

Axial compressive behavior of FRP/Steel-confined concrete with preload

Francesco Cannella, Liborio Cavaleri, Calogero Cucchiara, Marco Filippo Ferrotto, Maurizio Papia

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM), Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, 90133, Palermo.

Keywords: Preloading, Steel Jacketing, FRP Jacketing, Confined Concrete, ABAQUS

ABSTRACT

Strengthening of concrete columns with fiber reinforced polymers (FRP) sheets or Steel Jacketing system provide to the existing structural members a good improvement in terms of load and strain capacity due to the properties of the composite jackets. A proper knowledge of the load-strain response of the confined concrete elements is necessary for the seismic retrofitting design of existing structures. However, so far, the available design methods and technical codes do not consider the effect of the possible presence of serviceability loads at the moment of application of the reinforcement, and therefore, the compressive behavior of the confined concrete under preload conditions is still unclear. The goal of the present paper is to identify the efficiency of the confinement action in terms of strength and deformational capacity of concrete columns subjected to different preloading levels and strengthened with FRP and/or Steel Jacketing.

The physical problem is investigated by means of the Finite Element Software ABAQUS, able to reproduce the confined response of the concrete after the introduction of the external reinforcement under established stress/strain state to the plain concrete. Mechanical parameters that influence the confined systems are therefore examined and compared for both strengthening systems, analyzing the differences respect to the classical formulations.

Capacità in compressione di colonne in calcestruzzo confinato con FRP/Acciaio in presenza di precarico

Francesco Cannella, Liborio Cavaleri, Calogero Cucchiara, Marco Filippo Ferrotto, Maurizio Papia

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM), Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, 90133, Palermo.

Keywords: Precarico, Confinamento, Steel Jacketing, FRP, ABAQUS

ABSTRACT

Nell'ambito del recupero e rinforzo delle costruzioni esistenti, il confinamento di colonne in calcestruzzo armato con materiali polimerici fibro-rinforzati (FRP) e la tecnica di incamicatura tramite il sistema combinato di angolari e piatti in acciaio (Steel Jacketing) risultano molto utilizzate, in quanto offrono notevoli vantaggi in termini di incremento della capacità portante e deformativa agli elementi strutturali che presentano carenze di requisiti sismici.

L'esecuzione dell'intervento di rinforzo in condizioni di esercizio della struttura implica la presenza di uno stato tenso-deformativo esistente nelle colonne, causato dalla presenza dei carichi gravitazionali. Questo può comportare una variazione degli effetti del confinamento, in quanto la risposta del sistema si differenzia dal caso standard in cui il rinforzo viene applicato in assenza di sollecitazioni agenti.

Il meccanismo di confinamento che governa il fenomeno sopra descritto non è coerente con le formulazioni standard proposte e disponibili in letteratura, che sono previste per simulare il comportamento in regime di compressione monotono e/o ciclico del calcestruzzo confinato; pertanto, in presenza di precarico, la valutazione della capacità resistente e deformativa necessita di più accurate previsioni.

Nel presente lavoro, tramite modellazione agli elementi finiti (FEM) con ausilio del software ABAQUS, si analizzano gli effetti del confinamento elastico (FRP) ed elasto-plastico (Steel Jacketing) in presenza di precarico, valutando l'efficacia della risposta rispetto alle trattazioni classiche.

1 INTRODUZIONE

La domanda di sicurezza strutturale nell'edilizia civile, specialmente in aree ad alto rischio sismico, comporta l'impiego di risorse sempre crescenti per la riparazione ed il rinforzo di edifici esistenti in calcestruzzo armato e muratura. Le carenze strutturali riscontrate risultano principalmente dovute alle scarse proprietà meccaniche dei materiali e alle limitate caratteristiche di duttilità delle sezioni e/o dell'intera struttura. Inoltre, frequenti risultano i casi di strutture che presentano danneggiamenti post sisma e che richiedono interventi di adeguamento o miglioramento sismico.

Nell'ambito del rinforzo strutturale di colonne in calcestruzzo armato di edifici esistenti, esistono diverse tecniche di intervento atte a migliorare la capacità portante e deformativa degli elementi strutturali. Tra le più utilizzate, si ritrovano le incamicature in acciaio (*Steel*

Jacketing), in calcestruzzo (*Concrete Jacketing*) e le fasciature con materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (*FRP Jacketing*).

Sia in termini sperimentali che di formulazioni numeriche e analitiche, è ad oggi presente in letteratura una vasta gamma di indagini e proposte che analizzano i vantaggi delle incamicature in FRP (Spoelstra e Monti 1999, Lam and Teng 2004, Campione et al. 2004, Berthet et al. 2005, Lam e Teng 2006, Cui e Sheikh 2010, Liang et al. 2012, Ozbakkaloglu e Lim 2013), e acciaio (Braga et al. 2006, Adam et al. 2007, Badalamenti et al. 2010, Nagaprasad et al. 2009, Montuori e Piluso 2009, Campione et al. 2017), indagando sul comportamento in compressione delle colonne rinforzate e dunque sugli effetti di incremento della capacità portante e deformativa. Tuttavia, la maggior parte delle formulazioni disponibili non è in grado di tener conto della presenza di un eventuale stato tenso-deformativo esistente nella colonna al momento dell'applicazione del rinforzo, situazione che più

verosimilmente si riscontra nella pratica applicazione, quando i sistemi di rinforzo sono applicati agli elementi strutturali di edifici esistenti in condizioni di esercizio. Molto spesso infatti, quando vi è l'impossibilità di utilizzare martinetti idraulici per lo scarico delle colonne prima dell'applicazione dei rinforzi, gli interventi vengono eseguiti quando gli elementi strutturali sono sottoposti all'azione di carichi verticali.

In Fig. 1 viene riportato uno scenario tipico in cui sono illustrate tre colonne di un sistema strutturale che necessitano di intervento di rinforzo. Nell'esempio in figura, a causa delle condizioni di servizio, le colonne sono interessate da uno stato di tensione critica (prossimo al raggiungimento della resistenza a compressione del calcestruzzo). Nella colonna centrale, il rinforzo viene applicato dopo lo scarico della colonna tramite l'ausilio di martinetti idraulici, per cui lo stato tenso-deformativo al momento dell'applicazione della fasciatura (FRP o Steel Jacketing) è nullo. Nella colonna di destra invece, l'applicazione della fasciatura avviene senza aver operato lo scarico della struttura, pertanto, al momento del rinforzo, il calcestruzzo presenta un determinato stato di tensione/deformazione. È di facile intuizione che la risposta dei sistemi rinforzati nelle due diverse configurazioni potrebbe non essere dello stesso tipo.

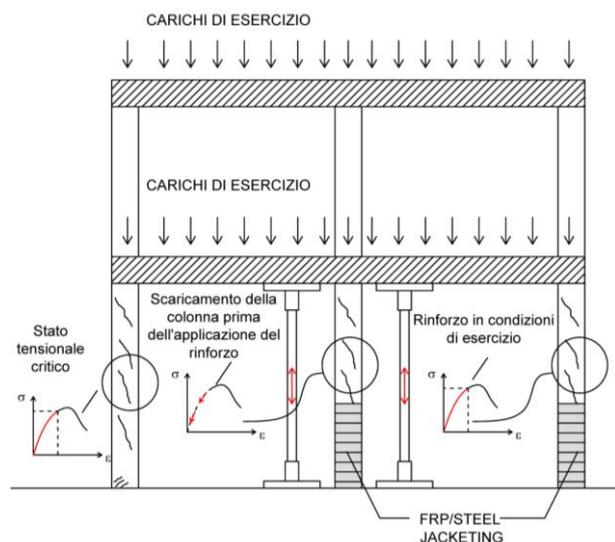


Figura 1. Scenario di interventi di recupero sulle strutture esistenti: rinforzo in presenza e assenza di carichi gravitazionali.

Mentre dall'analisi dello stato dell'arte si può constatare che il comportamento monotonic e ciclico in condizioni standard è stato - sebbene ancora in forte sviluppo - approfonditamente studiato, carenti risultano le fonti che analizzano il comportamento dei sistemi confinati soggetti a precarico. A tal proposito, i pochi lavori ad oggi disponibili sono stati condotti principalmente su

colonne in calcestruzzo confinato con FRP (si veda Shi e He 2009, He e Jin 2011, Ivorra et al. 2013), tra l'altro con conclusioni a volte contrastanti da parte dei diversi autori. Inoltre, non esistono riferimenti bibliografici sugli effetti del precarico su colonne con Steel Jacketing, sebbene sia una tecnica ampiamente usata nell'ambito del rinforzo e/o adeguamento sismico di strutture esistenti.

L'obiettivo del presente lavoro dunque è quello di investigare sulle differenze in termini di capacità portante dei due sistemi sopra descritti, che caratterizzano il comportamento in compressione del calcestruzzo confinato in presenza e assenza di precarico.

2 COMPORTAMENTO MECCANICO IN CONDIZIONI DI PRECARICO

Per una adeguata interpretazione del fenomeno, si può pensare ad una colonna in c.a. soggetta ad uno stato di tensione/deformazione assegnato, in un range tra 0 e la resistenza del materiale f_{c0} (resistenza a compressione del calcestruzzo non confinato). In tal modo si può definire un indice di precarico n_p pari al rapporto tra la tensione agente sul materiale e la resistenza a compressione dello stesso:

$$n_p = \frac{\sigma(\varepsilon)}{f_{c0}} \text{ per } 0 \leq n_p \leq 1 \quad (1)$$

Analizzando il comportamento in compressione del calcestruzzo tramite la definizione del suo legame costitutivo, si possono identificare diversi scenari, a seconda che il confinamento sia di tipo elasto-plastico (caso di incamicatura in acciaio) o di tipo elastico (caso di incamicatura in FRP).

A un dato livello di compressione assiale corrisponderà certamente un determinato livello di deformazione laterale del calcestruzzo. Nel momento in cui il rinforzo viene applicato, il comportamento del materiale si può identificare come confinato; pertanto, se il rinforzo si applica in condizioni di precarico, si avrà sicuramente un ritardo della risposta rispetto al caso di compressione monotonica (con confinamento attivo da condizioni tenso/deformative nulle).

Dal momento quindi che la pressione laterale di confinamento si attiva quando il rinforzo viene applicato, si avranno potenzialmente valori della risposta inferiori rispetto al caso standard. L'aspetto incognito risiede nel valutare in che modo questo "ritardo" caratterizza la curva di compressione del calcestruzzo confinato in termini di resistenza e deformazione associata.

In Fig. 2 è riportato uno schema qualitativo che descrive l'ipotesi di partenza, a partire dalla quale verranno sviluppate successivamente le formulazioni numeriche. Le curve rappresentate, sia del comportamento assiale che con riferimento alla pressione laterale di confinamento, sono pensate in modo che, dato un prestabilito livello di precarico imposto (σ_{0p} , ε_{0p}), venga rappresentato un possibile andamento della risposta in compressione.

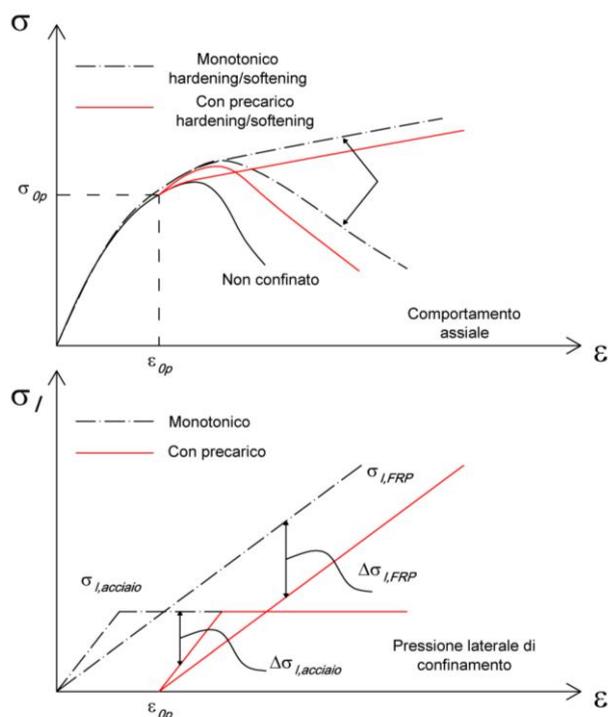


Figura 2. Comportamento meccanico del calcestruzzo confinato in regime monotonic e di precarico.

3 MODELLAZIONE FEM

Le simulazioni numeriche, effettuate con l'ausilio del software Simulia ABAQUS, hanno permesso in una prima fase la valutazione della capacità di confinamento sulle colonne in calcestruzzo soggette a carico di compressione monotonic. Successivamente, ne viene interpretata la risposta in regime di precarico. Le simulazioni numeriche eseguite si estendono sia al caso di confinamento elastico (confinamento con FRP), che nel caso di confinamento elasto-plastico (confinamento con Steel Jacketing).

3.1 Tipologia di elementi e discretizzazione

Le colonne in calcestruzzo sono state modellate come elementi *Solid* a 8 nodi, identificati nel software come *C3D8R*, del tipo "8-node linear brick, reduced integration, hourglass control". L'incamiciatura in acciaio, che nel presente lavoro è rappresentata dalla

tecnica combinata di angolari e piatti, è stata modellata con la stessa tipologia di elementi utilizzati per la modellazione delle colonne. La fasciatura in FRP è stata modellata invece come elemento *shell* di tipo membrana a 4 nodi, denominato *S4R*, del tipo "4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains".

3.2 Proprietà dei materiali

Le proprietà elastofragili del rivestimento in FRP si possono specificare su ABAQUS con proprietà di tipo "lamina", e correlazioni dei moduli elastici longitudinale E_1 e trasversale E_2 , dei moduli di rigidezza G_{12} , G_{13} , G_{23} e il coefficiente di Poisson ν_{12} .

L'acciaio è stato modellato come materiale elasto-plastico a deformazione indefinita, coerentemente con il legame costitutivo monoassiale in trazione, trascurando gli effetti di incrudimento.

Il calcestruzzo è stato modellato tramite il *Concrete Damaged Plasticity Model (CDPM)* (Abaqus. Theory and User Manuals 2013). Il modello a plasticità di danno consente di riprodurre le non linearità del materiale: è possibile dunque tener conto del cracking in tensione e del crushing in compressione.

Le formulazioni che definiscono il comportamento non lineare del materiale, soggetto ad uno stato tensionale di tipo pluriassiale, includono la variabile di danno, il criterio di rottura, la regola di flusso e le leggi di hardening/softening.

Le formulazioni di cui sopra sono gestite in ABAQUS Standard settando i parametri di plasticità, ovvero: l'angolo di dilatanza ψ che caratterizza l'andamento delle deformazioni plastiche, il rapporto f_{bo}/f_{co} tra la resistenza in compressione in regime biassiale e la stessa in regime monoassiale, l'eccentricità e del flusso potenziale, il parametro di viscosità μ ed il rapporto K_c tra il secondo invariante sul meridiano di trazione e quello sul meridiano di compressione per la funzione di rottura (Lee e Fevens 1988, Lubiner et al. 1989).

Nel presente lavoro, i parametri assunti alla base del modello numerico sono in accordo con gli studi presentati da Hany et al. 2016 nel caso di confinamento con FRP e di Tao et al. 2013 nel caso di confinamento con Steel Jacketing.

In Fig. 3, a titolo esemplificativo, sono rappresentati i due modelli numerici realizzati rispettivamente per il caso di incamiciatura in acciaio e FRP, utilizzati per le analisi numeriche in regime monotonic e di precarico.

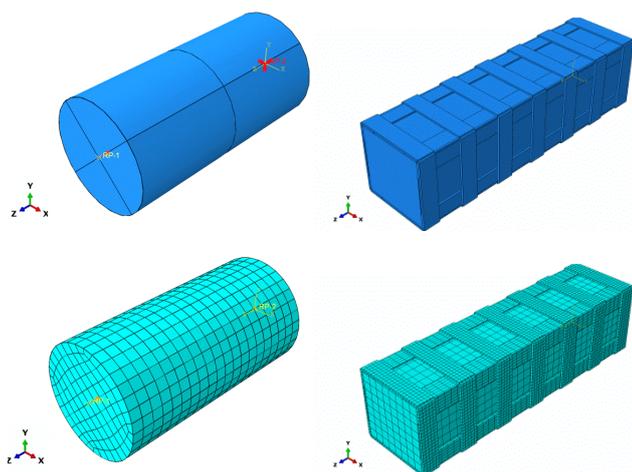


Figura 3. Modellazione e meshing dei campioni confinati con FRP e Steel Jacketing.

4 COMPORTAMENTO MONOTONICO: CONFRONTI NUMERICO-SPERIMENTALI

Come ben noto dalla letteratura, il meccanismo di confinamento generato dall'incamiciatura con FRP è di tipo elastico fino alla rottura della fibra. Di conseguenza, la pressione laterale di confinamento avrà un andamento sempre crescente, coerentemente con il livello di deformazione trasversale del campione.

Nel caso di incamiciatura con Steel Jacketing, il sistema è interessato da un meccanismo di confinamento di tipo elasto-plastico. Differentemente dal legame di confinamento elastico, nel momento in cui i piatti in acciaio costituenti il jacketing raggiungono la tensione di snervamento del materiale, forniscono una tensione costante all'aumentare del livello di deformazione del campione. Ne consegue che per questi sistemi si ottengono, nella maggior parte dei casi, risposte caratterizzate da softening, o al massimo da rami post picco sub-orizzontali.

Per analizzare il comportamento in compressione in condizioni di precarico è fondamentale dunque interpretare adeguatamente il processo in regime di carico monotonic.

4.1 Confinamento con FRP

Si riportano nel presente paragrafo i confronti numerico-sperimentali effettuati per la validazione dei modelli in regime monotonic di compressione.

Gli studi sperimentali selezionati per la validazione del modello numerico sono stati condotti su provini cilindrici in calcestruzzo privo

di armatura interna, con diversi livelli di rapporto meccanico di confinamento, identificato in funzione delle caratteristiche meccaniche nominali dei materiali, come illustrato dalla seguente relazione:

$$\omega = \frac{4 \cdot t_{frp} \cdot E_{frp} \cdot \varepsilon_{ju}}{D \cdot f_{c0}} \quad (2)$$

in cui t_{frp} è lo spessore della fibra, E_{frp} è il modulo di elasticità longitudinale della fibra unidirezionale, ε_{ju} è la deformazione nominale a rottura, D il diametro del campione e f_{c0} la resistenza a compressione del calcestruzzo non confinato.

I dati sperimentali utilizzati nel presente lavoro per la validazione del modello numerico sono riferiti a Lam e Teng 2004, Berthet et al. 2005 e Lam e Teng 2006.

Si è dunque riprodotto il comportamento in compressione di provini in calcestruzzo confinato aventi diverso rapporto meccanico di confinamento. Si riportano in Tab. 1 le caratteristiche meccaniche dei campioni (deformazione al picco di resistenza del calcestruzzo non confinato ε_{c0} , diametro d e altezza h del campione, rapporto meccanico di confinamento ω) il rapporto tra risultati numerici e sperimentali (resistenza a compressione f_{cc} e deformazione al picco di resistenza del calcestruzzo confinato ε_{cc}) e i rispettivi riferimenti bibliografici.

Tabella 1. Proprietà meccaniche e risultati numerico sperimentali di colonne in calcestruzzo confinate con FRP.

Autori	d x h (mm)	ε_{c0} (%)	E_{frp} (GPa)	ω	$\frac{f_{cc,expl}}{f_{cc,num}}$	$\frac{\varepsilon_{cc,expl}}{\varepsilon_{cc,num}}$
Lam-Teng (2006)	152x305	0.256	25.32	0.369	1.074	1.141
Lam-Teng (2004)	152x305	0.203	27.98	0.422	1.090	1.310
Berthet et al. (2005)	160x320	0.20	25.24	0.517	0.928	0.842
Lam-Teng (2006)	152x305	0.25	24.63	0.780	1.126	1.228
Berthet et al. (2005)	160x320	0.20	25.24	0.808	1.052	1.179
Lam-Teng (2004)	152x305	0.20	27.98	0.845	1.036	1.089
Lam-Teng (2004)	152x305	0.188	29.80	1.327	0.964	1.022
Berthet et al. (2005)	160x320	0.20	36.05	1.305	0.837	0.809

Dal confronto tra i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche e le curve sperimentali si nota come il modello si presta bene all'interpretazione della risposta monotonic del calcestruzzo confinato con FRP (Fig. 4-5), con buona approssimazione sia in termini di tensione-deformazione assiale, sia relativamente alla riproduzione dell'andamento delle deformazioni

lateralmente, aspetto fondamentale per la determinazione numerica della pressione laterale di confinamento esercitata dal tessuto, e di conseguenza delle condizioni ultime, identificate dalla rottura della fibra.

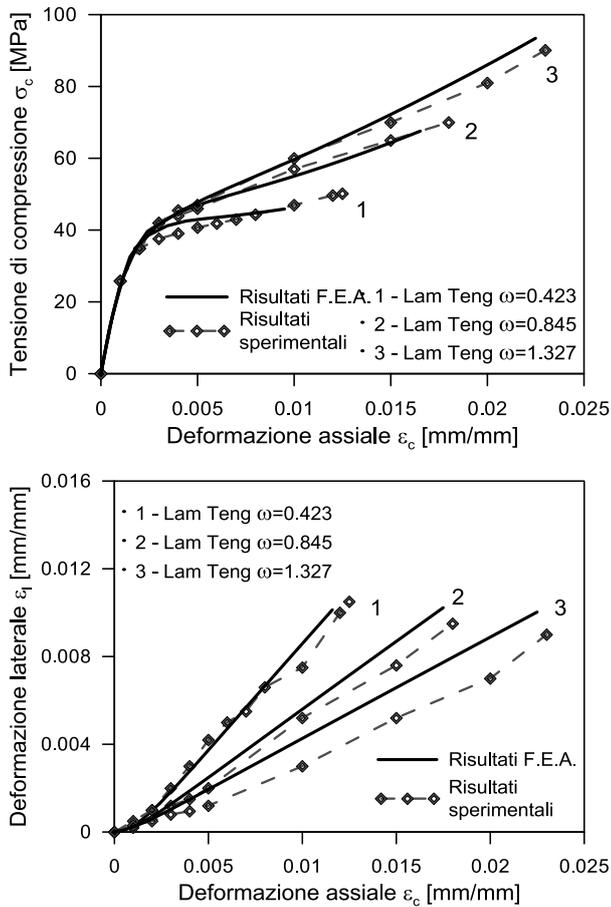


Figura 4. Confronti numerico-sperimentali. Lam-Teng 2004.

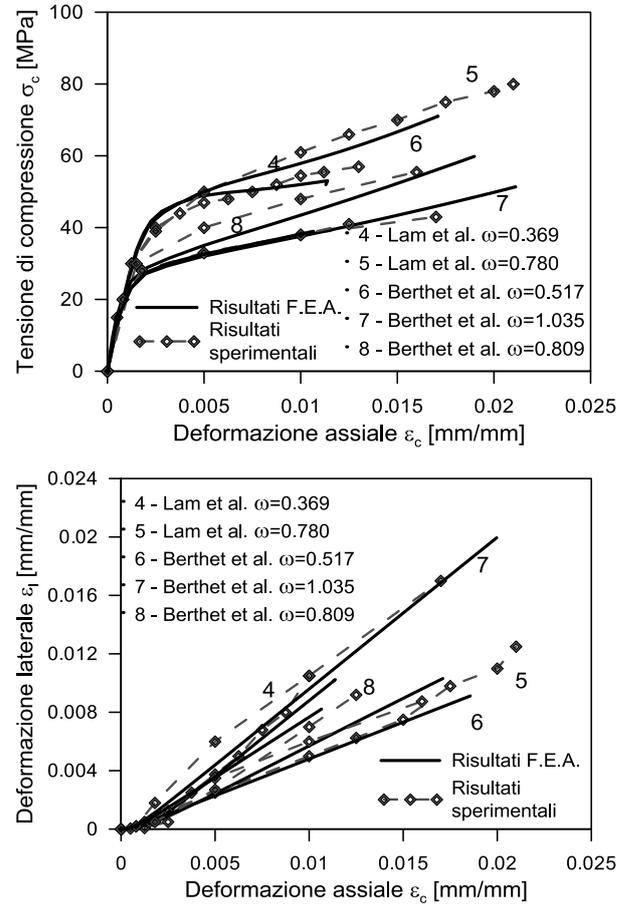


Figura 5. Confronti numerico sperimentali. Berthet et al. 2005, Lam-Teng 2006.

4.2 Confinamento con Steel Jacketing

Per la validazione del modello numerico posto alla base delle analisi, sono stati effettuati confronti numerico-sperimentali con i risultati delle ricerche condotte da Campione et al. 2017 e Shafei e Rahmdel 2017. Le caratteristiche geometriche e meccaniche dei campioni posti alla base delle analisi numeriche sono riportate in Tab. 2. In questo caso, dal momento che i campioni analizzati sono interessati da confinamento discontinuo, il rapporto meccanico di confinamento è stato valutato in accordo con Montuori e Piluso 2009, tenendo conto dei fattori di efficacia del confinamento orizzontale k_h e verticale k_v :

$$\omega = \frac{A_{st} \cdot f_y}{A_c \cdot f_{c0}} \cdot k_e; \quad k_e = k_h \cdot k_v; \quad (3)$$

$$k_h = \frac{(b/h)(h-2r)^2 + (h/b)(b-2r)^2}{3bh}; \quad (4)$$

$$k_v = \left(1 - \frac{s'}{2b}\right) \left(1 - \frac{s'}{2h}\right)$$

con A_{st} area dell'armatura trasversale, f_y tensione di snervamento del materiale, A_c area del

calcestruzzo confinato, b e h dimensioni della sezione trasversale, r raggio di raccordo agli spigoli, s' passo dell'armatura trasversale.

Tabella 2. Proprietà meccaniche e risultati numerico sperimentali di colonne confinate con Steel Jacketing.

Autori	$d \times h$ (mm)	ε_{c0} (%)	E_{c0} (GPa)	ω	$f_{cc,exp}/$ $f_{cc,num}$	$\varepsilon_{cc,exp}/$ $\varepsilon_{cc,num}$
Campione et al. (2017)	220x300	0.25	23.42	0.251	0.941	1.67
Campione et al. (2017)	220x300	0.4	16.82	0.487	1.030	2.36
Shafei e Rahmdel (2017)	150x150	0.20	23.92	0.496	1.065	0.723
Shafei e Rahmdel (2017)	150x150	0.20	23.92	0.992	1.161	0.872

I confronti riportati in Fig. 6 e Fig. 7 mostrano che il modello numerico restituisce globalmente una buona previsione dei dati sperimentali, interpretando adeguatamente il comportamento in compressione nei diversi casi analizzati, comprendenti rapporti meccanici di confinamento bassi, medi e alti ($\omega=0.251-0.992$). Leggere differenze si riscontrano sul trend della risposta forza-deformazione assiale nel caso di calcestruzzi con elevata deformabilità (Campione et al. 2017, $\varepsilon_{c0}=0.4\%$).

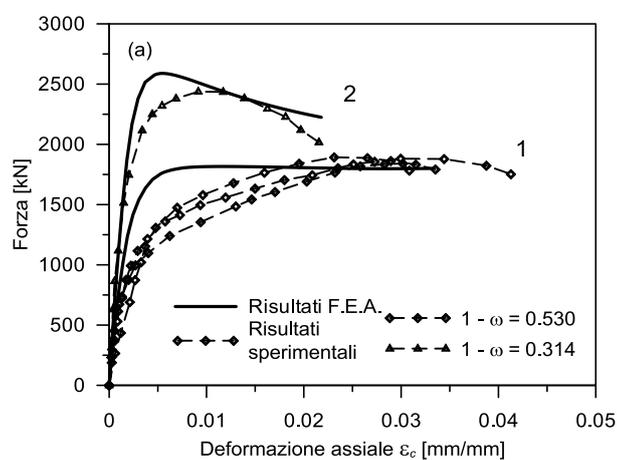


Figura 6. Confronti numerico-sperimentali. Campione et al. 2017.

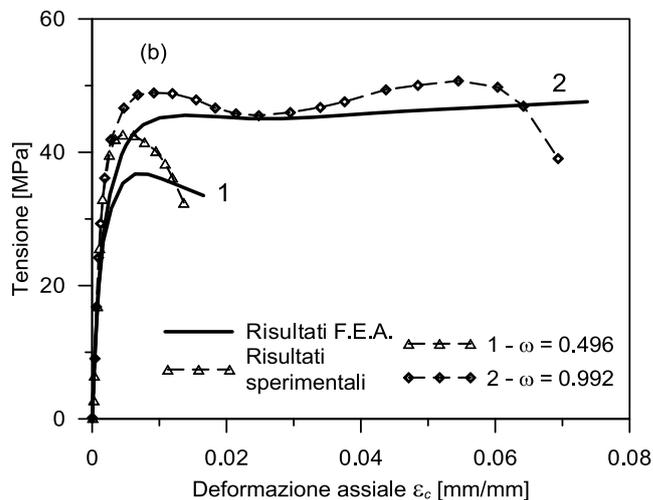


Figura 7. Confronti numerico-sperimentali. Shafei-Rahmdel 2017.

5 COMPORTAMENTO IN CONDIZIONI DI PRECARICO

Come detto in precedenza, rispetto al caso in cui il rinforzo viene applicato alla colonna caratterizzata da uno stato tenso-deformativo nullo, la condizione di precarico prevede che la risposta meccanica dell'elemento confinato si origini a partire da un livello di sollecitazione e deformazione diverso da zero. Questa condizione fisica riflette le normali condizioni in cui versano gli elementi strutturali che necessitano di interventi di retrofit, nell'ambito dei quali ne viene previsto un incremento delle capacità per mezzo di un'incamiciatura che generi un'azione di confinamento. Tuttavia, non risultano chiare le modalità con cui lo stato di tensione e deformazione caratteristico della colonna, prima dell'intervento di rinforzo, influenza la risposta meccanica del sistema confinato.

Il problema principale della riproduzione del suddetto fenomeno tramite un codice di calcolo agli elementi finiti risiede nella determinazione dell'effetto di carichi secondari su geometrie deformate, come riportato anche da Shi e He 2009. Infatti, volendo analizzare il problema descritto nel paragrafo 2, nel momento in cui si applica un determinato livello di precarico su una colonna non confinata, essa presenta un livello di deformazione assiale e trasversale che richiederebbe la definizione della geometria del sistema di rinforzo su una configurazione deformata del sistema non confinato. Il problema viene risolto nel presente lavoro tramite l'utilizzo della tecnica di de-attivazione/riattivazione degli elementi in un determinato step di analisi. È possibile così definire il sistema assemblato prima dell'analisi, assegnando opportunamente le proprietà al materiale utilizzato per il

confinamento, in modo tale da attivare il suo contributo sulla risposta globale solo nel momento in cui si desidera.

La simulazione delle condizioni di precarico viene ottenuta dunque articolando l'analisi numerica in due fasi: si modula lo spostamento applicato alla testa del campione in funzione del livello di precarico fissato, il che equivale a caricare la colonna non confinata fino al raggiungimento del livello di tensione prestabilito; viene attivata la fasciatura e continuato il test di carico fino alla rottura dell'elemento, segnalata dall'interruzione della convergenza dell'analisi.

Nell'ambito del presente lavoro, gli effetti a lungo termine sul calcestruzzo vengono trascurati. L'ipotesi sembra ragionevole se si considera che, nelle pratiche applicazioni, i pilastri che necessitano di dispositivi di rinforzo si trovano ad uno stadio avanzato della loro vita nominale, per cui gli effetti di creep, soggetti nel tempo a stabilizzarsi, risultano a quel punto trascurabili.

5.1 *Definizione del sistema soggetto a precarico tramite la tecnica di deattivazione/riattivazione degli elementi*

Il software consente di operare, in un qualsiasi step dell'analisi, la rimozione di elementi specifici (nella fattispecie la fasciatura in FRP o l'incamiciatura in acciaio) del modello assemblato. Prima della de-attivazione, ABAQUS memorizza le forze che la porzione da nascondere temporaneamente esercita sulla rimanente parte del modello attraverso i nodi all'interfaccia tra i due elementi; le azzerava invece durante lo svolgimento della fase di rimozione. Dunque, l'effetto che eserciterebbe il componente in questione sul resto del modello risulta completamente assente fino al termine di questo step. La de-attivazione di una porzione specifica di un sistema complesso comporta che l'analisi numerica venga avviata e proceda senza computare il contributo della regione nascosta. Gli elementi inattivi rimangono tali nei successivi passaggi a meno della loro riattivazione.

Nel secondo step di analisi, gli elementi rimossi vengono riattivati in una configurazione deformata diversa da zero ma in stato tensionale nullo, in modo da poter fornire il proprio contributo a partire dallo stato tenso/deformativo imposto al sistema non confinato, corrispondente con il livello di precarico assegnato.

Ne consegue che nella riproduzione di un test di compressione esteso fino alla rottura del campione, la risposta del sistema diviene

“ibrida”, ossia costituita da una fase “non confinata” e da una fase “confinata”, differenziandosi dalla classica riproduzione standard, in cui il rinforzo è applicato in condizioni iniziali indeformate.

5.2 *Confinamento in condizioni di precarico: Analisi parametrica*

Tramite la tecnica di modellazione sopra descritta, si riportano i risultati effettuati ottenuti dalle simulazioni numeriche sia nel caso di confinamento con FRP (caso 1) che con Steel Jacketing (caso 2).

Il modello numerico utilizzato per il caso 1 consiste in un cilindro in calcestruzzo, privo di armatura interna, di diametro $d=150\text{mm}$ e altezza $h=450\text{mm}$, avente resistenza a compressione $f_{c0}=15\text{ MPa}$ e deformazione al picco di resistenza $\varepsilon_{c0}=0.0025$. Il cilindro è stato rinforzato con fibra di carbonio avente modulo elastico $E_{frp}=230\text{ GPa}$ e uno spessore $t_{frp}=0.260\text{ mm}$ corrispondente a due avvolgimenti del materiale composito.

Il modello numerico utilizzato per il caso 2 invece consiste in una colonna quadrata in calcestruzzo privo di armatura interna, di lati $b=150\text{ mm}$ e altezza $h=1000\text{ mm}$, con calcestruzzo non confinato avente resistenza a compressione $f_{c0}=25\text{ MPa}$ e deformazione al picco di resistenza $\varepsilon_{c0}=0.002$. Il modello è stato rinforzato con acciaio S275 (tensione di snervamento $f_y=275\text{ MPa}$). La camicia in acciaio è costituita da angolari 50/50/5 e piatti 60/4, disposti a passo $s_b=140\text{ mm}$.

Le simulazioni sono state dunque articolate in modo da avere due step di analisi:

-lo step 1, in cui si analizza il comportamento del calcestruzzo non confinato solo nei casi in cui viene simulato il processo del precarico (negli altri casi, in questa fase il modello risulta soggetto a forze nulle);

-lo step 2, in cui si analizza il comportamento del calcestruzzo confinato, sia nelle condizioni di precarico che in regime monotono.

Nello specifico, le simulazioni in condizioni di precarico prevedono che nel primo step venga applicato uno spostamento al campione non confinato (con il dispositivo di rinforzo disattivato), che al termine dell'analisi corrisponde allo stato tensionale relativo al target di precarico prestabilito. Nel secondo step, il dispositivo di confinamento si attiva in condizioni deformate, caratterizzate dalla congruenza degli spostamenti nodali della mesh del campione in calcestruzzo, ma con stato tensionale nullo. A partire dunque dal livello di precarico imposto,

l'analisi continua valutando gli effetti del sistema confinato fino alla rottura.

Come è possibile osservare in Fig. 8-a, nel caso di confinamento con FRP, non si registrano differenze in termini di resistenza a compressione confinata, in quanto la rottura del campione avviene esclusivamente nel momento in cui la fibra raggiunge la deformazione ultima. In questi casi, ovvero per curve caratterizzate da comportamenti di tipo "strain-hardening", la tensione di calcestruzzo confinato è correlata alla pressione laterale di confinamento che raggiunge sempre lo stesso valore massimo. Nel caso di confinamento con Steel Jacketing (Fig. 8-b) invece, esibendo un comportamento di tipo "strain-softening" si nota che la tensione al picco di resistenza subisce un decremento all'aumentare del livello di precarico imposto.

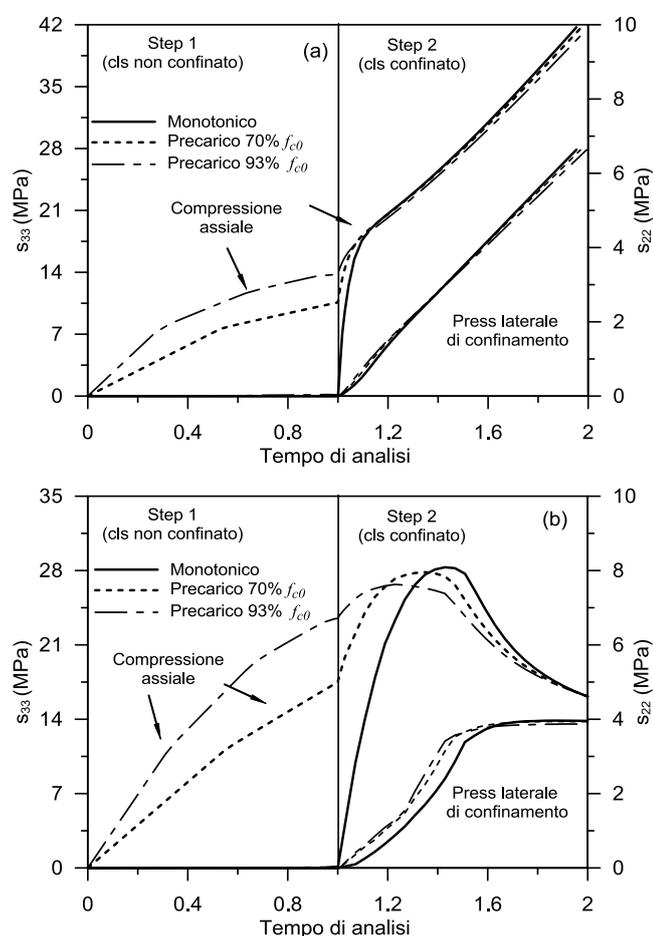


Figura 8. Simulazione numerica di un test di compressione in regime monotonic e di precarico. Confinamento con FRP (a); Confinamento con Steel Jacketing (b).

Una più comprensibile valutazione della capacità può effettuarsi analizzando il comportamento tenso-deformativo dei due sistemi. In Fig. 9 vengono riportate le risposte in termini di tensione-deformazione assiale, correlando la pressione laterale di confinamento ad ogni incremento di deformazione del sistema.

Nel caso di confinamento con FRP, all'aumentare dell'indice di precarico, si ha una riduzione del trend tensione-deformazione, seguito da un leggero incremento della deformazione ultima del calcestruzzo confinato, mentre la resistenza del calcestruzzo rimane pressochè invariata. Questo effetto è giustificato dall'applicazione ritardata della fasciatura in FRP, in quanto la rottura avviene sempre per la medesima deformazione ultima del tessuto che, applicato in ritardo, viene raggiunta per livelli di deformazione assiale del calcestruzzo maggiori. Risulta interessante notare, come per i diagrammi in Fig. 8-a, la medesima resistenza esibita in condizioni di rottura.

Nel caso di confinamento con Steel Jacketing invece, all'aumentare dei livelli di precarico si registrano progressive riduzioni della tensione al picco di resistenza, seguiti anche in questo caso da riduzione del trend tensione-deformazione del calcestruzzo confinato.

Nello specifico, i livelli di precarico riportati in Fig 9 (a-b) sono rispettivamente pari al 70% di f_{c0} e il 93% di f_{c0} . Per indici di precarico inferiori del 50% di f_{c0} non si osservano particolari variazioni nella risposta del sistema rinforzato, mentre superate queste percentuali, la riduzione del trend risulta non trascurabile, diventando significativa per alti livelli di precarico ($n_p > 0.7$).

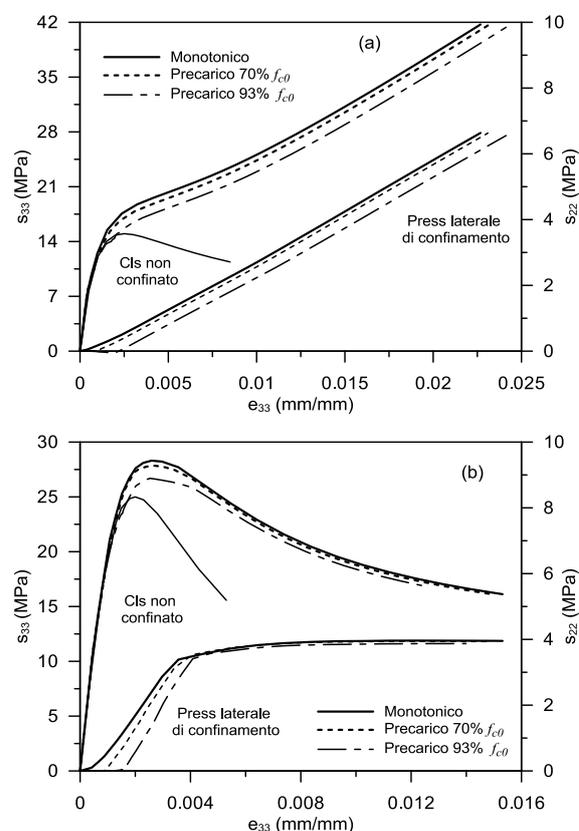


Figura 9. Risposta numerica in compressione assiale. Confinamento con FRP (a); Confinamento con Steel Jacketing (b).

6 CONFRONTI NUMERICO-SPERIMENTALI DI COLONNE CONFINATE CON FRP IN REGIME DI PRECARICO

Come detto nelle sezioni precedenti, risultano veramente limitati i riferimenti bibliografici relativi a sperimentazioni condotte nell'ambito del confinamento in condizioni di precarico, riscontrando la totale assenza di fonti nel caso di confinamento con Steel Jacketing.

Nel presente paragrafo si riportano i confronti numerico-sperimentali con i risultati di He e Jin 2011, ottenuti da prove di compressione su campioni cilindrici confinati con fibre di carbonio, sia in regime monotonic che di precarico, valutando le variazioni sulla risposta sperimentale. Le caratteristiche geometriche e meccaniche dei campioni sono riportate in Tab. 3.

Tabella 3. Caratteristiche geometriche e meccaniche dei campioni. He e Jin 2011.

dxh (mm)	f_{c0} (MPa)	ε_{c0} (%)	E_{c0} (GPa)	t_{frp} (mm)	E_{frp} (GPa)
150x450	29.55	0.2	26.8	0.200	234.0

Gli autori definiscono diversi indici di precarico n_p che, come specificato in precedenza, sono funzioni della resistenza a compressione del calcestruzzo non confinato. Dopo la fase di applicazione del precarico, i campioni sono stati fasciati con fibre di carbonio (mantenendo costante il livello di precarico) e mantenuti in ambiente a temperatura controllata per tutto il processo di indurimento del composito, effettuando il test di rottura a compressione.

Gli autori dichiarano che il comportamento in compressione dei campioni soggetti a precarico non è affetto da significative variazioni di resistenza. Nello specifico, è risultato che la tensione relativa alle condizioni di rottura non varia all'aumentare dell'indice di precarico, aspetto che viene confermato anche dai risultati delle analisi numeriche (Fig. 10). Le differenze riguardano il trend della risposta tensione-deformazione, attribuibili probabilmente alla redistribuzione delle tensioni per gli effetti del creep; i campioni soggetti a precarico mostravano infatti una rigidità del secondo ramo più pronunciata, esibendo deformazioni ultime del calcestruzzo confinato inferiori rispetto ai campioni non precaricati. Questo fenomeno non si evince invece dalle simulazioni numeriche in

quanto, come detto in precedenza, gli effetti legati al tempo vengono trascurati.

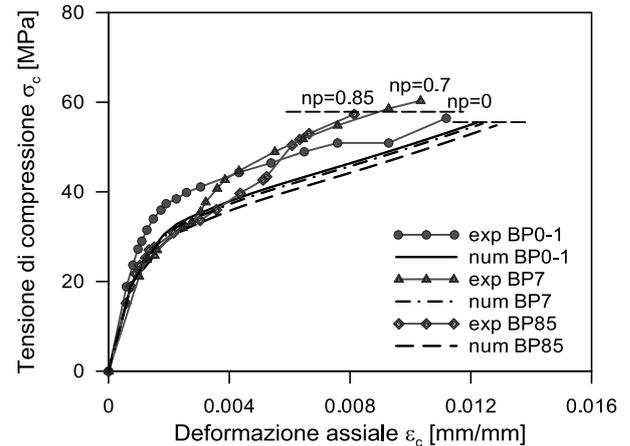


Figura 10. Confronti numerico sperimentale in regime monotonic e di precarico. He e Jin 2011.

I risultati ottenuti nel presente lavoro sono inoltre coerenti con quelli ottenuti dalle simulazioni numeriche condotte da Shi e He 2009, i quali dimostrano che nel caso di confinamento con FRP di colonne soggette a precarico, la resistenza a compressione del calcestruzzo confinato non subisce variazioni rispetto alle condizioni standard di capacità in regime monotonic. Differenze sostanziali si osservano invece nella diminuzione del trend del legame all'aumentare del livello di precarico.

7 CONCLUSIONI

Dai risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche emerge che per le colonne rinforzate con CFRP la presenza di un determinato stato tenso-deformativo nella configurazione non confinata risulta pressoché ininfluenza sulla resistenza del calcestruzzo confinato. I risultati vengono confermati anche dai dati sperimentali degli studi disponibili in letteratura.

Nel caso di confinamento con Steel Jacketing invece si ottengono diversi risultati, che indicano una diminuzione della resistenza del calcestruzzo confinato all'aumentare del livello di precarico imposto.

Le variazioni significative si riscontrano nell'osservazione del trend della risposta confinata, che manifesta una riduzione proporzionale all'indice di precarico. Tuttavia, per livelli di precarico inferiori al 50% della resistenza del calcestruzzo non confinato, non si riscontrano significative variazioni tra le risposte. Superata questa percentuale, le variazioni osservate non risultano più trascurabili, comportando perciò la necessità di considerare gli

effetti del precarico nella valutazione della risposta meccanica del sistema rinforzato, per ottenere una riproduzione più realistica del comportamento in compressione dell'elemento strutturale nei casi in cui gli interventi di rinforzo vengono eseguiti in condizioni di esercizio.

BIBLIOGRAFIA

- ABAQUS. ABAQUS Theory and User Manuals, version 6.13-1; 2013.
- Adam, J.M., et al. 2007. Behaviour of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips. *Steel and Composite Structures*, **7**(5), 405-419.
- Badalamenti, V., Campione, G., Mangiavillano, M.L., 2010. Simplified model for compressive behaviour of concrete columns strengthened with steel angles and strips, *Journal of Engineering Mechanics*, 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000069, 230-238.
- Berthet, J.F., Ferrier E., Hamelin P., 2005. Compressive Behavior of Concrete Confined by Composite Jackets. Part A: experimental study. *Construction and Building Materials*, **19**(3), 223-232.
- Braga, F., Gigliotti, R., Laterza, M., 2006. Analytical stress-strain relationship for concrete confined by steel stirrups and/or FRP jackets, *Journal of Structural Engineering*, **132**(9), 1402-1416.
- Campione, G., Miraglia, N., Papia, M., 2004. Strength and strain enhancements of concrete columns confined with FRP sheets. *Structural Engineering and Mechanics*, **18**(6), 769-790.
- Campione, G., Cavaleri, L., Di Trapani, F., Ferrotto, M.F., 2017. Frictional Effects in Structural Behavior of No-End-Connected Steel Jacketed RC Columns. Experimental Results and New Approaches to Model Numerical and Analytical Response. *Journal of Structural Engineering ASCE*, **143**(8), 04017070, 1-15.
- Cui, C., Sheikh, S.A., 2010. Experimental study of normal- and high-strength concrete confined with fiber-reinforced polymers. *Journal of Composites for Construction*, **14**(5), 553-561.
- Hany, N.F., Hantouche, E.G., Harajli, M.H., 2016. Finite element modeling of FRP-confined concrete using modified concrete damaged plasticity. *Engineering Structures*, **125**, 1-14.
- He, Z., Jin, J.P., 2011. Axial Compressive Behavior of CFRP-Confined Concrete Columns Subject to Short-Term Preloading, *Advanced Material Research*, **163-167**, 3830-3837.
- Ivorra, S., Estevan, L., Adam, J.M., 2013. Experimental Study of Axial Stress-Strain Relationship of Cylindrical Concrete Elements Confined by CFRP under a Maintained Preload, In: *2nd Workshop on "The new boundaries of structural concrete"*. ISBN 978-88-904292-4.
- Lam, L., Teng, J.G., 2004. Ultimate Condition of Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete. *Journal of Composites for Construction ASCE*, **8**(6), 539-548.
- Lam, L., Teng, J.G., Cheung, C.H., Xiao, Y., 2006. FRP-confined concrete under axial cyclic compression. *Cement and Concrete Composites*, **28**(10), 949-958.
- Lee, J., Fenves, G.L., 1988. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. *Journal of Engineering and Mechanics ASCE*, **124**(8), 892-900.
- Liang, M., Wu, Z.M., Ueda, T., Zheng, J.J., Akogbe, R., 2012. Experiment and modeling on axial behavior of carbon fiber reinforced polymer confined concrete cylinders with different sizes. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **31**(6), 389-403.
- Lubiner, J., Oliver, J., Oller, S., Oñate, E.A., 1989. Plastic Damage Model for Concrete. *International Journal of Solid and Structures*, **25**(3), 299-326.
- Montuori, R., Piluso, V., 2009. Reinforced concrete columns strengthened with angles and battens subjected to eccentric load, *Engineering Structures*, **31**(2), 539-550.
- Nagaprasad, P., Sahoo, D.R., Rai, D.C., 2009. Seismic strengthening of R.C. columns using external steel cage, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **38**(14), 1563-1586.
- Ozbakkaloglu, T., Lim, J.C., 2013. Axial compressive behavior of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design-oriented model. *Composites Part B*, **55**, 607-634.
- Shi, D., He, Z., 2009. Short-Term Axial Behavior of Preloaded Concrete Columns Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Laminate. *Computational Structural Engineering*, 1089-1098.
- Spoelstra, M.R., Monti, G., 1999. FRP-Confined Concrete Model. *Journal for Composites for Construction ASCE*, **3**(3), 143-150.
- Tao, Z., Wang, Z.B., Yu, Q., 2013. Finite element modeling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, **89**, 121-131.