

Influenza della corrosione sul comportamento ciclico di pilastri in c.a.

Fabio Di Carlo, Alberto Meda, Zila Rinaldi

Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ingegneria Informatica, Università di Roma "Tor Vergata". Via del Politecnico 1, 00133 Roma

Keywords: corrosione, comportamento ciclico, modellazione numerica.

ABSTRACT

The analysis of structures damaged by seismic actions has shown how, very often, poor mechanical properties and lack of structural detailing are combined to the corrosion presence in the rebars. This phenomenon, main cause of degradation in r.c. structures in non exceptional conditions, can have significant effects on the seismic behaviour, leading to dangerous strain localizations and variations of strength distribution and rotation capacity. Aim of the present work is the numerical evaluation of the influence of the corrosion of steel rebars on the cyclic behaviour of r.c. columns. The corrosion phenomenon is simulated accounting for both the geometrical and mechanical variations of the bar properties, furthermore the steel rebar buckling is considered. The model is validated through a comparison with the results of experimental tests developed at the University of Bergamo, on full-scale elements. The comparative analysis highlights the effectiveness of the numerical model in simulating the experimental response.

1 INTRODUZIONE

La riduzione di vita utile dovuta a fenomeni di corrosione 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. Oltre alla ovvia riduzione di sezione resistente delle barre d'armatura, può verificarsi una significativa riduzione di duttilità delle barre (Cairns et al., 2005; Imperatore, Rinaldi, 2008), e quindi di duttilità locale dell'elemento. La formazione degli ossidi, inoltre, può causare fessurazione e localizzazione di tensioni, ed influenzare il comportamento d'aderenza (Almusallam et al., 1996; Coronelli, 2002; Prieto et al., 2011).

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.

Tale problematica, seppur di grande rilevanza, appare ancora non sufficientemente analizzata in letteratura tecnica. Molti studi sono oggi disponibili sul comportamento di elementi trave in c.a. o in precompresso, soggetti ad azioni

statiche (Rodriguez et al., 1996; Castel et al., 2000; Coronelli e Gambarova, 2004; Rinaldi et al., 2008; Rinaldi et al., 2010).

La previsione della capacità portante di elementi in cemento armato soggetti a corrosione delle barre di armatura è generalmente condotta con approcci semplificati, basati sulla riduzione dell'area di acciaio. Tali metodologie, seppur idonee alla determinazione del carico ultimo, possono essere non adatte, o addirittura fuorvianti nella definizione della duttilità locale e globale. Il comportamento ciclico di barre corrose è trattato in (Apostolopoulos, 2007; Hawileha Rami et al., 2011; Kashani et al., 2013). Un minor numero di studi è disponibile sul comportamento ciclico di elementi corrosi (Ou et al., 2012; Ma et al., 2012, Cardone et al., 2013; Meda et al., 2014).

Scopo del presente lavoro è la valutazione del comportamento strutturale di pilastri in c.a. con armatura corrosa, soggetti a carichi ciclici, attraverso modellazioni numeriche. Particolare cura è posta nella definizione del modello tridimensionale e nella simulazione della corrosione delle barre, attraverso la variazione del legame costitutivo dell'acciaio.

Il modello numerico è sviluppato, e quindi validato, con esplicito riferimento ai campioni sperimentati presso l'Università di Bergamo su

pilastri, in scala reale, soggetti a corrosione delle armature e a carichi ciclici (Meda et al., 2014).

2 PROVE SPERIMENTALI

La valutazione sperimentale del comportamento ciclico di un pilastro con armatura corrosa è stata eseguita presso l'Università di Bergamo (Meda et al., 2014). In particolare sono stati realizzati due pilastri di altezza pari a 1.8 m, caratterizzati da sezione quadrata (300x300mm²) e armati con 4 barre Ø16mm. Le armature trasversali sono costituite da staffe Ø8mm poste ad interasse pari a 300mm (Fig. 1). Nella zona di applicazione del carico orizzontale, ad una quota di 1.5 m dall'estradosso della fondazione, è presente un infittimento delle staffe con passo 10 cm. La fondazione presenta dimensioni pari a 1.3 m x 0.6 m x 0.5 m, ed è armata con 4 barre Ø20 superiori ed inferiori, 4 barre Ø12 di parete e staffe Ø12/15. La geometria ed i dettagli costruttivi dei pilastri sono mostrati in Figura 1. I materiali adottati sono tipici delle costruzioni anni '60-'70 in Italia, ossia calcestruzzo con resistenza cubica media pari a 20 MPa, e acciai classificabili come B500C, con resistenze medie di snervamento e ultima pari a 520 MPa e 620 MPa, rispettivamente. Un pilastro, denominato CC, è stato corroso artificialmente al fine di ottenere una perdita di massa pari a circa il 20% nelle barre longitudinali. L'armatura trasversale, opportunamente protetta, non è stata soggetta a corrosione. Il secondo campione, denominato UC è stato adottato come riferimento. Dettagli sulla modalità di conferimento della corrosione possono essere trovati in (Meda et al., 2014). A seguito della prova le barre estratte hanno mostrato, come atteso, una corrosione dell'ordine del 20% in perdita di massa con presenza di pitting.

Il set-up di prova è rappresentato in Figura 2, insieme alla storia di carico ciclico assegnata. Una forza orizzontale è stata impressa alla colonna, ad una quota pari a 1.5 m dallo spicco 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. I diagrammi carico-drift (definito come rapporto tra lo spostamento orizzontale del punto di applicazione del carico δ e l'altezza del

pilastro h ; $drift = \delta / h$) dei pilastri corroso e non corroso, misurati sperimentalmente, sono posti a confronto in Figura 3.

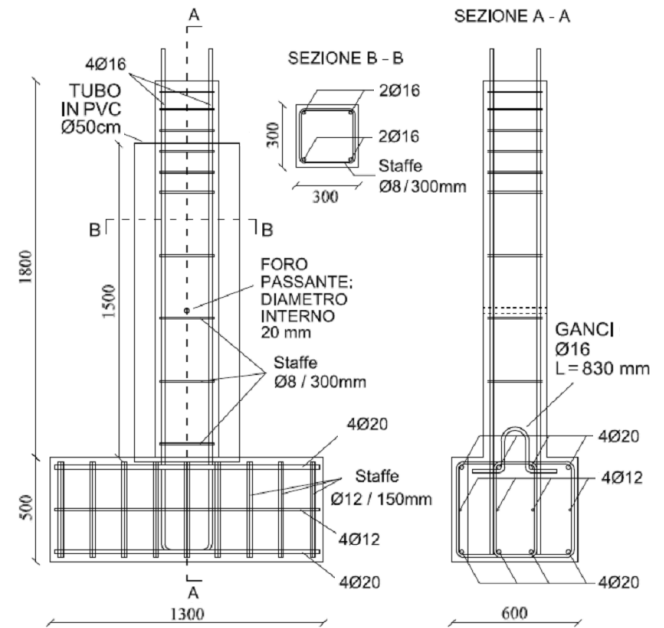


Figura 1. Geometria e dettagli costruttivi dei pilastri

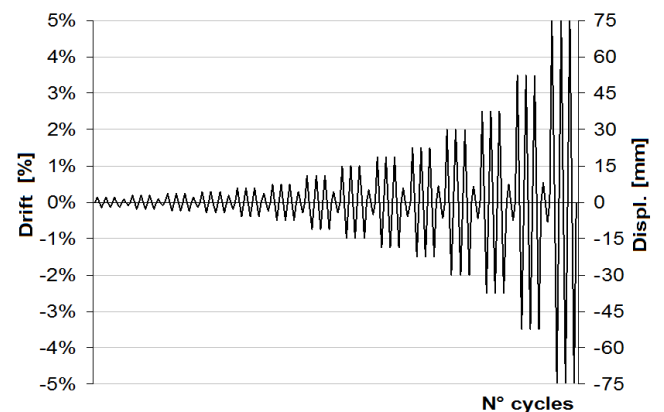
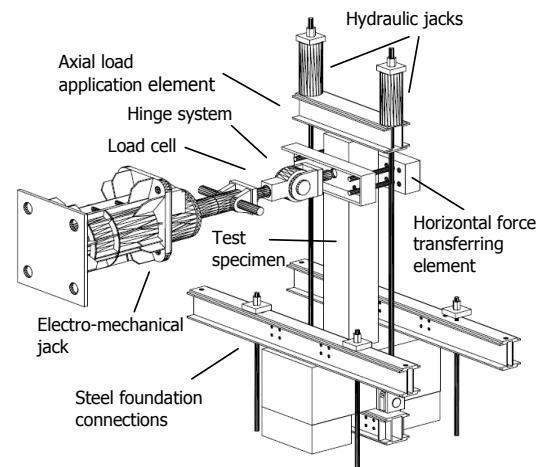


Figura 2. Set-up di prova e cicli di carico

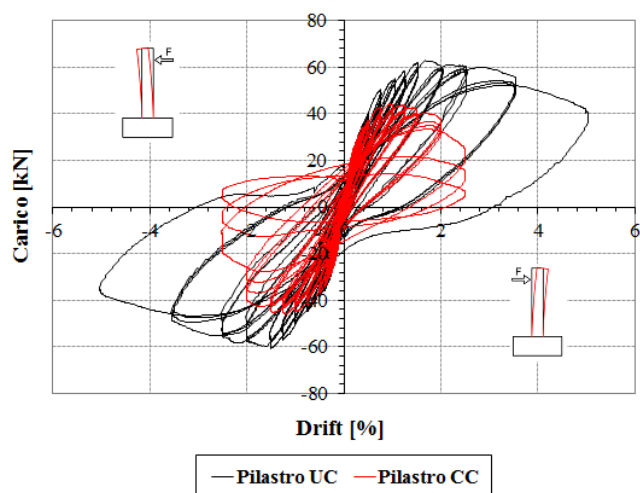


Figura 3. Risultati sperimentali pilastro non corrosivo UC e corrosivo CC

3 MODELLO NUMERICO

Il comportamento ciclico di pilastri in c.a. con barre di armature corrose è stato indagato tramite analisi numeriche non lineari, mediante il software agli elementi finiti TNO Diana (2005).

La geometria del modello, 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); l'armatura è definita come elemento monodimensionale a due nodi, ipotizzando la perfetta aderenza tra il calcestruzzo ed acciaio.

La mesh cubica utilizzata per la discretizzazione del pilastro presenta 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.

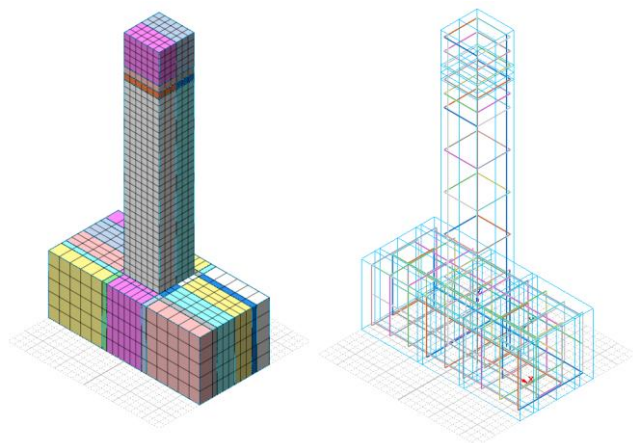


Figura 4. Geometria del modello numerico

Particolare attenzione è stata posta nel riprodurre lo schema di vincolo sperimentale. Sono stati, infatti, impediti (Fig. 5):

- gli spostamenti lungo la direzione z a tutti i nodi della base;
- gli spostamenti lungo y a tutti i nodi del piano $y = 0$;
- gli spostamenti lungo x ai 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 (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.

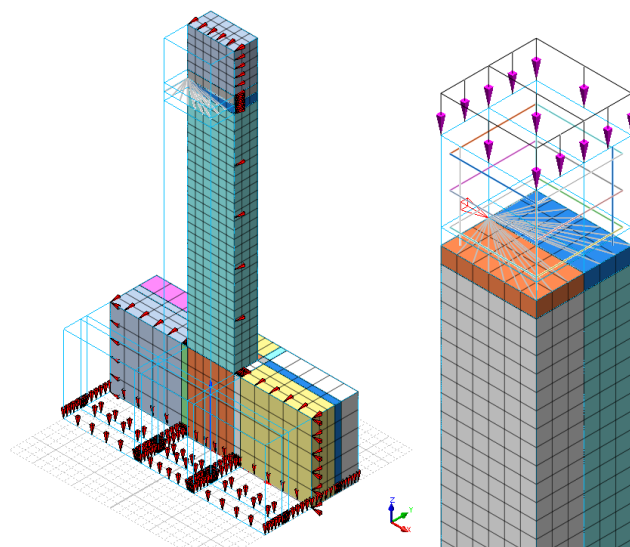


Figura 5. Schema di vincolo e condizione di carico

Successivamente è stata imposta a tutti i punti posti a quota 1.5 m la storia temporale ciclica di spostamenti orizzontali, di ampiezza crescente fino a rottura, applicata sperimentalmente (Fig. 2).

Il calcestruzzo è stato modellato con un legame costitutivo "*Total strain rotating crack model*". Il comportamento in compressione è stato simulato attraverso una funzione di tipo multilineare (Fig. 6), definita attraverso i parametri di modulo elastico di Young e di resistenza a compressione misurati sperimentalmente e pari rispettivamente a 25250 MPa e 19 MPa. Per il ramo in trazione è stata adottata la funzione di softening proposta da

Hordijk et al. (1986), basata sui valori di resistenza a trazione e dell'energia di frattura (Fig. 7), posti rispettivamente pari a 1.49 MPa e 0.124 MPa, in accordo alle indicazioni del Fib Model Code 2010 (2013).

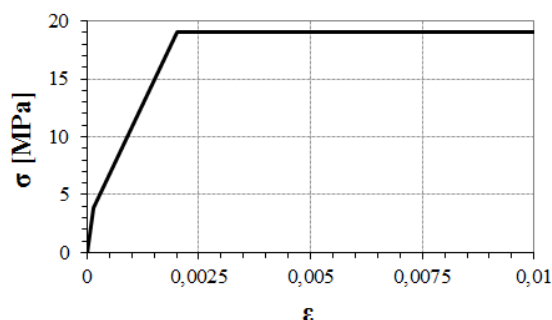


Figura 6. Legame costitutivo del calcestruzzo in compressione

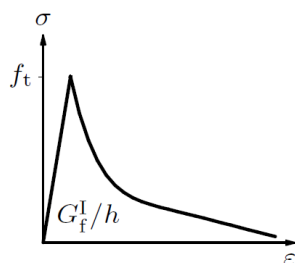


Figura 7. Legame costitutivo del calcestruzzo in trazione

Le barre di armatura sono state modellate con elementi di tipo “*embedded reinforcement*”, utilizzando il legame costitutivo ciclico proposto da (Monti e Nuti, 1992), al fine di tener conto dei fenomeni di instabilità che si generano in campo plastico, evidenziati dalle risultanze sperimentali. È stata implementata una legge di incrudimento di tipo misto cinematico e isotropo, caratterizzata dai seguenti parametri:

- peso $P = 0.9$;
- parametro di curvatura iniziale $R_o = 20$;
- coefficiente $a_1 = 18.5$;
- coefficiente $a_2 = 1e^{-0.5}$.

Nel caso di modellazione del pilastro non corrosivo i valori della tensione di snervamento e della pendenza del ramo di primo incrudimento b^o sono stati fissati in accordo con i risultati delle prove di trazione effettuate sui campioni non corrosivi (Fig. 8), come mostrato in Tabella 1.

Il comportamento delle barre longitudinali corrosive è stato simulato come proposto in (Imperatore et al., 2010), attraverso variazione del legame costitutivo dell'acciaio, mantenendo la sezione nominale della barra stessa. In particolare, nello specifico caso analizzato,

disponendo dei risultati sperimentali delle prove di trazione sulle barre corrosive (Fig. 7), sono stati utilizzati i valori della tensione di snervamento e della pendenza del ramo di primo incrudimento b^o misurati e riportati in Tabella 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 in entrambi i casi di modello non corrosivo e corrosivo.

Tabella 1. Parametri del legame delle barre di armatura

Tipologia	f_{yd} [MPa]	b^o
Non Corrosa	521	0.0050
Corrosa	270	0.0086

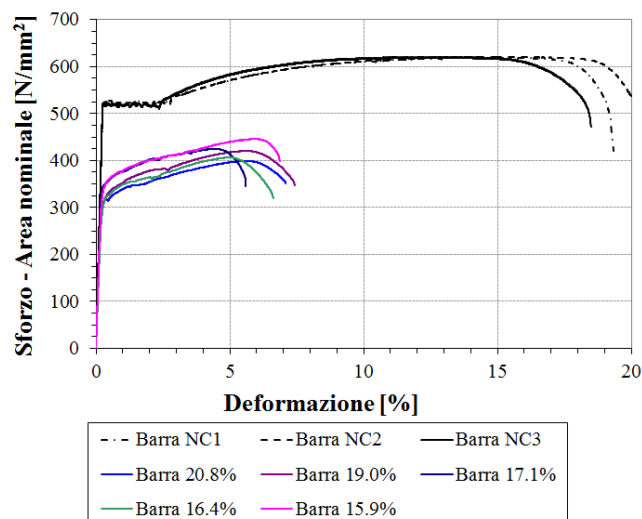


Figura 8. Curva tensione nominale – deformazione delle barre

4 RISULTATI

4.1 Modello pilastro non corrosivo

La risposta totale del pilastro, in termini di diagrammi forza-spostamento, è riportata in Figura 9. La condizione ultima è relativa ad un drift pari al 5% (valore di rottura sperimentale). Per maggiore chiarezza, sono inoltre riportati, nelle successive figure, i diagrammi carico-spostamento, relativi a diversi cicli di carico intermedi, e posti a confronto con gli analoghi misurati sperimentalmente. In particolare nelle Figure 10, 11 e 12 è illustrato il comportamento ciclico relativo a drift pari allo 0.3%, 1.25 e 5%.

In Figura 13 la risposta ciclica sperimentale e numerica sono sovrapposte per l'intera storia di carico.

Il confronto evidenzia la correttezza del modello numerico, in grado di simulare correttamente ciascun ciclo di carico, sia in termini di resistenza che di rigidezza.

Appare, però, utile evidenziare la necessità di utilizzare un modello che tenga conto della instabilità delle barre di acciaio (fenomeno verificatosi sperimentalmente), al fine di cogliere la forma di danneggiamento che appare per cicli con drift superiori al 2-2.5%, chiaramente evidenziate dal “pinching” delle curve sia sperimentali che numeriche.

Globalmente il pilastro presenta un comportamento ciclico caratterizzato da una graduale riduzione di resistenza e rigidezza al crescere dei cicli. Per drift pari al 3.5%, la riduzione di forza è dell'ordine del 12%. Nell'ultimo ciclo (drift pari a 5%) il carico ultimo risulta pari a circa il 64% del carico massimo.

L'energia dissipata in ogni ciclo è rappresentata in Figura 14 in forma adimensionale rispetto all'energia elastica, definita come prodotto della forza massima (F_{max}) e del relativo spostamento massimo (δ_{max}). Tale parametro, assunto come indice di danno, appare praticamente costante (pari a circa 0.4) fino a drift dell'ordine dell'1.5%. Per valori maggiori si verifica un incremento di dissipazione di energia, a causa del completo snervamento delle barre di armatura.

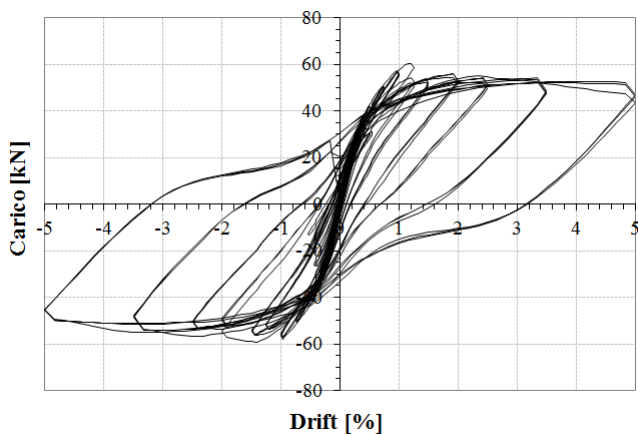


Figura 9. Risultato numerico pilastro non corrosivo UC

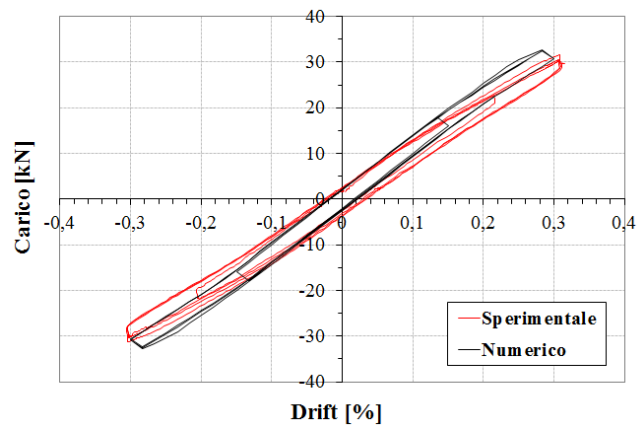


Figura 10. Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari allo 0.3%

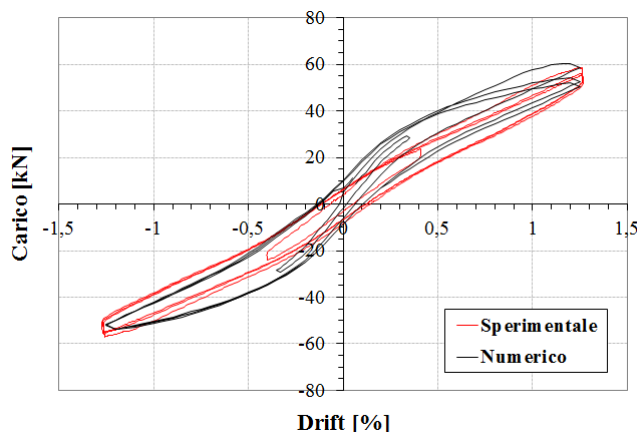


Figura 11. Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari a 1.25%

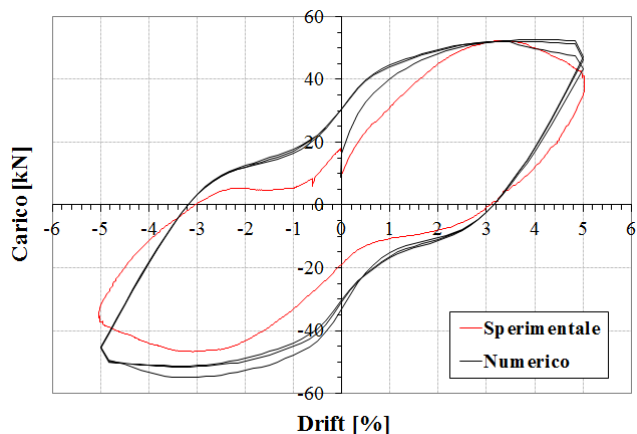


Figura 12. Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari al 5%

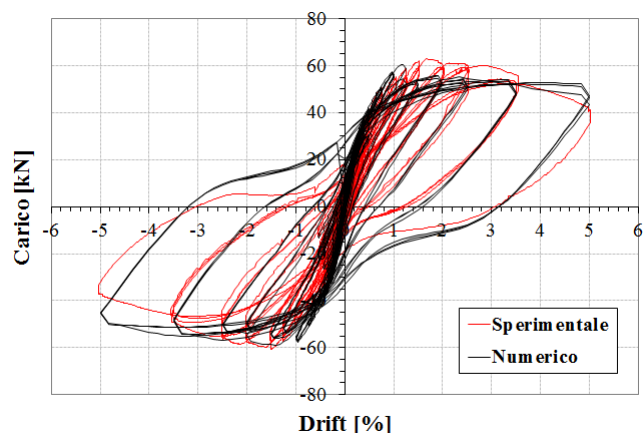


Figura 13. Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici

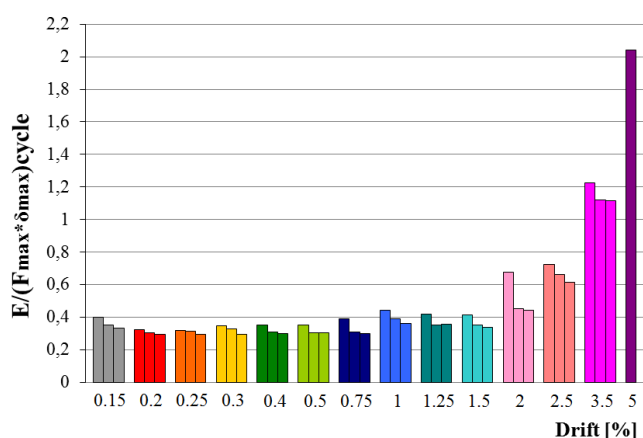


Figura 14. Rapporto tra l'energia dissipata e l'energia elastica al variare del drift

4.2 Modello pilastro corroso

Il comportamento ciclico sperimentale e numerico del pilastro corroso è riassunto in Figura 15, in termini di legame carico-drift.

L'efficacia della modellazione, sviluppata tenendo conto della corrosione come variazione di legame costitutivo delle barre, a parità di sezione nominale, è evidenziata nelle successive figure, in cui sono sovrapposti i risultati relativi a drift dello 0.3 % (Fig. 16), dell'1% (Fig. 17) e del 2% (Fig. 18). Ancora una volta occorre evidenziare la necessità di tener conto del fenomeno di instabilità delle barre per la corretta simulazione del comportamento sperimentale.

In Figura 19 la risposta ciclica sperimentale e numerica sono sovrapposte per l'intera storia di carico. Il confronto evidenzia la correttezza del modello numerico, in grado di simulare correttamente ciascun ciclo di carico, sia in termini di resistenza che di rigidità, fino a drift pari al 2%. Il comportamento sperimentale relativo all'ultima tripletta di cicli (drift pari al

2.5%) non è colta dal modello numerico, a causa della drastica riduzione di resistenza e rigidità, legata all'espulsione del copriferro e alla completa instabilità delle barre. Tale situazione è in fase di implementazione.

Il pilastro presenta un comportamento ciclico piuttosto stabile, con scarsa riduzione di resistenza e rigidità, fino a drift pari al 2%. L'energia dissipata adimensionalizzata, per ogni ciclo è rappresentata in Figura 20. Tale indice di danno, ancora una volta, è quasi costante, e pari a circa 0.5, fino a drift uguali all'1.5%, quindi si incrementa fino a valori superiori a 1.2 per drift pari al 2%.

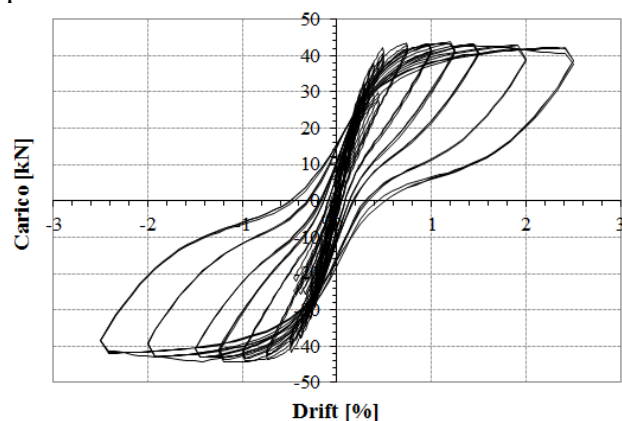


Figura 15. Risultato numerico del pilastro corroso CC

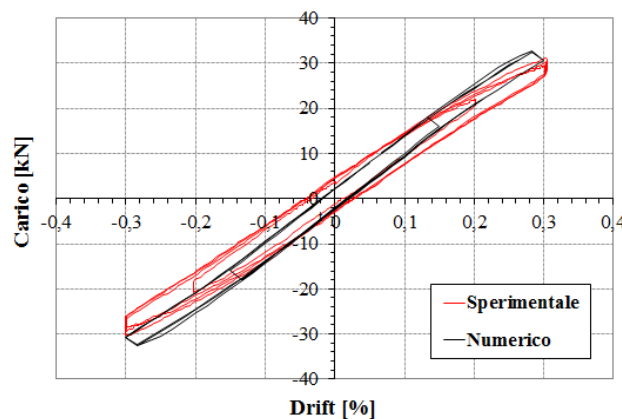


Figura 16. Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari allo 0.3%

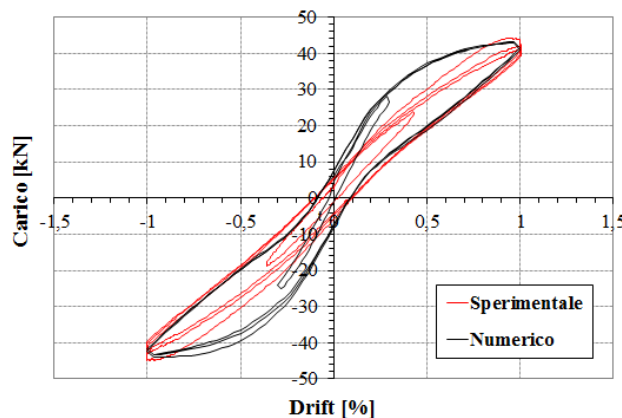


Figura 17. Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari all'1 %

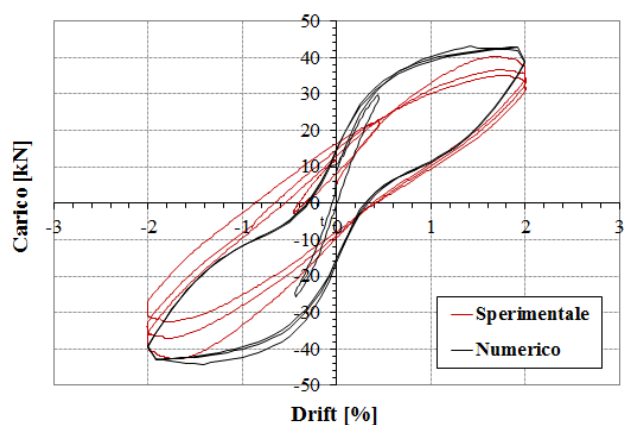


Figura 18. Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici per un valore del drift pari al 2%

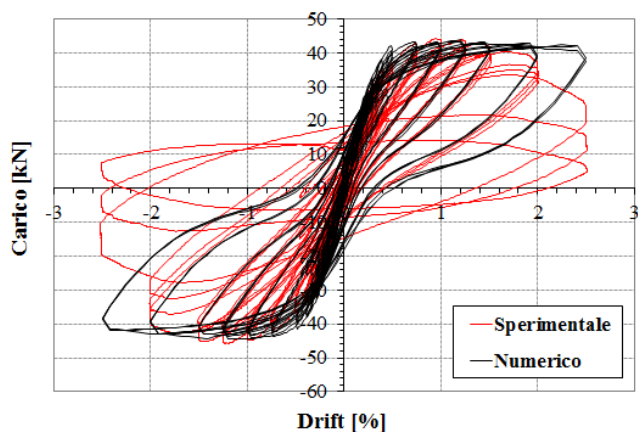


Figura 19. Sovrapposizione dei risultati sperimentali e numerici

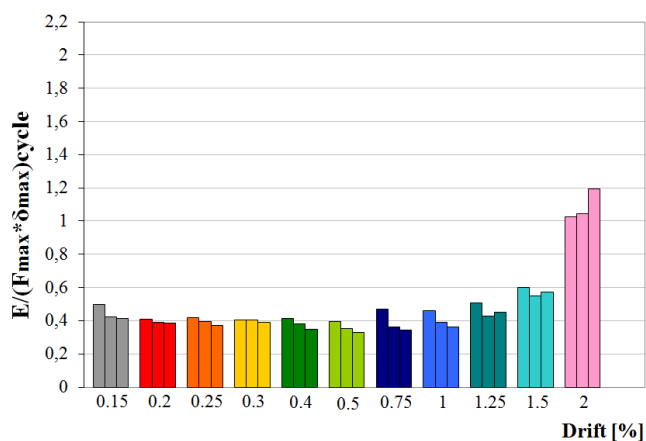


Figura 20. Rapporto tra l'energia dissipata e l'energia elastica al variare del drift

5 OSSERVAZIONI CONCLUSIVE SULL'INFLUENZA DELLA CORROSIONE SUL COMPORTAMENTO CICLICO

L'influenza della corrosione delle barre di armatura sul comportamento ciclico di pilastri in c.a. è infine discussa sulla base dei risultati ottenuti.

In Figura 21 la risposta numerica dell'elemento corroso con perdita di massa dell'ordine del 20% è sovrapposta a quella dell'elemento di riferimento. Come atteso, appare evidente una riduzione del carico massimo, nel modello corroso, dell'ordine del 26%, come evidenziato anche dalla prova sperimentale. E' inoltre evidenziata una marcata riduzione di spostamento dell'ordine del 50%.

Sulla base dei risultati ottenuti, deve essere rimarcata l'importanza degli effetti della corrosione sul comportamento locale (e quindi sulle proprietà di cerniera plastica) e globale di strutture in sismica.

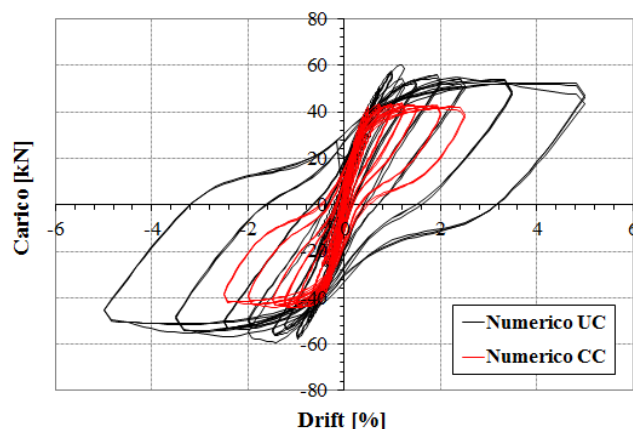


Figura 21. Sovrapposizione dei risultati numerici del pilastro non corroso UC e corroso CC

RINGRAZIAMENTI

La ricerca presentata rientra nell'ambito delle attività Reluis.

Gli autori ringraziano la Prof. Beatrice Belletti per i preziosi suggerimenti sulla modellazione numerica.

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.
- Apostolopoulos C.A., 2007. Mechanical behavior of corroded reinforcing steel bars S500s tempcore under low cycle fatigue, *Construction and Building Materials* 2007, **21**, 1447-56.
- Cairns J, Plizzari G.A, Du Y., Law D.W., Franzoni C., 2005. Mechanical properties of corrosion-damaged reinforcement, *ACI Mater J* 2005, **102**(4), 256-64, art. no. 102-M29.
- Cardone D, Perrone G, Sofia S., 2013. Experimental and numerical studies on the cyclic behavior of R/C hollow bridge piers with corroded rebars, *Earthquakes and Structures*, **4**(1), 41-62.

Castel A., Francois R., Arligue G., 2000. Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams - Part 1: experimental study of corroded beams, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, **33**, November.

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), May-June

Coronelli D. and Gambarova P.G., 2004. Structural Assessment of Corroded Reinforced Concrete Beams: Modeling Guidelines, *ASCE - Journal of Structural Engineering*, **130**(8), 1214-1224.

Diana v. 9.1., 2005. Material library, TNO DIANA BV. Delft, The Netherlands.

fib Model Code for Concrete Structures 2010, 2013. FIB fédération internationale du béton. October.

Hawileh, R.A., Abdalla J.A., Tamimi A.A., Abdelrahman K., Oudah F., 2011. Behavior of corroded steel reinforcing bars under monotonic and cyclic loadings, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **18**(3), 218-224.

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, Balkema: CRC Press*.

Imperatore S., Rinaldi Z., Valente C., Zuccarino L., 2010. Influenza della corrosione sulle caratteristiche meccaniche dell'acciaio, *18° Congresso CTE, Brescia 11-13 Novembre 2010*, **1**, 285-292.

Kashani, M.M., Crewe, A.J., Alexander, N.A., 2013. Nonlinear cyclic response of corrosion damaged reinforcing bars with the effect of buckling, *Construction and Building Materials*, **41**, 388-400.

Ma, Y., Che, Y., Gong, J., 2012. Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading, *Construction and Building Materials*, **29**, 548-556.

Meda, A., Mostosi, S., Rinaldi, Z., Riva, P., 2014. Experimental evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of R.C. columns, *Engineering Structures*, **76**, 112-123.

Monti, G., Nuti C., 1992. Nonlinear cyclic behaviour of reinforcing bars including buckling, *Journal of Structural Engineering*, **118**(12), 3268-3284.

Ou, Y., Tsai, L., Chen, H., 2012. Cyclic performance of large-scale corroded reinforced concrete beams, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **41**(4), 593-604.

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.

Rinaldi, Z., Valente, C., Pardi, L., 2008. A simplified methodology for the evaluation of the residual life of corroded elements, *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis Eds, **4**(2), 139-152.

Rinaldi, Z., Imperatore, S., Valente, C., 2010. Experimental evaluation of the flexural behavior of corroded P/C beams, *Construction and Building Materials*, **24**(11), 2267-2278.

Rodriguez, J., Ortega, L., Casal, J., Diez, J.M., 1996. Assessing structural conditions of concrete structures

with corroded reinforcement, *International Conference Concrete in the Service of Mankind, Dundee, U.K.*