

PROVE CICLICHE SU CILINDRI DI CALCESTRUZZO AUTOCOMPATTANTE CONFINATI CON FRP

Davide Lavorato¹, Konstantinos G. Megalooikonomou¹, Camillo Nuti¹, Silvia Santini¹

¹ Dipartimento di Strutture, Università di Roma Tre

SOMMARIO

Parametri quali la qualità, la densità e il grado di compattazione del calcestruzzo hanno un ruolo fondamentale sulla durabilità delle strutture civili. Il calcestruzzo autocompattante (SCC) grazie alla sua elevata fluidità allo stato fresco senza segregazione, garantisce un ottimo grado di compattazione per effetto del solo peso proprio anche in spazi ristretti congestionati dalle armature. L'SCC rinforzato con fasciature in C-FRP può rappresentare una promettente soluzione per il rinforzo e l'adeguamento delle strutture esistenti in c.a.. Un totale di 23 cilindri di SCC confinati con C-FRP sono stati sottoposti a prove cicliche di compressione. I parametri esaminati in questo studio sono le dimensioni dei cilindri (rispettivamente 100x240 mm e 150x300 mm) e il numero di strati di C-FRP applicati (1, 2 o 3). I risultati sperimentali sono stati confrontati con diversi modelli analitici presenti in letteratura che ben descrivono il comportamento del calcestruzzo confinato da FRP.

SUMMARY

Parameters such as quality, density and degree of compaction of the concrete have a key role on the durability of structures. The self-compacting concrete (SCC) due to its high fluidity without segregation in the fresh state, guarantees a high degree of compaction as a result of its own weight even in narrow space congested by steel reinforcement. The SCC reinforced with C-FRP wraps represents a promising solution for the repair and reinforcement of existing r.c. structures. A total of 23 cylinders of SCC confined with C-FRP were subjected to cyclic compression tests. The parameters examined in this study are the size of the cylinders (100x240 mm and 150x300 mm respectively) and the number of layers of C-FRP applied (1, 2 or 3). The experimental results were compared with several analytical models in the literature that describe the behaviour of concrete confined by FRP.

1. INTRODUZIONE

Il calcestruzzo autocompattante (SCC) è un materiale sempre più utilizzato nelle strutture. La grande fluidità allo stato fresco e la resistenza alla segregazione degli inerti dell'SCC consentono di risparmiare sui tempi e costi di posa in opera eseguendo getti anche in presenza di armature complesse e congestionate senza vibrare il materiale.

Inoltre l'SCC risulta un materiale sostenibile anche perché permette il rimpiego di materiali di scarto di processi industriali quali le ceneri volanti.

L'utilizzo di un getto di SCC per ripristinare il calcestruzzo danneggiato in interventi di riparazione e rinforzo sismico di pile da ponte circolari in c.a. (in scala 1:6), seriamente danneggiate da un sisma, è stato già analizzato dagli autori (Albanesi et al.[2]). Le superfici finite dell'SCC non necessitano di ulteriori lavorazioni e consentono l'applicazione diretta del rinforzo in C-FRP.

Ad oggi non sono molti i dati sperimentali di prove cicliche a compressione per cilindri di SCC confinati con FRP.

Lo studio intende indagare le proprietà dell'SCC per caratterizzare il calcestruzzo utilizzato per gli interventi di riparazione delle pile.

Un totale di ventitre cilindri di calcestruzzo autocompattante realizzati con la stesso mix design dell'SCC usato nella riparazione delle pile confinate con C-FRP (Fig.1 a), sono stati sottoposti a prove cicliche di compressione assiale.

In una prima parte della memoria sono riportati alcuni dei dati sperimentali ottenuti. Sono stati successivamente illustrati tre modelli analitici di letteratura che descrivono bene il comportamento del calcestruzzo ordinario.

In particolare sono stati presi in esame: il modello iterativo di Spoelstra e Monti [9], il modello diretto di Lam e Teng [5] che non considera la deformazione laterale del calcestruzzo e il modello in forma chiusa di Albanesi, Nuti e Vanzi [1] che considera la deformazione laterale del calcestruzzo confinato.

Alcune considerazioni sulla applicabilità dei modelli analitici nel caso del calcestruzzo autocompattante confinato con C-FRP, sono fornite sulla base del confronto tra i dati sperimentali e le curve analitiche descritte dai modelli.

2. PROVE SPERIMENTALI

2.1. Campioni

Sono stati prodotti due gruppi (A e B) di campioni cilindrici di SCC utilizzando lo stesso mix design dell'SCC impiegato per gli interventi di riparazione e rinforzo di pile da ponte in c.a. (in scala 1:6) seriamente danneggiate da un sisma [2]. Si tratta di un calcestruzzo opportunamente progettato per essere molto fluido, con inerti non più grandi di 20mm e con basso ritiro per consentire il ripristino di volumi modesti di calcestruzzo congestionati dalle armature.

I provini del gruppo A hanno dimensioni di 100x240mm (rapporto tra altezza (h) e diametro (d) del provino h/d pari a 2,4) mentre quelli del gruppo B hanno dimensioni 150x300mm (h/d pari a 2,0). La resistenza media cilindrica a

compressione ottenuta da prove su cubetti standard (150x150x150mm) dopo 28 giorni è pari a 40MPa.

I cilindri maturati in ambiente chiuso per più di 28 giorni, presentano una superficie compatta e liscia con minime imperfezioni su cui è possibile applicare il rinforzo in C-FRP senza lavorare le superfici (rasatura, stuccatura) con evidente risparmio di tempo e costi.

Tutti i campioni ad eccezione di due cilindri del gruppo B, sono stati rinforzati con tessuto in fibre di carbonio unidirezionali da 300g/m² della Toho-Tenax (Tenax HTS 300/10) con una deformazione ultima di 1,8%, una resistenza a rottura di 4300MPa, un modulo elastico di 240Gpa e uno spessore di 0,169mm applicando una resina EPR320 + EPH550.

I due rimanenti cilindri con diametro 150mm sono stati rinforzati con fibre di carbonio unidirezionali da 300g/m² (MAPEWRAP C UNI-AX 300/10) della Mapei con una resistenza a trazione di 4830MPa, un modulo elastico di 230GPa, deformazione massima a rottura pari al 2% e spessore di 0,166mm utilizzando un adesivo epossidico bicomponente (MAPEWRAP 31) con resistenza a trazione di 40MPa, allungamento a trazione di 1,8%, resistenza e modulo elastico a flessione rispettivamente pari a 70 e 3000MPa.

Le fibre usate per il rinforzo hanno quindi caratteristiche meccaniche simili.

Le fibre di entrambi i produttori sono applicate utilizzando delle strisce di tessuto larghe 100mm. Si tratta delle stesse fibre usate per i rinforzi discontinui delle pile riparate e rinforzate.

Il rinforzo continuo è stato applicato con più cerchiature data l'altezza dei provini, e la continuità lungo l'altezza è garantita dalla zona di sovrapposizione di almeno 20-30mm. Le strisce larghe 100mm sono state tagliate della lunghezza necessaria per avere cerchiature di rinforzo rispettivamente di 1, 2 e 3 strati e una zona di sovrapposizione finale di chiusura di circa 150-200mm. Al momento dell'applicazione del rinforzo è stata preparata la resina bicomponente avendo cura di evitare la formazione di bolle. Per i soli cilindri Mapei sono stati applicati un primer e uno stucco prima di applicare il tessuto di rinforzo (come indicato dal produttore), anche se le superfici dell'SCC non lo richiedevano.

Il processo di applicazione delle fibre è semplice ed immediato e comune a tutti i cilindri. Un primo strato di resina è posto sulla superficie del provino (con funzione anche di primer nel caso dei cilindri rinforzati con Toho-Tenax). La resina viene applicata con cura lungo tutta la superficie delle fibre precedentemente tagliate e disposte su di un piano di lavoro, fino a saturarle. Le strisce vengono quindi applicate manualmente sui cilindri prestando attenzione alla corretta disposizione delle fibre per garantire il loro allineamento lungo il perimetro della sezione dei provini.

Infine altra resina viene posta sulle fibre applicate operando poi con uno specifico rullo metallico utilizzato per massaggiare le fibre al fine di eliminare eventuali bolle d'aria e vuoti, e per distendere correttamente le fibre.

Dopo circa 72 ore la resina ha fatto presa e i cilindri sono pronti per le prove.

Residui di resina e imperfezioni di bordo sono stati riscontrati sulle superfici di base dei campioni per cui sono state realizzate delle capping utilizzando un cemento ad alta

resistenza a presa rapida. La corretta realizzazione delle capping è molto importante al fine di evitare di caricare erroneamente il campione. Le capping regolarizzano le superfici di base del campione così da caricare durante la prova tutta la superficie di base del provino evitando l'eccentricità del carico risultante (azioni di pressoflessione).

2.2. Allestimento della prova

Le prove condotte sui provini nudi e confinati sono prove cicliche di compressione. L'apparecchiatura utilizzata comprende: degli strain gauges applicati sulla superficie del rinforzo, una macchina di compressione Metrocom da 3000kN, una cella di carico per misurare i carichi applicati e un LVDT per misurare gli spostamenti della piastra inferiore della macchina (Fig. 1). Un sistema di acquisizione esterno costituito da scheda e moduli di acquisizione della National Instruments e da un programma in Labview, consente il controllo in tempo reale e l'acquisizione di tutti gli strumenti. La cella di carico è stata utilizzata poiché la macchina di compressione con il set-up attuale non può leggere il carico durante i rami di scarico.

Sulla superficie dei provini sono stati applicati fino a 12 strain gauges: 3 lungo la verticale per A, 3 lungo la verticale per C (Fig.1c), 3 perpendicolari alla verticale per B e 3 perpendicolari alla verticale per D (Fig.1c) per misurare le deformazioni assiali del provino e del rinforzo a metà altezza e alle due estremità del provino.

Non è stato possibile utilizzare dei potenziometri per leggere la deformazione assiale del provino su tutta l'altezza del provino. Purtroppo la rottura dei provini confinati, date le alte resistenze, comporta una forte esplosione che può provocare la rottura dei potenziometri se non opportunamente protetti. Inoltre la struttura di sostegno dei potenziometri può danneggiare localmente le fibre nei punti di fissaggio.

Gli strain gauges misurano localmente le deformazioni per cui sono stati usati più strain gauges per misurare la deformazione in tratti diversi lungo la stessa verticale o lungo la stessa circonferenza. L'impiego degli strain gauges non consente però di cogliere bene le deformazioni ultime dei provini poiché lo strain gauges lavora solo se è a contatto con la superficie del campione. Quando si è prossimi alla rottura, lo strain gauges può staccarsi anche solo parzialmente e non è più in grado di misurare le deformazioni.

Nella Figura 1b è mostrato l'allestimento di una prova. Alcune piastre in acciaio sono state interposte tra il provino e la piastra superiore di carico e tra il provino e la cella di carico inferiore per meglio ripartire il carico verticale applicato impedendo il danneggiamento delle superfici di contatto. Due fogli in Teflon posti alle basi del campione riducono gli effetti di bordo.

La storia di carico applicata è divisa in due parti. Nella prima parte della prova si raggiunge la resistenza del provino non confinato con tre livelli di carico incrementando il carico di un terzo del carico massimo misurato per il provino confinato. Per ogni livello di carico sono stati eseguiti tre cicli di carico e scarico. Il provino è poi portato a rottura riducendo l'incremento di carico alla metà. Per ogni incremento di carico sono stati eseguiti ancora tre cicli di carico e scarico.

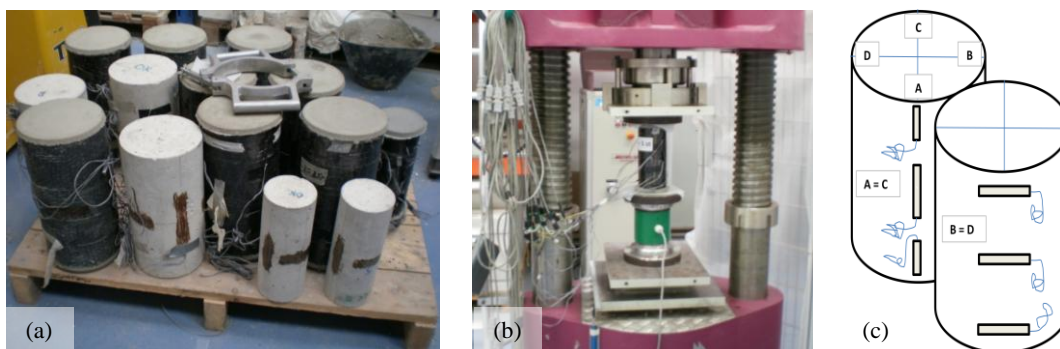


Figura 1– (a) Provini nudi e confinati, (b) apparato di prova, (c) schema degli strain gauges applicati

3. RISULTATI SPERIMENTALI

3.1 Provini gruppo A

Nella Figura 2 sulla colonna di sinistra sono mostrati i legami tra tensione e deformazione assiale e tra tensione assiale e deformazione circonferenziale relativi ai cilindri del gruppo A di dimensioni 100x240mm non confinati e confinati rispettivamente con 1, 2 e 3 strati di rinforzo.

La rigidità iniziale dei provini confinati è simile a quella dei provini non confinati poiché il rinforzo di tipo unidirezionale è disposto lungo la circonferenza e non ha effetti sulla risposta quando le deformazioni laterali sono modeste. Al crescere delle deformazioni laterali si attiva il confinamento passivo del rinforzo e diminuisce la rigidità dei provini confinati.

La deformazione e la resistenza ultima dei campioni crescono al crescere del numero di strati di rinforzo applicati. Se lo scarico avviene prima o dopo del punto in cui varia sensibilmente la rigidità del provino (bend point) si osserva un diverso comportamento lungo il ramo di scarico: lo scarico è lineare se avviene prima del bend point ed è chiaramente non lineare con una deformazione residua se avviene successivamente. Si osserva inoltre una traslazione dei cicli di carico e scarico verso le deformazioni maggiori per ogni livello di carico.

Nella colonna di destra della Figura 2, sono mostrati i diagrammi deformazione volumetrica-deformazione assiale per i cilindri non confinati e confinati. La deformazione volumetrica (ε_V) è pari a:

$$\varepsilon_V = \varepsilon_c + 2\varepsilon_r \quad (1)$$

Dove ε_c è la deformazione assiale e ε_r è la deformazione laterale. I valori positivi di questa deformazione indicano espansione volumetrica mentre i negativi indicano contrazione.

Fino a una deformazione assiale del 2% tutte le curve presentano un andamento lineare con circa la stessa pendenza lungo i rami di carico e scarico. Al crescere delle deformazioni assiali la pendenza dei rami di carico e scarico diminuisce.

Nella Tabella 2 sono indicate le principali proprietà meccaniche determinate sperimentalmente

Tabella 1 – Principali proprietà meccaniche sperimentali, gruppo A

Gruppo A	f_{cc}^* (MPa)	ε_{cu}^*		$\varepsilon_{h,rup}^*$	
		Media	Massima	Media	Massima
Non conf.	44.1	0.0028	0.0029	0.0011	0.0012
1 strato	67.7	0.0062	0.012	0.005	0.0085
2 strati	88.4	0.0087	0.0087	0.006	0.0011
3 strati	95.1	0.014	0.014	0.0057	0.012

* f_{cc} tensione massima, ε_{cu} deformazione assiale ultima, $\varepsilon_{h,rup}$ deformazione laterale alla rottura

3.2 Provini gruppo B

Le curve sperimentali tensione-deformazione assiale, tensione-deformazione laterale e deformazione volumetrica-deformazione assiale ottenute per i cilindri del gruppo B di dimensioni 150x300mm, sono mostrate nelle Figure 3 e 4. Rispetto a quanto già detto per il gruppo A si osserva nella Figura 4 dove sono state sovrapposte tutte le curve sperimentali del gruppo B, che la deformazione residua per una data resistenza del calcestruzzo e per la stessa storia di carico è indipendente dalla quantità di rinforzo applicato (soprattutto per i provini confinati con 1 o 2 strati)

Table 2 - Principali proprietà meccaniche sperimentali, gruppo B

Gruppo B	f_{cc}^* (MPa)	ε_{cu}^*		$\varepsilon_{h,rup}^*$	
		Media	Massima	Media	Massima
Non conf.	52.1	0.0025	0.0028	0.0013	0.002
1 strato	67.5	0.0039	0.0062	0.0053	0.0075
2 strati	76.4	0.0053	0.0099	0.0044	0.0083
3 strati	99.6	0.0087	0.0126	0.0047	0.0068

* f_{cc} tensione massima, ε_{cu} deformazione assiale ultima, $\varepsilon_{h,rup}$ deformazione laterale alla rottura

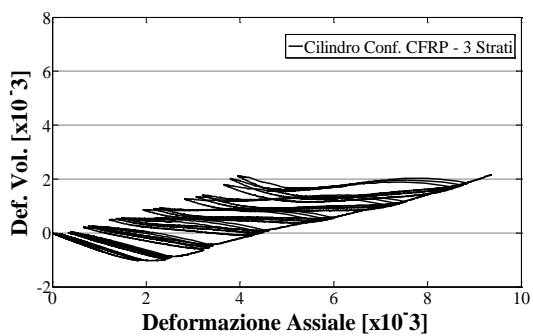
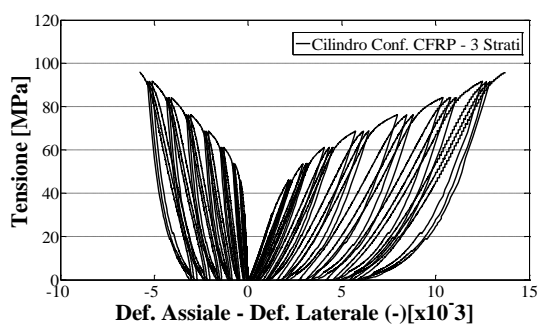
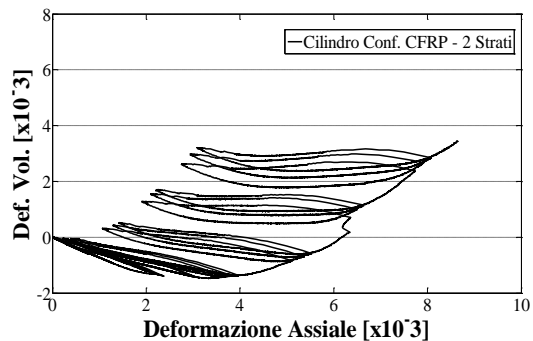
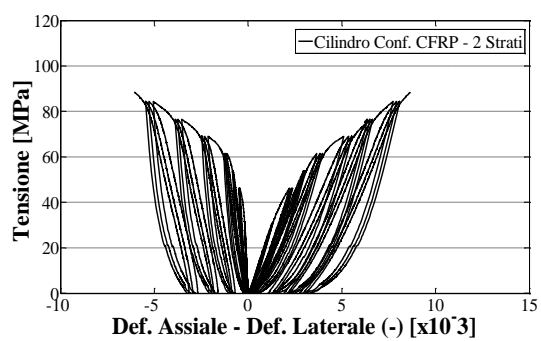
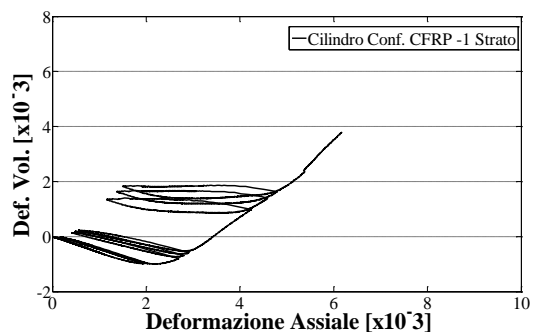
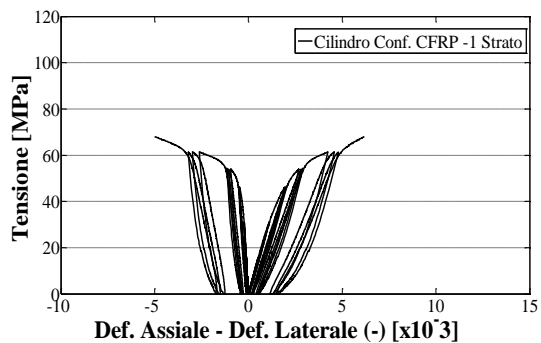
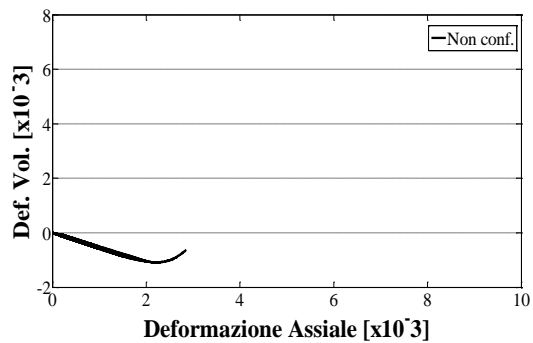
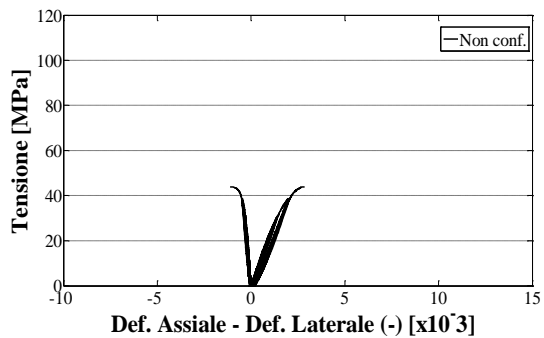


Figura 2-Risposta sperimentale dei provini del gruppo A(100x240mm).

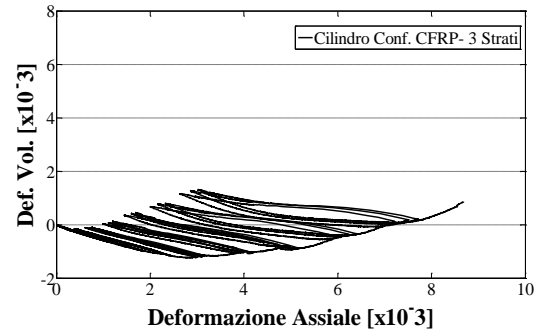
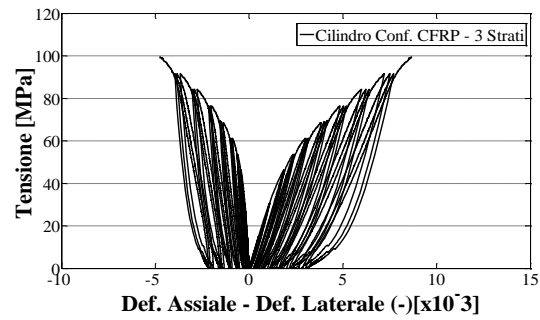
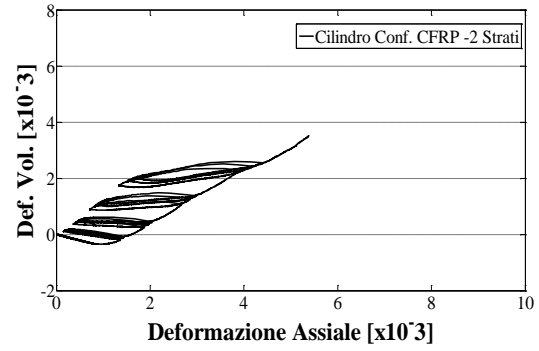
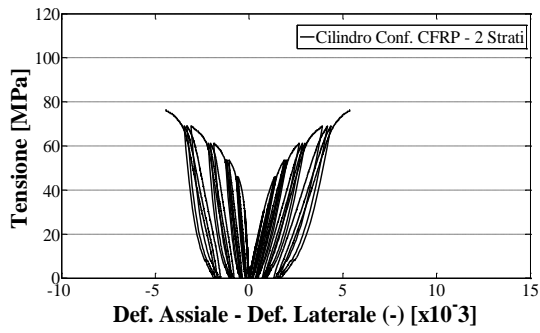
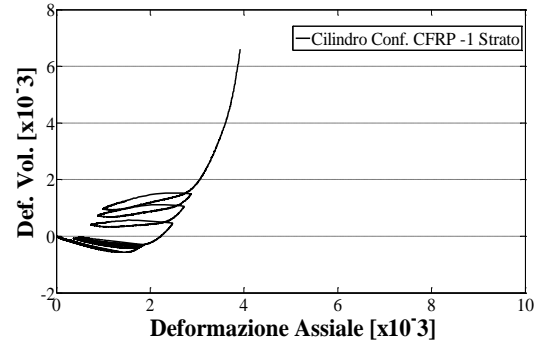
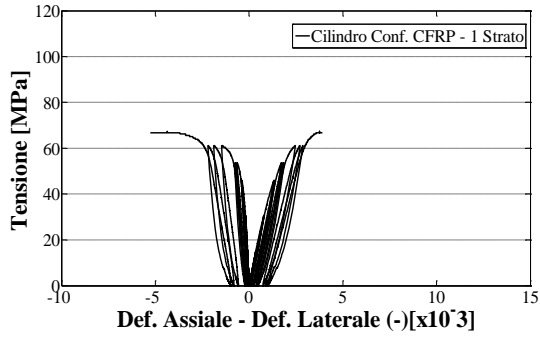
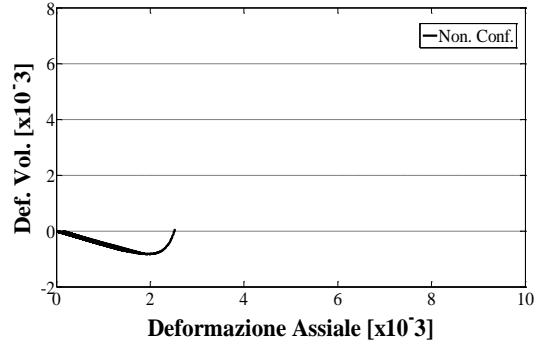
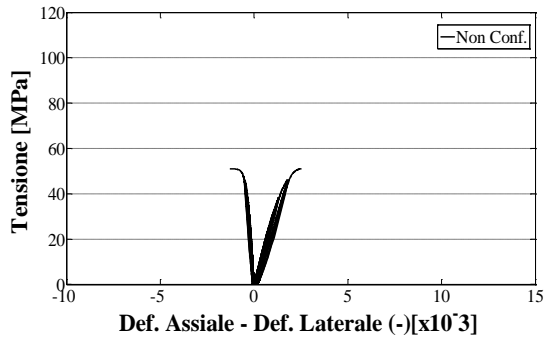


Figura 3- Risposta sperimentale dei provini del gruppo B(150x300mm).

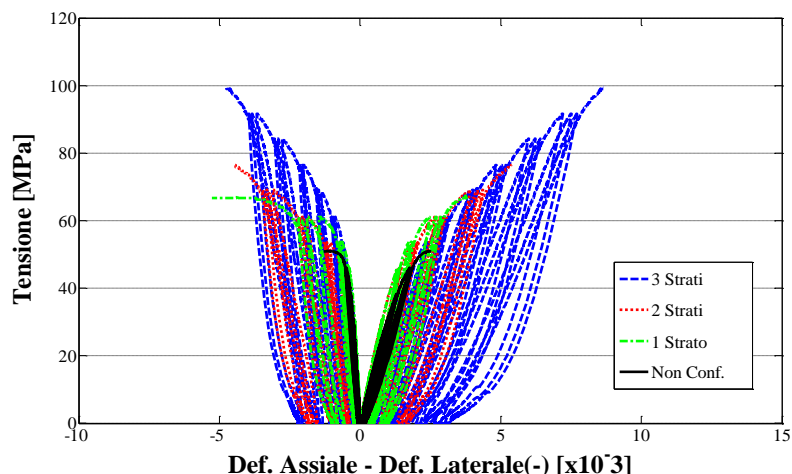


Figura 4-Risposta sperimentale dei provini del gruppo B(150x300mm).

4. CONFRONTO TRA PROVE E MODELLI

4.1. Stato dell'arte dei modelli

In letteratura esistono diversi modelli analitici che descrivono il comportamento del calcestruzzo ordinario confinato da FRP. Il rinforzo in FRP con fibre disposte perpendicolarmente all'asse del provino esercita una pressione passiva crescente al crescere della deformazione laterale del provino assialmente compresso. Sono stati selezionati tre modelli analitici in grado di descrivere il comportamento a compressione di provini di calcestruzzo confinati con FRP: un modello di tipo iterativo che ad ogni deformazione assiale associa la corrispondente tensione attraverso un processo iterativo e due modelli diretti in grado di fornire per ogni deformazione assiale direttamente la corrispondente tensione senza iterazioni.

Il modello iterativo di Spoelstra e Monti (S&M)[9] considera il modello di confinamento di Mander, Priestley e Park in cui si assume una pressione di confinamento costante. Il rinforzo in FRP esercita una pressione di confinamento crescente al crescere delle deformazioni assiali e laterali dato il comportamento elastico del rinforzo. Nel modello S&M per ogni deformazione assiale applicata al provino si segue un processo iterativo in cui si considera una tensione di confinamento con cui calcolare la tensione assiale corrispondente (modello di Mander [6]), e quindi la deformazione laterale del rinforzo. Nota la deformazione laterale del rinforzo, si può stimare la tensione di confinamento corrispondente che è confrontata con quella assunta a inizio iterazione ripetendo le iterazioni fino alla convergenza. Gli autori forniscono anche delle espressioni approssimate per la deformazione e la tensione ultima di compressione per i cilindri confinati con FRP ottenute grazie a una analisi di regressione dei risultati esatti determinati grazie all'approccio esatto prima menzionato

Lam e Teng (L&T) [5] hanno sviluppato un modello analitico semplice ed accurato per descrivere il comportamento del calcestruzzo confinato, sulla base di un esteso database di dati sperimentali di letteratura. Il modello considera una relazione lineare tra la resistenza a compressione del calcestruzzo confinato con FRP e la pressione laterale di confinamento fornita dal rinforzo. Il modello è appropriato per un uso diretto nella progettazione, non richiede iterazioni e riesce a catturare tutte le principali

caratteristiche del comportamento a compressione del calcestruzzo confinato.

Albanesi, Nuti e Vanzani (ANV) [1] hanno proposto e validato sulla base di dati sperimentali, un modello in forma chiusa che descrive il comportamento longitudinale e trasversale di campioni di calcestruzzo confinati con FRP e caricati assialmente. Il problema di equilibrio e compatibilità dopo essere stato risolto per i cilindri bassi (senza effetti di instabilità) è stato esteso ai cilindri snelli includendo gli effetti della instabilità.

E' un modello che si basa su una procedura fisica che grazie ad opportune semplificazioni fornisce una espressione per la deformazione trasversale che consente di risolvere il problema in forma chiusa senza iterazioni.

Questo modello è in grado di cogliere i rami degradanti mostrati sperimentalmente da alcuni cilindri confinati con FRP ed ha il vantaggio di essere di semplice e pratica applicazione.

4.2. Correlazioni

Nella Figura 5 sono mostrati i confronti tra gli involucri delle curve sperimentali dei gruppi A e B e le curve ottenute con i tre modelli analitici selezionati. Tutte le curve sono state tracciate fino al valore della deformazione ultima sperimentale registrata dagli strain gauges verticali.

Tutti i modelli descrivono bene la rigidità iniziale dei provini. Dal confronto tra le curve analitiche e quelle sperimentali emerge che il modello iterativo di S&M riesce ad avvicinarsi maggiormente alle curve sperimentali anche se occorre ricordare che si tratta di un modello che richiede un processo iterativo. Il modello iterativo descrive meglio del modello ANV l'andamento delle deformazioni laterali sperimentali (Fig.5 C-FRP due strati) anche se talvolta fornisce valori di deformazioni più bassi.

Nei diagrammi di Figura 6 è mostrato l'errore nella stima della tensione ultima per i tre modelli analitici esaminati.

Il modello iterativo presenta sempre un errore più basso rispetto agli altri modelli analitici per i cilindri con diametro più grande (Fig.6b). Solo per i cilindri più piccoli con tre strati di rinforzo si osserva una sovrastima da parte del modello iterativo, una sottostima da parte del modello di L&T ed una ottima predizione da parte del modello ANV (Fig.6a).

Infine il modello di L&T presenta un errore compreso tra i valori più bassi del modello S&M e più alti del modello ANV per i cilindri del gruppo B (Fig.6b).

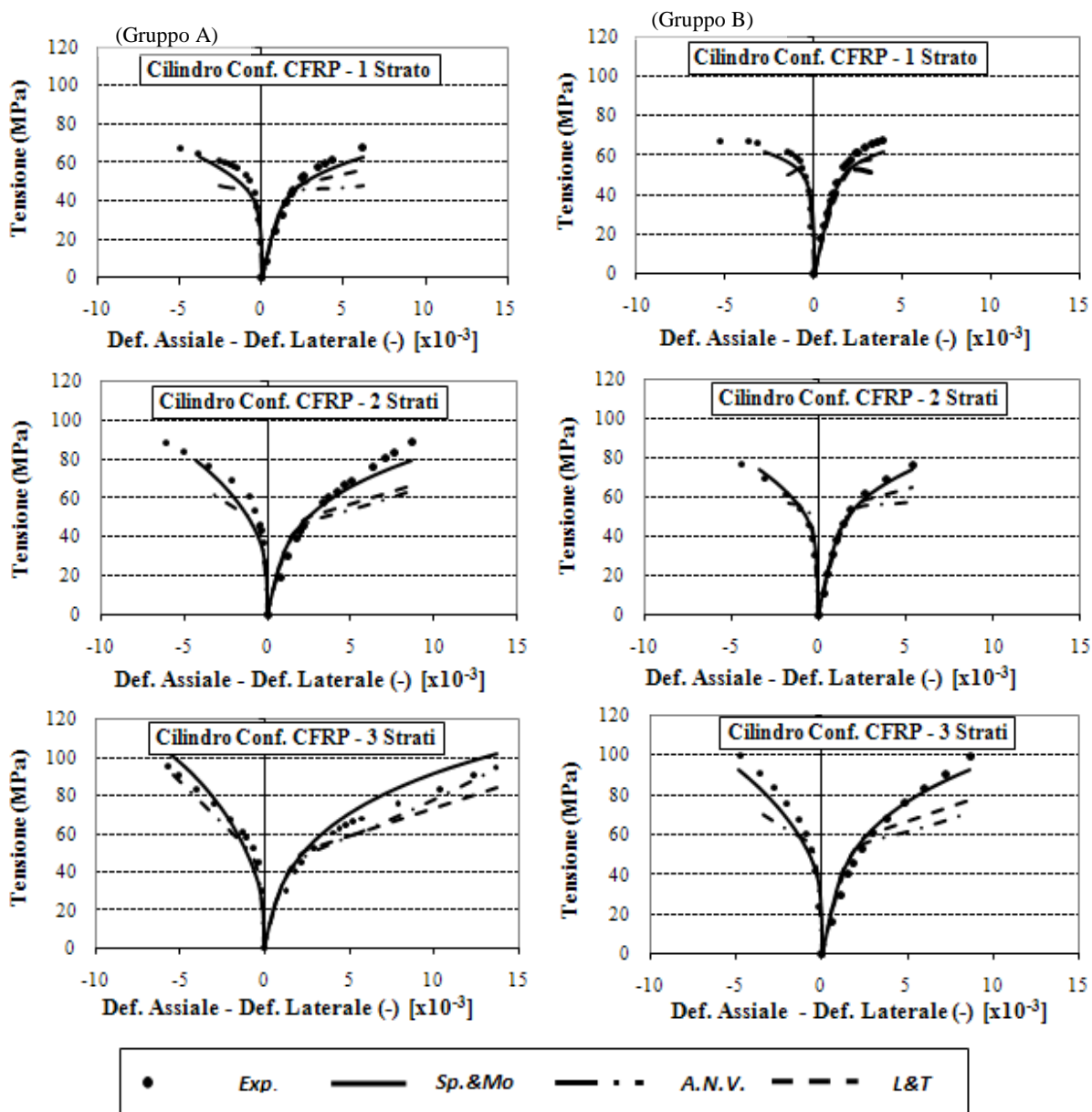


Figura 5-Confronto tra differenti modelli analitici e risultati sperimentali dei provini di SCC confinati con C-FRP del gruppo A (100x240mm) e del gruppo B (150x300).

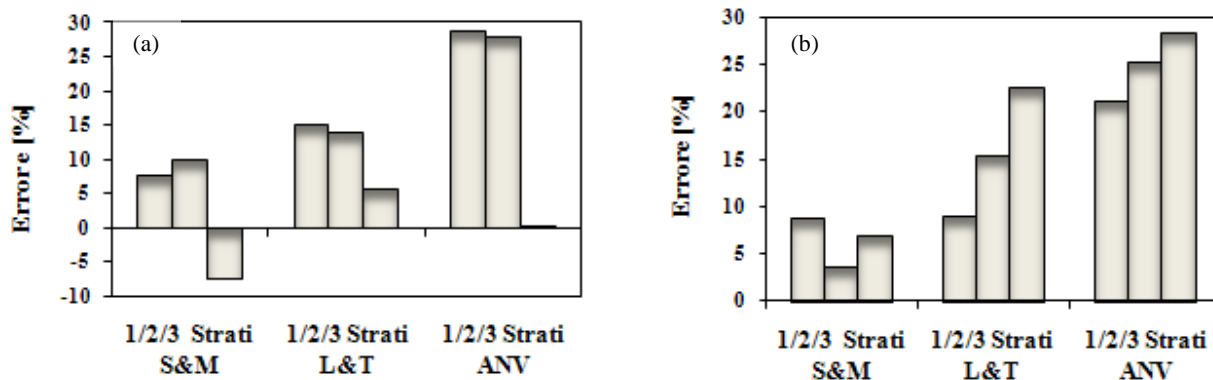


Figura 6-Errore nella stima della resistenza massima fornita dai modelli analitici selezionati rispetto ai risultati sperimentali; (a) cilindri gruppo A, (b) cilindri gruppo B.

5. CONCLUSIONI

Il calcestruzzo autocompattante (SCC) grazie alle sua elevata fluidità senza segregazione degli inerti è un materiale ottimale anche per il ripristino del calcestruzzo di elementi strutturali esistenti seriamente danneggiati. Le superfici finite non richiedono alcuna successiva lavorazione e consentono l'applicazione diretta di un rinforzo di fibre di carbonio (C-FRP) per il rinforzo sismico degli elementi riparati con risparmio di tempo e costi.

Due gruppi di campioni cilindrici di SCC con diametro 100x240mm e 150x300mm nudi e confinati con 1, 2 o 3 strati di C-FRP, sono stati provati sottoponendoli a prove cicliche di compressione. L'SCC ha lo stesso mix-design del calcestruzzo impiegato in interventi di riparazione e rinforzo di pile da ponte in c.a (Albanesi et al. [2]). Le curve sperimentali tensione-deformazione assiale, tensione-deformazione laterale e deformazione volumetrica-deformazione assiale sono date. Al crescere del confinamento si osserva un incremento della tensione e della deformazione ultima in tutti i cilindri provati.

Le resistenze misurate sono simili in tutti i cilindri ma i cilindri più piccoli mostrano una maggiore duttilità.

Si osserva un'alta variabilità delle deformazioni laterali misurate ma i valori medi delle deformazioni ultime delle fibre applicate sono più basse di quelle dichiarate dai produttori.

Il comportamento ciclico e la deformazione volumetrica sperimentale risultano diverse se si scarica il provino prima o dopo la deformazione in cui si ha una forte variazione della rigidezza del provino (bend point).

Tre modelli analitici di letteratura (Spoelstra e Monti [9], Lam e Teng [5], Albanesi, Nuti e Vanzi [1]) in grado di descrivere bene il comportamento monotono a compressione del calcestruzzo confinato da FRP sono stati selezionati e confrontati con i risultati sperimentali.

Dai confronti emerge come l'SCC confinato si comporti in modo sostanzialmente simile al calcestruzzo ordinario confinato. Il modello di S&M riesce a descrivere meglio l'involuppo sperimentale anche se è un modello che richiede un processo iterativo e sembra sovrastimare la resistenza ultima dei cilindri con diametro più piccolo rinforzati con tre strati di rinforzo. Il modello ANV coglie molto bene la tensione ultima per i provini piccoli confinati con 3 strati di rinforzo. Il modello di L&T presenta un errore nella predizione della tensione ultima sempre compreso tra quello degli altri due modelli nel caso dei cilindri più grandi.

Recentemente L&T [10] hanno modificato il modello originale introducendo la dipendenza dalle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo per migliorare l'efficacia del modello anche in presenza di elevate percentuali di FRP.

L'esame dei dati sperimentali sarà esteso considerando altri modelli analitici presenti in letteratura che descrivono anche il comportamento ciclico e non solo l'involuppo monotono. Tra i possibili sviluppi futuri si pensa a una calibrazione del modello ANV diretto e di pratica applicazione nella progettazione, per approssimare meglio il comportamento sperimentale dei cilindri confinati grazie ai dati sperimentali qui presentati.

RINGRAZIAMENTI

Lavoro svolto con il finanziamento RELUIS AT1, Linea 1.1, Task 1.1.2. e con la collaborazione di UNICAL S.p.A. e di Altomodulo s.r.l.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ALBANESI T., NUTI C., VANZI I. – (2005), Closed form constitutive relationship for concrete filled FRP tubes under compression, *Constructions and Building Materials*, 21, 409-427.
- [2] ALBANESI T., LAVORATO D., NUTI C., SANTINI S. – (2009), Experimental program for pseudodynamic tests on repaired and retrofitted bridge piers, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Paris: Lavoisier, vol. 13, N6/2009: 671-683.
- [3] DANIEL M. I., ISHAI O – (2006), Engineering Mechanics of Composites Materials, *Oxford University Press, second edition*.
- [4] LAM L., TENG J.G., CHEUNG C.H., XIAO Y. – (2006), FRP-confined concrete under axial cyclic compression, *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 28, 949-958.
- [5] LAM L., TENG J.G. – (2003), Design oriented stress strain model for FRP-concrete, *Construction and Building Materials*, 17, 471-489.
- [6] MANDER J. B., PRIESTLEY M. J. N., PARK R. – (1988), Theoretical Stress – Strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 8 (114), 1804-1826.
- [7] OKAMURA H., OZAWA, K. – (1995), Mix-design for self-compacting concrete, *Concrete Library of JSCE*, 25, 107-120.
- [8] SHAO Y., ZHU Z., MIRMIRAN A. – (2006), Cyclic Modeling of FRP-confined concrete with improved ductility, *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 28, 959-968.
- [9] SPOELSTRA M.R., MONTI G. – (1999), FRP-Confined Concrete Model, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 3(3), 143-150.
- [10] TENG J.G., JIANG T., LAM L., LUO Y. Z. – (2009), Refinement of a Design-Oriented Stress–Strain Model for FRP-Confined Concrete, *Journal of composites for construction*, ASCE, 13, 269-278.