

## LAMIERE PERFORATE IN ACCIAIO PER IL RINFORZO LOCALE DI COLONNE IN C.A.: UNO STUDIO NUMERICO

### STEEL PERFORATED SHEETING FOR LOCAL REINFORCING OF RC COLUMNS: A NUMERICAL STUDY

Antonio Davino, Generoso Vaiano, Antonio Formisano  
Università di Napoli Federico II  
Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura  
Napoli, Italia  
davino.ad@gmail.com  
generoso.vaiano@inwind.it  
antoform@unina.it

#### ABSTRACT

The use of steelwork for global and local reinforcing of existing structures is a consolidated and effective intervention method. Other than use of metal bracing and shear walls for seismic retrofitting, recently, researchers and designers paid attention to the use of lightweight steel elements as local intervention technique of existing RC and masonry structural members. In the paper, firstly, a refined FEM model has been developed to reproduce the experimental results of a literature laboratory test campaign performed on axially loaded RC columns. Subsequently, a new reinforcing system based on the use of steel perforated sheeting has been presented. Numerical models of the RC column strengthened with the proposed reinforcement system have been developed considering the nonlinearity of the building materials and the effects of the contact interfaces between RC and steel components. Finally, the results of the FEM model analysis have accurately described the general behaviour of the reinforced column and the comparison with the standard strengthening technique based on steel angles and batten plates has been done to demonstrate the efficient performances of the steel system proposed as a local strengthening technique of RC columns.

#### SOMMARIO

L'uso della carpenteria metallica per il rinforzo globale e locale delle strutture esistenti è un consolidato ed efficace metodo di intervento. Oltre all'uso di controventi e pareti a taglio metalliche per l'adeguamento sismico, recentemente, ricercatori e progettisti hanno prestato attenzione all'uso di elementi in acciaio alleggeriti come tecnica di intervento locale di membrature strutturali di edifici

esistenti in cemento armato e muratura. Nella presente memoria, in primo luogo, è stato sviluppato un raffinato modello FEM per riprodurre i risultati sperimentali di una campagna di prove di laboratorio di letteratura eseguita su colonne in c.a. caricate assialmente. Successivamente è stato presentato un nuovo sistema di rinforzo basato sull'utilizzo di lamiere perforate in acciaio. Sono stati sviluppati modelli numerici della colonna in c.a. rinforzata con il sistema di rinforzo proposto considerando la non linearità dei materiali costitutivi e gli effetti di contatto all'interfaccia tra il componente in c.a. e quelli in acciaio. In conclusione, i risultati delle analisi derivanti dal modello FEM implementato hanno descritto accuratamente il comportamento generale della colonna rinforzata ed il confronto con la tecnica di rinforzo standard basata su angolari e calastrelli di acciaio ha mostrato le efficienti prestazioni del sistema in acciaio proposto come tecnica di rinforzo locale di colonne in c.a.

## 1 INTRODUZIONE

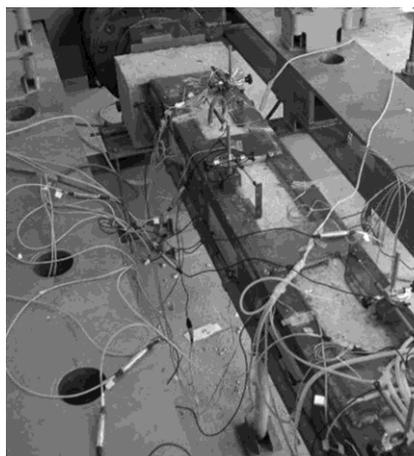
Una panoramica mondiale sulle strutture in cemento armato esistenti ha evidenziato che il loro rapido degrado è imputabile a molteplici cause, quali il decadimento del calcestruzzo, la modifica della classe d'uso e dei requisiti di carico, la corrosione delle armature, nonché errori in fase di progettazione e costruzione [1]. Ciò ha rivelato la necessità di studiare e sperimentare nuove tecniche di intervento al fine di aumentare le prestazioni sismiche degli edifici esistenti [2]. Il consolidamento delle strutture esistenti in cemento armato tradizionale o in muratura sta assumendo cruciale importanza nel campo dell'Ingegneria Strutturale. Rilievi diagnostici effettuati su numerosi edifici esistenti del patrimonio nazionale, hanno rilevato la presenza di calcestruzzo di bassa qualità, con resistenze a compressione comprese tra 10 e 15 MPa [3]. In questi casi, oltre a presentare gravissimi problemi inerenti la verifica per azioni sismiche, tali edifici richiedono spesso un sostanziale incremento delle prestazioni anche nei riguardi dei carichi verticali. Ciò può essere ottenuto mediante interventi di rinforzo strutturali realizzati sia aggiungendo nuovi elementi, che consentano di assorbire le azioni orizzontali, sia rinforzando la struttura esistente. Negli ultimi decenni, si sono affermate diverse tecniche per il rinforzo locale di elementi in cemento armato. Esse possono essere raggruppate in tre macro-categorie di interventi di confinamento, in funzione del materiale utilizzato: calcestruzzo, materiali compositi a base di polimeri fibro-rinforzati (FRP) ed acciaio. Quest'ultima macro-categoria, reputata la più impiegata [4], consiste nell'applicazione di piastre, calastrelli ed angolari che, in funzione della disposizione, classificano gli interventi in ingabbiamento, incapsulamento, confinamento con piastre ed ancoraggi e rivestimento di forma circolare/ovale [5]. Se opportunamente diffusi, gli interventi locali possono anche rappresentare una tecnica di rinforzo globale in quanto, pur agendo sui singoli elementi, essi influenzano il comportamento dell'intera struttura. Pertanto, è fondamentale esaminare l'influenza complessiva dei vari interventi locali nel loro complesso sul comportamento sismico globale dell'edificio [6].

Il presente articolo ha l'obiettivo di proporre un innovativo sistema per il rinforzo di elementi in c.a. basato sull'impiego di lamiere forate in acciaio, poste in opera mediante unioni bullonate. A tale scopo, è stata dapprima condotta un'accurata ricerca bibliografica al fine di reperire una campagna sperimentale su una colonna in c.a. in scala reale, con e senza rinforzo costituito da confinamento con angolari e calastrelli [7], da utilizzare come prova di riferimento per le successive analisi numeriche. Il modello FEM di tale colonna prima e dopo l'intervento di rinforzo è stato implementato tramite il codice di calcolo ABAQUS. Sottoposto a carichi assiali e ad azioni sismiche, il modello FEM della colonna rinforzata ha mostrato risultati in linea con quelli della campagna di sperimentazione numerica eseguita in [8]. Validato tale modello numerico standard, è stato implementato un differente modello FEM di rinforzo volto ad utilizzare lamiere perforate in acciaio, considerando le non linearità dei materiali e gli effetti dell'attrito tra la colonna in c.a. e le lamiere metalliche. E' stata eseguita un'analisi parametrica facendo variare le caratteristiche geometriche del

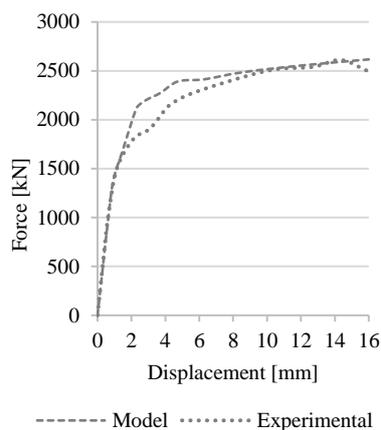
sistema. I risultati ottenuti sono stati comparati fra loro e, infine, è stata determinata la configurazione ottimale del sistema di rinforzo.

## 2 LA PROVA SPERIMENTALE DI RIFERIMENTO

La campagna sperimentale condotta da Adam et al. [7] è stata considerata quale prova di riferimento per la calibrazione numerica. Questa sperimentazione è stata scelta poiché il pilastro in c.a. è a grandezza naturale (Fig. 1) e presenta altezza, sezione e armature simili a quelle dei pilastri appartenenti ad edifici progettati in assenza di criteri antisismici. Le colonne in c.a. possiedono una sezione di 30x30 cm, un'altezza di 250 cm e sono armati con 4 $\Phi$ 12 longitudinali e staffe  $\Phi$ 6 aventi una spaziatura costante di 20 cm. La tecnologia di rinforzo prevede angolari 25x8x0,8 cm in ogni spigolo della colonna e calastrelli, di dimensioni 27x16x0,8 cm, saldati agli angolari e distanziati tra loro di 41,5 cm. I materiali utilizzati sono calcestruzzo avente  $f_c$  pari a 10,6 MPa, acciaio da armatura B450C e acciaio da carpenteria per lamiera del tipo S210. I risultati delle prove sperimentali sono stati replicati implementando un raffinato modello FEM tridimensionale con il codice di calcolo ABAQUS [9]. Dal confronto tra la prova sperimentale ed il modello numerico messo a punto si nota un'ottima corrispondenza di risultati in termini di rigidità iniziale e massima resistenza raggiunta (Fig. 2). Al contrario, nell'analisi numerica, l'inizio del campo plastico è caratterizzato da resistenze leggermente superiori a quelle raggiunte nella prova sperimentale. Ciò è dovuto alle maggiori imperfezioni che hanno caratterizzato il sistema strutturale reale rispetto a quello FEM.



**Fig. 1.** Colonna sottoposta a test di compressione da Adam *et al.* (2007)

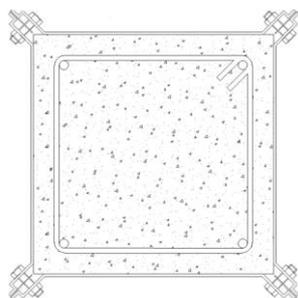


**Fig. 2.** Confronto tra la curva sperimentale e quella di ABAQUS

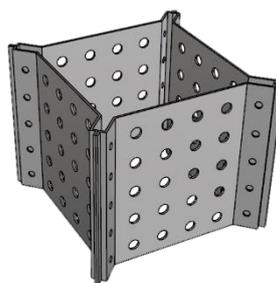
## 3 IL SISTEMA DI RINFORZO: IMPLEMENTAZIONE E MODELLO FEM

L'innovativo sistema di retrofit proposto si basa sull'impiego di lamiere forate che, esercitando un'azione di confinamento, sono volte al consolidamento di pilastri in cemento armato. Per tale intervento vengono utilizzate quattro lamiere forate, posizionate in aderenza alle quattro facce del pilastro e bullonate tra loro (Fig. 3). Le piastre presentano una piegatura a forma di "Z" per tutta la loro altezza, così da consentire la bullonatura tra le loro estremità (Fig. 4). I bulloni utilizzati sono

del tipo M14 di classe 8.8 e vengono disposti in ciascuno dei fori presenti sulle piegature della lamiera. La presenza dei fori è finalizzata a ridurre il peso della piastra e, pertanto, il costo del materiale.

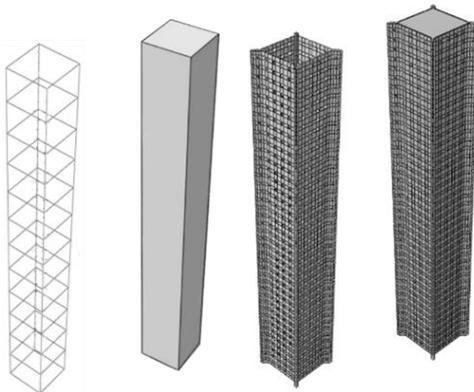


**Fig. 3.** Sezione trasversale del pilastro rinforzato con lamiere forate



**Fig. 4.** Vista tridimensionale dell'intervento proposto

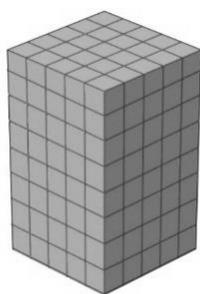
Stabilita la geometria del modello e le proprietà dei materiali, si procede con la fase di assemblaggio (Fig. 5). La gabbia di armatura, composta da barre e staffe, è disposta all'interno del pilastro in calcestruzzo. Le quattro lamiere sono posizionate in aderenza al pilastro e vengono posizionate in modo che tutti i lembi da bullonare siano a contatto tra loro.



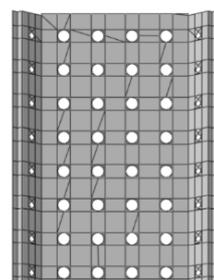
**Fig. 5.** Vista tridimensionale in ABAQUS delle parti del sistema e del relativo assemblaggio

Implementato il modello geometrico con le proprietà dei materiali definiti in precedenza, sono state considerate le proprietà di interazione tra le parti strutturali. In particolare, sono stati identificati ed assegnati i tipi di contatto fra le parti del sistema [9]. Il contatto relativo al collegamento tra lamiera e colonna è definito come *Surface to Surface* per materiali differenti (acciaio-calcestruzzo), assegnando un coefficiente di attrito pari a 0,2. Sono state definite 4 interazioni. Per ciascuna interazione, le superfici *master* e *slave* coinvolte sono, rispettivamente, quella interna della lamiera e quella esterna della colonna. Per simulare la bullonatura tra le lamiere, sono stati utilizzati vincoli *constraints* del tipo *Rigid Body constraints*, che impediscono il movimento relativo tra le parti. Tali vincoli sono stati applicati in corrispondenza dei fori delle lamiere poste a contatto. Essi sono stati

inoltre utilizzati anche per associare il comportamento di una superficie ad un singolo punto di riferimento (*reference point*). Tale modellazione risulta utile per imporre uno spostamento ad un'intera superficie selezionando un singolo punto. Quest'ultima tipologia di legame caratterizza anche la superficie inferiore e quella superiore del modello geometrico della colonna. Infine, per simulare il legame tra l'armatura e il calcestruzzo sono stati utilizzati *Embedded region constraints*. La discretizzazione del modello è stata eseguita con una mesh di elementi tridimensionali continui, appartenenti al primo ordine, definiti da otto nodi e da un'interazione lineare. La raffinatezza della maglia della singola superficie è funzione della tipologia di contatto e, dunque, dell'algoritmo *master – slave* che la caratterizza. Al fine di generare una mesh regolare, i fori sono stati isolati iscrivendoli in superfici di forma quadrata (Fig. 6 e 7).



**Fig. 6.** Generazione della mesh per la colonna



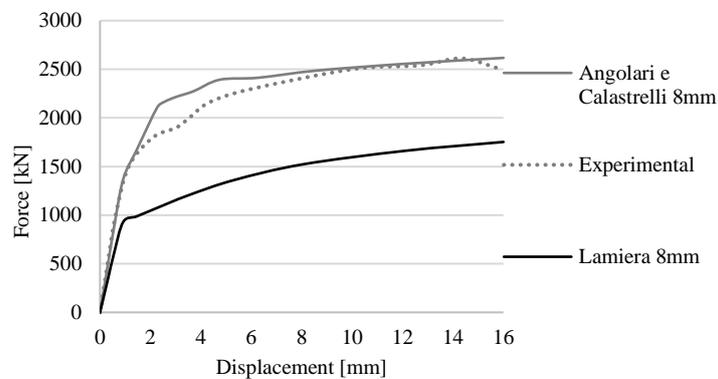
**Fig. 7.** Generazione della mesh per la lamiera

## 4 ANALISI FEM

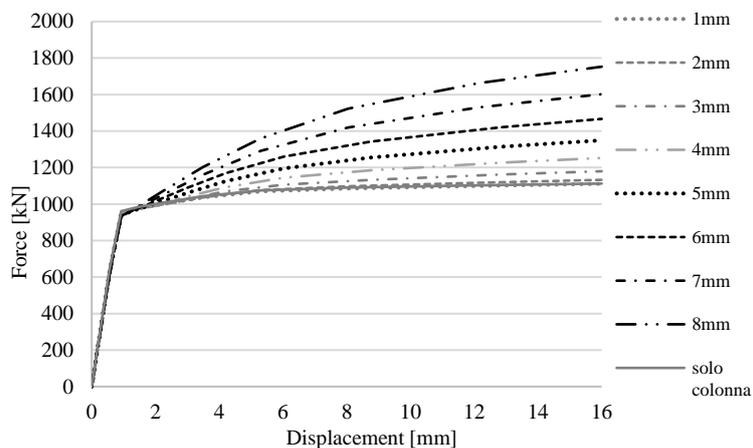
Al fine di riprodurre fedelmente le prove monotone, è stata eseguita un'analisi FEM a controllo di spostamento. Il carico è stato applicato in due step: (I) fase iniziale: simulazione dell'azione verticale uniassiale con abbassamento di 16 mm; (II) seconda fase: simulazione di un'azione sismica applicata in testa alla colonna rinforzata con le lamiere, applicando uno spostamento orizzontale pari a 100 mm. I risultati delle due fasi di analisi sono di seguito presentati.

### 4.1 Carichi verticali

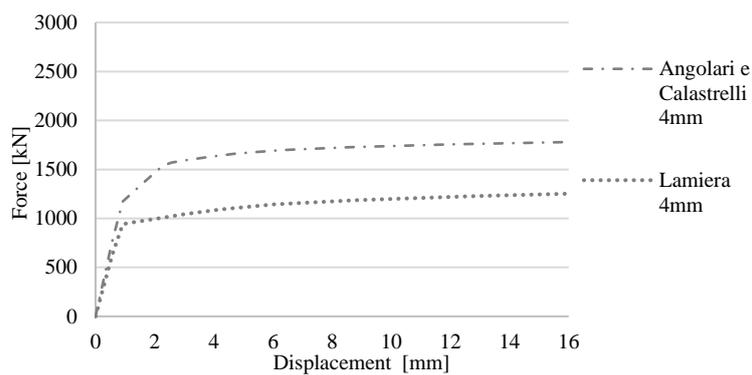
Al fine di confrontare i risultati ottenuti con la precedente trattazione, in Fig. 8 si riporta un grafico forza-spostamento in cui sono presenti tre curve: (I) in nero, la curva FEM ricavata dalla sperimentazione numerica sulle lamiere forate; (II) in grigio, la curva FEM del corrispondente intervento con angolari e calastrelli; (III) in grigio tratteggiato, la curva ottenuta dalla prova sperimentale di Adam *et al.* Per individuare il sistema di rinforzo ottimale, ovvero quello con migliore resistenza, rigidità e duttilità a parità di dimensione degli elementi, è stata effettuata un'analisi parametrica variando lo spessore della lamiera. In Fig. 9 sono riportate le curve forza-spostamento ottenute al variare dello spessore della lamiera (da 1 mm a 8 mm). Infine si riporta il confronto tra i due interventi analizzati, considerando uno spessore di 4 mm. Tale limitazione geometrica è dettata dalle operazioni di piegatura a freddo della lamiera, che diventano difficoltose per spessori superiori a 4 mm (Fig. 10).



**Fig. 8.** Confronto tra la colonna senza intervento e quella rinforzata con i due sistemi in acciaio



**Fig. 9.** Analisi parametrica sul sistema proposto al variare dello spessore della lamiera



**Fig. 10.** Confronto fra l'intervento proposto e quello tradizionale (spessore elementi 4 mm)

## 4.2 Sollecitazioni sismiche

Nel secondo step di carico è stata simulata la presenza di un'azione sismica orizzontale applicata in testa alla colonna. Si riportano le curve forza-spostamento per gli spessori della lamiera investigati (Fig. 11) ed il confronto tra l'intervento proposto e quello con angolari e calastrelli, entrambi con spessori degli elementi pari a 4 mm.

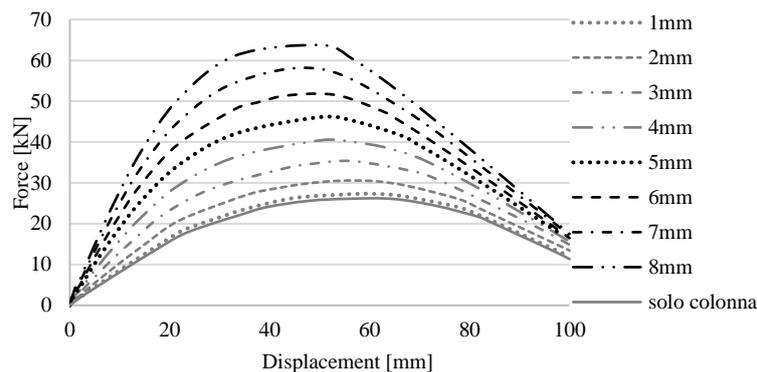


Fig. 11. Analisi parametrica sul sistema esaminato variando lo spessore della lamiera

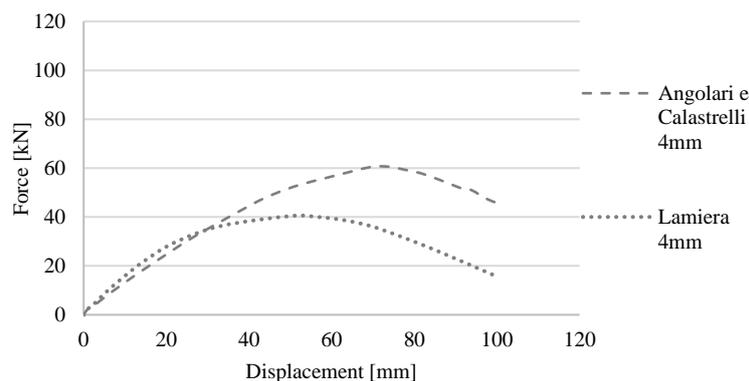


Fig. 12. Confronto fra l'intervento proposto e quello tradizionale (spessore elementi 4 mm)

Dal confronto fra i due sistemi si nota un'analogia rigidità e duttilità. La riduzione di resistenza rispetto all'intervento tradizionale è funzione del minor effetto di confinamento esercitato dai collegamenti bullonati del sistema presentato rispetto a quelli saldati dell'intervento con angolari e calastrelli. Tuttavia, considerando la riduzione dei costi di manodopera del sistema con lamiera rispetto a quello tradizionale, che richiede solitamente collegamenti saldati in opera fra angolari e calastrelli, la tecnica di rinforzo con le lamiere forate può ritenersi efficace ed economica.

## CONCLUSIONI

L'innovativo sistema di retrofit sismico con lamiere forate in acciaio per colonne di edifici in cemento armato ha l'obiettivo di porsi come alternativa all'affermata tecnologia che prevede l'impiego di angolari e calastrelli. Nella memoria sono state eseguite analisi FEM parametriche su una

colonna in c.a., soggetta a soli carichi verticali e a carichi verticali più azioni orizzontali, rinforzata col sistema presentato. I risultati ottenuti sono stati confrontati con un'analogia sperimentazione di laboratorio eseguita sulla stessa colonna rinforzata con la classica tecnica che prevede l'uso di angolari e calastrelli.

Sulla base di un confronto prestazionale fra le due tecniche risulta che il sistema con le lamiere forate potrebbe sembrare meno vantaggioso rispetto all'intervento tradizionale con angolari e calastrelli. In realtà, il sistema proposto è maggiormente competitivo in termini economici e di qualità dell'intervento, poiché le lamiere forate possono essere messe in opera velocemente grazie al semplice serraggio dei bulloni, che garantisce un abbattimento dei costi della manodopera rispetto a quelli richiesti dai collegamenti saldati angolari-calastrelli. I collegamenti bullonati, inoltre, richiedono minori e più semplici controlli in opera per valutarne la corretta esecuzione in confronto a quelli richiesti dai collegamenti saldati previsti dal sistema con angolari e calastrelli, che hanno bisogno di controlli in opera più approfonditi da eseguirsi mediante prove distruttive e non distruttive.

I dati ottenuti da questa sperimentazione evidenziano, quindi, le ottime prestazioni del sistema proposto, che potrà essere migliorato ulteriormente studiandone ulteriori configurazioni geometriche, facendo variare la dimensione dei fori e l'interasse fra questi ultimi, al fine di evitare che il collasso per attingimento della tensione di rottura delle zone di lamiera fra le forature del sistema in questa sede testato possa precludere il completo sfruttamento delle sue grandi potenzialità in campo sismico.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Raza S, Khan MKI, Menegon SJ *et al*, Strengthening and repair of reinforced concrete columns by jacketing: state-of-the-art review, Sustainability, 2019.
- [2] Paulay T, Priestley MJN Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. Wiley, New York, 1992.
- [3] Ferrini M, Signorini N, Pelliccia P *et al*, Risultati delle campagne di indagine effettuate dalla Regione Toscana per la valutazione della resistenza del calcestruzzo di edifici rinforzati esistenti, Workshop ReLUIS "Valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica di edifici esistenti in c.a.", Roma, 29-30 Maggio, 2008.
- [4] Tamai S, Sato T, Okamoto M, Hysteresis model of steel jacketed RC columns for railway viaducts. Proc 16th Congress of IABSE, Lucerne, Switzerland, 2000.
- [5] Wu YF, Liu T, Oehlers DJ, Fundamental principles that govern retrofitting of reinforced concrete columns by steel and rp jacketing, Adv Struct Eng, 2006.
- [6] Ghimire A, State-of-the-Art-review on masonry structure: identification behaviour and seismic retrofitting techniques for structures, IJSR 8:2319-7064, 2019.
- [7] Adam JM, Ivorra S, Giménez E *et al*, Behaviour of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips, Steel and Composite Structures, 7(5):405-419, 2007.
- [8] Formisano A, Longo D, Un'analisi parametrica sul rinforzo locale di colonne in c.a. mediante angolari e calastrelli metallici, Atti del XXVI Congresso CTA "Giornate italiane della costruzione in acciaio", Venezia, 28-30 Settembre 2017.
- [9] Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., (HKS), ABAQUS Standard/explicit user's manual, Version 6.7, USA, 2008.

## PAROLE CHIAVE

Edifici esistenti, Cemento armato, Tecniche di intervento locale, Lamiere perforate di acciaio, Modello FEM, Analisi non lineari.