

Comportamento in compressione di elementi in calcestruzzo armato a sezione circolare e quadrata rinforzati con FRP

G. Campione*, N. Miraglia** & N. Scibilia***

* Ricercatore non confermato di Tecnica delle Costruzioni

** Ricercatore confermato di Tecnica delle Costruzioni

*** Professore Associato di Costruzioni in Acciaio

Università di Palermo, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica
Viale delle Scienze 90128 - tel. 091/6568467; Fax: 091/6568407
email: campione@stru.diseg.unipa.it

SOMMARIO - Si esamina il comportamento sperimentale di elementi in cemento armato a sezione circolare e quadrata, rinforzati con tessuto di fibre di carbonio (CFRP), soggetti a compressione assiale centrata.

I risultati ottenuti evidenziano l'incremento di resistenza e di duttilità legati all'impiego del CFRP, mettendo in luce i parametri che ne governano il comportamento.

Si propone un modello di calcolo per la resistenza di pilastri circolari fasciati con CFRP.

SUMMARY- In the present investigation the experimental behaviour in compression of R.C. members having circular and square transverse cross-section and reinforced with carbon unidirectional wraps (CFRP) was analysed.

Results obtained have shown the increase in strength and in ductility due to the use of CFRP as strengthening material for R.C. members subjected to axial compressive forces.

Finally, analytical model to determine the bearing capacity of compressed R.C. members with circular cross-section reinforced with CFRP is developed.

Parole chiave: CFRP, confinamento, prove compressione.

Key words: CFRP, confinement, compressive tests.

1. Introduzione

La ricerca prende spunto dal crescente interesse per l'impiego di materiali innovativi per il ripristino e/o l'adeguamento sismico di elementi in calcestruzzo armato, rivolto prevalentemente al rafforzamento di elementi compressi carenti di armature di confinamento e di elementi inflessi con inadeguata resistenza alla flessione o al taglio.

I vantaggi legati all'uso di materiali compositi (FRP) derivano dalle elevate proprietà meccaniche (resistenza a trazione e modulo elastico), dalla non corrodibilità, dalla facilità di applicazione e dalla leggerezza di cui sono dotati.

Relativamente al caso degli elementi compressi, i principali parametri investigati in letteratura /1-9/ sono: il tipo di materiale utilizzato per il rinforzo (carbonio, kevlar, vetro) e la sua manifattura (tessuto mono e bi-direzionale); la forma della sezione trasversale; le dimensioni degli elementi e la resistenza del conglomerato.

Nel presente lavoro si valuta l'efficacia di tessuti di fibre di carbonio (CFRP) per il ripristino e/o l'adeguamento di strutture in calcestruzzo armato, con particolare riferimento al caso dei pilastri, focalizzando l'attenzione sul comportamento in compressione di elementi in calcestruzzo armato, al variare della forma della sezione (circolare e quadrata) e delle dimensioni dei provini. I risultati ottenuti evidenziano in particolare il benefico effetto sulla duttilità prodotto dal CFRP che può essere efficacemente impiegato in aggiunta alle preesistenti armature trasversali, conferendo al materiale notevoli capacità dissipative in zona sismica.

2. Programma sperimentale

2.1. Confezionamento dei provini

Il programma sperimentale ha previsto il confezionamento di elementi di calcestruzzo di

forma cilindrica e prismatica a sezione quadrata, in entrambi i casi di dimensioni 100 x 200 mm e 100 x 340 mm, realizzati con conglomerato di normale resistenza. Per ciascuna serie investigata si sono confezionati cinque provini di cui tre sottoposti a prova monotonica e due sottoposti a carico ciclico. In Fig. 1 si mostrano la geometria dei provini e i dettagli delle armature impiegate. In Tabella 1 si forniscono le caratteristiche e le tipologie dei campioni provati.

Alcuni dei cilindri di entrambe le dimensioni previste sono stati rinforzati con spirali di acciaio di diametro $\phi = 4$ mm disposte con passo $p = 25$ e 50 mm. Le corrispondenti percentuali volumetriche di armatura trasversale, $\rho_s = 4A_s/(d p)$, sono pari a 2.48 e 1.24%, essendo A_s l'area trasversale del tondo costituente le spirali, d il diametro del nucleo confinato e p il passo delle spirali. Parte dei cilindri di dimensioni 100 x 340 mm sono stati armati anche con 6 ferri longitudinali di diametro 5 mm, risultando una percentuale di armatura longitudinale $\rho_l = A_l/A_c$, dell'1.25%, essendo A_l l'area complessiva dei ferri longitudinali e A_c l'area totale di conglomerato della sezione trasversale dei provini.

Analogamente, nei prismi di dimensioni 100 x 200 mm si sono impiegate armature trasversali costituite da staffe chiuse di diametro $\phi = 4$ mm, disposte con passo $p = 20$ e 40 mm. Le corrispondenti percentuali volumetriche di armatura trasversale sono pari a $\rho_t = \rho_x = \rho_y = A_{s,x}/(p b_c) = 1.46$ e 0.73% , essendo $A_{s,x}$ l'area totale del tondo costituente la staffa in direzione x e b_c la dimensione in asse della staffa in direzione x . Alcuni prismi di dimensioni 100 x 340 mm sono stati armati anche con 4 ferri longitudinali di diametro 5 mm. La percentuale di armatura longitudinale è risultata $\rho_l = 0.785\%$. Per tutti i provini si è adottato un copriferro di 3 mm.

Alcuni elementi sono stati fasciati con un solo foglio di tessuto di fibra di carbonio (CFRP) di spessore 0.165 mm incollato ai provini e sovrapposto per una lunghezza di 10 cm, come mostrato in Fig. 2. Nel caso dei pilastri quadrati la sovrapposizione ha interessato l'intero lato

del provino. Il tessuto di fibra è stato reso aderente alla superficie del conglomerato mediante resina epossidica bicomponente, previa applicazione di un primer di supporto.

Tutti i campioni sono stati preparati con spianatura delle facce destinate a venire a contatto con i piani della pressa. Le prove di compressione sono state eseguite dopo 28 giorni di stagionatura del conglomerato e dopo 4 giorni dall'applicazione del tessuto.

2.2. Caratteristiche dei materiali

Il conglomerato della presente indagine è caratterizzato dall'impiego di 300 kg/m^3 di cemento Portland, 165 l/m^3 di acqua, 850 kg/m^3 di sabbia e 1050 kg/m^3 di inerti con massima pezzatura 10 mm. Quest'ultima è stata scelta in relazione alla geometria dei provini ed alla tipologia e alle dimensioni delle armature. Con tale composizione si è ottenuta una resistenza cilindrica a 28 giorni, misurata su provini $100 \times 200 \text{ mm}$, $f_c' \approx 20 \text{ MPa}$.

L'acciaio impiegato per la realizzazione delle armature trasversali e longitudinali ha tensione di snervamento $f_y = 520 \text{ MPa}$. Le spirali, aventi passo $p = 25$ e 50 mm e diametro esterno 85 mm , sono in grado di esercitare una tensione di confinamento massima, $\sigma = 2f_y A_s / (dp)$, rispettivamente di 6.45 e 3.22 MPa .

Nel caso dei prismi, essendo $b_c = 85 \text{ mm}$ e $p = 20$ e 40 mm , si possono determinare pressioni di confinamento $f_{tx} = \rho_x \times f_y = f_{ty} = \rho_y \times f_y = 7.64$ e 3.82 MPa .

Il tessuto di fibre di carbonio del tipo MBrace C1-30 con orientamento unidirezionale ha peso dell'unità di volume 1820 kg/m^3 , larghezza 500 mm , spessore equivalente $t = 0.165 \text{ mm}$, modulo elastico caratteristico 230000 MPa , resistenza caratteristica a trazione $f_t = 3430 \text{ MPa}$ ed allungamento a rottura $\epsilon_u = 1.5\%$. Le corrispondenti percentuali volumetriche di tessuto fibroso risultano, sia nel caso della sezione quadrata che di quella circolare, pari a $\rho_f = 4t / D = 0.66\%$, essendo D il diametro esterno della sezione circolare (ovvero il lato del quadrato).

Prove di trazione diretta eseguite sul tessuto di fibre di carbonio hanno evidenziato un

comportamento elasto-fragile, come risulta dal diagramma di Fig. 3, dove si riporta anche il diagramma costitutivo dell'acciaio.

3. RISULTATI DELLE PROVE SPERIMENTALI

Le prove di compressione sono state eseguite utilizzando una pressa idraulica del tipo Galdabini da 60 t dotata di snodo sferico e operante in controllo di spostamento, con velocità di avvicinamento delle testate di 0.2 mm/min.

Le tensioni sono state calcolate come rapporto tra il valore registrato dalla cella di carico e l'area della sezione trasversale nominale del provino. Per la valutazione delle deformazioni sono stati disposti sul provino tre trasduttori a 120° in pianta e su una base di misura pari a 140 mm, escludendo le zone in prossimità dei vincoli, come in /10/. Il valore medio delle tre letture in rapporto alla base di misura ha fornito l'ascissa delle curve tensione-deformazione.

3.1. Test di compressione su provini 100 x 200 mm

In Fig. 4 sono riportate le curve medie tensione-deformazione relative alle prove di compressione su cilindri e su prismi di calcestruzzo non armato o rinforzato con armature trasversali costituite, come già detto, da spirali nel caso dei cilindri e da staffe nel caso dei prismi.

Le curve mostrano che l'aggiunta di spirali (Fig. 4 a) e di staffe (Fig. 4 b) produce significativi miglioramenti in termini di resistenza, deformazione massima, duttilità e capacità di assorbimento di energia.

Si osserva inoltre che, impiegando armature trasversali con passo ridotto, si ha la rottura del provino per cedimento della spirale o delle staffe, provocata da un eccesso di deformazione dell'acciaio. Nel caso di passo più elevato, invece, la rottura del provino avviene per

schacciamento del conglomerato, senza che sia stata sfruttata a pieno la capacità di confinamento delle armature trasversali.

In Fig. 5 sono riportati gli analoghi risultati relativi alle prove di compressione su cilindri (Fig. 5 a) e su prismi (Fig. 5 b) rinforzati con tessuto di fibre di carbonio e con tessuto di fibre e armature trasversali di confinamento. Come nei diagrammi di Fig. 4, vengono qui riportati i risultati relativi alle medie.

L'applicazione delle bande di tessuto produce una sensibile variazione del comportamento del materiale rispetto alla sola matrice, sia per i cilindri che per i prismi, ed, in particolare, si registrano notevoli incrementi di resistenza. Tali incrementi sono risultati più del 200% negli elementi cilindrici e di circa il 140% negli elementi a sezione quadrata.

Come si è già rilevato in /6/, la forma quadrata della sezione riduce, rispetto al caso della sezione circolare, l'efficacia del confinamento del CFRP sia per la concentrazione di tensione negli spigoli, sia per la riduzione dell'area efficace. Migliori prestazioni nei pilastri quadrati possono essere ottenute aumentando il numero degli strati di rinforzo e/o smussando gli spigoli della sezione, con l'aggiunta di idoneo materiale di riempimento, prima dell'applicazione del CFRP.

L'aumento di resistenza è accompagnato anche da un notevole incremento di deformazione ultima, governata, sia nel caso dei cilindri che dei prismi, dallo strappo del tessuto che si verifica in posizione casuale nei cilindri ed in prossimità dello spigolo nei prismi.

L'uso combinato di CFRP e spirali comporta un incremento di resistenza e di deformazione massima in misura nettamente superiore a quello che si otterrebbe sommando i singoli effetti delle armature trasversali e del CFRP. In questo caso la rottura è ancora fragile, ma si ha una resistenza residua legata alla presenza delle armature trasversali con valori delle deformazioni a rottura paragonabili a quelli ottenuti impiegando elevate percentuali di armature di confinamento.

In Tabella 2 sono riportati i valori delle grandezze più significative delle prove di

compressione. Si è indicato con f'_c la resistenza cilindrica a compressione a 28 gg, con ϵ_0 la deformazione corrispondente alla massima tensione f'_c ed, infine, con E_c il modulo di elasticità tangente.

3.2. Test di compressione su provini 100 x 340 mm

In Fig. 6 sono riportate le curve carico-deformazione relative alle prove di compressione su cilindri (Fig. 6 a) e prismi (Fig. 6 b) di dimensioni 100 x 340 mm, armati con ferri longitudinali e trasversali.

Dai diagrammi si evince che nel caso di sola matrice il comportamento del materiale è complessivamente più fragile rispetto a quello osservato per gli elementi 100 x 200 mm (maggiore pendenza del ramo post-picco) e la resistenza risulta più bassa (probabile effetto di scala).

Nel caso di elementi con armatura longitudinale e trasversale si registrano valori di resistenza lievemente superiori a quelli rilevati negli analoghi elementi di dimensioni 100 x 200 mm con sole armature trasversali, evidenziandosi così il modesto contributo alla resistenza offerto dalle armature longitudinali.

Si rileva inoltre che, dopo l'espulsione del copriferro e prima del raggiungimento della massima deformazione corrispondente alla rottura delle armature trasversali, si manifestano fenomeni di instabilità delle barre compresse, senza tuttavia compromettere la capacità portante ultima dell'elemento.

In Fig. 7 si riportano i risultati relativi ai provini cilindrici (Fig.7 a) e prismatici (Fig. 7 b) di dimensioni 100 x 340 mm in presenza di CFRP, senza e con armature trasversali. In quest'ultimo caso, oltre agli ulteriori incrementi di resistenza e di deformazione ultima rispetto al caso dell'impiego delle sole armature trasversali in elevata percentuale, si osserva un ritardo nell'innescarsi del fenomeno dell'instabilità delle barre longitudinali che si manifesta dopo la

rottura del tessuto. I risultati più rappresentativi delle prove sono riportati in Tabella 3.

Le modalità di rottura sono caratterizzate dalla formazione di un piano di frattura inclinato nel conglomerato, dallo strappo del tessuto in posizione casuale per i cilindri e lungo lo spigolo nel caso dei prismi ed, infine, dalla instabilità delle barre compresse.

La Fig. 8 mostra i campioni prismatici con armature trasversali e CFRP dopo l'esecuzione delle prove. E' evidente l'effetto benefico del confinamento sul conglomerato esercitato sia dalle armature che dalla presenza del CFRP.

In Fig. 9 si riporta la curva relativa ad una delle prove cicliche su elementi cilindrici 100 x 340 mm rinforzati con CFRP, unitamente alla curva dedotta per via monotonica.

Dall'andamento dei diagrammi si evince che la curva dei punti comuni della risposta ciclica segue quella ottenuta per via monotonica. Inoltre, i cicli di carico e scarico presentano andamento analogo indipendentemente dal punto di inizio scarico, evidenziando la buona attitudine del materiale a sopportare azioni di natura ciclica senza subire fenomeni di degrado.

4. CALCOLO DELLA RESISTENZA DI SEZIONI RINFORZATE CON CFRP

Diversi studi teorici e sperimentali si sono occupati del calcolo della resistenza di elementi compressi di conglomerato confinato con armature tradizionali (spirali o staffe) /11-12/, con sezione trasversale di forma circolare o rettangolare. Da tali lavori è emerso, in particolare, che la presenza di armature trasversali aumenta la resistenza del materiale a causa del regime triassiale che si instaura all'interno del nucleo di conglomerato compresso.

Negli elementi con sezione circolare confinati con spirali si hanno maggiori incrementi di resistenza e di duttilità rispetto a quelli degli analoghi elementi aventi staffe circolari e rispetto a quelli con sezione quadrata o rettangolare. Occorre comunque osservare che nei pilastri rettangolari o quadrati l'aumento di resistenza legato al confinamento è in genere ridotto dalla

espulsione del copriferro.

Secondo la vigente normativa italiana per le costruzioni in calcestruzzo armato in zona sismica /13-14/ si può tenere conto, con il metodo di verifica alle tensioni ammissibili, dell'aumento di resistenza dovuto al confinamento solo nel caso dei pilastri cerchiati e rispettando determinate condizioni (limitata snellezza della colonna e rapporto diametro passo minore di 1/5). Le stesse norme considerano implicitamente che i pilastri posseggano adeguata duttilità attraverso il rispetto di limitazioni sulle dimensioni e sulle percentuali di armature longitudinali e trasversali.

Le norme internazionali trattano esplicitamente il problema della duttilità e forniscono i requisiti fondamentali per conseguirla. In particolare, l'Eurocodice 8 /15/ prevede, come è noto, tre classi di duttilità (DC-H alta, DC-M media, DC-L bassa) alle quali corrispondono diversi livelli di prescrizioni per i materiali e per i particolari costruttivi.

Considerando quanto su riportato si fornisce una espressione per il calcolo della portanza dei pilastri cerchiati con armature tradizionali ed FRP e si danno alcune indicazioni sull'impiego dell'FRP in zona sismica alla luce di quanto previsto dall'EC8.

4.1. Calcolo della resistenza di pilastri cerchiati con CFRP e spirali

Per determinare la capacità portante di pilastri circolari confinati con spirali e con tessuto di fibre di rinforzo plastico opportunamente ancorato (adeguata lunghezza di sovrapposizione), può applicarsi in via cautelativa il principio di sovrapposizione degli effetti, separando il contributo della spirale da quello del CFRP.

Relativamente all'azione di confinamento, l'evidenza sperimentale /11/ ha mostrato che, in presenza di stato di tensione triassiale, la pressione che determina la rottura di un provino cilindrico é:

$$f'_{cc} = f'_c + k_1 \cdot f'_i \quad (1)$$

essendo f'_i la pressione laterale cerchiante il calcestruzzo dovuta alla spirale e al CFRP e k_1 un coefficiente sperimentale. Nel caso di elementi confinati con armature tradizionali tale coefficiente è solito assumersi pari a 4.1 /11/ e nel caso invece di impiego di FRP è ragionevole assumere un valore più basso di k_1 pari a 2 in accordo con l'evidenza sperimentale /6/.

Con riferimento alla simbologia di Fig. 10, dall'equilibrio delle forze agenti nella generica sezione trasversale può ricavarsi la pressione radiale f'_i come:

$$f'_i = \frac{2 \cdot f_y \cdot A_s}{d \cdot p} \quad \text{per confinamento con spirale} \quad (2)$$

$$f'_i = \frac{2 \cdot f_{ud} \cdot t}{D} \quad \text{per confinamento con CFRP} \quad (3)$$

dove si indica con f_{ud} la tensione di rottura del tessuto penalizzata con un opportuno coefficiente di sicurezza (che tiene conto del comportamento elasto-fragile del materiale, del processo di lavorazione e delle tecniche di ancoraggio), con t lo spessore del tessuto e con D il diametro esterno dell'elemento da confinare.

Occorre precisare che, secondo alcuni autori /16/, è opportuno ridurre la pressione determinata con la (3) del 15% per tenere conto dell'effetto scala; nell'ambito del presente lavoro ciò non si è ritenuto necessario poichè dal confronto tra i risultati analitici con quelli sperimentali è risultato che tale effetto non è rilevante.

Sommando i singoli contributi dovuti alla resistenza del calcestruzzo e delle armature longitudinali supposte snervate, si ottiene il seguente carico ultimo:

$$N_u = f_c' \cdot \left[A_n + \frac{f_y}{f_c'} \cdot A_a + 2 \cdot \frac{f_y}{f_c'} \cdot A_c + \frac{f_{ud}}{f_c'} \cdot \mathbf{p} \cdot D \cdot t \right] \quad (4)$$

in cui:

$$A_n = \frac{\mathbf{p} \cdot d^2}{4} \quad ; \quad A_c = \frac{\mathbf{p} \cdot d \cdot A_s}{p} \quad (5)$$

essendo A_n l'area della sezione trasversale al netto delle armature longitudinali e A_s l'area di spirale equipesante nel passo p .

Considerando valori medi di $f_c' = 20$ MPa, $f_y = 300$ MPa, $f_{ud} = 15000$ MPa (valore cautelativo pari circa alla metà della tensione di rottura per fibre di carbonio ad alta resistenza), si ottiene:

$$N_{ua} = f_c' \cdot [A_n + 15 \cdot A_a + 30 \cdot A_c + 75 \cdot \mathbf{p} \cdot D \cdot t] \quad (6)$$

Tale espressione costituisce l'estensione di quanto previsto dalla normativa italiana /13/ per la verifica dei pilastri cerchiati con il metodo delle tensioni ammissibili, tenendo conto anche del contributo del CFRP. La (6) è applicabile limitatamente ai valori di resistenza prima indicati e richiede per una sua generalizzazione ulteriori indagini.

In Tabella 4 si confrontano i valori di resistenza relativi ai pilastri circolari ottenuti nelle prove qui riportate con quelli teorici ottenuti applicando la (4). Dal confronto risulta la buona rispondenza tra i valori teorici e quelli sperimentali.

4.2. Considerazioni sulla duttilità delle sezioni rinforzate con spirali e con FRP

La presenza dell'FRP, come già detto, produce non solo incrementi di resistenza, ma anche di deformazione ultima e quindi di duttilità, con effetti paragonabili a quelli indotti dalle armature tradizionali di confinamento, i cui risultati sono già stati recepiti dalle più recenti normative e tradotti in regole di dettaglio.

Relativamente al confinamento prodotto dall'FRP, non esistono, allo stato attuale, norme di riferimento; comunque alcuni concetti validi per il cemento armato potrebbero estendersi agli elementi confinati con FRP.

L'EC8, in funzione delle classi di duttilità previste, indica (Tabella 5): le percentuali meccaniche minime di armatura trasversale $\omega_{wd,min} = \rho_s f_{yd} / f_{cd}$ da adottare nelle regioni critiche; il valore minimo $\mu_{1/r}$ del fattore di duttilità di curvatura convenzionale; il massimo sforzo normale adimensionale v_{max} .

Per adeguare il confinamento degli elementi in c.a. di sezione trasversale circolare, armati con spirali, alla classe di duttilità richiesta dall'EC8, attraverso l'uso del CFRP, si propone di utilizzare il diagramma di Fig. 11 avente in ordinata la percentuale meccanica di spirali ed in ascissa quella del tessuto fibroso. Come già detto, la percentuale meccanica di spirali è pari a $\rho_s f_{yd} / f_{cd}$ e quella del tessuto è pari a $\rho_f f_{ud} / f_{cd}$, con ρ_f la percentuale volumetrica del tessuto. Tale diagramma è stato costruito eguagliando le pressioni di confinamento esercitate dalle spirali e dal CFRP (Eqn. 2, 3). Attraverso l'uso di questo diagramma è possibile individuare la percentuale meccanica di tessuto di fibre di rinforzo necessario per adeguare il confinamento preesistente alla classe di duttilità richiesta.

5. CONCLUSIONI

Le prove sperimentali di compressione su campioni di calcestruzzo con armature trasversali di confinamento e rinforzati con tessuto di fibre di carbonio hanno consentito di valutare il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo conseguenti all'applicazione del CFRP.

In particolare, i risultati ottenuti mostrano che l'aggiunta di bande di rinforzo correttamente applicate (opportuna scelta dello spessore e della lunghezza di sovrapposizione) aumenta

sensibilmente la resistenza e la capacità deformativa degli elementi strutturali provati e riduce il rischio dell'instabilità delle barre compresse.

L'incremento di resistenza dovuto al confinamento è influenzato dalla forma della sezione: nella circolare esso è nettamente superiore rispetto a quello rilevato nella sezione quadrata.

Le espressioni analitiche proposte per il calcolo della portanza delle colonne circolari fasciate con CFRP, tenendo conto dell'effetto combinato delle spirali e del CFRP, consentono di riprodurre con buona approssimazione i risultati sperimentali.

Si è anche proposto un diagramma che consente di individuare la percentuale meccanica di tessuto di fibre equivalente a quella della spirale necessaria per adeguare il confinamento preesistente alla classe di duttilità richiesta in accordo con quanto previsto da EC8.

Si osserva infine che, essendo limitato il numero delle prove eseguite e delle variabili investigate, dai risultati ottenuti si ricavano solo indicazioni qualitative. Un approfondimento sperimentale è necessario per potere pervenire a espressioni di progetto per il calcolo della resistenza degli elementi compressi rinforzati con FRP.

Bibliografia

- /1/ Arduini M., Di Tommaso A., Manfroni O., Ferrari S., Romagnolo M., <<Il confinamento passivo di elementi compressi in calcestruzzo con fogli di materiale composito>>, *Industria Italiana del Cemento*, 11, 836-841, 1999.
- /2/ Arduini M., Di Tommaso A., Mantegazza G., <<Compositi per la riabilitazione strutturale>>, *Atti delle Giornate AICAP 97*, 1, 29-240, 1997.
- /3/ Bortolotti L., Lai S., Carta S., Cireddu D., <<Comportamento a carico assiale di conglomerati ad alta resistenza confinati con tessuto di fibra di carbonio>>, *Atti delle Giornate AICAP 99*, 1, 5-14, 1999.
- /4/ Mirmiran A., Shahawy M., <<Behavior of concrete columns confined by fiber composites>>, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 123, 5, 583-590, 1997.
- /5/ Purba B. K., Mufti A. A., <<Investigation of the behaviour of circular concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) jackets>>, *Can. J. Civ. Eng.* 26, 590-596, 1999.
- /6/ Rochette P., Labossière P., <<Axial testing of rectangular column models confined with composites >>, *ASCE Journal of Composites for Construction*, 4, 3, 129-136, 2000.
- /7/ Saadatmanesh H., Ehsani M. R., Li M. W., <<Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps>>, *ACI Structural Journal*, 91, 4, 434-447, 1994.
- /8/ Saafi M., Toutanji H. A., Li Z., <<Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes>>, *ACI Materials Journal*, 96, 4, 500-509, 1999.
- /9/ Seible F., M. J. N. Priestley, G. A. Hegemier, D. Innamorato, <<Seismic retrofit of R.C. columns with continuous carbon fiber jackets>>, *ASCE Journal of Composites for Construction*, 1, 2, 52-62, 1997.
- /10/ Campione G., La Mendola L., Miraglia N., <<Comportamento in compressione di calcestruzzi fibrorinforzati alleggeriti con inerti di pomice>>, *Atti delle Giornate AICAP 99*, 1, 17-26, 1999.
- /11/ Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., <<Theoretical stress-strain model for confined concrete>>, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 114, 8, 1804-1826, 1988.
- /12/ Cusson D., Paultre P., <<Stress-strain model for confined high strength concrete>>, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 121, 3, 468-477, 1995.
- /13/ D.M. Min. LL.PP. 16.01.96, <<Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche>>.
- /14/ Circolare Min. LL.PP. 10.04.97 n.65, <<Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al D.M. Min LL.PP. 16.01.96>>.
- /15/ Eurocode n. 8, <<Structures in seismic regions>>, *Commission of the European Communities*. Brussels, Belgio. 1994.

/16/ Miyauchi K., Nishibayashi S., Inoue S., <<Estimation of strengthening effects with carbon sheet for concrete column>>, *Proc. 3th Int. Symp. "Non metallic FRP reinforcement for concrete structures"*, Japan Concrete Institute, Sapporo, 1997.

Lista dei simboli

A_s	area sezione trasversale spirale
A_a	area complessiva dei ferri longitudinali
A_c	area lorda della sezione trasversale della sezione di conglomerato
A_{sx}	area complessiva delle staffe in direzione x nel passo p
A_n	area netta della sezione di conglomerato
b_c	dimensione trasversale della sezione quadrata
D	diametro nucleo confinato in asse CFRP
d	diametro nucleo confinato in asse spirale
E_c	modulo elastico del conglomerato
f_{cd}	tensione di calcolo del conglomerato
f_{yd}	tensione di calcolo dell'acciaio
f_y	tensione di snervamento sperimentale delle armature
f_u	tensione di rottura del CFRP
f_{ud}	tensione di calcolo del CFRP
f'_c	resistenza cilindrica a 28 giorni del conglomerato
f'_l	pressione di confinamento
ϕ	diametro armature
ρ_s	percentuale volumetrica spirale
ρ_t	percentuale volumetrica staffe
ρ_f	percentuale volumetrica di tessuto di fibre
p	passo staffe o spirali
ϵ_0	deformazione massima conglomerato corrispondente ad f'_c
V_{max}	sforzo normale massimo adimensionale
$\omega_{wd,min}$	percentuale meccanica minima di armatura trasversale spirali
$\mu_{1/r}$	fattore di duttilità di curvatura convenzionale

Lista delle figure

Fig. 1. *Armature impiegate e relativa geometria dei provini.*

Fig. 2. *Dettaglio del rinforzo dei provini con CFRP.*

Fig. 3. *Curve **s-e** per l'acciaio **f** 4 mm e per il tessuto di fibra di carbonio.*

Fig. 4. *Curve **s-e** per elementi 100 x 200 mm rinforzati con armature di confinamento.*

Fig. 5. *Curve **s-e** per elementi 100 x 200 mm rinforzati con CFRP e/o armature di confinamento di acciaio.*

Fig. 6. *Curve carico-deformazione per elementi 100 x 340 mm rinforzati con armature tradizionali.*

Fig. 7. *Curve carico-deformazione per elementi 100 x 340 mm rinforzati con CFRP.*

Fig. 8. *Modo di rottura dei prismi rinforzati con CFRP e con staffe.*

Fig. 9. *Risposta ciclica di cilindri rinforzati con CFRP.*

Fig. 10. *Schema geometrico armatura e sezione trasversale.*

Fig. 11. *Diagramma di equivalenza della percentuale meccanica delle spirali e del tessuto fibroso.*

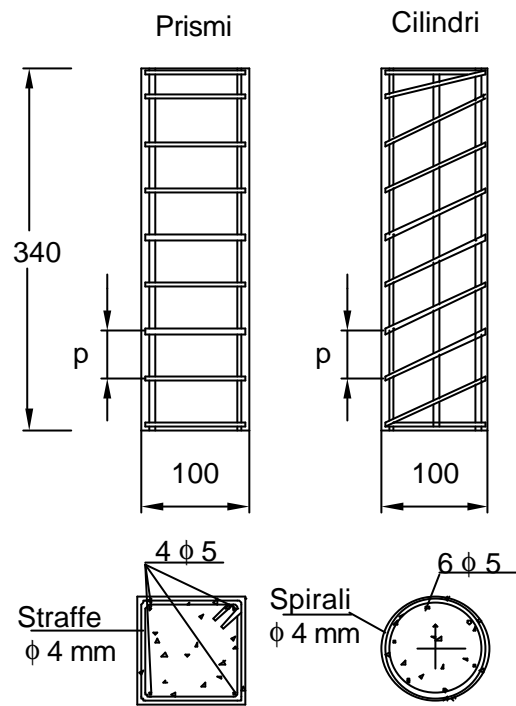


Fig. 1. Armature impiegate e relativa geometria dei provini.

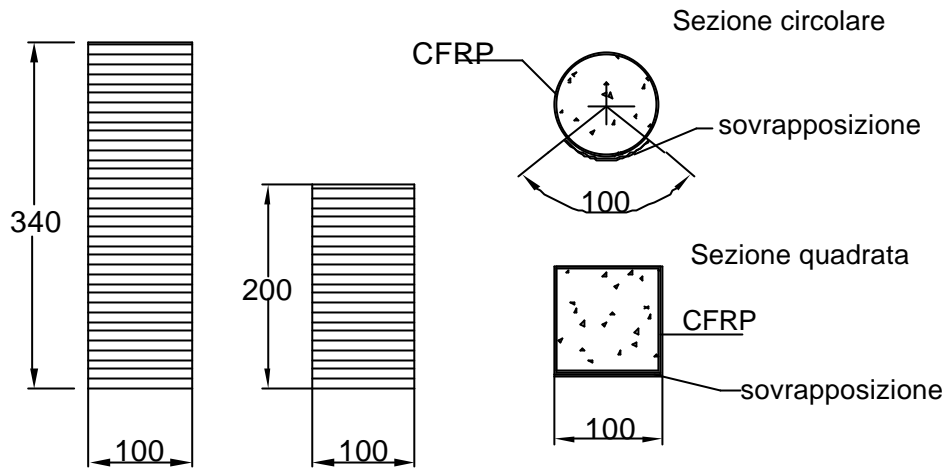


Fig. 2. Dettaglio del rinforzo dei provini con CFRP.

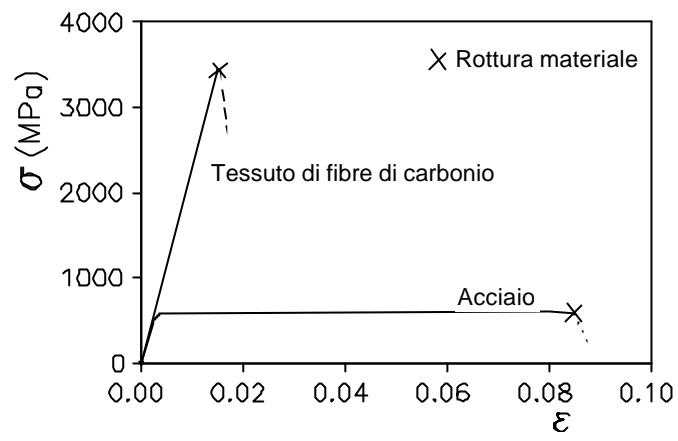


Fig. 3. Curve σ - ϵ per l'acciaio f 4 mm e per il tessuto di fibra di carbonio.

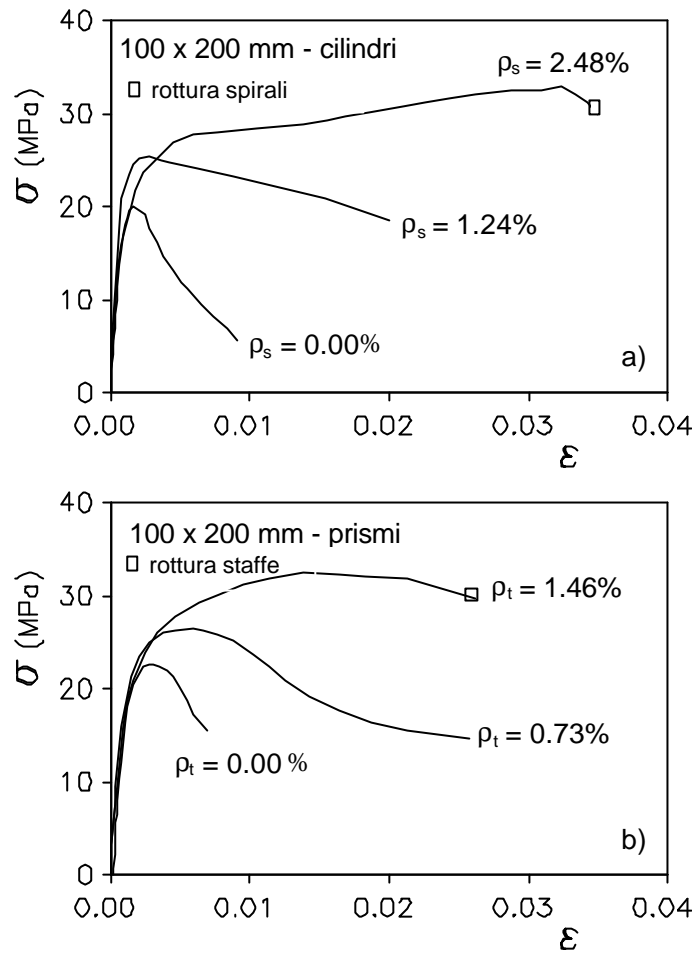


Fig. 4. Curve σ - ϵ per elementi 100 x 200 mm rinforzati con armature di confinamento:
 a) provini cilindrici; b) provini prismatici.

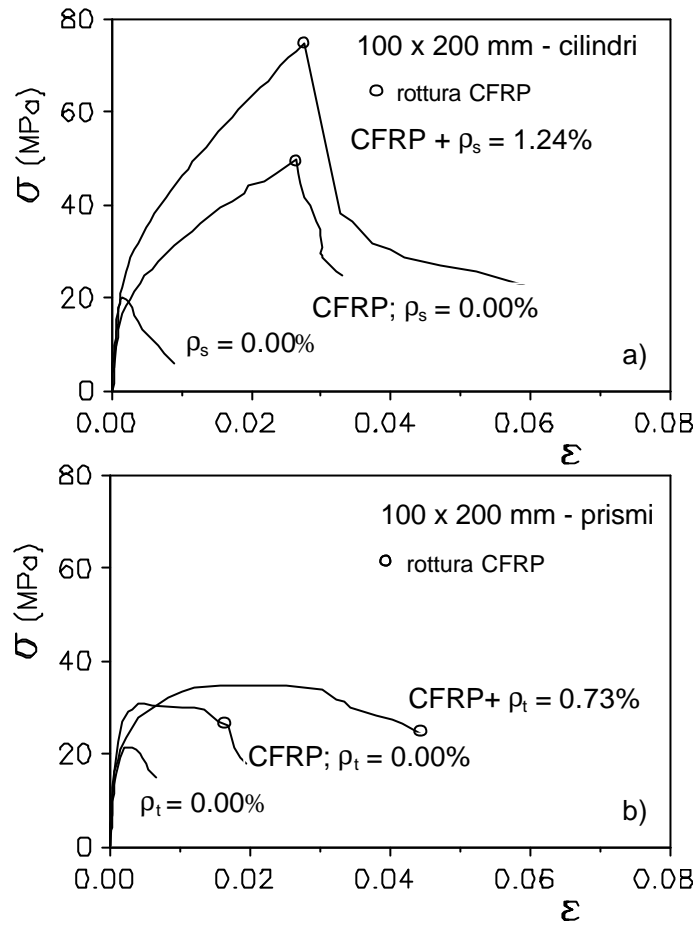


Fig. 5. Curve σ - ϵ per elementi 100 x 200 mm rinforzati con CFRP e/o armature di confinamento di acciaio: a) provini cilindrici; b) provini prismatici.

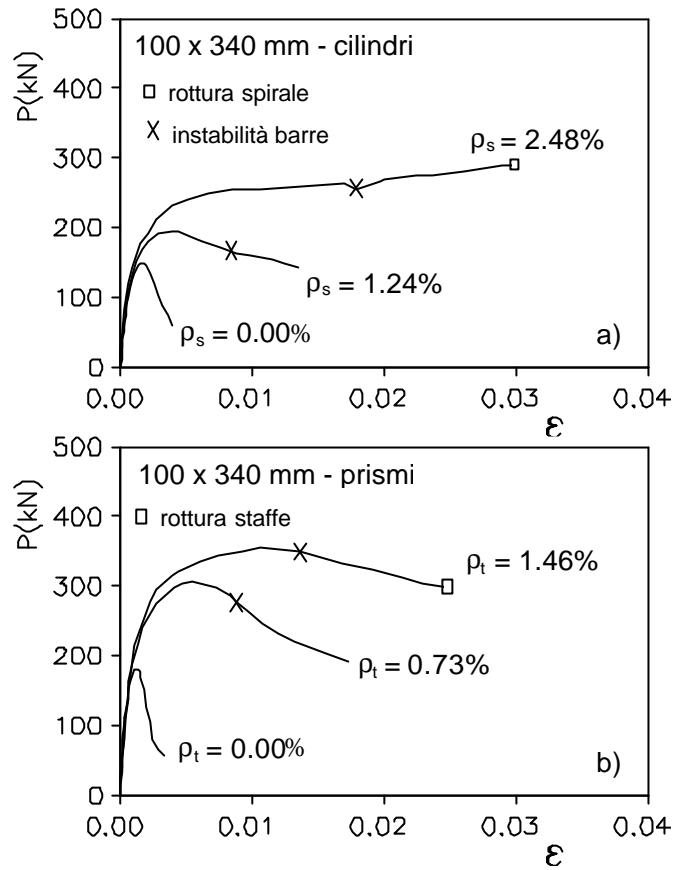


Fig. 6. Curve carico-deformazione per elementi 100 x 340 mm rinforzati con armature tradizionali: a) provini cilindrici; b) provini prismatici.

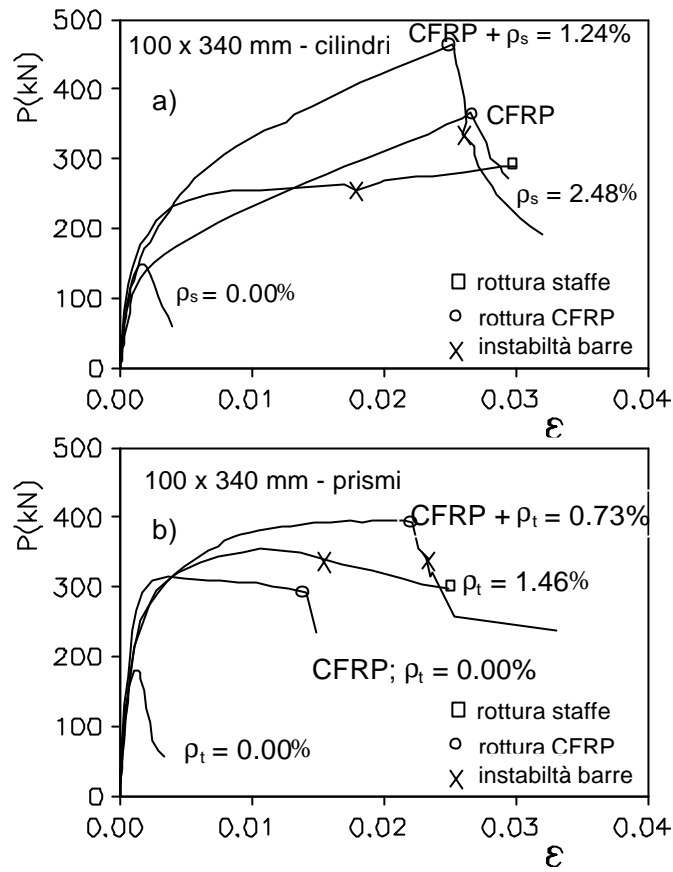


Fig. 7. Curve carico-deformazione per elementi 100 x 340 mm rinforzati con CFRP:
 a) provini cilindrici; b) provini prismatici..



$\rho_s = 0.73\% + \text{CFRP}$

$\rho_s = 0.73\%$

$\rho_s = 1.46\%$

Fig. 8. *Modo di rottura dei prismi rinforzati con CFRP e con staffe.*

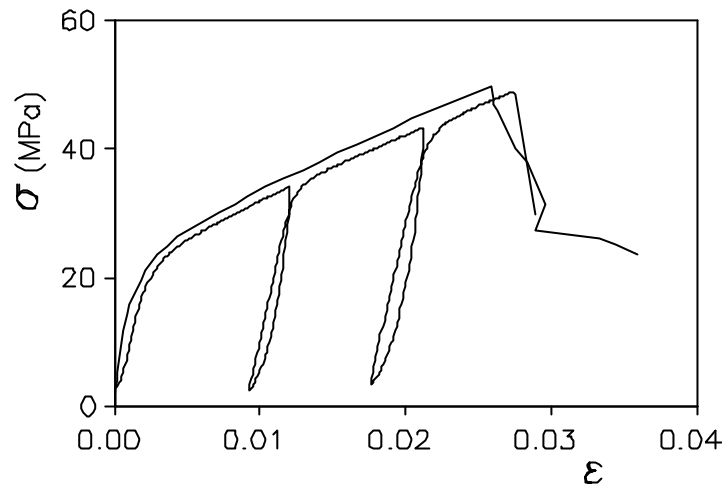


Fig. 9. Risposta ciclica di cilindri 100 x 200 mm rinforzati con CFRP.

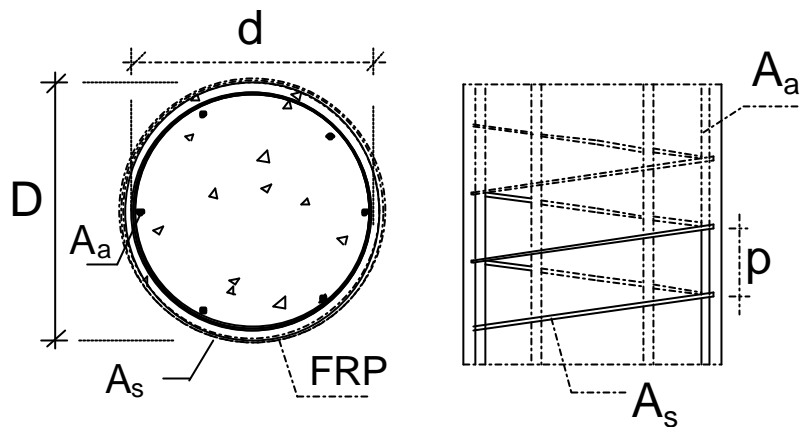


Fig. 10. Schema geometrico armatura e sezione trasversale.

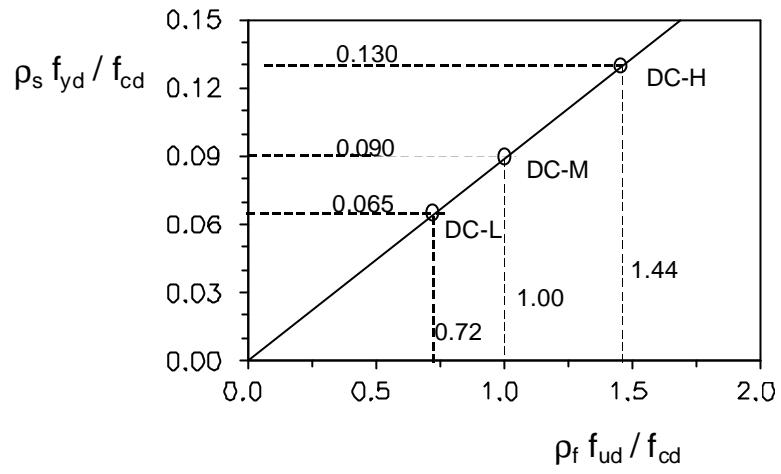


Fig. 11. *Diagramma di equivalenza della percentuale meccanica delle spirali e del tessuto fibroso.*

Lista delle tabelle

Tabella 1. Caratteristiche geometriche dei provini.

Tabella 2. Caratteristiche meccaniche dei provini 100 x 200 mm.

Tabella 3. Caratteristiche meccaniche dei provini 100 x 340 mm.

Tabella 4. Confronto teorico-sperimentale per i cilindri 100 x 340 mm.

Tabella 5. Valori di riferimento per il calcolo della duttilità locale secondo EC8.

Tabella 1. Caratteristiche geometriche dei provini.

Forma elemento	Base (mm)	Altezza (mm)	ρ_s (%)	ρ_t (%)	ρ_l (%)	ρ_f (%)
cilindro	100	200	0	0	0	0
“	100	200	1.24	0	0	0
“	100	200	2.48	0	0	0
“	100	200	0	0	0	0.66
“	100	200	1.24	0	0	0.66
prisma	100	200	0	0	0	0
“	100	200	0	0.73	0	0
“	100	200	0	1.46	0	0
“	100	200	0	0	0	0.66
“	100	200	0	0.73	0	0.66
cilindro	100	340	0	0	0	0
“	100	340	1.24	0	1.25	0
“	100	340	2.48	0	1.25	0
“	100	340	0	0	1.25	0.66
“	100	340	1.24	0	1.25	0.66
prisma	100	340	0	0	0	0
“	100	340	0	0.73	0.78	0
“	100	340	0	1.46	0.78	0
“	100	340	0	0	0.78	0.66
“	100	340	0	0.73	0.78	0.66

Tabella 2. Caratteristiche meccaniche dei provini 100 x 200 mm.

Forma elemento	CFRP t (mm)	ρ_s (%)	ρ_l (%)	f'_c (MPa)	$\epsilon_0 \times 10^3$	E_c (MPa)
Cilindro	/	0	/	20.05	2.07	22217
“	/	1.24	/	25.29	2.80	22827
“	/	2.48	/	35.56	13.8	22076
“	0.165	/	/	49.60	26.50	23641
“	0.165	1.24	/	74.77	27.65	24412
Prisma	/	0	/	22.65	2.00	22351
“	/	0.73	0.78	26.35	5.90	22287
“	/	1.46	0.78	32.35	13.00	22360
“	0.165	0	/	31.15	5.70	22351
“	0.165	0.73	/	34.83	25.10	22596

Tabella 3. Caratteristiche meccaniche dei provini 100 x 340 mm.

Forma elemento	CFRP t (mm)	ρ_s (%)	ρ_l (%)	f'_c (MPa)	$\epsilon_0 \times 10^3$	E_c (MPa)
Cilindro	/	0	/	18.98	1.97	23556
“	/	1.24	1.25	29.92	4.46	25726
“	/	2.48	1.25	41.59	19.60	26155
“	0.165	/	/	46.62	27.00	25300
“	0.165	1.24	/	76.43	25.66	25700
Prisma	/	0	/	18.17	2.39	22264
“	/	0.73	0.78	30.68	5.50	22523
“	/	1.46	0.78	35.47	11.00	22340
“	0.165	0	/	31.41	3.60	22810
“	0.165	0.73	0.78	39.61	20.60	22236

Tabella 4. Confronto teorico-sperimentale per i cilindri 100 x 340 mm.

CFRP t (mm)	ρ_s (%)	ρ_l (%)	$N_{u,sper.}$ (kN)	$N_{u,teor.}^{(*)}$ (kN)
0.165	0	0	366	315
0.165	1.24	1.25	457	387

(*) valori ottenuti con la (4)

Tabella 5. Valori di riferimento per il calcolo della duttilità locale secondo EC8.

Classe	Simbolo	$\mu_{1/r}$	$\omega_{wd,min}$	V_{max}
alta	DC-H	13	0.130	0.55
media	DC-M	9	0.090	0.65
bassa	DC-L	5	0.065	0.75