

# Cyclic behavior of RC columns repaired with HPFRC jackets

## Comportamento ciclico di pilastri in c.a. rinforzati con camicie in HPFRC

F. Di Carlo<sup>1</sup>, A. Meda<sup>1</sup>, Z. Rinaldi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Civil Engineering and Computer Science Engineering, University of Rome "Tor Vergata", Rome, Italy*

**ABSTRACT:** One of the main causes of concern for reinforced concrete structures consists in the reduction of durability caused by the possible reinforcement corrosion phenomena. Strain localizations, variations of strength distribution and rotation capacity can furthermore significantly affect the bearing capacity in case of a seismic event. An innovative technique for repairing and strengthening of damaged RC columns consists in the adoption of jackets in HPFRC. The paper aims to investigate the behaviour of strengthened elements, either undamaged or corroded, subjected to cyclic loads, by means of performing nonlinear numerical analyses. The corrosion phenomenon is accounted for with variations of the bar mechanical properties. A comparison with the experimental outcomes of full-scale tests carried out at the University of Bergamo has allowed to highlight the validity of the model and to underline the effectiveness of the analysed strengthening technique. / Una delle principali cause di preoccupazione per le strutture in calcestruzzo armato consiste nella riduzione di durabilità a causa dei possibili fenomeni di corrosione delle barre di armatura. Localizzazioni di deformazioni, variazioni di resistenza e capacità rotazionale possono inoltre influenzarne significativamente la capacità portante in caso di evento sismico. Una tecnica innovativa di riparazione e rinforzo di pilastri in c.a. danneggiati consiste nell'adozione di camicie in HPFRC. Lo scopo dello studio è quello di investigare il comportamento di elementi rinforzati, non danneggiati o corrosi, soggetti a carichi ciclici, attraverso l'esecuzione di analisi numeriche non lineari. Il fenomeno corrosivo è stato simulato attraverso una variazione delle proprietà meccaniche delle barre di armatura. Un confronto con i risultati delle prove sperimentali in scala reale effettuate presso i laboratori dell'Università di Bergamo ha permesso di mettere in luce la validità del modello realizzato e di rimarcare l'efficacia della tecnica di rinforzo analizzata.

**KEYWORDS:** reinforcement corrosion; RC columns; cyclic behavior; numerical analyses; high performance fiber reinforced concrete; jacketing / corrosione; pilastri in c.a.; comportamento ciclico; analisi numeriche; calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni; camicia

### 1 INTRODUZIONE

La riduzione di vita utile dovuta a fenomeni di corrosione delle barre di armatura è causa di preoccupazione per numerose strutture in cemento armato, soprattutto se realizzate con calcestruzzi di scarsa qualità. Gli effetti strutturali della corrosione sono molteplici e ben noti. Possono verificarsi una riduzione di sezione resistente delle barre d'armatura e una significativa riduzione di duttilità delle barre (Cairns et al. 2005; Imperatore & Rinaldi 2008), e quindi di duttilità locale dell'elemento. La corrosione può inoltre causare fessurazione, localizzazioni di tensioni ed influenzare il comportamento d'aderenza (Almusallam et al., 1996; Coronelli, 2002; Prieto et al., 2011, Coccia et al., 2016).

Di conseguenza, il comportamento sismico di una struttura degradata può essere ben diverso da quanto atteso, poiché, a causa della corrosione, possono generarsi pericolosi fenomeni di localizzazione delle

deformazioni, tali da indurre variazioni delle modalità di rottura (Meda et al. 2014a; Meda et al. 2014b; Di Carlo et al. 2015).

Interventi di riparazione si rendono quindi necessari per queste strutture, con lo scopo di ripristinare la capacità portante originaria e di assicurare una adeguata durabilità. Numerose ricerche sono state condotte negli ultimi anni per investigare la possibilità di utilizzare calcestruzzi fibrorinforzati ad alte prestazioni (HPFRC) per il rinforzo di strutture in c.a. (Marini & Meda 2009; Martinola et al. 2007, Martinola et al. 2010; Preti & Meda 2013; Kobayashi & Rokugo 2013; Massicotte & Boucher-Proulx 2013; Meda et al. 2014). L'efficacia dell'applicazione di camicie in HPFRC per la riparazione di pilastri e travi d'angolo esistenti viene mostrata in Beschi et al. (2011) ed in Beschi et al. (2015). La possibilità di utilizzare la tecnica in esame su pilastri in c.a. corrosi è stata affrontata in Meda et al. (2015). Per questo tipo di strutture, infatti, la riduzione della capacità portante a causa

dell'uso di materiali di scarsa qualità e della corrosione delle barre di armature può comportare seria preoccupazione.

Scopo del lavoro è la valutazione del comportamento strutturale di pilastri in c.a., non danneggiati o corrosi (denominati nel seguito UC e CC), rinforzati con tale tecnica innovativa e soggetti a carichi ciclici, adottando un approccio di tipo numerico. Una notevole attenzione è posta nella definizione del modello tridimensionale e nella simulazione della corrosione delle barre di armatura, attraverso una variazione del legame costitutivo dell'acciaio (Imperatore & Rinaldi 2008; Imperatore et al. 2016).

Il modello numerico è sviluppato e validato con esplicito riferimento ai risultati di prove sperimentali cicliche in scala reale effettuate presso l'Università di Bergamo su pilastri soggetti artificialmente a corrosione delle armature e successivamente riparati con l'utilizzo di una camicia in calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni (Meda et al. 2015).

## 2 PROVE SPERIMENTALI

La valutazione sperimentale del comportamento ciclico di un pilastro in scala reale con armatura corrosa, riparato con una camicia in HPFRC, è stata eseguita presso l'Università di Bergamo e descritta in Meda et al. (2015). In particolare è stato realizzato un pilastro di altezza pari a 1.80 m, con sezione quadrata di lato 300 mm, armato con 4 barre  $\varnothing 16$  mm e staffe  $\varnothing 8$  mm poste ad interasse pari a 300 mm (Fig. 1). Nella zona di applicazione del carico orizzontale, ad una quota di 1.50 m dall'estradosso della fondazione, l'interasse delle staffe è ridotto a 100 mm. L'elemento è realizzato su una fondazione di dimensioni pari a 1.3 m x 0.6 m x 0.5 m, armata simmetricamente con 4 barre  $\varnothing 20$ . La gabbia di armatura completa è mostrata in Figura 1.

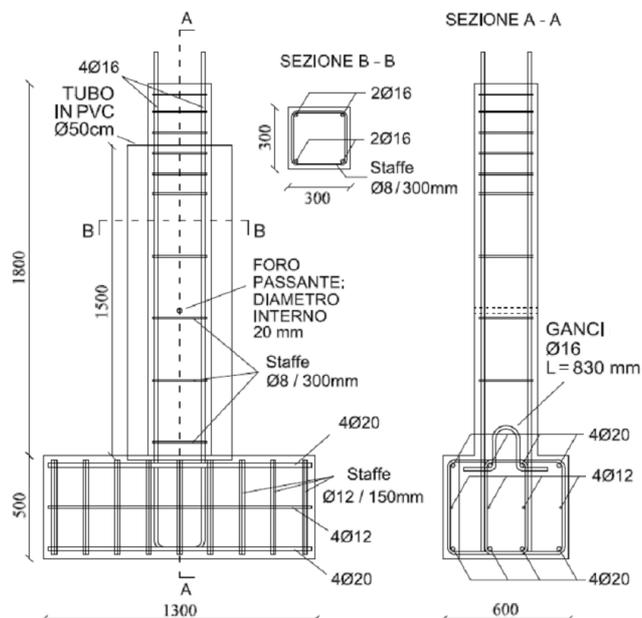


Figure 1. Column geometry / Geometria del pilastro.

Sono stati adottati un calcestruzzo avente resistenza cubica media pari a 20 MPa, tipico delle costruzioni anni '60-'70 in Italia ed un acciaio classificabile come B500C, con resistenze medie di snervamento e ultima pari rispettivamente a 520 MPa e 620 MPa. Le barre longitudinali sono state quindi sottoposte ad una corrosione artificiale al fine di ottenere una perdita di massa pari a circa il 20%. L'armatura trasversale, opportunamente protetta, non è stata soggetta a corrosione. Ulteriori dettagli sulla modalità di conferimento della corrosione possono essere trovati in Meda et al. (2015). Successivamente, sono state eseguite una serie di operazioni necessarie per l'applicazione della camicia in HPFRC al pilastro in c.a. Lo spessore di copriferro deteriorato in corrispondenza delle quattro barre longitudinali è stato rimosso e le armature sono state pulite manualmente al fine di eliminare i prodotti della corrosione. Per garantire una idonea connessione della camicia con la fondazione è stata realizzata una tasca di 80 mm. Una sabbiatura della superficie laterale del pilastro è stata quindi eseguita per assicurare una adeguata adesione tra il calcestruzzo del supporto e la camicia in HPFRC. Infine è stata realizzata una camicia di spessore 40 mm con un calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni caratterizzato da una resistenza cubica media a compressione pari a 130 MPa e da una resistenza monoassiale a trazione di circa 6 MPa. Il carico flessionale misurato su travette è pari a circa 42 kN (tensione nominale 12.6 MPa). Le fibre utilizzate sono di tipo rettilineo in acciaio, con una lunghezza di 15 mm, un diametro di 0.175 mm ed un contenuto in volume dell'1.2%.

Il set-up di prova è rappresentato in Figura 2, insieme alla storia di carico ciclico assegnata. Una

forza orizzontale è stata impressa al pilastro, ad una quota pari a 1.50 m dallo spiccatto di fondazione, attraverso un martinetto elettromeccanico da 500 kN, in presenza di un carico assiale costante pari a 400 kN. Gli spostamenti sono misurati con un sistema di trasduttori e di LVDTs.

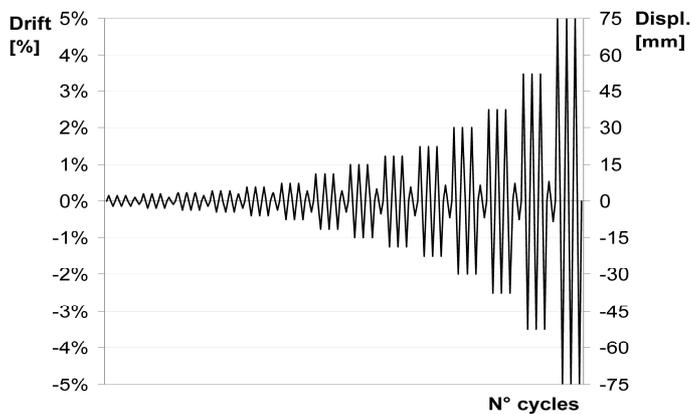
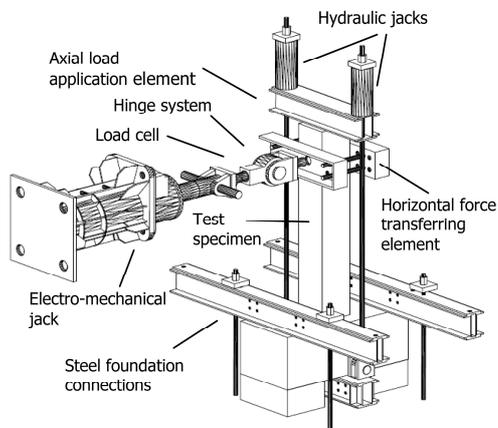


Figure 2. Test set-up and load cycles / Set-up di prova e cicli di carico.

I risultati ottenuti sono mostrati in Figura 3 attraverso un diagramma carico ( $F$ ) - drift ( $\delta/h$ ), essendo  $\delta$  lo spostamento del punto di applicazione del carico orizzontale e  $h$  l'altezza del pilastro. Il massimo carico positivo registrato è pari a circa 86 kN per un drift dello 0.75%, mentre il carico massimo negativo è pari a circa 100 kN per un drift dell'1%. Nei cicli successivi si evidenzia una significativa riduzione della resistenza dell'elemento. A partire da un valore di drift pari allo 0.75% sono stati registrati una stabilizzazione dello sviluppo delle fessure nella camicia esterna e l'innesco di un danneggiamento locale della camicia in HPFRC nella sezione di interfaccia tra pilastro ed estradosso fondazione. In particolare, si è verificato un graduale distacco della camicia in calcestruzzo fibrorinforzato dalla base della fondazione, nel caso di drift positivo, con un conseguente pinching dei cicli carico-spostamento per valori del drift maggiori dell'1.5%.

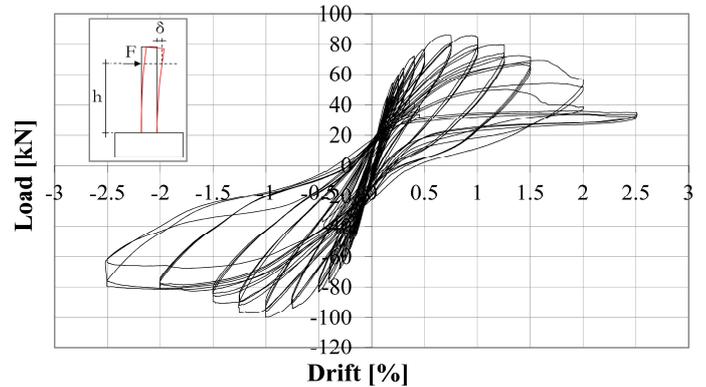


Figure 3. Experimental results: Load – drift diagram / Risultati sperimentali: diagramma carico-drift.

### 3 MODELLO NUMERICO

Il comportamento ciclico dell'elemento, non corroso o corroso, rinforzato con la camicia in HPFRC è stato indagato tramite analisi numeriche non lineari, mediante il software agli elementi finiti TNO Diana (2005). La geometria del campione, le condizioni di vincolo, le proprietà dei materiali e gli schemi di carico sono stati assunti in accordo con Meda et al. (2015), Di Carlo et. al (2015 e 2016), al fine di calibrare e validare la risposta dell'elemento.

#### 3.1 Mesh, condizioni di vincolo e di carico

La geometria del modello numerico, con riferimento agli elementi di calcestruzzo e all'armatura longitudinale e trasversale, è rappresentata in Figura 4. La struttura è stata modellata con elementi solidi di tipo brick a otto nodi (HX24L), mentre l'armatura è definita come elemento monodimensionale a due nodi. La mesh utilizzata per la discretizzazione del pilastro è cubica di lato pari a 5 cm. Per la struttura di fondazione è stata scelta una mesh meno fitta, di tipo parallelepipedo, con dimensione caratteristica pari a 10 cm.

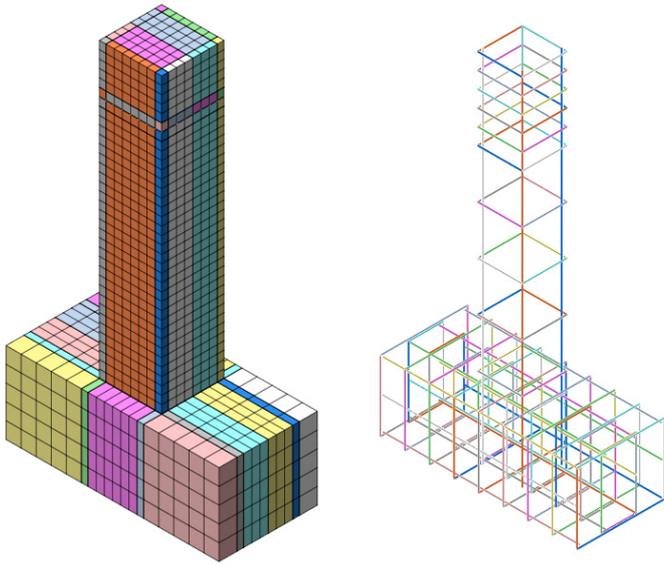


Figure 4. Geometry of the numerical model / Geometria del modello numerico.

Particolare attenzione è stata posta nella riproduzione dello schema di vincolo sperimentale. Con riferimento al sistema x-y-z mostrato in Figura 5 i seguenti spostamenti sono stati impediti: gli spostamenti lungo la direzione z di tutti i nodi della base; gli spostamenti lungo y di tutti i nodi del piano  $y=0$ ; gli spostamenti lungo x dei nodi delle due linee verticali centrali delle sezioni di estremità della fondazione. Infine, a tutti i nodi della sezione trasversale posta alla quota di applicazione del carico orizzontale è stata assegnata una proprietà di piano rigido, imponendo l'uguaglianza degli spostamenti lungo la direzione x, attraverso una relazione di tipo master-slave (Fig. 5).

L'analisi è stata condotta in controllo di spostamento. In una prima fase è stato applicato il peso proprio dell'elemento strutturale e l'azione assiale presente nella sezione di sommità del pilastro, pari a 400 kN, attraverso quattro step di carico. Successivamente è stata imposta a tutti i punti posti a quota 1.50 m la storia temporale ciclica di spostamenti orizzontali, di ampiezza crescente fino a rottura, applicata sperimentalmente (Fig. 2).

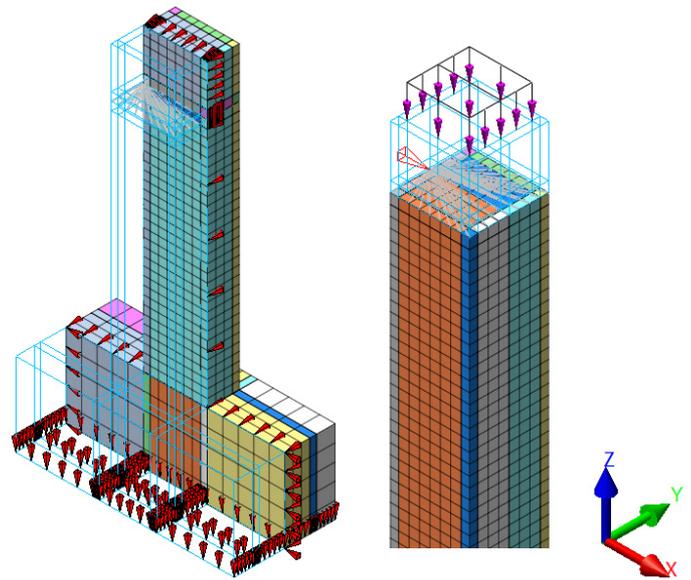


Figure 5. Boundary and load conditions / Schema di vincolo e condizione di carico.

### 3.2 Legame costitutivo del calcestruzzo

Il calcestruzzo è stato modellato con un legame costitutivo “*Total strain rotating crack model*”. Il comportamento in compressione è stato simulato con il modello proposto da Mander et al. (1988), con parametri definiti in accordo ai risultati sperimentali. In particolare, il modulo elastico di Young e la resistenza a compressione sono stati rispettivamente assunti pari a 25250 MPa e 19 MPa. Per il ramo in trazione è stata adottata la funzione di softening proposta da (Hordijk 1986; Cornelissen et al. 1991), basata sui valori di resistenza a trazione e dell'energia di frattura, posti rispettivamente pari a 1.49 MPa e 0.124 MPa, in accordo alle indicazioni del Fib Model Code 2010 (2013).

### 3.3 Legame costitutivo del calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni

Il calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni è stato modellato con un legame costitutivo “*Total strain rotating crack model*”. Per il ramo in compressione è stata implementata una legge multilineare caratterizzata da un modulo di Young pari a 45078 MPa e da una resistenza di picco pari a 109 MPa. Il comportamento a trazione è stato modellato con una legge multilineare, definita in accordo con i risultati delle prove di trazione monoassiale eseguite (Meda et al. 2015), come mostrato in Figura 6.

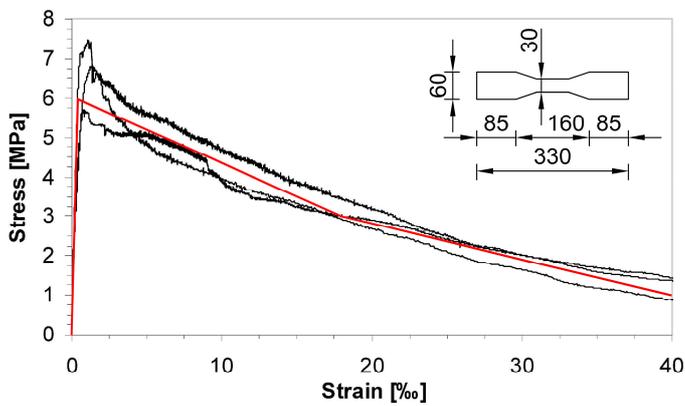


Figure 6. Uniaxial tensile law adopted for HPFRC (Meda et al. 2015) / Legge costitutiva monoassiale adottata per il materiale HPFRC (Meda et al. 2015).

### 3.4 Legame costitutivo dell'acciaio

Le barre di armatura sono state modellate con elementi di tipo “*embedded reinforcement*”, utilizzando il legame costitutivo ciclico proposto da Monti & Nuti (1992). In particolare è stata implementata una legge di incrudimento di tipo misto cinematico e isotropo, caratterizzata dai seguenti parametri: modulo elastico  $E$ ; tensione di snervamento iniziale  $\sigma_y^o$ ; pendenza del ramo di primo incrudimento  $b^o$ ; parametro di curvatura iniziale  $R^o$ ; due costanti del materiale  $A_1$  e  $A_2$ ; coefficiente di peso  $P$ . Il comportamento delle barre longitudinali corrose è stato simulato come proposto in (Imperatore & Rinaldi 2008; Imperatore et al. 2016), attraverso variazione del legame costitutivo dell'acciaio in funzione della percentuale di corrosione, mantenendo la sezione nominale della barra stessa.

Nel presente lavoro, in accordo con Monti & Nuti (1992) e Dhakal & Maekawa (2002), il peso  $P$  è stato assunto pari a 0.9, la curvatura iniziale  $R^o$  pari a 20 ed i coefficienti  $A_1$  e  $A_2$  pari rispettivamente a 18.5 e  $1e-5$ . Riguardo i valori della tensione di snervamento iniziale  $\sigma_y^o$  e della pendenza del ramo di primo incrudimento  $b^o$ , sono stati utilizzati i valori misurati, essendo disponibili i risultati delle prove sperimentali di trazione effettuate sulle barre non corrose UC e corrose CC (Fig. 7 e Tab. 1).

Appare opportuno ricordare che le staffe non presentano degrado da corrosione (essendo state trattate con vernici antiruggine) e sono state modellate con riferimento alle proprietà meccaniche misurate sperimentalmente per le barre non corrose.

Table 1. Parameters for the steel constitutive relationship / Parametri del legame delle barre di armatura.

Tipologia	$f_{yd}$ [MPa]	$b^o$
Non Corrosa (UC)	521	0.0050
Corrosa (CC)	270	0.0086

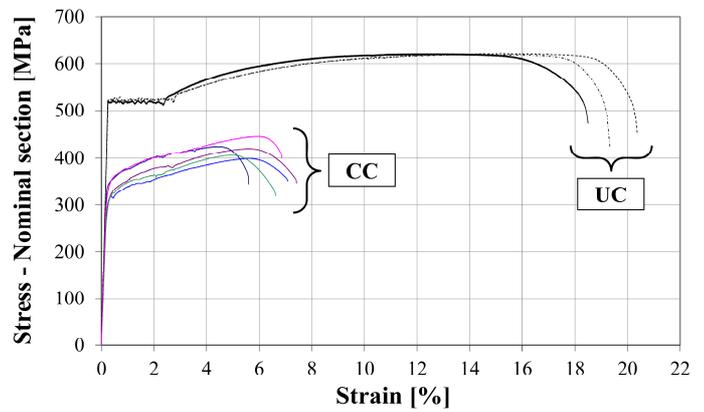


Figure 7. Experimental results on steel rebars (Meda et al. 2015) / Risultati sperimentali delle barre di acciaio (Meda et al. 2015).

## 4 RISULTATI MODELLAZIONE NUMERICA

### 4.1 Pilastro con camicia in HPFRC

Il primo passo della modellazione numerica è rappresentato dall'analisi del comportamento ciclico di un pilastro in c.a. integro, non soggetto a corrosione, rinforzato con una camicia in calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni.

È importante sottolineare che in questo caso, per la modellazione delle barre in acciaio longitudinale, si è fatto riferimento al legame costitutivo delle barre non corrose.

La risposta totale del pilastro è mostrata in termini di diagramma carico-drift in Figura 8 ed il carico massimo è pari a circa 125 kN.

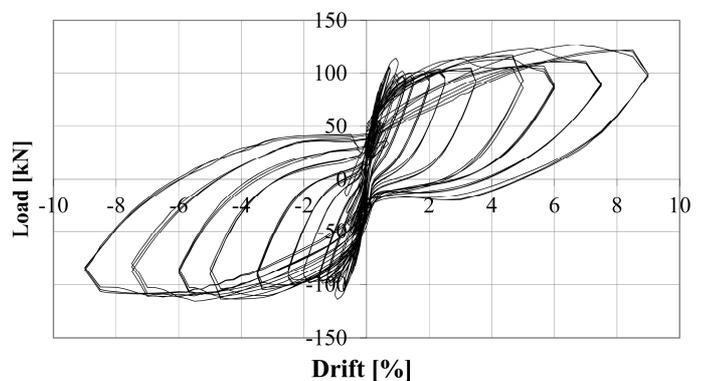


Figure 8. Numerical response of the un-corroded column repaired with the HPFRC jacket / Risposta numerica del pilastro non corroso rinforzato con la camicia in HPFRC

Per maggiore chiarezza, sono inoltre riportati, nelle successive figure, i diagrammi carico-spostamento relativi a diversi cicli di carico intermedi. In particolare nelle Figure 9, 10 e 11 e 12 è illustrato il comportamento ciclico relativo a drifts pari allo 0.15%, 1.25%, 5% e 9%.

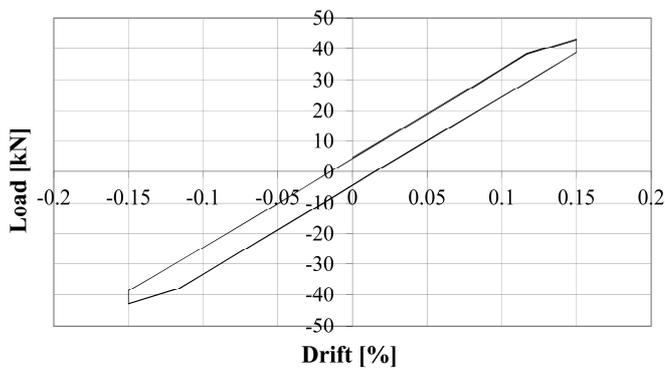


Figure 9. Comparison between experimental and numerical responses for drift equal to 0.15% / Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari allo 0.15%

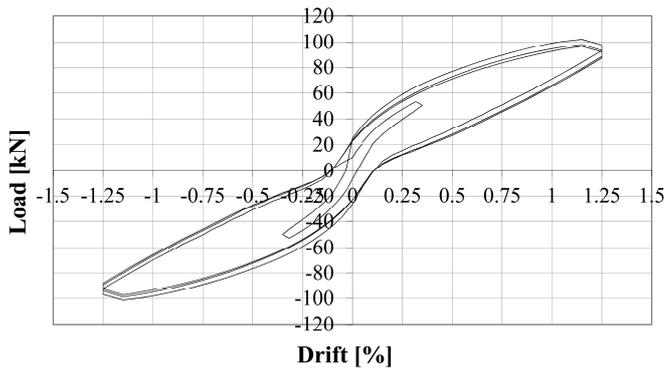


Figure 10. Comparison between experimental and numerical responses for drift equal to 1.25% / Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari allo 1.25%

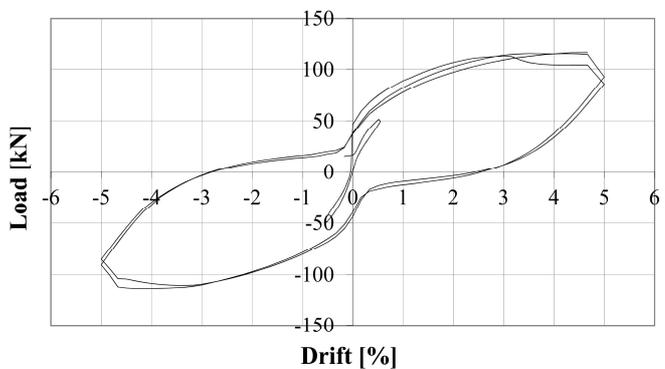


Figure 11. Comparison between experimental and numerical responses for drift equal to 5% / Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari al 5%

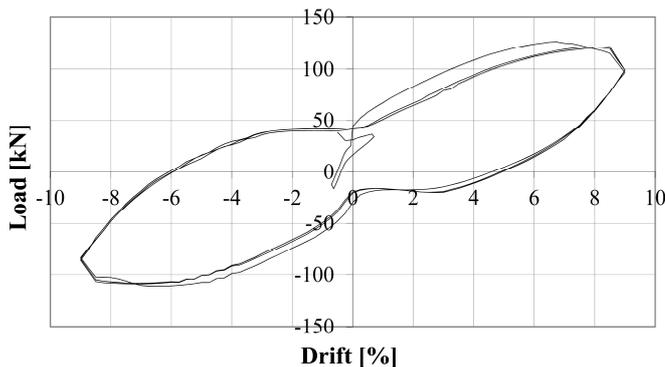


Figure 12. Comparison between experimental and numerical responses for drift equal to 9% / Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari al 9%

#### 4.2 Pilastro corroso con camicia in HPFRC

La risposta totale del pilastro corroso rinforzato con la camicia in HPFRC è mostrata in termini di diagramma carico-drift in Figura 13. Il carico massimo, per entrambi i casi di drift positivo e negativo, è pari a circa 95 kN.

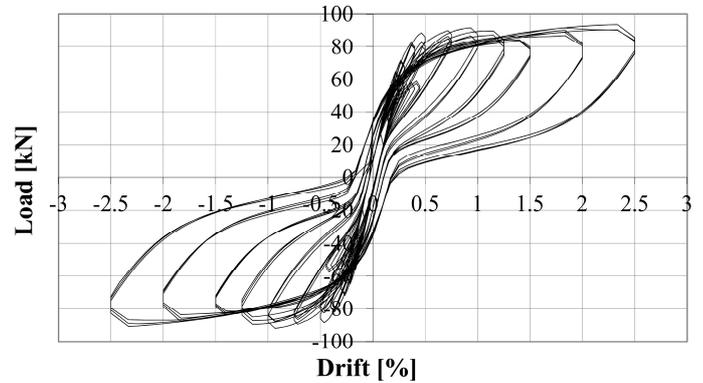


Figure 13. Numerical response of the corroded column repaired with the HPFRC jacket / Risposta numerica del pilastro corroso rinforzato con la camicia in HPFRC

L'efficacia della modellazione è evidenziata nelle figure successive, in cui sono sovrapposti i diagrammi carico-spostamento, relativi a diversi cicli di carico intermedi, e posti a confronto con gli analoghi misurati sperimentalmente. In particolare nelle Figure 14, 15 e 16 e 17 è illustrato il comportamento ciclico relativo a drifts pari allo 0.15%, 1.25, 2% e 2.5%.

Infine in Figura 18 le risposte cicliche sperimentale e numerica sono sovrapposte per l'intera storia di carico. Il confronto evidenzia la correttezza e l'accuratezza del modello numerico, in grado di simulare correttamente ciascun ciclo di carico, sia in termini di resistenza che di rigidità ed in grado di cogliere i fenomeni principali che governano il problema oggetto di studio.

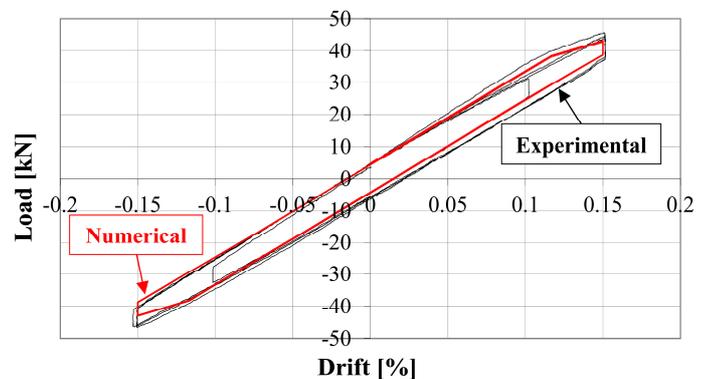


Figure 14. Comparison between experimental and numerical responses for drift equal to 0.15% / Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari allo 0.15%

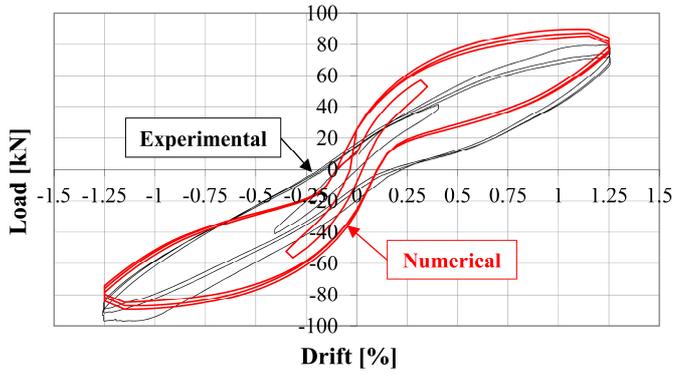


Figure 15. Comparison between experimental and numerical responses for drift equal to 1.25% / Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari allo 1.25%

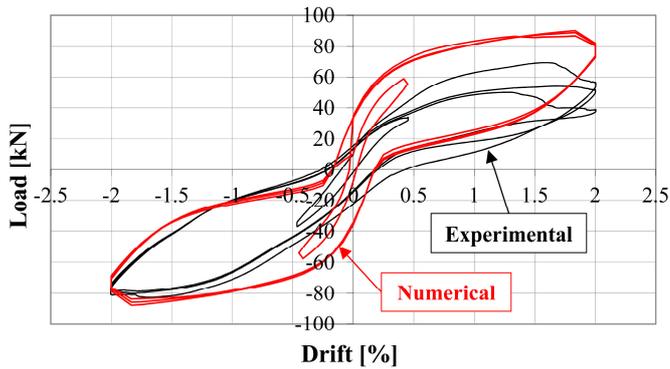


Figure 16. Comparison between experimental and numerical responses for drift equal to 2% / Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari allo 2%

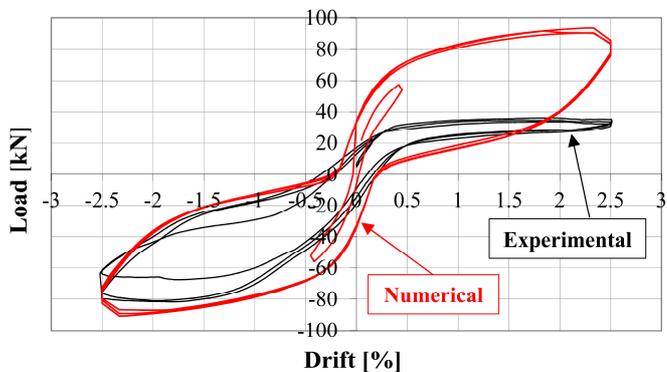


Figure 17. Comparison between experimental and numerical responses for drift equal to 2.5% / Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari allo 2.5%

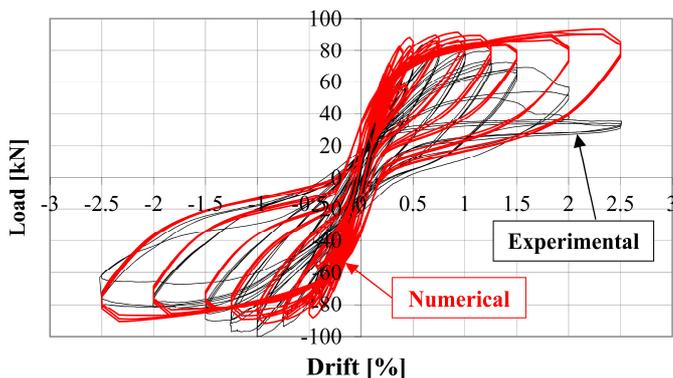


Figure 18. Comparison between experimental and numerical responses for drift equal to 2.5% / Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari allo 2.5%

## CONCLUSIONI

A numerical model for the evaluation of the cyclic response of RC columns subjected or not to rebar corrosion and repaired with a high performance fiber reinforced concrete jacket is developed and discussed in the paper. This innovative intervention technique allows repairing and strengthening the damaged element, restoring its original bearing capacity and increasing its durability.

Numerical analyses have been performed by using the FEM software Diana in order to simulate their cyclic behavior, taking into account the corrosion phenomenon through a variation of the steel constitutive relationship of the reinforcement.

The obtained results have shown the effectiveness of the numerical model in evaluating the response of the repaired RC column, expressed through a load-drift diagram, both in terms of strength and stiffness. Figure 19 shows a superimposition of the experimental and numerical responses of the un-corroded and corroded columns, repaired with the HPFRC jacket. For both elements, an increment of both maximum drift and maximum load is obtained.

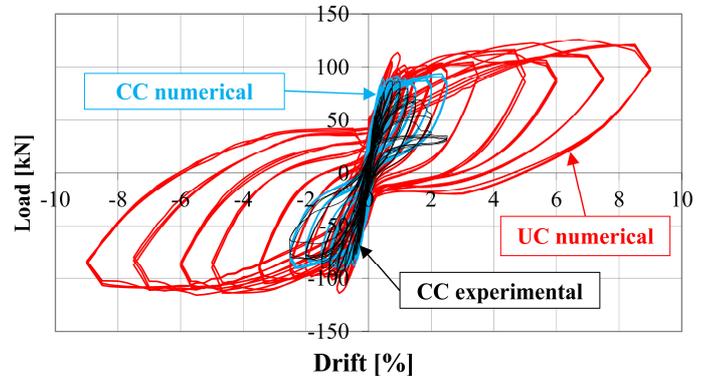


Figure 19. Comparison between responses of the un-corroded and corroded columns repaired with the HPFRC jacket (experimental and numerical) / Sovrapposizione dei risultati dei pilastri, non corrosi e corrosi, rinforzati con la camicia in HPFRC (sperimentali e numerici).

Eventually, in the following figures, a comparison of the results obtained in the present paper is shown with the experimental and numerical responses of the corresponding un-repaired elements, for both un-corroded and corroded cases, reported in Di Carlo et al. (2015) and Di Carlo et al. (submitted). In particular, Figures 20 and 21 refer to the cases of un-corroded and corroded column, respectively. The

obtained results allow to remark the feasibility of using high performance fiber reinforced concrete jackets for strengthening un-corroded or corroded RC structures.

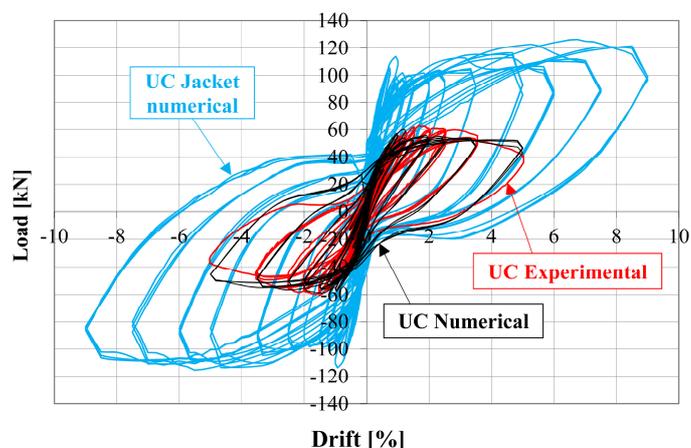


Figure 20. Comparison of the numerical response of the un-corroded column repaired with the HPFRC jacket with the experimental and numerical responses of the un-corroded element (Di Carlo et al. 2015; Di Carlo et al. submitted) / Confronto della risposta numerica del pilastro non corroso rinforzato con la camicia in HPFRC con le risposte sperimentale e numerica dell'elemento non corroso (Di Carlo et al. 2015; Di Carlo et al. submitted).

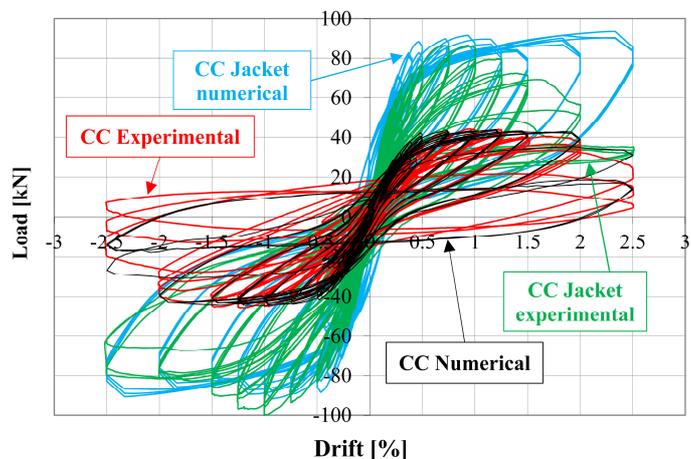


Figure 21. Comparison of the experimental and numerical responses of the corroded column repaired with the HPFRC jacket with the experimental and numerical responses of the corroded element (Di Carlo et al. 2015; Di Carlo et al. submitted) / Confronto delle risposte sperimentale e numerica del pilastro non corroso rinforzato con la camicia in HPFRC con le risposte sperimentale e numerica dell'elemento non corroso (Di Carlo et al. 2015; Di Carlo et al. submitted).

Nel presente lavoro è stato sviluppato e discusso un modello numerico per la valutazione della risposta ciclica di pilastri in c.a., soggetti o meno a corrosione delle barre longitudinali, rinforzati con camicie in calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni. Tale tecnica di intervento innovativa permette di riparare e rinforzare elementi danneggiati, ripristinandone le capacità portanti

originali ed allo stesso tempo incrementandone la durabilità.

Al fine di simulare opportunamente il loro comportamento ciclico, analisi numeriche non lineari sono state eseguite con l'ausilio del software agli elementi finiti Diana. Il fenomeno di corrosione delle barre longitudinali è stato modellato attraverso una variazione della legge costitutiva dell'acciaio.

I risultati ottenuti hanno evidenziato l'efficacia del modello numerico nella valutazione della risposta di pilastri in c.a. rinforzati con tale tecnica, espressa in termini di diagramma carico-drift, sia in termini di resistenza che di rigidità. In Figura 19 è mostrata una sovrapposizione dei risultati, sperimentali e numerici, dei pilastri, non corroso e corroso, rinforzati con la camicia in HPFRC. Per entrambi gli elementi si registra un incremento sia di drift che di carico massimo.

Infine, nelle figure successive, viene mostrato un confronto dei risultati ottenuti nel presente lavoro con le risposte sperimentali e numeriche dei corrispondenti pilastri non rinforzati, soggetti o meno a corrosione, riportati in Di Carlo et al. (2015) e Di Carlo et al. (submitted). In particolare, le Figure 20 e 21 si riferiscono rispettivamente ai casi di pilastro non corroso e corroso. I risultati ottenuti permettono di rimarcare la fattibilità dell'utilizzo di camicie in calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni per il rinforzo di strutture in c.a., soggette o meno a fenomeni di corrosione delle armature.

## RINGRAZIAMENTI

La ricerca presentata rientra nell'ambito delle attività ReLUIIS - "Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica", finanziate dal Dipartimento della Protezione Civile - Executive Project 2014-2016.

## REFERENCES

- Almusallam, A.A., Al-Gahtani, A.S., Aziz, A.R., Rasheeduzzafar 1996. Effect of reinforcement corrosion on bond strength. *Construction and Building Materials*, 10(2): 123-129.
- Beschi, C., Meda, A., Riva, P. 2011. Column and joint retrofitting with high performance fiber reinforced concrete jacketing. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(7): 989-1014.
- Beschi, C., Riva, P., Metelli, G., Meda, A. 2015. HPFRC Jacketing of non seismically detailed RC corner joints. *Journal of Earthquake Engineering*, 19(1): 25-47.
- Cairns, J., Plizzari, G.A., Du, Y., Law, D.W., Franzoni, C. 2005. Mechanical properties of corrosion-damaged reinforcement. *ACI Materials Journal*, 102(4): 256-264.

- Coccia, S., Imperatore, S., Rinaldi, Z. 2016. Influence of corrosion on the bond strength of steel rebars in concrete *Materials and Structures*, 49(1), 537-551.
- Cornelissen, H.A.W., Hordijk, D.A., Reinhardt, H.W. 1986. Experimental determination of crack softening characteristics of normalweight and lightweight concrete. *Heron*, 31(2): 45-56.
- Coronelli, D. 2002. Corrosion Cracking and Bond Strength Modeling for Corroded Bars in Reinforced Concrete. *ACI Structural Journal*, 99(3): 267-276.
- Dhakal, R.P., Maekawa, K. 2002. Path-dependent cyclic stress-strain relationship of reinforcing bar including buckling. *Engineering Structures*, 24(11): 1383-1396.
- Di Carlo, F., Meda, A., Rinaldi, Z. 2015. Influenza della corrosione sul comportamento ciclico di pilastri in c.a. *Proc. XVI Convegno Anidis*, L'Aquila 13-17 September 2015.
- Di Carlo, F., Meda, A., Rinaldi, Z., 2016. Numerical modelling of corroded RC columns repaired with high performance fiber reinforced concrete jacket. *Proc. CONSEC 2016*, Lecco, Italy, 12-14 September 2016.
- Di Carlo, F., Meda, A., Rinaldi, Z. Numerical evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns. *Submitted to Journal of Earthquake Engineering*.
- fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn (2013).
- Hordijk, D.A. 1991. Local approach to fatigue of concrete, *PhD thesis*, Delft University of Technology.
- Imperatore, S., Rinaldi, Z. 2008. Mechanical behaviour of corroded rebars and influence on the structural response of R/C elements. *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, Cape Town, South Africa, 24-26 November 2008. CRC Press, Balkema.
- Imperatore, S., Leonardi, A., Rinaldi, Z. 2016. Strength decay of RC sections for chloride attack. *International Journal of Structural Integrity*, 7(2): 194-212.
- Kobayashi, K., Rokugo, K. 2013. Mechanical performance of corroded RC member repaired by HPRFRC patching. *Construction and building materials*, 39: 139-147.
- Mander, J.B, Priestley, M.J.N., Park, R. 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8): 1804-1826.
- Marini, A., Meda, A. 2009. Retrofitting of R/C Shear Walls by means of High- Performance Jackets. *Engineering Structures*, 31(12): 3059-64.
- Martinola G., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z., 2007. An application of high performance fiber reinforced cementitious composites for R/C beams strengthening FraMCos-6. 6th Int. Conf. on Fracture Mechanics of concrete and concrete structures. Catania, 17-22 June. .Pp. 1541-1548
- Martinola, G., Meda, A., Plizzari, G.A., Rinaldi, Z. 2010. Strengthening and Repair of R/C Beams with Fibre-Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 32: 731-739.
- Massicotte, B., Boucher-Proulx, G. 2013. Seismic Retrofitting of Bridge Piers with UHPFRC Jackets. *Designing and Building with UHPFRC*.
- Meda, A., Mostosi, S., Rinaldi, Z., Riva, P. 2014a. Experimental evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of R.C. columns. *Engineering Structures* 76: 112-123.
- Meda, A., Mostosi, S., Riva, P. 2014b. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beam with High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite Jacketing. *ACI Structural Journal*, 111(5): 1059-1068.
- Meda, A., Mostosi, S., Rinaldi, Z., Riva, P. 2015. Corroded RC columns repair and strengthening with high performance fiber reinforced concrete jacket. *Materials and Structures*, 49(5): 1967-1978.
- Monti, G., Nuti, C. 1992. Nonlinear cyclic behavior of reinforcing bars including buckling. *Journal of Structural Engineering*, 118(12): 3268-3284.
- Preti, M., Meda, A. 2013. RC structural wall with unbonded tendons strengthened with high performance fiber-reinforced concrete. *Materials and Structures*, 48(1): 249-260.
- Prieto, M., Tanner, P., Andrade, C. 2011. Bond Response in Structural Concrete with Corroded Steel Bars. Experimental Results. *Modelling of Corroding Concrete Structures RILEM Bookseries*, 5: 231-241.