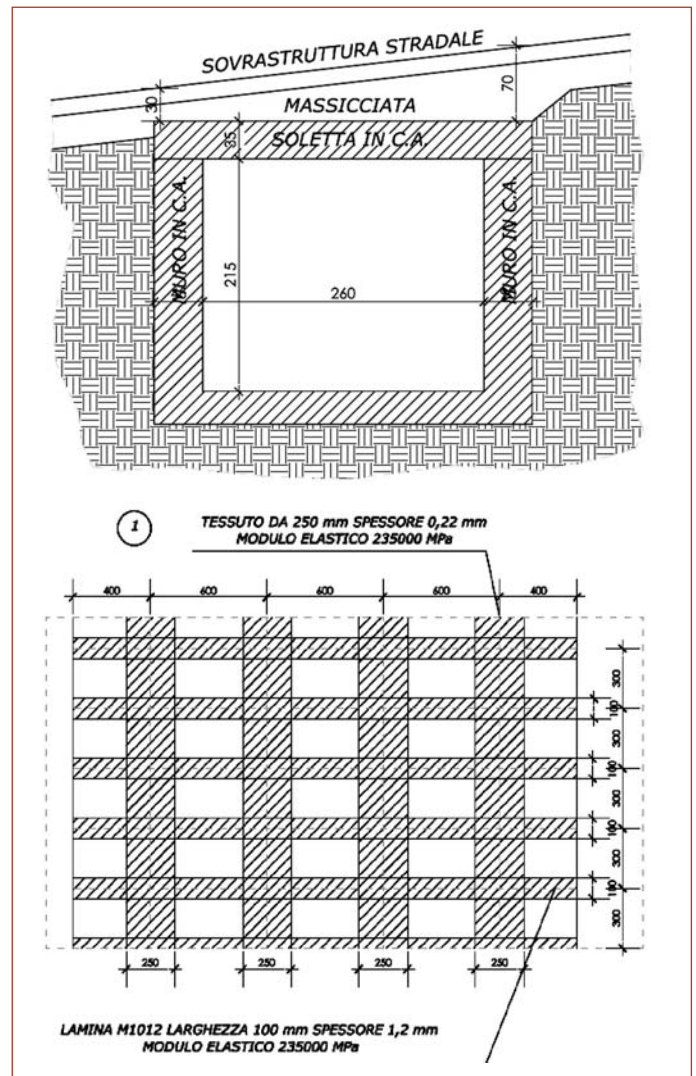
VERIFICA DELLA CORRETTA ESECUZIONE DEI RINFORZI FRP

La verifica della corretta esecuzione dei rinforzi FRP è essenziale per poter procedere al collaudo delle opere e garantire l'efficienza statica delle stesse nel tempo (Aprile, 2007). In particolare sono necessarie due tipi di verifiche:

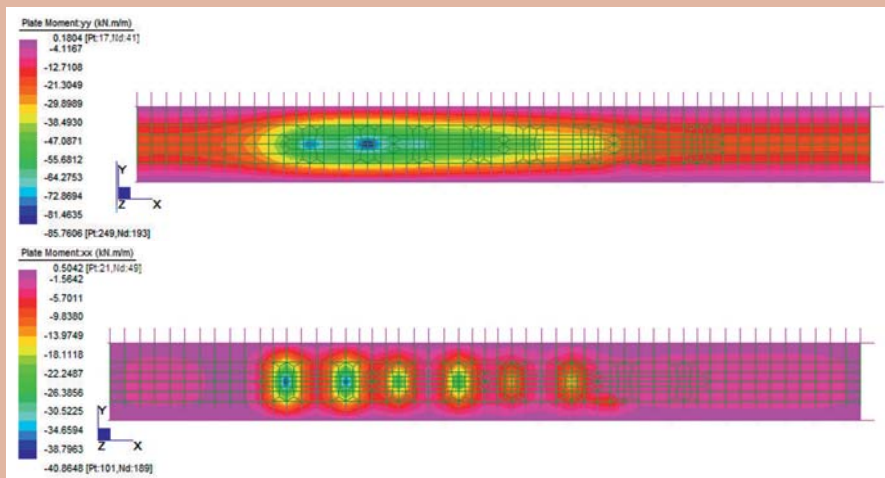
a) qualificazione del sistema di rinforzo in termini di qua-

lità dei materiali; prove di trazione sui tessuti e sulle lamine, prove di trazione sulle resine, prove di taglio sulla connessione fibra – resina;

b) qualificazione della corretta esecuzione del sistema stratificato supporto – resina – rinforzo secondo le regole esecutive fissate dal produttore.



12



13a - Momenti in direzione x ed y nel caso di non diffusione del carico.

13b - Momenti in direzione x ed y nel caso di diffusione del carico.

13a

Nel primo caso, è necessario procedere alla campionatura dei materiali impiegati, per poterli inviare ad un laboratorio per le prove di routine. Attualmente Assocompositi ha prodotto un manuale ed un sistema facilitato per il prelievo denominato "COKIT", in modo da permettere la campionatura secondo regole standardizzate (Poggi, 2008).

Per quello che riguarda invece la definizione della corretta esecuzione del sistema di rinforzo, sono in commercio numerose attrezzature per l'esecuzione di prove di strappo di piccoli campioni di tessuto FRP o di strati di regolarizzazione di micro calcestruzzo. La normativa di riferimento con cui svolgere le prove è contenuta nei documenti ASTM D4541 e ISO 4624 "Pull-off adhesion testing".

In particolare l'apparecchiatura di strappo è costituita da una speciale morsa in grado di afferrare una piastra che viene incollata sul lembo di FRP che si deve strappare.

Sul perimetro della piastra fissata al materiale sotto test, viene realizzata un'incisione mediante disco o corona diamantata in modo da separare la stratigrafia delle interfacce al di sotto della piastra dal materiale contiguo.

La prova si conclude in modo positivo se il sottile cilindro che viene estratto contiene sia il rinforzo FRP che lo strato di resina, essendosi prodotta la rottura nello strato di supporto del materiale da rinforzare, ovvero nel calcestruzzo o muratura sul quale è stato fissato il rinforzo. Tensioni tipiche di distacco vanno da 1,50 MPa a 3,00 MPa.

In presenza di dati sufficientemente elevati vi è la garanzia che il distacco del rinforzo allo stato limite ultimo avvenga con il meccanismo previsto in sede di progetto.

CONCLUSIONI

La riparazione di strutture per le quali le azioni ambientali hanno prodotto una perdita dell'armatura metallica e del copriferro di protezione ha molto beneficiato

delle possibilità offerte dai nuovi materiali polimerici e dalle fibre ad altissima resistenza.

Il progetto di un intervento di riparazione strutturale presenta molte fasi esecutive in sequenza e può dare risultati non accettabili se le lavorazioni non sono eseguite in base ai protocolli di riferimento o se i materiali prescelti non hanno la compatibilità necessaria per garantire la durata della riparazione per tutta la vita utile della costruzione.

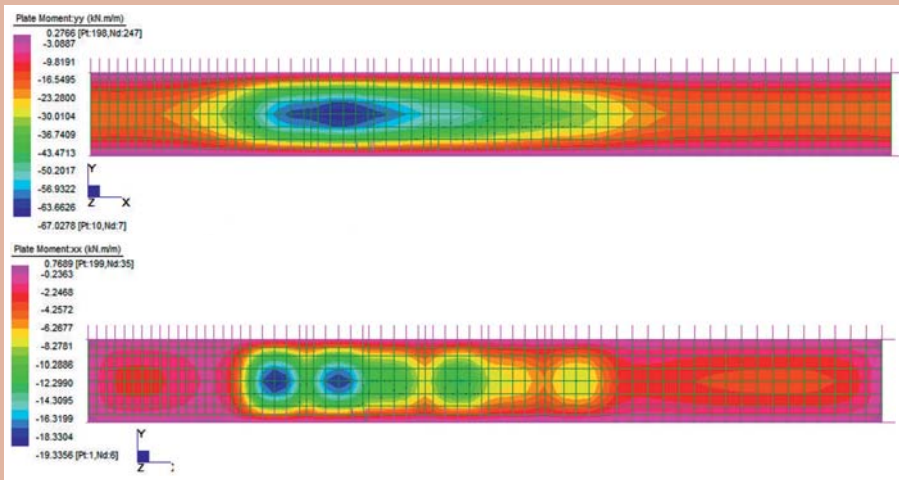
Qualora la struttura sia in funzione in un ambiente particolarmente ostile, la previsione della messa in opera di un rivestimento protettivo può essere una soluzione economicamente ottimale, ma anche in questo caso ispezioni ripetute e interventi di manutenzione ordinaria sono sempre necessari per una piena durabilità dell'opera.

Nelle situazioni in cui l'armatura metallica è seriamente compromessa e la realizzazione di una nuova armatura appesantirebbe troppo la costruzione o non garantirebbe l'inibizione dell'innesco della corrosione, è spesso possibile realizzare sistemi di rinforzo in materiali compositi FRP, che oltre ad essere leggeri e resistenti, forniscono anche una certa protezione delle superfici esposte agli agenti corrosivi.

Una formazione di una rete di strisce di rinforzo che copre metà della superficie di una soletta, riduce della metà la diffusione di anidride carbonica e quindi raddoppia il tempo necessario per la depassivazione dell'armatura metallica residua interna.

La disponibilità di malte elasticizzate per la protezione delle superfici e di resine inibitrici della corrosione per le barre d'armatura, consentono una gestione ottimale del progetto di riparazione, assicurando un'ampia possibilità di scelte tra le quali selezionare quella che a parità di vita utile produce il minimo onere economico per l'ente proprietario della costruzione.

E' infine da segnalare che, un controllo finale della bontà delle interfacce realizzate tra i materiali esistenti e quelli aggiunti in fase di riparazione è un ingrediente essenziale per il soddisfacimento dei criteri di ammissibilità statica e di durabilità dell'intervento.



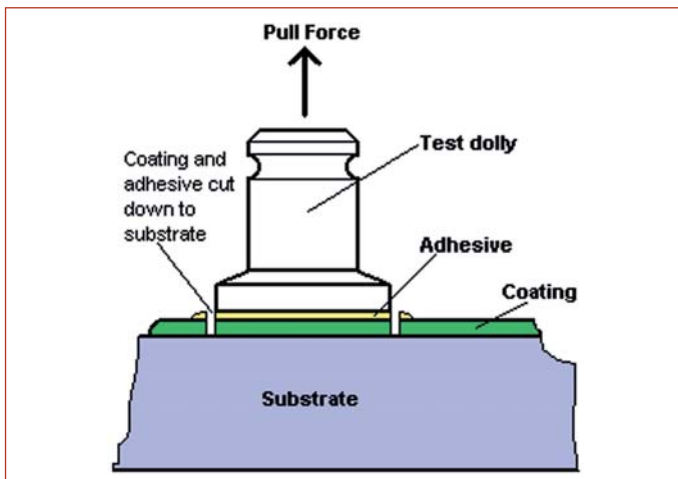
13b

- 14a - Descrizione della prova di strappo.
- 14b - Vista della piastra con testa.
- 14c - Estrazione del campione con il tester.
- 14d - Scala graduata del tester.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il geom. Alessandro Battaglia e la ditta Restauri Innovativi Tecnologici s.r.l. (RES.IN.TEC Italia Srl) di Calderara di Reno (BOLOGNA) per aver messo a disposizione il materiale fotografico e progettuale dei lavori completati negli ultimi anni; in tale modo è stato

possibile compilare la vasta casistica di questa nota, e condurre la discussione in essa contenuta. Si ringrazia inoltre il geom. Luca Calisti della ditta Kimia s.p.a. di Ponte Felcino (Perugia) per la consulenza ed il costante supporto tecnico nei cantieri. Un particolare ringraziamento all'Ing. Davide Bartolini per il supporto alla progettazione del rinforzo.



14a



14b



14c



14d



15



16



17

15 - Prove di delaminazione di campioni di calcestruzzo vecchio riparati con uno strato di malta ad alta resistenza e rinforzo esterno in C-FRP (si veda Aprile, 2007).

16 - Delaminazione del campione nell'interfaccia tra nuovo copriferro e rinforzo esterno (Aprile, 2007).

17 - Delaminazione del campione nell'interfaccia tra vecchio calcestruzzo e nuovo copriferro (Aprile, 2007).

4. EN 1992-1-1 (2002), *Design of Concrete Structures – General rules and rules for buildings*, CEN TC250/SC2, Bruxelles.
5. AFGC – CEFACOR, (2003), *Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion*, disponibile su: <http://www.afgc.asso.fr/index.php/Publications.html>
6. Benedetti A. Mangoni E., Evangelisti M., Meoni S., (2007), "Riparazione e consolidamento del sovrappasso ferroviario dell'Arca a Pistoia", *INARCOS*, **LXII**(682), Bologna.
7. **fib**, (2001), *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*, Bulletin 14, Fédération Internationale du Béton, Lausanne, Switzerland.
8. CNR, (2005), *Guidelines for Design, Execution and Control of Strengthening Interventions by Means of Fibre-reinforced Composites*, Bulletin DT 200/2004, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italy (english version).
9. Benedetti A., (2003), "Composite Innovative Materials in Structural Repairing", *CDS 2 - The Conceptual Design of Structures*, CI Premiere Ltd, Singapore.
10. Aprile A., Benedetti A., (2004), "Coupled flexural-shear design of R/C beams strengthened with FRP", *Composites Part B: Engineering*, **35**(1), Pages 1-25.
11. Benedetti A., Mangoni E., Montesi M., Steli E., "Verifiche di sicurezza ed interventi di consolidamento della chiesa di S. Martino in Casola", *INARCOS*, **LXII**(680), Bologna.
12. Aprile A., Pelà L., Benedetti A., (2007), "repair and strengthening with FRP of damaged bridge r/c slabs", *Proc. of FRPRCS-8*, University of Patras, Greece.
13. Poggi C., Fava G., (2008), "Il controllo di accettazione dei materiali fibrorinforzati per il rinforzo strutturale", *I Quaderni Tecnici di Assocompositi*, **1**, Milano.

BIBLIOGRAFIA

1. Pedefferri P., Bertolini L., (2001), *La durabilità del calcestruzzo armato*, McGraw-Hill Italia, Milano.
2. Basheer P., Chidiac S., Long A., (1996), "Predictive models for deterioration of concrete structures". *Construction and Building Materials*, **10**(1), 27-37.
3. **fib**, (2002), *Management, maintenance, and strengthening of concrete structures*, Bulletin 17, Fédération Internationale du Béton, Lausanne, Switzerland.