

Rinforzo della connessione plinto-pilastro in strutture prefabbricate danneggiate da sisma con materiali compositi

A. Balsamo¹, I. Iovinella² and M.I. Verbicaro³

ABSTRACT: Una delle tipologie di danno frequentemente verificatesi in seguito al recente sisma dell'Emilia riguarda il danneggiamento della connessione plinto-pilastro, spesso con conseguente disassamento del pilastro e danneggiamento della parte inferiore dello stesso.

Tra le concause all'origine del danno possono annoverarsi il deterioramento dei materiali utilizzati, l'utilizzo di codici normativi inadeguati, nonché l'errata realizzazione del manufatto in relazione ai particolari esecutivi.

Nel presente lavoro un intervento di riparazione e rinforzo per il collegamento della connessione plinto-pilastro viene illustrato e analizzato alla luce dell'esperienza maturata nel recente evento sismico. L'intervento prevede l'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati, sia con fibre in carbonio che con fibre in acciaio, così da sfruttare i vantaggi dei materiali compositi quali la bassa invasività, la rapidità di esecuzione e l'efficacia, nell'ambito del rinforzo delle strutture prefabbricate. Vengono, inoltre, descritte le operazioni necessarie alla riparazione degli elementi esistenti e le operazioni propedeutiche alla corretta esecuzione dell'intervento.

Un esempio di calcolo viene sviluppato per validare gli effetti del provvedimento in termini di miglioramento sismico e operatività.

1 INTRODUZIONE

Gli eventi sismici generalmente portano alla luce i problemi insiti nelle strutture esistenti, ed il recente sisma che ha colpito l'Emilia e parte della Lombardia ha confermato questa regola, evidenziando molti fattori di rischio in dote agli edifici esistenti, ed in particolar modo ai capannoni prefabbricati. Tra tali fattori si è frequentemente rilevato il sottodimensionamento della fondazione associato all'inadeguatezza del collegamento pilastro-fondazione, oltre alla scarsa armatura della base del pilastro. Ad amplificare maggiormente tale problema vi è la presenza del pavimento industriale, sovente di spessori notevoli, che può agire da vincolo in una zona del pilastro non progettata per sopportare tali sollecitazioni.

Nella scelta della tipologia d'intervento non si può prescindere dalla valutazione di elementi quali l'invasività, la rapidità di esecuzione, la possibilità di procedere

¹ Prof., Dip. di Ingegneria Strutturale – Università di Napoli "Federico II", albalsam@unina.it

² PhD, Dip. di Ingegneria Strutturale – Università di Napoli "Federico II", ivano.iovinella@unina.it

³ PhD, Dip. di Ingegneria Strutturale – Università di Napoli "Federico II", isabella.verbicaro@unina.it

all'intervento delegando a momenti diversi l'esecuzione di calcoli sismici spesso lunghi e dall'esito incerto, e non ultimo il costo dell'intervento.

2 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

L'intervento proposto prevede la riparazione e il rinforzo della connessione plinto-pilastro e della base del pilastro con l'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati realizzati con fibre di carbonio (CFRP) o acciaio (SFRP) in matrici epossidiche.

L'utilizzo di materiali compositi offre il vantaggio di una rapida esecuzione dell'intervento con la necessità di spazi operativi ridotti, nonché di una trascurabile variazione delle dimensioni iniziali dell'elemento. Di contro tale intervento, visto l'utilizzo di materiali aventi unicamente una rigidità estensionale, risulta utile solo nel caso in cui il pilastro sia caratterizzato da un rapporto di armatura molto basso. Tale evenienza è, tuttavia, molto frequente nelle strutture prefabbricate le quali, essendo progettate per soli carichi verticali ed avendo genericamente altezze elevate, hanno armature limitate e sezioni di grandi dimensioni necessarie ad evitare problemi di instabilità.

2.1 Operazioni Preliminari

L'intervento oggetto di studio necessita dell'esecuzione di alcune operazioni preliminari senza le quali ne verrebbero compromesse la corretta esecuzione e l'efficacia.

La prima operazione prevede la rimozione della pavimentazione industriale e del materiale di riempimento esistente tra quest'ultima e la parte sommitale del plinto fino a liberare completamente la superficie laterale del pilastro. Benché tale lavorazione possa sembrare particolarmente invasiva è da considerare che sovente gli interventi di miglioramento sismico in strutture prefabbricate implicano il rinforzo delle fondazioni e dunque la rimozione del pavimento e l'asportazione del sottofondo fino alla completa pulizia della superficie laterale del bicchiere del plinto.

Elemento non trascurabile, inoltre, è che in caso di sisma la pavimentazione industriale può fungere da vincolo impedendo la traslazione del pilastro ed esercitando su quest'ultimo un'azione tagliante che risulterebbe particolarmente dannosa in considerazione anche del fatto che esso non è progettato per tale tipo di sollecitazione localizzata.

Nel caso in cui siano presenti danni quali lesioni del calcestruzzo, armature plasticizzate o copriferro danneggiato è comunque necessario procedere alla riparazione del pilastro. In tale evenienza, infatti, va rimosso il calcestruzzo danneggiato ed incoerente, oltre ad effettuare la sostituzione delle armature plasticizzate e le iniezioni di resina epossidica bicomponente ad elevata fluidità per ripristinare la monoliticità delle lesioni. Tali operazioni devono essere seguite dalla ricostruzione volumetrica del copriferro con adeguate malte cementizie a stabilità volumetrica.

Altrettanta attenzione va posta nella valutazione dello stato della malta di riempimento presente fra le pareti del plinto ed il pilastro; spesso tale malta può presentarsi disgregata ed irrimediabilmente danneggiata a causa della rotazione del pilastro indotta dal sisma. In tal caso è necessario procedere con la rimozione della stessa, almeno nella parte sommitale più danneggiata, e con la sua successiva ricostruzione. La rimozione della malta di riempimento è utile in funzione delle successive operazioni, infatti, prima della ricostruzione della malta, è possibile alloggiare, nell'intercapedine ricavata tra il bicchiere del plinto ed il pilastro, il tessuto metallico che poi andrebbe successivamente applicato (Figura 2). Qualora la malta di riempimento dovesse presentare solo lesioni di piccola entità, è possibile ripristinarne la monoliticità attraverso iniezioni di resina epos-

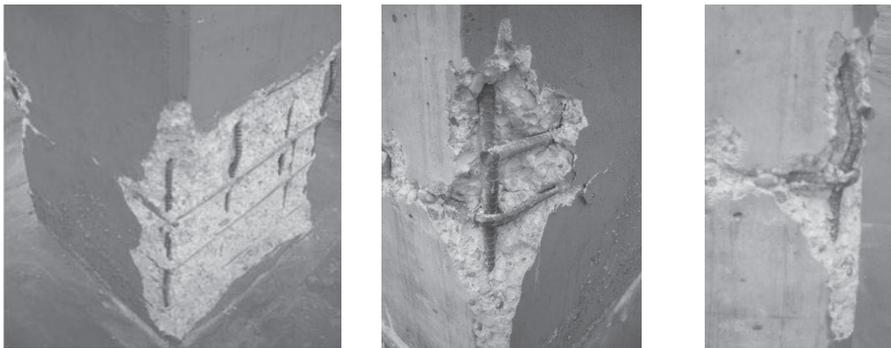


Figura 1: Plasticizzazione delle armature ed espulsione del copriferro in un edificio prefabbricato in seguito al sisma.

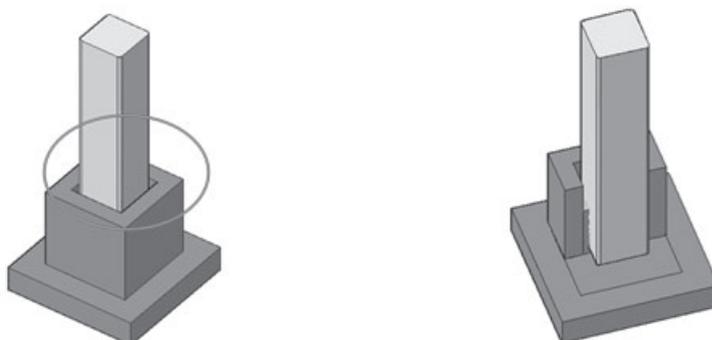


Figura 2: Rimozione della malta di riempimento tra plinto e pilastro.

2.2 Rinforzo per pressoflessione

Il miglioramento delle resistenza a pressoflessione del pilastro è ottenuto attraverso l'applicazione, con stucco epossidico, di tessuto unidirezionale in fibra di acciaio sulla superficie del pilastro. La funzione del tessuto metallico è quella di sopperire alla insufficienza di armatura longitudinale, per tale motivo, le fibre vengono disposte con asse verticale e parallelo all'armatura longitudinale esistente.

Per garantire l'adeguato ancoraggio e migliorare la connessione plinto-pilastro è comunque necessario ancorarne la parte terminale al plinto di fondazione; tale obiettivo può essere conseguito attraverso due operazioni diverse determinate in funzione dello stato di conservazione della malta di riempimento.

Se la malta di riempimento è disgregata e dunque è stato necessario procedere alla sua rimozione sarà possibile ricavare una tasca per l'alloggiamento e l'ancoraggio del tessuto metallico come mostrato in Figura 3(a). In tal caso il tessuto metallico unidirezionale va applicato partendo dall'estremità inferiore della tasca di ancoraggio e per tutta l'altezza necessaria al rinforzo.

L'applicazione del tessuto metallico va fatta previa primerizzazione del supporto ed applicazione di stucco epossidico bicomponente. Inoltre, al fine di migliorare l'adesione del tessuto metallico al calcestruzzo, uno strato di tessuto quadriassiale in fibra di car-

bonio viene applicato superiormente al tessuto metallico. L'applicazione del tessuto quadrassiale si realizza fresco su fresco con stucco epossidico, dello stesso tipo utilizzato per il tessuto metallico, e resina epossidica bicomponente. (Figura 3(b)). Le condizioni di incastro al piede del pilastro vengono ripristinate attraverso il riempimento della tasca con stucco epossidico (Figura 3(c)) che, grazie alla forte adesione al supporto ed alla stabilità volumetrica, fornisce anche il corretto ancoraggio al tessuto metallico.

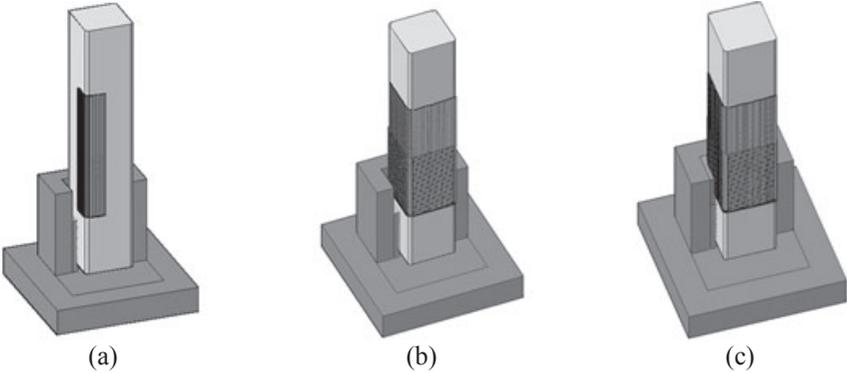


Figura 3: (a) Applicazione del tessuto metallico unidirezionale, (b) del tessuto quadrassiale in fibra di carbonio e (c) riempimento con stucco epossidico.

Qualora la malta di riempimento del bicchiere del plinto abbia una buona resistenza meccanica e sia in buone condizioni di conservazione è possibile assicurare al tessuto metallico l'adeguato ancoraggio al piede utilizzando dei connettori metallici. L'applicazione dei connettori metallici, realizzati con corde in fibra di acciaio ad alta resistenza, deve avvenire previa foratura della malta di riempimento, pulizia del foro con aria compressa e primerizzazione dello stesso. Il connettore potrà esercitare l'azione di ancoraggio essendo vincolato all'estremità inferiore alla malta del riempimento, e all'estremità superiore al tessuto metallico sul quale dovrà essere allargato fino a coprire una superficie triangolare come mostrato in Figura 4b

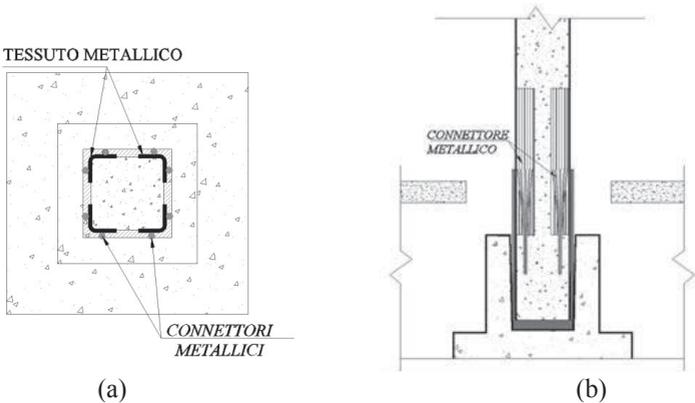


Figura 4: Disposizione dei connettori per l'ancoraggio del tessuto metallico alla fondazione (a) pianta e (b) sezione.

2.3 Confinamento

Al fine di promuovere l'adesione dei tessuti precedentemente applicati, impedirne l'instabilizzazione e incrementare la duttilità del pilastro è possibile confinare il calcestruzzo con del tessuto unidirezionale in fibra di carbonio ad elevata resistenza. Tale tessuto verrà applicato a partire dalla sommità del plinto direttamente a contatto con i tessuti sottostanti, essendo separato da quest'ultimi solo dallo stucco e dalla resina epossidica. L'intervento deve essere esteso a tutta l'altezza necessaria al rinforzo del pilastro.

A tal proposito si osservi che tale tipo di intervento incrementa sensibilmente anche la resistenza al taglio del pilastro per cui, nel caso in cui sia necessario considerare anche questo contributo, si deve valutare attentamente l'estensione dell'intervento poiché nelle strutture prefabbricate il taglio sui pilastri ha andamento costante lungo tutta l'altezza del pilastro.

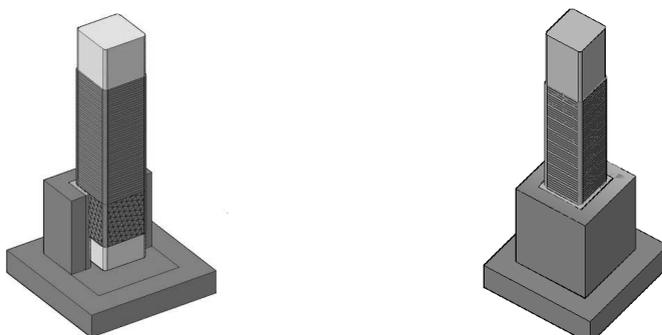


Figura 5: Applicazione di tessuto unidirezionale in fibra di carbonio.

3 CASO STUDIO

Per valutare l'efficacia di tale intervento si è studiato il caso di un capannone prefabbricato monopiano e monocampata realizzato in Emilia con progetto esecutivo del 2007, scelto tra una serie di progetti realizzati in Emilia tra il 1995 e il 2012, temporalmente successivo al D.M.'96 e subito antecedente alle NTC 2008.

Il capannone ha pianta rettangolare con pilastri di altezza pari a 6 m e sezione quadrata di 60 cm di lato, travi a doppio T con larghezza pari a 60 cm e altezza di 150 cm ed anima di larghezza 30 cm. Travi e pilastri sono realizzati con calcestruzzo di resistenza R_{ck} 35 MPa, i pilastri sono armati con 10.81 cmq di acciaio FeB44k, distribuiti lungo il perimetro lasciando un copriferro di 10 cm. L'armatura trasversale dei pilastri è costituita da staffe $\phi 6$ con passo pari a 20 cm.

I materiali compositi utilizzati per il rinforzo sono elencati in Tabella 1.

Tabella 1: Caratteristiche meccaniche.

Materiale	Tessitura	ϵ_{ult} [%]	σ_{ult} [MPa]	E [MPa]
Fibre Metalliche	Uniassiale	1.0	1900	190000
Tessuto in fibra di carbonio	Uniassiale	2.0	4800	230000
Tessuto in fibra di carbonio	Quadriassiale	2.0	4800	230000

3.1 Pressoflessione

Tra le diverse sollecitazioni agenti sui pilastri quella da sisma risulta essere la più gravosa e con tale sollecitazione la sezione del pilastro non risulta verificata.

La condizione del pilastro tipo nello stato di fatto è sintetizzata nel dominio di interazione M-N riportato in Figura 6; in esso si nota come il punto che rappresenta la sollecitazione sismica sia al di fuori del dominio di interazione ed in particolare si trova nella zona nella quale il pilastro è soggetto a sforzi di compressione bassi ovvero dove la sezione risente maggiormente della carenza di armatura metallica.

Una siffatta condizione è ideale per il tipo di intervento in oggetto poiché la sezione necessita di aggiunta di materiale resistente a trazione.

L'aggiunta di FRP incrementa la capacità resistente della sezione proprio in quella zona del dominio dove l'armatura è maggiormente sollecitata. Nella circostanza in esame sono stati inseriti circa 224 mm^2 di tessuto metallico su ciascun lato del pilastro.

La particolare forma del dominio della sezione rinforzata rispetto a quello della sezione originaria (Figura 7) mette in evidenza questo aspetto.

In particolare si nota che il valore della resistenza ultima a compressione non subisce variazioni, ma si ha un forte incremento della resistenza a trazione. Inoltre, nella parte destra del dominio, quella caratterizzata da sforzi di compressione elevati non si rileva alcun sensibile incremento della capacità resistente della sezione poiché in tale zona il calcestruzzo è maggiormente sollecitato rispetto all'acciaio.

A vantaggio di sicurezza e per mero scopo illustrativo dei singoli benefici dell'intervento adottato, nel calcolo del dominio non si è tenuto conto dell'incremento di deformazione ultima del calcestruzzo confinato.

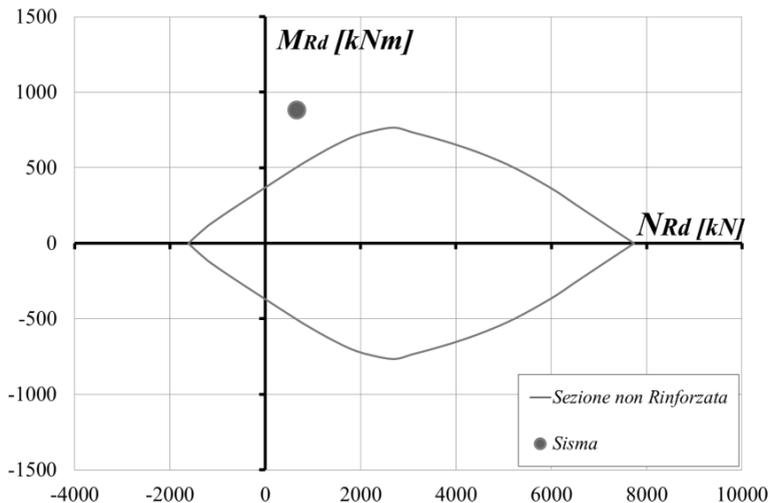


Figura 6: Dominio M-N sul pilastro nella fase ante-operam.

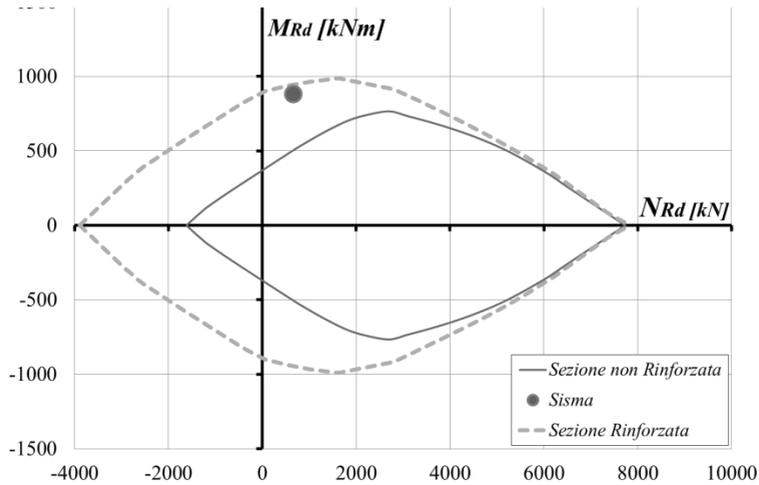


Figura 7: Dominio M-N della sezione rinforzata.

Tale incremento migliora il comportamento della sezione, non solo in relazione alla resistenza a pressoflessione, ma soprattutto in relazione al suo comportamento deformativo accrescendone sensibilmente la duttilità. Il confinamento del pilastro, infatti, consente al calcestruzzo di raggiungere una deformazione ultima pari a 0.0066 mm/mm ovvero del 6.6 ‰ con un incremento rispetto al deformazione ultima del calcestruzzo non confinato (3.5 ‰) pari al 67%.

3.2 Taglio

Il calcolo viene condotto con le indicazioni delle Linee Guida del Ministero dei lavori Pubblici del 24/07/2009 che permettono di calcolare la resistenza a taglio della sezione rinforzata con la formula:

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,s} + V_{Rd,f} + V_{Rd,c}) \quad (1)$$

dove $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,c}$ sono rispettivamente il contributo dell'armatura trasversale e della biella compressa di calcestruzzo, mentre $V_{Rd,f}$ è il contributo dell'FRP.

Dall'equazione (1) si evince che il contributo dell'FRP, $V_{Rd,f}$ è efficace solo se il contributo resistente delle staffe è inferiore a quello del calcestruzzo, e in ogni caso esso non sarà mai maggiore di $[V_{Rd,c} - V_{Rd,s}]$.

Generalmente nelle strutture prefabbricate tale condizione è verificata poiché, a fronte di una scarsa quantità di armatura trasversale, si è in presenza di sezioni di grandi dimensioni.

Nel caso in esame il pilastro è soggetto ad un taglio sollecitante di 147 kN rispetto ad una resistenza, determinata dalla modesta presenza di armatura trasversale pari a 119 kN . ($V_{Rd,c} = 766 \text{ kN}$)

Grazie al rinforzo con tessuto di carbonio unidirezionale applicato in avvolgimento sul pilastro la resistenza al taglio di quest'ultimo migliora sensibilmente.

Il contributo del rinforzo $V_{Rd,f}$, considerando un'applicazione in "Ambiente Aggressivo" con uno layer di carbonio unidirezionale da 300 gr/mq , è pari a 89 kN per cui la

resistenza finale della sezione è pari a 208 kN.

La Figura 8 mostra l'incremento di resistenza a taglio, al variare della resistenza del calcestruzzo, derivante da un rinforzo in completo avvolgimento con uno strato di tessuto in carbonio unidirezionale da 300 gr/mq. Il grafico fa riferimento ad una sezione quadrata di 60 cm di lato. Si noti come in corrispondenza delle classi di calcestruzzo che più frequentemente si incontrano negli edifici prefabbricati esistenti, il valore di $V_{Rd,f}$ sia sempre superiore a 80 kN. Nel caso frequente di armatura longitudinale realizzata con staffe di diametro 6 mm poste ad interasse di 20 cm ciò equivarrebbe ad un incremento di resistenza non inferiore al 70% della resistenza originaria.

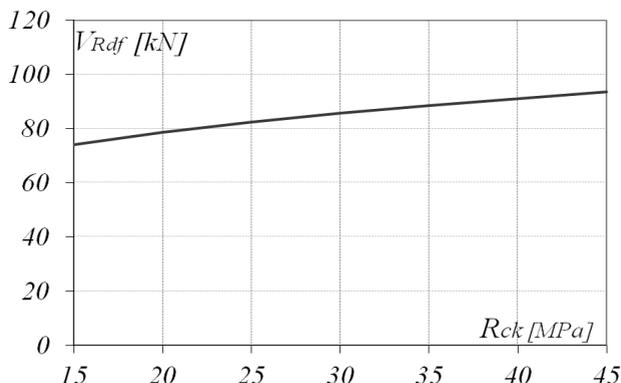


Figura 8: Incremento di resistenza a taglio al variare della resistenza del calcestruzzo.

4 CONCLUSIONI

L'intervento proposto nell'ambito della riparazione e del miglioramento di strutture prefabbricate danneggiate dal sisma risulta, pertanto, di sicura efficacia, grazie alla innovatività dei materiali utilizzati, e di rapida e semplice esecuzione. Grazie a tale intervento, infatti, è possibile rinforzare il pilastro sia dal punto di vista pressoflessionale che tagliante, oltre a conferire allo stesso un'elevata duttilità. La possibilità di non aumentare gli spessori degli elementi coinvolti, per di più, rende questo intervento ottimale nelle situazioni in cui si hanno problemi di spazio.

Per onestà scientifica, va comunque ricordato che tale intervento tuttavia è efficace solo nel caso in cui sia necessario incrementare il materiale resistente a trazione, in quanto per sezioni geometricamente inadeguate è necessario provvedere con altri tipi di interventi quali possono essere ringrossi o calastrellatura.

BIBLIOGRAFIA

Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (2009) "Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP".

Ministero delle Infrastrutture (2008) "Norme Tecniche per le Costruzioni".