



UNIVERSITÀ DI PARMA

ARCHIVIO DELLA RICERCA

University of Parma Research Repository

Il fenomeno del buckling implementato nel modello fessurativo PARC_CL 2.1

This is the peer reviewed version of the following article:

Original

Il fenomeno del buckling implementato nel modello fessurativo PARC_CL 2.1 / Belletti, B.; Vecchi, F.. - ELETTRONICO. - (2018). ((Intervento presentato al convegno Italian Concrete Days 2018 tenutosi a Lecco-Milano nel 13-16 Giugno.

Availability:

This version is available at: 11381/2879058 since: 2020-07-20T13:16:18Z

Publisher:

GWMAX srl

Published

DOI:

Terms of use:

openAccess

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available

Publisher copyright

(Article begins on next page)

Buckling phenomenon implemented in the PARC_CL 2.1 crack model

Il fenomeno del buckling implementato nel modello fessurativo PARC_CL 2.1

B. Belletti¹, F. Vecchi¹

¹ *Department of Engineering and Architecture DIA, University of Parma, Parma, Italy*

ABSTRACT: Reinforced concrete (RC) structures, designed and built before the modern seismic codes, typically present an underestimated transversal reinforcement, that causes a bad confinement for the longitudinal rebars. During earthquake, longitudinal reinforcement could be subjected to high deformations inducing buckling. It is therefore necessary using a constitutive model able to realistically simulate the buckling phenomenon. In the present work, the Monti-Nuti model and the Kashani model has been analyzed and implemented in the PARC_CL 2.1 crack model. Then, RC elements subjected to cyclic loads with mechanical and geometrical characteristics typical of 70's buildings in Italy (before seismic codes) have been analyzed with the two proposed models. / Gli edifici esistenti in calcestruzzo armato, progettati prima delle attuali normative sismiche, presentano solitamente un'armatura trasversale ridotta o assente che causa un cattivo confinamento dell'armatura longitudinale. Durante il sisma le armature longitudinali possono essere sottoposte ad elevate deformazioni che possono indurre lo svergolamento ("buckling"). Si rende dunque necessario l'utilizzo di un modello costitutivo per l'acciaio capace di simulare realisticamente il fenomeno del buckling. I modelli analizzati nel presente lavoro sono quello formulati da Monti-Nuti e da Kashani implementati nel modello fessurativo PARC_CL 2.1. Sono stati quindi analizzati elementi in calcestruzzo armato sottoposti a carichi ciclici con caratteristiche geometriche e meccaniche tipiche degli edifici costruiti negli anni '70 (pre normativa sismica), simulandone il comportamento con entrambi i modelli proposti.

KEYWORDS: crack model; PARC_CL model; buckling; reinforced concrete / modello fessurativo; PARC_CL; buckling.

1 INTRODUZIONE

Nel contesto sismico, le colonne in calcestruzzo armato possono sperimentare elevate deformazioni laterali delle armature longitudinali accompagnate dalla rottura del calcestruzzo per espulsione del copriferro. Gli elementi in CA progettati prima delle attuali normative sismiche presentano solitamente una sezione sottodimensionata e una grande spaziatura tra le staffe. Per questi elementi le deformazioni di compressione nelle armature longitudinali diventano particolarmente elevate tanto da indurre il "piegamento" verso l'esterno delle barre (buckling). Perciò, il buckling delle armature longitudinali riveste una fondamentale importanza nella previsione della risposta sismica degli elementi strutturali.

Le modalità di rottura normalmente osservate associate a questo fenomeno sono in primo luogo l'inarcamento delle armature longitudinali tra due staffe consecutive (local buckling) e, meno comunemente, un aumento di snellezza a causa della rottura di una staffa (global buckling), Massone et al. 2014.

Pertanto, per una valutazione realistica della risposta strutturale di elementi e/o edifici esistenti in

cemento armato risulta di fondamentale importanza l'utilizzo di un legame costitutivo per l'acciaio capace di cogliere il fenomeno del buckling delle armature longitudinali.

Basandosi sui risultati sperimentali di test monotoni e ciclici eseguiti su barre nude, sono stati proposti in passato diversi legami costitutivi per l'acciaio affetto da buckling. Il modello proposto da Monti & Nuti, 1992 è stato uno dei primi modelli per l'acciaio in grado di considerare questo effetto. Successivamente il modello è stato raffinato da Lavorato, Nuti e Zhou (Zhou et al. 2014 e Zhou et al. 2015) e quindi implementato all'interno dei programmi agli elementi finiti Opensees and Cyrus_NL come modello a fibre. Più recentemente Kashani et al. 2014, hanno condotto uno studio parametrico su barre nude sottoposte a carichi ciclici corrosive e non corrosive e scoprirono che per elevati valori di snellezza il legame costitutivo presentava un complesso effetto pinching.

Al fine di considerare la rottura per buckling all'interno del modello fessurativo PARC_CL 2.1 (Belletti et al. 2017a), sono stati implementati i modelli costitutivo di Monti e Nuti 1992 e Kashani et al. 2014. Il modello PARC_CL 2.1, che assume un

quadro fessurativo fisso ed equi distanziato ed un'armatura di tipo "smeared", è stato implementato in una user subroutine e permette di condurre analisi agli elementi finiti attraverso l'utilizzo del software Abaqus.

Scopo del presente lavoro è la validazione dei modelli di Monti-Nuti e di Kashani e la valutazione dell'affidabilità delle analisi non lineari agli elementi finiti mediante il confronto dei risultati ottenuti con il modello fessurativo PARC_CL 2.1 con i risultati sperimentali di un pilastro in CA con caratteristiche meccaniche e geometriche tipiche degli edifici costruiti negli anni '70 in Italia.

2 MODELLI COSTITUTIVI PER L'ACCIAIO CHE CONSIDERANO IL BUCKLING

In genere il comportamento meccanico dell'acciaio è considerato simmetrico a trazione e a compressione. Nel caso di cicli ripetuti senza inversione di segno, i rami di carico-scarico coincidono a meno di piccoli effetti isterici. Per tale ragione la curva σ - ε monotona si può ritenere un buon involucro del comportamento ciclico. Nel caso invece di cicli con inversione di segno si ha una diminuzione della tensione di snervamento seguita da un tratto non lineare caratterizzato da una progressiva perdita di rigidità, fenomeno noto come effetto Bauschinger. Per una valutazione più realistica della risposta strutturale di edifici esistenti in c.a., privi di adeguata staffatura, può essere necessario l'utilizzo di un legame costitutivo per l'acciaio capace di cogliere il fenomeno di buckling a compressione delle armature longitudinali. Il comportamento monotono post-buckling varia con la snellezza delle armature, definito come $\lambda=L/D$ (dove L è il passo delle staffe e D è il diametro delle armature longitudinali). Questo fenomeno è stato studiato da Mau & El-Mabsout, 1989 e Monti & Nuti, 1992 che hanno anche individuato un valore di snellezza limite $\lambda=5$ sotto al quale il comportamento a compressione rimane simile a quello a trazione. Questo valore limite è anche funzione delle proprietà meccaniche dell'acciaio (Bae et al. 2005). Dhakal & Maekawa, 2002 dimostrarono che il comportamento a compressione di una barra di armatura soggetta a buckling dipende sia dalla tensione di snervamento sia dalla snellezza: armature con differenti rapporti di snellezza e differenti tensioni di snervamento possono generare una curva tensione-deformazione identica se il parametro combinato $L/D\sqrt{f_y}$ è uguale. Cosenza & Prota, 2006 condussero una vasta indagine sulle proprietà meccaniche delle armature utilizzate fino agli anni '70 in Italia (barre lisce), registrando rapporti di snellezza tra 5 e 70. Scopo dell'indagine era la calibrazione di un nuovo modello costitutivo per le armature lisce soggette a carichi di compressione tali da indurre buckling. Successivamente Prota et al. 2009 estese

lo studio sperimentale al caso ciclico, evidenziando che per valori di snellezza elevati, il ramo di ricarica compressione-trazione è soggetto ad un accentuato effetto pinching (con cambio di segno della curvatura).

In letteratura sono presenti alcuni modelli in grado di descrivere il comportamento ciclico di una barra d'acciaio soggetta a buckling. Tra questi Monti & Nuti, 1992 proposero una legge costitutiva partendo dall'osservazione sperimentale del comportamento di provini in acciaio con diversi rapporti λ . Tale modello consiste in una relazione σ - ε analoga a quella proposta da Menegotto & Pinto, 1973. Si cita infine il modello proposto nello studio del comportamento ciclico di barre corrose e non corrose da Kashani et al., 2015.

2.1 Modello di Monti & Nuti, 1992

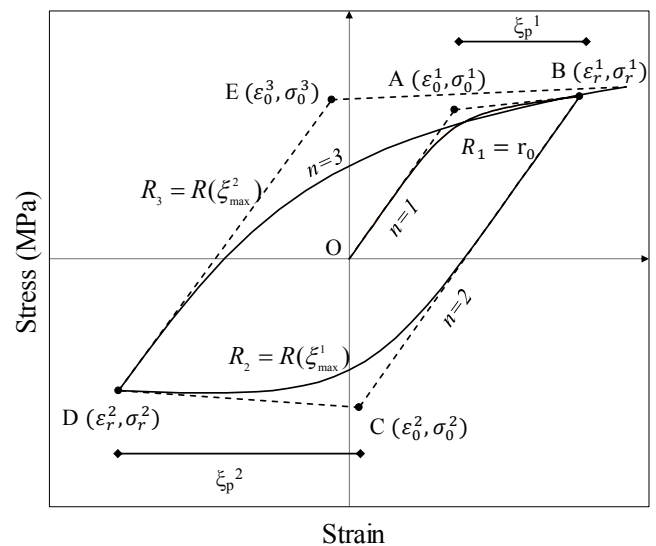


Figure 1. Constitutive law for steel, Monti & Nuti 1992 / Legge costitutiva per l'acciaio Monti & Nuti 1992.

La formulazione proposta da Monti & Nuti 1992 deriva dalle osservazioni sperimentali di barre nude sottoposte a carichi ciclici con valori di snellezza pari a 5, 8 e 11. Questi valori di snellezza tuttavia sono limitati se si pensa agli edifici esistenti in cui il passo tra le staffe, quando presenti, è molto ampio. Tuttavia, il modello proposto da Monti & Nuti 1992 presenta una formulazione che associa alla legge costitutiva di Menegotto&Pinto 1973 quattro regole: (i) hardening cinematico, (ii) hardening isotropo, (iii) regola di memoria che permette di considerare le caratteristiche intrinseche del materiale di memorizzare le deformazioni plastiche, (iv) regola di saturazione che permette di tenere in conto del comportamento asintotico dello snervamento.

La tensione finale di snervamento per il semiciclo $n+1$ è definita da Eq.(1):

dove σ_0 è la tensione di snervamento e $\Delta\sigma_{KIM,b}$ è il contributo dovuto alle quattro regole di memoria. A causa del buckling il valore assoluto della tensione a compressione diminuisce con l'aumentare delle deformazioni dopo che l'acciaio ha raggiunto lo snervamento.

2.2 Modello di Kashani et al., 2014

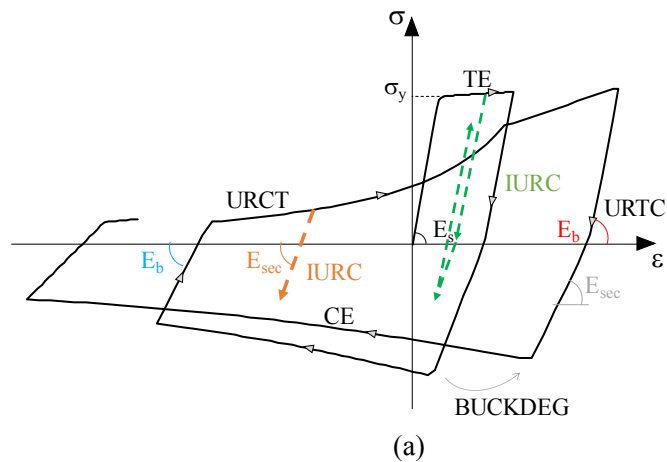


Figure 2. Constitutive law for steel, Kashani et al. 2014 / Legge costitutiva per l'acciaio Kashani et al. 2014.

Al fine di avere a disposizione un legame costitutivo per l'acciaio capace di simulare il buckling anche per valori di snellezza tipici di edifici esistenti, è stato implementato nel modello PARC CL 2.1 anche la legge proposta da Kashani et al. 2014.

Questo modello fenomenologico considera l'effetto combinato di buckling e fatica per elementi corrosi e non corrosi, Kashani et al. 2013.

Il modello proposto da Kashani et al. 2014 consiste di sette rami: (1) ramo a trazione, TE; (2) ramo a compressione, CE; (3) curva di scarico-ricarico da compressione a trazione, URCT; (4) curva di scarico-ricarico da trazione a compressione, URTC; (5) cicli incompleti di carico-scarico; (6) riduzione di tensione a compressione dovuta a buckling, BUCKDEG; (7) riduzione di tensione a trazione dovuto alla fatica, FATDEG. Questo ultimo contributo ad oggi non è ancora stato implementato all'interno del modello PARC_CL 2.1.

Un aspetto di notevole importanza e da tenere in considerazione, è che i modelli per l'acciaio vengono formulati sulla base del comportamento di armature nude senza tenere in considerazione l'effetto del calcestruzzo sulla risposta globale.

$$\sigma_0^{n+1} = \sigma_0 \cdot \text{sign}(-\xi_p^n) + \Delta\sigma_{KIM,b}^{n+1} \quad (1)$$

2.3 Modello fessurativo PARC_CL 2.1

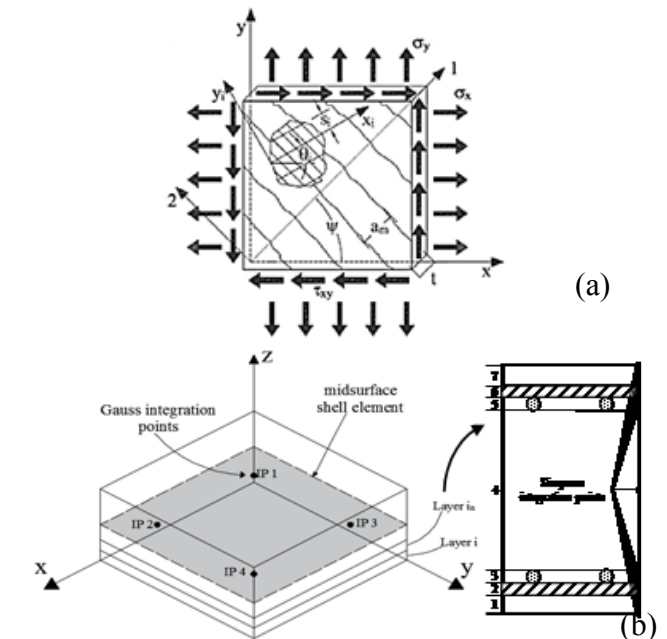


Figure 3. PARC_CL 2.1 crack model: (a) RC membrane element subjected to plane stress state, (b) multi layered shell approach. / Modello fessurativo PARC_CL 2.1: (elementi in CA soggetto a stato piano di tensione, (b) parametri fessurativi.

Il modello fessurativo PARC_CL 2.1 è scritto in linguaggio fortran all'interno di una user subroutine UMAT che utilizza il programma agli elementi finiti Abaqus. Il modello è stato realizzato per l'assegnazione del comportamento non lineare in ciascun punto di integrazione di elementi shell multi layer. Il modello PARC_CL 2.1 è basato su un approccio a fessurazione fissa: ciò significa che dopo la fessura il sistema di riferimento 1-2 rimane fisso per il punto di integrazione. Le armature sono considerate spalmate nell'elemento di calcestruzzo, Figure 3. Nella sua ultima versione è in grado di simulare il comportamento ciclico, considerando deformazioni plastiche e irreversibili, di acciaio e calcestruzzo. I legami costitutivi adottati sono stati presentati in maniera più approfondita in Belletti et al. 2017a. Il modello PARC è stato validato in più occasioni sia per le analisi di elementi in CA sottoposti a carichi monotoni (Belletti et al. 2001, Belletti et al. 2013) che ciclici (Belletti et al. 2017b). In particolare è in grado di valutare il comportamento statico e dinamico di piastre, pareti e diaframmi.

La novità del modello PARC_CL 2.1, rispetto alle precedenti versioni, risiede nella implementazione del modello costitutivo di Monti-Nuti 1992 (succes-

sivamente aggiornato da Lavorato e Zhou) e il modello proposto da Kashani et al. 2014 per l'acciaio.

3 VALIDAZIONE DEL MODELLO PARC_CL 2.1

3.1 Modellazione di barre d'armatura

Al fine di verificare l'efficacia del modello PARC_CL 2.1 sono state modellate due barre non corrosive testate sperimentalmente da Kashani et al. 2013. Le proprietà meccaniche dell'acciaio sono riportate in Table 1.

Table 1. Mechanical properties of bare bars / Proprietà meccaniche dell'acciaio.

Test number	λ	f_y^t [MPa]	E_s [MPa]	E_h [MPa]
1	10	540	210000	2000
2	15	540	210000	2000

Le analisi non lineari sono state condotte usando un singolo elemento membrane a 4 nodi ed integrazione ridotta denominato (M3D4R).

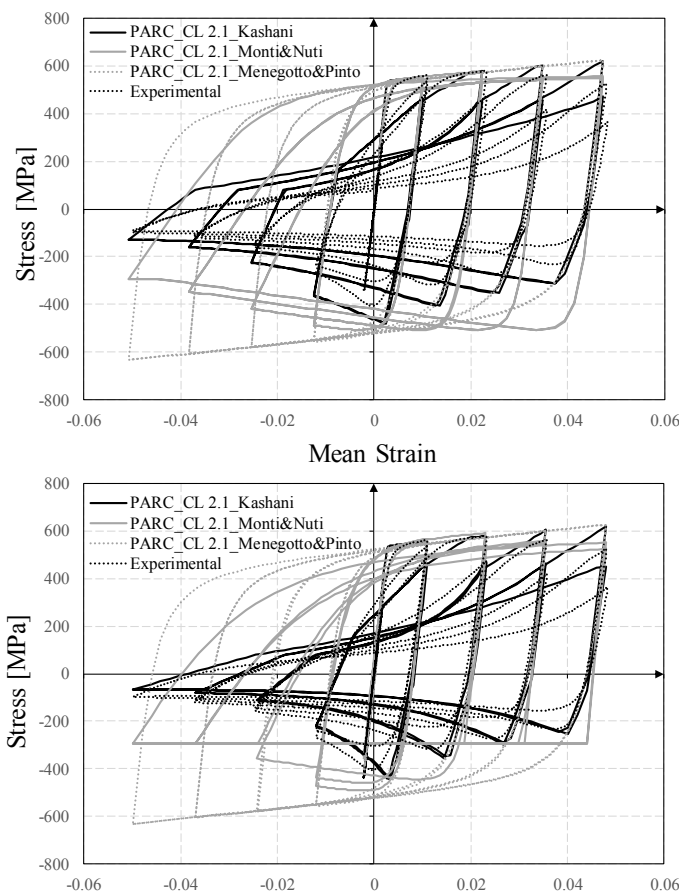


Figure 4. Comparison between the results obtained with three different constitutive laws for steel implemented in the PARC_CL 2.1 model and the experimental results of a) test number 1 and b) test number 2 / Confronti tra i risultati ottenuti con le tre legge costitutive per l'acciaio implementate nel modello fessurativo PARC_CL 2.1 e i risultati sperimentali del test numero 1 (a) e test numero 2 (b)

Figure 4 mostrano il confronto fra i risultati ottenuti con il modello PARC_CL 2.1 e i diversi legami costitutivi per l'acciaio implementati nella versione più attuale (Menegotto & Pinto 1973, Monti & Nuti 1992, Kashani et al. 2014). Il modello di Menegotto & Pinto 1973 non è in grado di cogliere la risposta a compressione dell'acciaio evidenziata dai test sperimentali. I modelli con buckling (Monti & Nuti 1992, Kashani et al. 2014) presentano sostanziali differenze dovute ad una diversa formulazione del limite inferiore dello stress a compressione e nelle curve di ricarico compressione-trazione. In particolare il legame di Kashani presenta una formulazione che considera l'effetto pinching rilevato nei risultati sperimentali. Tale differenza di concavità, rispetto al ricarico di Monti&Nuti, diventa più evidente con l'aumentare della snellezza.

3.2 Modellazione di una colonna reale in CA

I due modelli descritti sono stati confrontati mediante i risultati ottenuti dalla modellazione di un pilastro in CA testato presso l'Università di Bergamo (Meda et al., 2014).

Il pilastro ha altezza pari a 1800mm, sezione quadrata (300x300mm²) e armato con 4 barre Φ 16mm. Le staffe aventi diametro Φ 8mm presentano un passo di 300mm tranne nella zona di applicazione del carico (ad una quota di 1500mm) dove il passo è ridotto a 100mm. La fondazione presenta dimensioni pari a 1300x600x500mm ed è armata con 4 barre Φ 20mm superiori ed inferiori, 4 barre Φ 12mm di parete e staffe Φ 12mm passo 150mm. La grande spaziatura delle staffe (Meda et al., 2014) comporta valori di snellezza piuttosto elevati. In particolare vengono raggiunti valori di λ pari a 6,25 in sommità, dove la staffatura è stata infittita in prossimità della zona di applicazione del carico, e 18,75 nella zona centrale.

I materiali adottati per la prova sono quelli tipicamente adottati nelle costruzioni anni '70 in Italia, Table 2. Il pilastro è stato sollecitato ciclicamente ad una quota di 1500mm dalla base della fondazione attraverso un martinetto elettromeccanico. Inoltre è stato applicato un carico assiale costante pari a 400kN.

Table 2. Mechanical properties of materials / Proprietà meccaniche dei materiali.

concrete			steel		
f_c [MPa]	f_t [MPa]	E_c [MPa]	f_y [MPa]	E_s [MPa]	E_h [MPa]
19	1.5	25000	210000	210000	1050

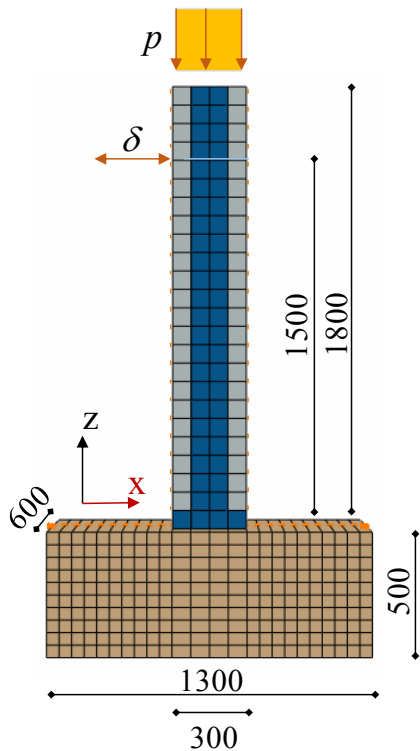


Figure 5. Adopted mesh /Mesh utilizzata per le analisi non lineari agli elementi finiti.

Il pilastro è stato modellato mediante elementi shell multistrato di dimensione 75x75 mm a 4 nodi (S4) con 4 punti di integrazione nel pianto e divisi in 7 layer con 3 punti di integrazione di Simpson nello spessore. Ciascun layer presenta proprietà meccaniche differenti come mostrato in Figure 6. La fondazione invece è stata modellata con materiale elastico. Le analisi non lineari sono state condotte con il software Abaqus 6.12 e la user subroutine PARC_CL 2.1. Tutti i nodi alla base sono stati vincolati agli spostamenti in direzione z, i nodi estremi della fondazione in direzione x e infine tutti i nodi del pilastro sono stati vincolati in direzione y.

Le analisi sono state condotte in controllo di spostamento, applicando nel primo step di carico il peso proprio dell'intero elemento, nel secondo step l'azione assiale pari a 400kN nella sezione di sommità e infine la storia ciclica di spostamenti applicata a tutti i nodi posti alla quota di 1500mm, Figure 5.

Al fine di cogliere lo spalling del calcestruzzo, è stata modificata la legge costitutiva del calcestruzzo per i punti di integrazione che costituiscono il copriferro, Figure 7. Quando tali punti di integrazione raggiungono deformazioni di compressione pari a 0.025, lo stress viene ridotto a zero in modo tale da non poter più contribuire in termine di resistenza e rigidità.

Figure 8 mostra la curva carico-drift ottenuta dalle NLFEA condotte con il modello PARC_CL 2.1 utilizzando i tre diversi modelli costitutivi implementati nella subroutine. L'utilizzo di un legame costitutivo per l'acciaio capace di considerare il buckling è di fondamentale importanza ai fini di cogliere il danno ciclico per valori di drift superiori al 2%.

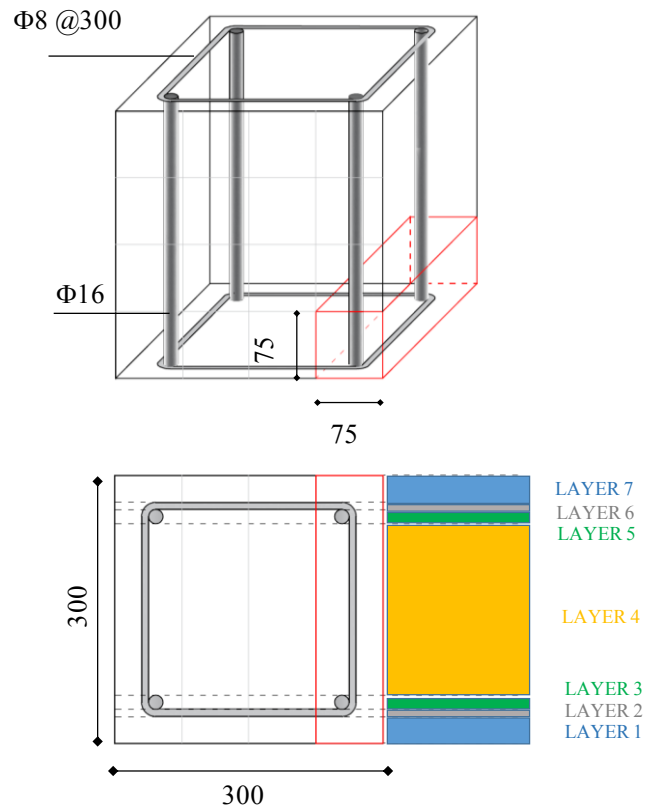


Figure 6. Size and discretization of NL multi-layered shell elements / Dimensione e suddivisione degli elementi shell.

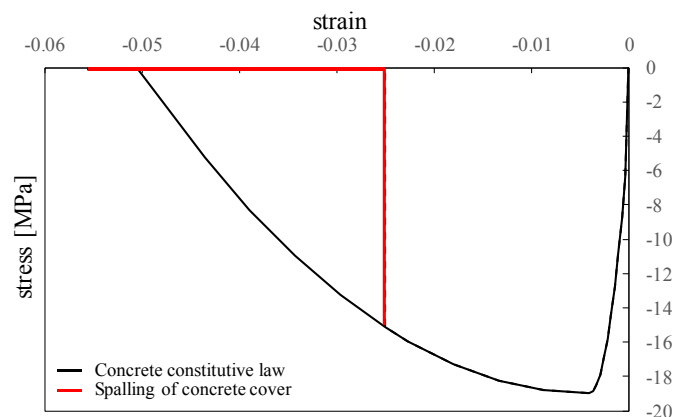


Figure 7. Constitutive law for concrete in PARC_CL 2.1 adopted to simulate the spalling of concrete cover / Legge costitutiva adottata per il calcestruzzo nel modello PARC_CL 2.1 al fine si simulare lo spalling del copriferro.

A questo proposito, si può osservare come nei primi cicli le tre differenti leggi costitutive conducano ai medesimi risultati. Questo è dovuto al fatto che fino al 2,5% di drift è il calcestruzzo a compressione a governare il problema, il quale non permette alle armature di raggiungere elevate deformazioni a compressione, Figure 9. Quando però gli elementi di calcestruzzo che costituiscono il copriferro vengono eliminati per poter considerare lo spalling del calcestruzzo, Figure 9a allora le armature iniziano a lavorare a compressione esibendo buckling. Questo si traduce in un calo della tensione a compressione all'aumentare delle tensioni, come mostrato in Fig-

ure 9b, solo per i legami di Monti & Nuti 1992 e Kashani et al., 2014 . L'analisi non lineare condotta con il legame di Menegotto&Pinto non mostra questo andamento: ciò si traduce in un aumento di forza nella curva load-drift, Figure 8, che dopo lo spalling non mostra softening.

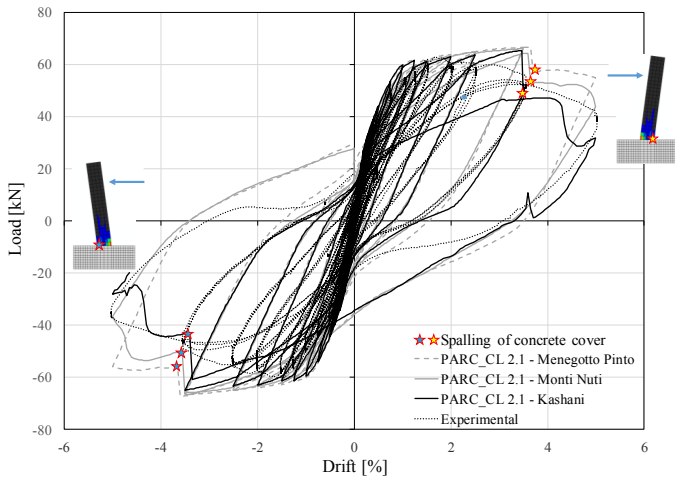


Figure 8. Comparison between the experimental result and the NLFEA with PARC_CL 2.1 crack model using different steel laws in terms of load-drift curve / Confronto tra i risultati sperimentali e i risultati ottenuti dalle analisi non lineari con i tre differenti legami costitutivi implementati nel modello PARC_CL 2.1

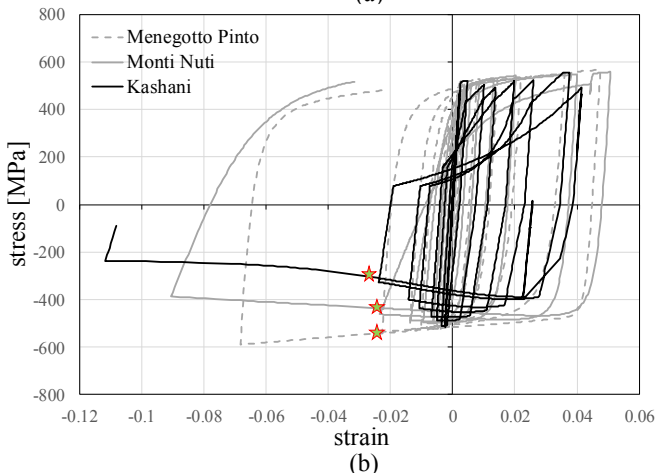
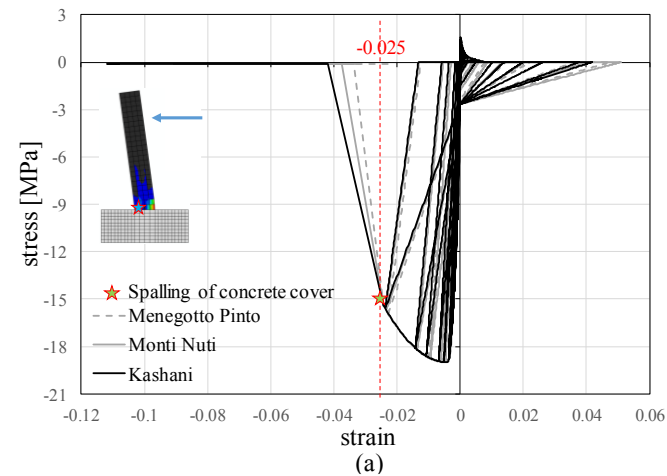


Figure 9. Stress-strain behaviour of the base element at the left side: (a) concrete and (b) steel / Legame tensione deformazione dell'elemento di sinistra alla base della colonna.

Il pilastro presentato mostra rapporti di armatura bassi, pari a circa 0,9%. Per vedere come il rapporto di armatura può influenzare la risposta globale si è dunque deciso di analizzare il pilastro con percentuale di armatura pari a tre volte il caso reale. I risultati delle analisi sono presentati in Figure 10 per le tre diverse leggi costitutive presenti nel modello PARC_CL 2.1. Da Figure 10 si può notare che il comportamento per bassi valori di drift rimane simile al caso reale, ma la duttilità diminuisce per i due modelli con buckling. Infatti, sia l'analisi condotta con il modello costitutivo di Kashani et al. 2014 sia quella condotta con Monti & Nuti 1992 non riescono a completare l'analisi a causa delle elevate deformazioni a cui sono soggette le armature compresse. La curva ottenuta con la legge costitutiva di Kashani et al. 2014 inoltre presenta una forte riduzione della capacità indotta dall'instabilizzazione delle armature già per un drift pari al 3,5%.

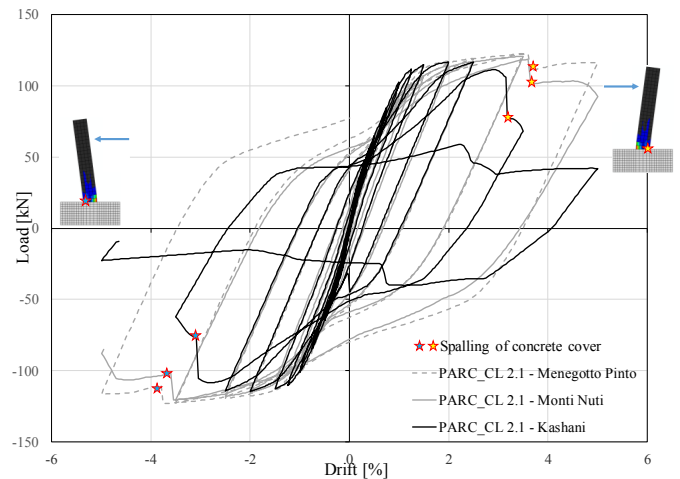


Figure 10. Case of 3 times the real reinforcement ratio: comparison between the experimental result and the NLFEA with PARC_CL 2.1 crack model using different steel laws in terms of load-drift curve / Caso di una sezione con tre volte il rapporto geometrico d'armatura: confronto tra i risultati sperimentali e i risultati ottenuti dalle analisi non lineari con i tre differenti legami costitutivi implementati nel modello PARC_CL 2.1

4 CONCLUSIONI

The buckling of longitudinal reinforcement can substantially influence the response of RC existing structural elements. For this reason, a numerical model able to reproduce the buckling failure is developed and discussed in this paper.

In the PARC_CL 2.1 crack model, three different models for steel have been implemented. The first one is the widely known Menegotto-Pinto (Menegotto et al., 1973), the second one is the Monti-Nuti (Monti et al., 1992) and the third one is the Kashani (Kashani et al. 2015). The Monti-Nuti and the

Kashani models are able to consider the buckling effect.

For the evaluation of the efficiency of the model, the cyclic response of a RC column is compared with the NLFEA conducted with PARC_CL 2.1 model. The main outcomes are briefly reported:

- the Monti -Nuti model (Monti et al., 1992) and the Kashani model (Kashani et al. 2015) are able to catch the buckling localization at the base of the column respect to the Menegotto-Pinto model (Menegotto et al., 1973).
- When the reinforcement ratio increases the buckling effect becomes more evident: Monti -Nuti model (Monti et al., 1992) shows the buckling failure for a drift equal to -5% and the Kashani model (Kashani et al. 2015) presents a force degradation starting from a drift equal to -3.5%.
- Each model adopted for steel is calibrated on the basis of bare bars behaviour and without taking into account the interaction with the surrounding concrete.

In future researchers the concrete-to-steel interaction will be improved. Future improvement will focus on the modelling of degradation of tensile strength, due to low-cycle fatigue loading and the modelling of corrosion effects. Indeed, one of the most interesting characteristic of the Kashani law is the extensibility of the formulation to corroded re-bars.

La risposta di un elemento strutturale in CA può subire cambiamenti sostanziali a causa del buckling. Per questo motivo è stato sviluppato un modello numero per le analisi non lineari capace di riprodurre la rottura per buckling.

Nel modello fessurativo PARC_CL 2.1 sono stati implementate tre leggi costitutive per l'acciaio: la legge di Menegotto-Pinto (Menegotto et al., 1973), di Monti-Nuti (Monti et al., 1992) e di Kashani (Kashani et al. 2015). Solo gli ultimi due sono però in grado di considerare il buckling.

Per validare l'efficacia del modello sono state condotte analisi non lineari agli elementi finiti di un pilastro in CA. I principali risultati ottenuti sono:

- il modello di Monti -Nuti (Monti et al., 1992) e di Kashani (Kashani et al. 2015) sono in grado di cogliere la localizzazione del buckling alla base della colonna rispetto a Menegotto-Pinto model (Menegotto et al., 1973).
- quando il rapporto di armatura aumenta l'effetto del buckling diventa più evidente: questo è evidenziato dal fatto che l'analisi di Monti-Nuti non giunge al termine (raggiunge la rottura per buckling per un drift del -5%) e l'analisi con Kashani presenta un forte degrado già a partire dal drift -3.5%.
- questi modelli per l'acciaio sono calibrati sulla base di armature nude senza considerare l'interazione con il calcestruzzo.

I futuri lavori saranno indirizzati ad un miglioramento del modello associato all'interazione tra ac-

ciaio e calcestruzzo. Inoltre sarà implementato il degrado a trazione presente nella legge di Kashani (Kashani et al. 2015) e la sua estensione al caso di armature corrose.

RINGRAZIAMENTI

La memoria rientra nelle attività svolte nell'ambito del progetto PRIN2015 "Failure mechanisms due to lack of details and degradation phenomena in existing reinforced concrete structures" dall'Unità di ricerca dell'Università di Parma.

Gli autori ringraziano il Prof. Camillo Nuti e il Prof. Davide Lavorato per la disponibilità mostrata.

REFERENCES

- Abaqus 6.12. User's and theory manuals; 2012 <<http://www.3ds.com/>> [1 June 2016].
- Bae, S., Miseses, A.M. & Bayrak, O. 2005. Inelastic buckling of reinforcing bars. *J. of Structural Engin.*, 131(2). 314-321.
- Belletti, B., Cerioni, R., Iori, I. 2001. Physical approach for reinforced-concrete (PARC) membrane elements. *ASCE J Struct Eng*, 2001, 127(12), pp.1412-26.
- Belletti, B., Damoni, C., Gasperi, A. 2013. Modeling approaches suitable for pushover analyses of RC structural wall buildings. *Eng Struct* 2013b;57(12), pp.327-38
- Belletti, B., Scolari, M., Vecchi, F. 2017a. PARC_CL 2.0 crack model for NLFEA of reinforced concrete structures under cyclic loadings. *Computers and Structures*, 191, 2017, 165-79.
- Belletti, B., Scolari, M., Stocchi, A., Vecchi, F. 2017b. Validation of the PARC_CL 2.0 crack model for the assessment of the nonlinear behaviour of RC structures subjected to seismic action: SMART 2013 shaking table test simulation. *Eng Struct* 150, 2017b, pp.759-73.
- Dhakal, R., & Maekawa, K. 2002. Modeling for postyield buckling of reinforcement. *Journal of Structural Engineering*, 128(9), 1139-1147.
- Kashani, M.M., Crewe, A.J., Alexander, N.A., 2013. Nonlinear cyclic response of corrosion-damaged reinforcing bar with the effect of buckling. *Constr Build Mater*, 41, 2013, pp. 388-400.
- Kashani, M.M., Lowes, L.N., Crewe, A.J., Alexander, N.A., 2014. Finite element investigation of the influence of corrosion pattern on inelasting buckling and cyclic response of corroded reinforcing bars. *Engineering Structures*, 75, 2014, pp. 113-25.
- Kashani, M.M., Lowes, L.N., Crewe, A.J., Alexander, N.A., 2015. Phenomenological hysteretic model for corroded reinforcing bars including inelastic buckling and low-cycle fatigue degradation. *Computers and Structures*, 156, 2015, pp. 58-71.
- Massone, L.M., López, E.E. 2014. Modeling of reinforcement global buckling in RC elements. *Engineering Structures*, 59, 2014, pp. 484-94.
- Mau, S., El-Mabsout, M. 1989. Inelastic buckling of reinforcing bars. *Journal of Engineering Mechanics*, 115(1). 1-17.
- Meda, A., Mostosi, S., Rinaldi, Z., Riva, P., 2014. Experimental evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns. *Engineering Structures*, 76(2014), 112-123.
- Menegotto, M., and Pinto, P.E. 1973. Method of analysis of cyclically loaded R.C. frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending moment. *IABSE Symposium on*

Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well – Defined Repeated Loads, Final Report, Lisbon, pp. 15-20.

- Monti, G., Nuti, C. 1992. Nonlinear cyclic behavior of reinforcing bars including buckling. *Journal of Structural Engineering*, 118(12), pp. 3268-84.
- Prota, A., De Cicco, F. & Cosenza, E. 2009. Cyclic Behavior of Smooth Steel Reinforcing Bars: Experimental Analysis and Modeling Issues, *J. of Earthq.Engin.*, Vol. 13, Nr. 4, pp. 500-519.
- Zhou, Z., Lavorato, D., Nuti, C., Marano, G.C., 2015. A model for carbon and stainless-steel reinforcing bars including inelastic buckling for evaluation of capacity of existing structures (2015) COMPDYN 2015 - 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, pp. 876-886.
- Zhou, Z., Nuti, C., Lavorato, D., 2014. Modeling of the mechanical behavior of stainless reinforcing steel. Proceedings of the 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, pp. 515-520.