

VERIFICA DEL CRITERIO DI ROTTURA UNIFICATO PER CONGLOMERATO E MURATURA ATTRAVERSO PROVE SU CONGLOMERATO IPERCONFINATO CON TESSUTO DI FIBRA DI CARBONIO SOGGETTO A COMPRESSIONE

1. Introduzione

In uno studio recente [01-02] fu individuata l'identità costitutiva della muratura di mattoni e del conglomerato cementizio, quali materiali a comportamento macroscopicamente omogeneo e isotropo.

Questi due materiali sono sostanzialmente due conglomerati: uno costituito da un insieme ordinato e regolare di elementi lapidei (mattoni) uniti da pasta cementizia; l'altro da un insieme disordinato e irregolare di elementi lapidei (pietrisco e sabbia) uniti da pasta cementizia. L'identità costitutiva dei due materiali fu riscontrata analizzando i risultati sperimentali ottenuti da diversi autori [03-10] nello stato di compressione biassiale.

Nel piano degli sforzi principali, normalizzati rispetto alla resistenza a compressione monoassiale, la legge di interazione che meglio modella i punti di rottura fu trovata essere una ellisse di equazione

$$s_1^2 + s_3^2 + \frac{4\alpha(1-\alpha)}{1+2\alpha(\alpha-1)}s_1s_3 - \frac{1}{1+2\alpha(\alpha-1)}(s_1 + s_3) + \frac{2\alpha(1-\alpha)}{1+2\alpha(\alpha-1)} = 0 \quad (1)$$

con $s_i = \frac{\sigma_i}{f'_c}$ e $\alpha = \frac{f_v}{f'_c}$, essendo f_v la resistenza a sforzi uguali. Per $\alpha=1.15$, la Fig.1 mostra

l'ellisse (1), con le coordinate normalizzate rispetto a f_v ($s'_i = \sigma_i/f_v$) su 96 punti sperimentali riguardanti muratura e conglomerato in stato biassiale di compressione.

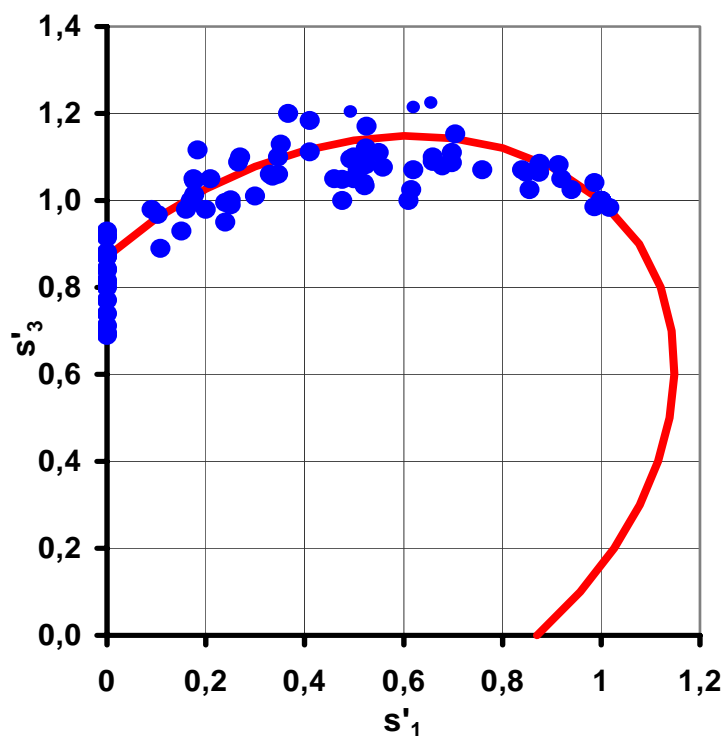


Fig.1. Curva ellittica di rottura, unificata per muratura e conglomerato, per lo stato di compressione biassiale, descritta su 96 punti sperimentali.

Nella figura è tracciato anche il ramo della curva simmetrico rispetto alla bisettrice del quadrante che si ottiene scambiando gli indici in (1).

La validità di tale equazione costitutiva fu riscontrata, per la muratura nell'intervallo del rapporto di sforzo principale s_1/s_3 , tra sforzo minore (confinante) e sforzo maggiore (dominante), compreso almeno tra 0.2 e 1, e per il conglomerato cementizio nell'intero intervallo tra zero e 1. In particolare, per la muratura si è constatato che i punti di rottura, nell'intervallo suddetto, sono indipendenti dall'orientazione dei giunti di malta rispetto alle direzioni principali di sforzo.

Un tale comportamento, macroscopicamente omogeneo e isotropo, è sostanzialmente riconducibile all'azione confinante delle componenti di sforzo che favorisce la coesione degli elementi costituenti e ne impedisce la disgregazione.

Per estendere l'unificazione del criterio di rottura allo stato di compressione triassiale fu analizzato il comportamento in tale stato ma, per l'assenza di dati sperimentali relativi alla muratura, l'analisi si ridusse esclusivamente ai risultati concernenti il conglomerato.

Furono analizzati i risultati sperimentali di diversi autori, relativi a stati triassiali di sforzo con le tensioni minore e intermedia uguali ($s_1=s_2$), [11-19], e con le tre tensioni differenti, essendo la tensione intermedia assunta multipla della minore o viceversa, [10].

L'analisi condusse a individuare come possibile superficie di rottura nello spazio delle tensioni principali, normalizzate rispetto alla resistenza a compressione monoassiale cilindrica, una superficie, simmetrica rispetto all'asse equinclinato sugli assi principali, il cui meridiano principale (giacente sul piano $s_1=s_2$) proiettato sul piano $s_2=0$ ha la forma parabolica

$$s_3^2 - s_3 - 11s_1 = 0 \quad (2)$$

$$\text{con } s_i = \frac{\sigma_i}{f'_c}$$

L'equazione (2) è descritta in Fig. 2 su 106 punti sperimentali esaminati e fornisce il valore di resistenza idrostatica, $f_h = 12f'_c$, e cioè 12 volte la resistenza a compressione monoassiale. Tale valore, derivante dai dati esaminati e dai diversi tipi di modellazione effettuati, risultò essere il più attendibile.

I punti sperimentali concernono stati triassiali aventi tensioni minore e intermedia uguali ($s_1=s_2$), con valori del rapporto di sforzo principale (s_1/s_3) fino a 0.35.

Nella figura è tracciato anche il ramo della curva simmetrico rispetto alla bisettrice del quadrante che si ottiene scambiando gli indici in (2).

Nel successivo paragrafo vengono descritti i criteri per definire la forma complessiva della superficie di rottura.

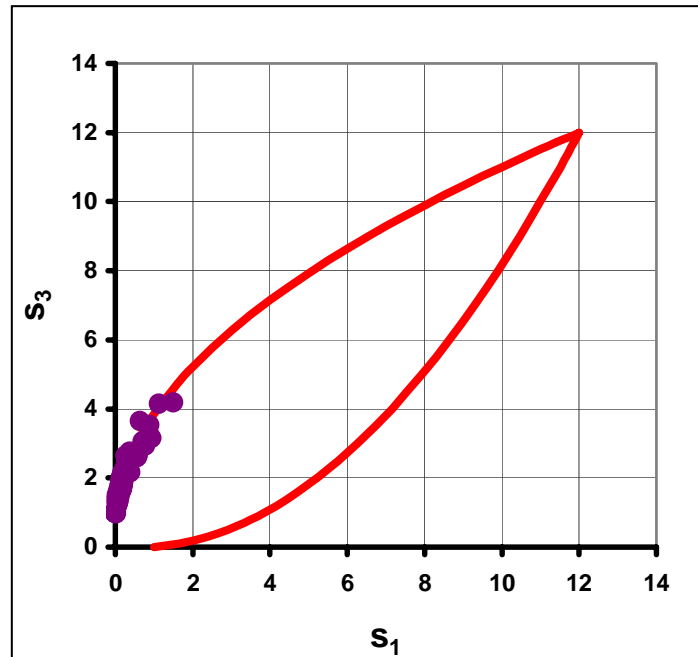


Fig.2. Curva parabolica di rottura per conglomerato cementizio nello stato di compressione triassiale a sforzi confinanti uguali, descritta su 106 punti sperimentali.

2. Superficie di rottura

In questa sezione sono sviluppati i criteri che definiscono la forma complessiva della superficie di rottura. A tal fine, sono stati ulteriormente analizzati i risultati sperimentali di Mills-Zimmermann [10]. Gli autori sperimentarono su cubi di conglomerato soggetti a stati triassiali con le tre tensioni principali differenti e con la tensione intermedia assunta di volta in volta multipla della minore o viceversa.

Nella Fig.3 sono descritte le distribuzioni sperimentali dei punti di rottura (s_1, s_3) al variare della componente di sforzo s_2 (0.046; 0.08; 0.16; 0.25; 0.42), la proiezione del meridiano principale della superficie di rottura di Eq. 2, la curva ellittica di Eq. 1 e le curve ellittiche modellanti le diverse serie di punti sperimentali.

Tali curve si ottengono per traslazione e deformazione della curva ellittica di Eq. 1. Le corrispondenti equazioni hanno la forma generica, formalmente simile alla (1)

$$s_1^2 + s_3^2 + A s_1 s_3 + B(s_1 + s_3) + C = 0 \quad (3)$$

Un estremo di ciascuna ellisse giace sulla curva parabolica del meridiano principale, l'altro sulla bisettrice del quadrante, luogo dei punti aventi due componenti di sforzo uguali.

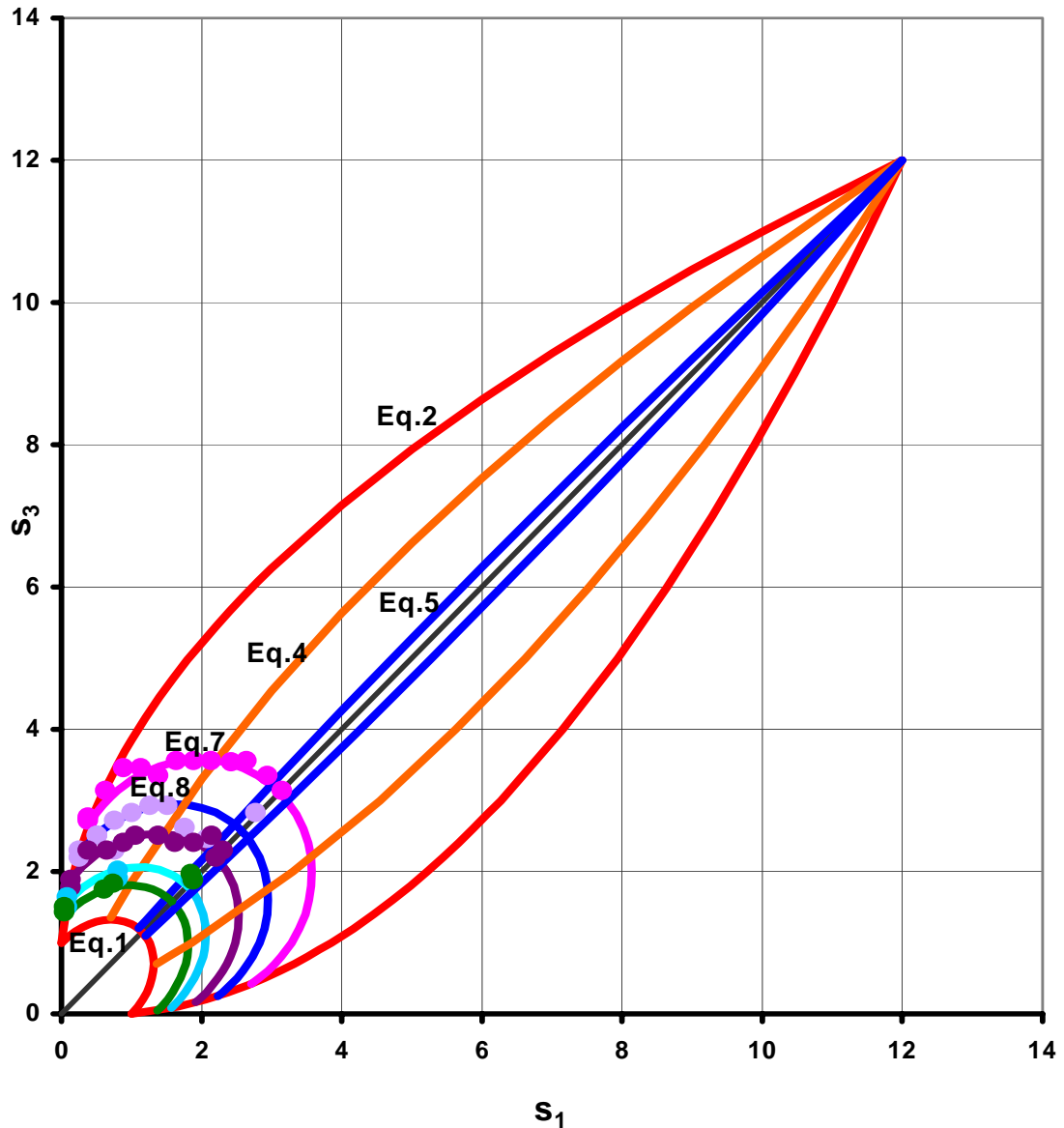


Fig 3. Superficie di rottura unificata per muratura e conglomerato nello stato di compressione triassiale, descritta dalle famiglie di ellissi e di meridiani sul piano $s_2=0$.

La superficie di rottura è descritta dalla famiglia di ellissi che sono le sezioni della superficie con piani paralleli al piano coordinato s_1s_3 per valori di s_2 che vanno da zero a 12.

La superficie di rottura può anche pensarsi descritta dalla famiglia di meridiani generata per spostamento e deformazione del meridiano principale lungo le curve ellittiche.

I meridiani hanno in comune il punto di resistenza idrostatica che rappresenta una ellisse degenera.

Il meridiano estremo destro è una parabola degenera rappresentata da una retta.

Le equazioni dei diversi meridiani sono formalmente simili all'Eq. 2

$$s_3^2 + As_3 + Bs_1 = 0 \quad (4)$$

Nella Fig.3 sono descritti due meridiani di equazioni

$$s_3^2 + 10s_3 - 22s_1 = 0 \quad (5)$$

$$s_3^2 + 113s_3 - 125s_1 = 0 \quad (6)$$

mentre delle ellissi descritte le equazioni di due di esse, per $s_2=0.42$ e 0.25 , hanno rispettivamente le equazioni

$$s_1^2 + s_3^2 - 0.142s_1s_3 - 3.44(s_1 + s_3) + 3.462 = 0 \quad (7)$$

$$s_1^2 + s_3^2 - 0.247s_1s_3 - 2.509(s_1 + s_3) + 1.318 = 0 \quad (8)$$

La validità della superficie di rottura così descritta è stata estesa anche alla muratura di mattoni.

3.Obbiettivi dello studio

Gli obbiettivi di questo studio riguardano:

la verifica del criterio di rottura unificato in un intervallo del rapporto di sforzo principale più esteso di quello proveniente dalla letteratura;

il raggiungimento di valori elevati degli sforzi confinanti, agenti su elementi cilindrici di conglomerato di diametro ridotto, attraverso un iperconfinamento ottenuto con numerosi avvolgimenti di tessuto di fibra di carbonio;

l'ottenimento di valori elevati della resistenza a compressione assiale e conseguentemente del rapporto di sforzo principale.

A tal fine, è stato predisposto un programma sperimentale di prove come descritto in seguito.

4.Programma sperimentale

Sono stati confezionati provini cilindrici di conglomerato del diametro di 58 mm e di altezza 120 mm utilizzando cassaforme cilindriche in plastica.

La composizione dei conglomerati ha previsto pietrisco del diametro massimo di 13 mm, sabbia di cava, cemento Portland R 42,5 con dosaggio variabile tra 330 e 360 kg/m³ e rapporto acqua-cemento 0.55.

I provini sono stati sformati dopo 24 ore dal getto. La stagionatura è proceduta in acqua per 20 giorni e successivamente in condizioni di temperatura e umidità costanti fino al giorno della prova di ogni singolo elemento.

Le superficie delle basi dei cilindri sono state rese piane e parallele mediante l'applicazione di uno stucco metallico.

Sono state conseguite resistenze cilindriche a compressione semplice comprese tra 19 e 39 MPa.

I provini sono stati fasciati con tessuto di fibra di carbonio bidirezionale (tipo SikaWrap 160C) reso aderente alla superficie del conglomerato e ai diversi strati di tessuto con una resina a base epossidica bicomponente tixotropica (tipo Sikadur -330 LVP). A indurimento avvenuto, i bordi dell'avvolgimento sono stati smussati, con smeriglio, a profilo inclinato in maniera che i piatti della pressa di carico venissero a contatto esclusivamente con le basi del provino di conglomerato. Il tessuto di fibra di carbonio aveva le seguenti caratteristiche:

- **larghezza del tessuto: 600 mm**
- **peso del tessuto: 1.77 kg/l**
- **spessore del tessuto: 0.10 mm**
- **resistenza a trazione delle fibre: 3900 MPa**
- **modulo elastico: 238.000 MPa**
- **allungamento a rottura: 1.5 %**

Sono stati realizzati avvolgimenti di tessuto con un numero di strati variabile tra 10 e 62.

Sono stati applicati estensimetri elettrici (della lunghezza di 20 mm) sulle superfici esterne e interne degli avvolgimenti, disposti circonferenzialmente e longitudinalmente in punti diametralmente opposti della superficie laterale dei provini, resi aderenti mediante adesivo bicomponente e saldati a conduttori elettrici collegati a una centralina per la lettura delle deformazioni.

I provini sono stati sottoposti a compressione assiale mediante una pressa idraulica "METROCOM" della capacità di 100 tonnellate.

I carichi sono stati applicati in maniera quasi statica, con incrementi regolari di carico, intervallati dal tempo necessario per la lettura delle deformazioni. I passi di carico sono stati ridotti in prossimità del carico di rottura stimato.

5. Comportamento sotto carico

Il comportamento sotto carico assiale dei cilindri confinati è stato caratterizzato dalla rottura improvvisa e violenta del tessuto di fibra di carbonio, avvenuta prevalentemente lungo una generatrice del cilindro (Fig. 4)



Fig.4 Modalità di rottura di elemento confinato.

La rottura del conglomerato all'interno dell'avvolgimento, ha manifestato lo schema tipico della rottura per scorrimento a doppio tronco di cono (Fig. 5).



Fig. 5. Tipica superficie di rottura per scorrimento manifestatasi nel conglomerato.



Fig. 5 A e B (sopra e sotto). Rottura di un provino con 62 giri di avvolgimento. Si notano i fili di connessione degli estensimetri interni all'avvolgimento.



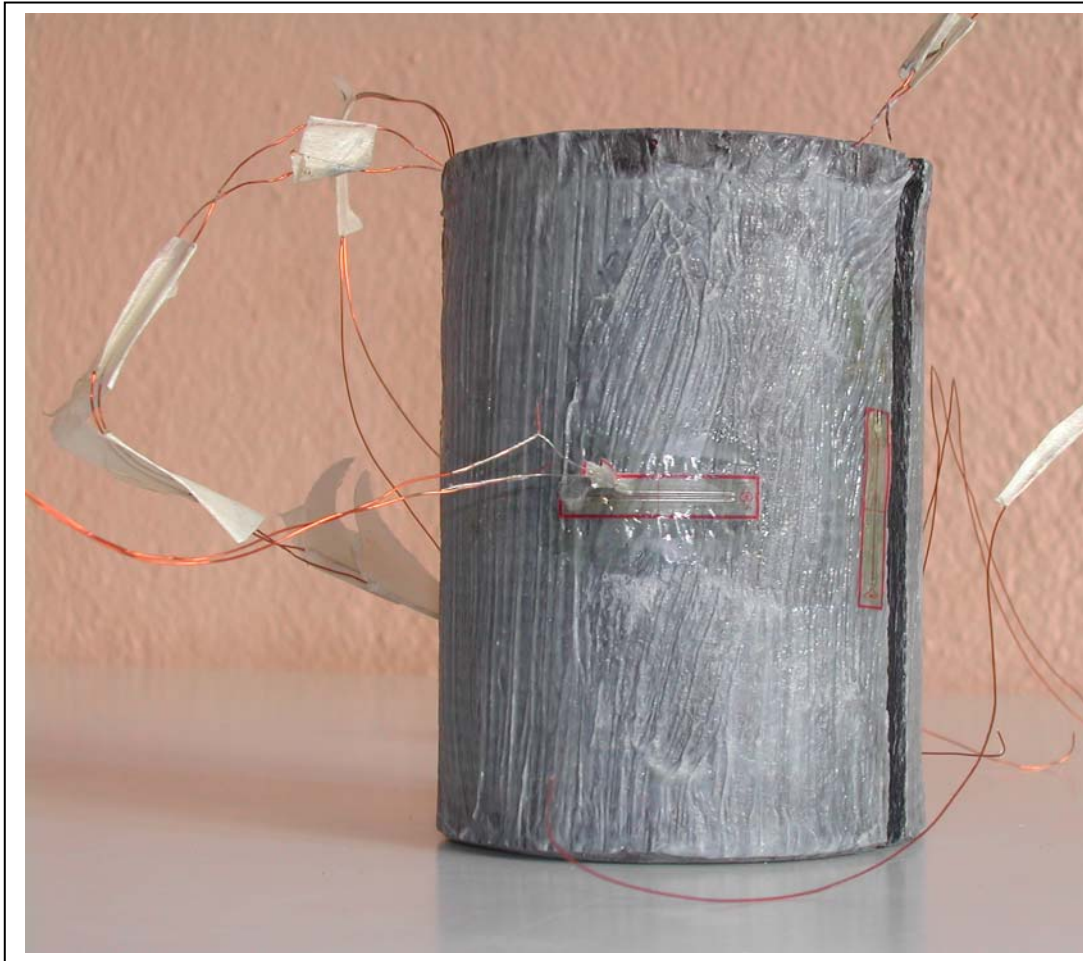


Fig. 5 C. Rottura di un provino. Si nota la posizione degli estensimetri sulla superficie esterna.

Nella figure 6 e 7 sono descritti gli andamenti sperimentali deformazioni-carichi di alcuni provini confinati con numero di strati differenti.

I punti sperimentali sono modellabili con polinomi di 4° grado che rappresentano le curve più approssimanti; risultano comunque molto soddisfacenti anche le modellazioni con polinomi di 2° grado.

La curva relativa ad uno degli estensimetri circonferenziali interni mostra il tendenziale raggiungimento della tensione di rottura della fibra di carbonio.

La differenziazione tra i diagrammi relativi ai diversi estensimetri circonferenziali indica che le deformazioni si accentuano maggiormente nei punti in cui si manifesterà la rottura del tessuto.

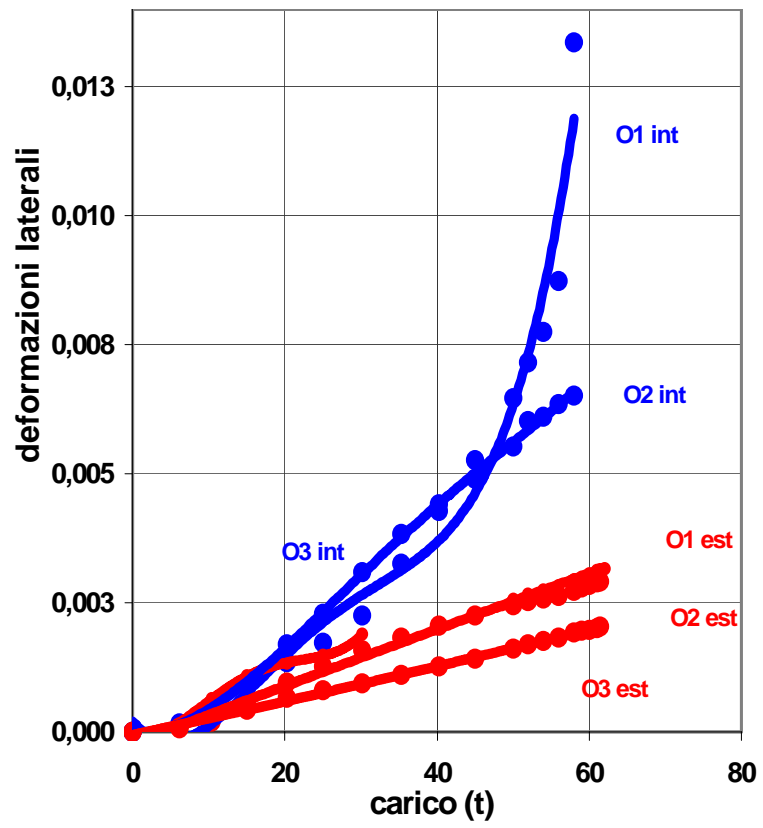


Fig. 6. Andamenti sperimentali deformazioni laterali (O)-carichi su un elemento confinato con 39 strati di fibra di carbonio.

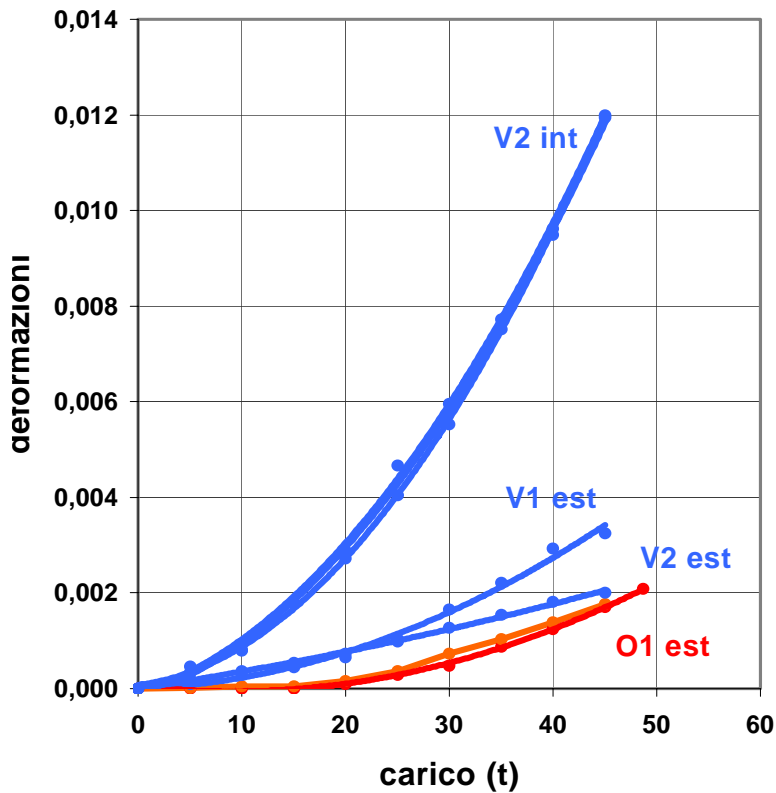


Fig. 7. Andamenti sperimentali delle deformazioni longitudinali (V) e laterali (O)-carichi su un elemento confinato con 20 strati di fibra di carbonio.

La deformazione circonferenziale misurata sulla superficie esterna dell'avvolgimento decresce al crescere dello spessore dell'avvolgimento

La Fig. 8 descrive il rapporto tra la deformazione circonferenziale esterna e la resistenza a compressione monoassiale del conglomerato in funzione dello spessore dell'avvolgimento.

La migliore curva di tendenza ha la seguente espressione

$$\varepsilon/f_c = 0,0008 s^{-0,78} \quad (9)$$

che è assunta come legge di distribuzione delle deformazioni circonferenziali all'interno dello spessore di avvolgimento di fibra. Si ipotizza che lo strato interno di fibra consegua la deformazione di rottura del tessuto (1.5 %).

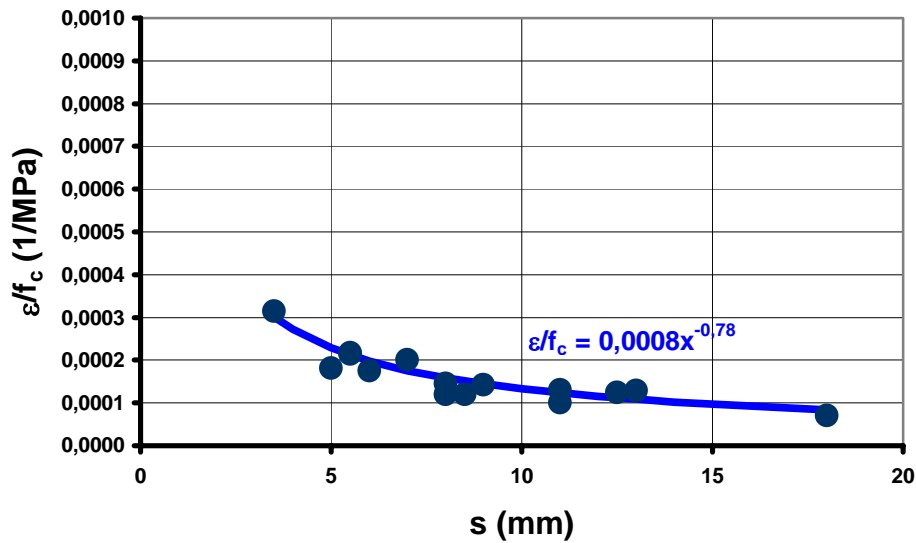


Fig 8. Relazione sperimentale tra ε_f/f_c e spessore dell'avvolgimento.

6. Calcolo della pressione di confinamento

Dalla legge di distribuzione della deformazione circonferenziale all'interno dell'avvolgimento si determina la pressione di confinamento sul nucleo di conglomerato come somma dei contributi forniti dai singoli strati di fibra

$$\sigma_1 = \sum \sigma_{ri} = \sum (\varepsilon_r E_f s_f) / r \quad (10)$$

dove ε_r , determinata con l'equazione (9), è la deformazione alla distanza r dall'asse del cilindro, s_f lo spessore del singolo strato di fibra (0.1 mm) ed E_f (238.000 MPa) il modulo elastico della fibra.

Il calcolo della pressione di confinamento attraverso una sommatoria dipende dal fatto che lo spessore dell'avvolgimento è costituito da una serie di strati di fibra intervallati da strati di resina che si considerano ininfluenti ai fini della determinazione di σ_1 .

Nella tabella 1, oltre alle caratteristiche geometriche e meccaniche dei provini, sono riportati

- i valori misurati della deformazione circonferenziale esterna,*
- il valore dello sforzo assiale di rottura σ_3*
- i valori calcolati della pressione di confinamento σ_1 ,*
- i valori di σ_1 e σ_3 normalizzati rispetto alla resistenza cilindrica del conglomerato e*
- i valori del rapporto di sforzo principale.*

Tavola 1. Caratteristiche geometriche e meccaniche dei cilindri iperconfinati

n°	f' _c (MPa)	n _f	s (mm)	Età congl. al giorno di prova	def. circ. est. ε _{He}	N _u (t)	σ ₃ (MPa)	σ ₁ (MPa)	σ ₃ /f _c	σ ₁ /f _c	σ ₁ /σ ₃	NOTE
1	22	10	3.5	189	0.0045	37.6	140	62	6.36	3.36	0.53	Giunto centrale Estensimetri orizzontali (O): 3 interni + 3 esterni
2	19	13	7	42	-	36.3	135	52.34	7.11	3.25	0.46	Senza estensimetri
3	28	20	6.5	42	-	57.7	214	104.63	7.64	4.34	0.57	Senza estensimetri
4	22	20	6	115	0.0083	56	208	109.61	7.43	4.54	0.61	Estensimetri: 1 esterno orizzontale
5	22	20	7	174	0.0044	40	149	85.76	6.77	4.63	0.68	Giunto centrale Estensimetri orizzontali: 1 interno + 2 esterni
6	22	21	5.5	168	0.0047	49	182	102.83	8.27	5.55	0.67	Estensimetri esterni orizzontali: 2 centrali + 2 estremi
7	39	30	11	112	0.0081*	75.4	280	146.33	7.18	4.15	0.58	Estensimetri esterni: 1 verticale (V) + 1 orizzontale
8	26	30	8	170	0.0031	58.9	219	132.75	8.42	5.36	0.64	Estensimetri esterni orizzontali: 2 centrali + 2 estremi
9	30	38	11	191	0.0030*	70	260	154.54	8.67	5.88	0.68	Giunto centrale Estensimetri orizzontali: 3 interni + 3 esterni estremi
10	24	20	6	139	0.0021	48.7	181	98.95	7.54	4.84	0.64	Estensimetri esterni: 2 orizzontali+2 verticali Estensimetri interni (intagli nella fibra): 2 verticali
11	24	21	6	155	0.0042	51.1	190	103.71	7.92	5.08	0.64	Estensimetri esterni: 2 centrali orizz+2 estremi orizz+1 vert
12	24	21	5.5	164	0.0052	48	178	108.30	7.42	5.33	0.72	Estensimetri esterni: 2 centrali orizz+2 estremi orizz+1 vert
13	33	30	11	156	0.0043	64	238	151.03	7.21	4.47	0.62	Estensimetri esterni: 2 centrali orizz+2 estremi orizz+1 vert
14	33	30	8	167	0.0048	75	278	155.17	8.42	5.94	0.71	Estensimetri esterni: 2 centrali orizz+2 estremi orizz+1 vert
15	21	10	3.5	119	0.0066	34.8	129	60.03	6.14	3.43	0.56	Estensimetri esterni orizzontale: 2 centrali
16	21	22	5	115	0.0038	47	174	108.07	8.29	6.22	0.75	Estensimetri esterni: 2 orizzontali Estensimetri interni (intagli

												nella fibra): 4 orizz+1 verticale
17	21	31	8.5	132	0.0025	50.8	189	14.86	9.00	6.48	0.72	Estensimetri esterni: 3 orizzontali +1 verticale Estensimetri interni (intagli nella fibra): 2 orizzontali
18	24	31	9	136	0.0034	59	219	121.72	9.13	5.92	0.65	Estensimetri esterni: 3 orizzontali
19	21	39	12.5	188	0.0026*	51.2	190	115.74	9.05	6.36	0.70	Giunto centrale Estensimetri orizzontali: 3 interni + 2 esterni
20	25	39	13	187	0.0032	62	230	127.21	9.20	5.84	0.63	Giunto centrale Estensimetri orizzontali: 3 interni + 3 esterni
21	27	62	18	193	0.0019	71.2	264	173.20	9.78	7.25	0.74	Giunto centrale Estensimetri orizzontali: 3 interni + 2 esterni

I risultati mostrano valori conseguiti dello **sforzo confinante** che vanno da **43** a **187** MPa, dello **sforzo assiale di rottura** da **71** a **280** MPa e del **rapporto di sforzo principale** (σ_1/σ_3) da **0.39** e **0.66**.

Le deformazioni circonferenziali esterne descritte nella tabella sono quelle effettivamente misurate in corrispondenza del carico massimo, oppure (indicate con *) quelle estrapolate attraverso le curve di tendenza, quando per rottura improvvisa non fu possibile effettuarne la misura.

7. Verifica del modello di rottura

I risultati provenienti dalla sperimentazione sono riportati nella **Fig. 9**. I punti di rottura sono riportati sulla curva di rottura (2), descrittiva del meridiano principale della superficie di rottura nello spazio delle tensioni principali. Essa si adatta ai punti con una **deviazione standard** di **4.77%** su 20 valori, che si riduce al **3.95%** su 18 valori.

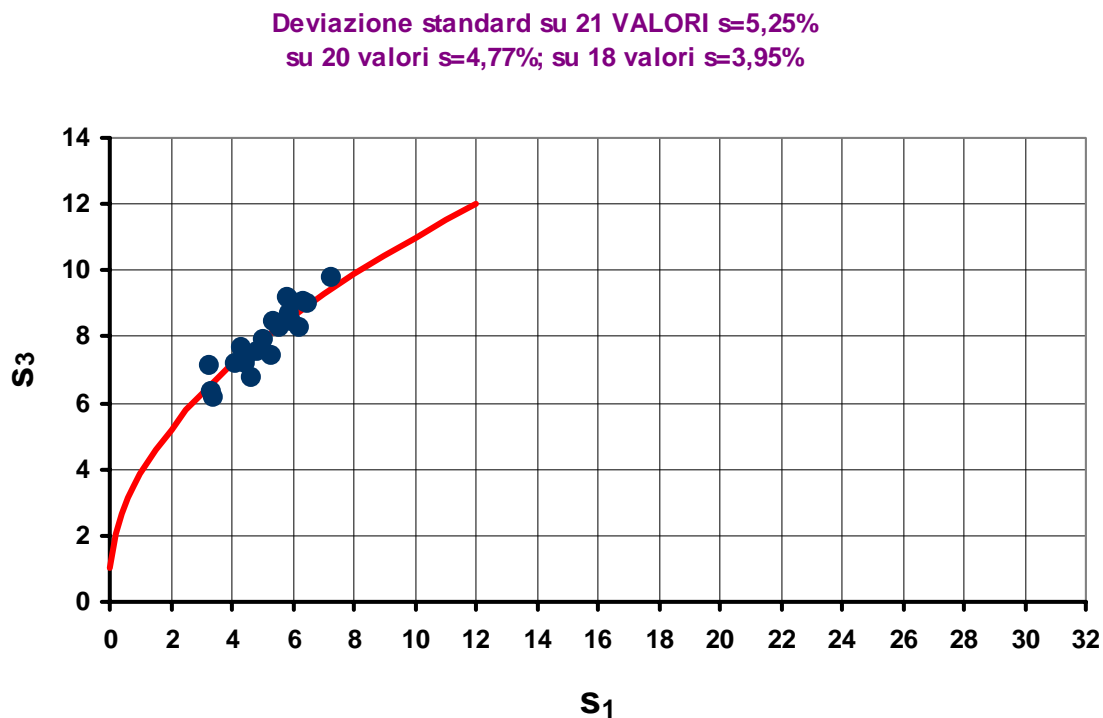


Fig 9. Posizione dei punti di rottura sperimentali sulla curva di rottura nello stato di compressione triassiale a sforzi confinanti uguali.

Nella figura successiva sono riportati tutti i punti sperimentali sulla curva di rottura, sia quelli derivanti dalla letteratura, sia quelli dalla nostra sperimentazione,.

s=9,05%; s=5,57% su 80% valori

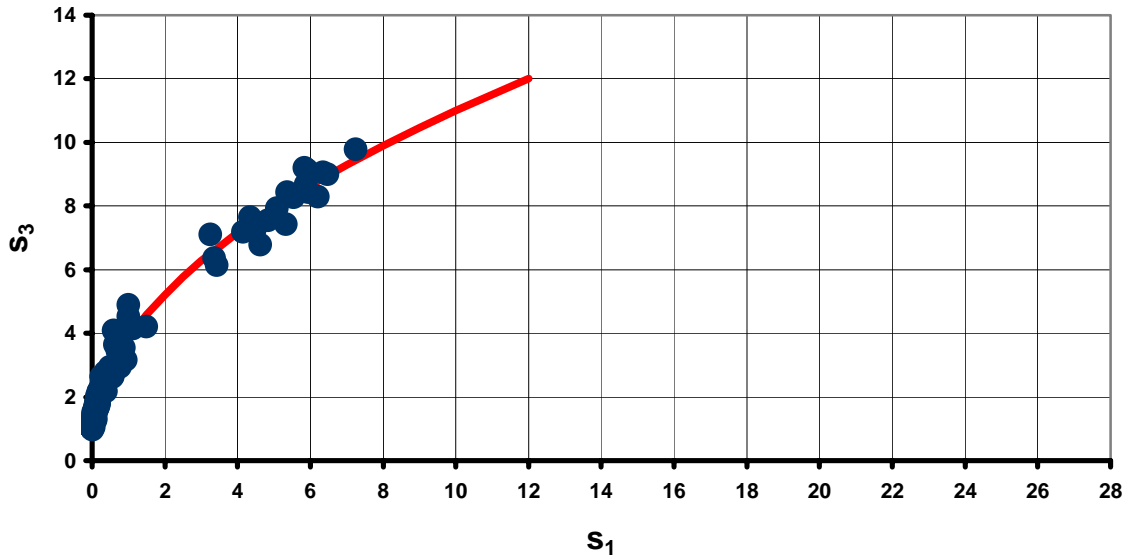


Fig 10. Posizione di tutti i punti di rottura sperimentali sulla curva di rottura nello stato di compressione triassiale a sforzi confinanti uguali ($S_1=S_2$).

La figura seguente mostra tutti i punti sperimentali dello sforzo dominante in funzione dell'inverso del rapporto di sforzo principale sulla curva derivata dall'equazione parabolica del meridiano principale. Si nota la buona aderenza alla curva stessa.

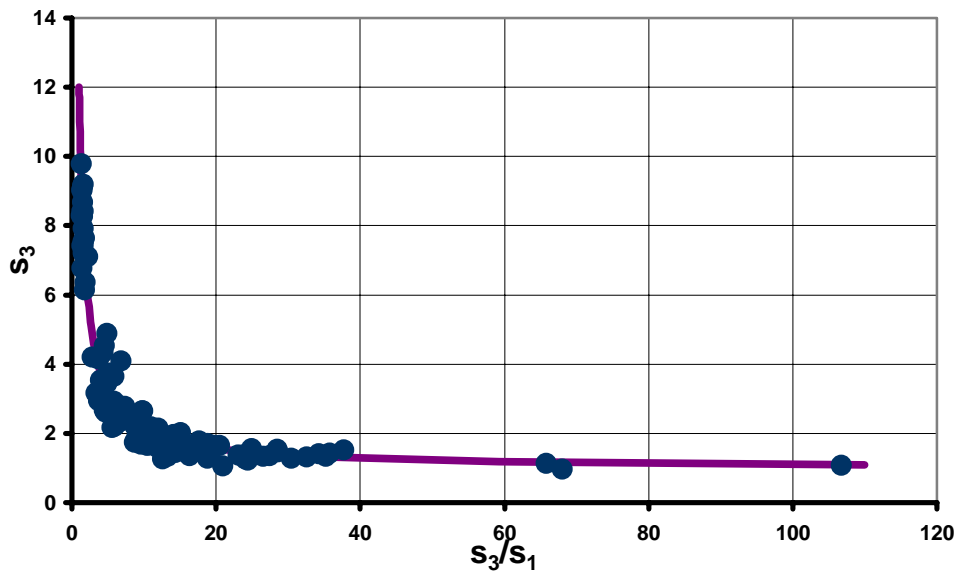


Fig 11. Posizione di tutti i punti sperimentali dello sforzo dominante in funzione dell'inverso del rapporto di sforzo principale sulla curva derivata dall'equazione parabolica del meridiano principale.

L'attendibilità del modello proposto risulta quindi confermata in un intervallo più esteso del rapporto di sforzo principale pari quasi al doppio di quello coperto dai risultati provenienti dalla letteratura.

La sperimentazione ha mostrato, inoltre, la possibilità di conseguire consistenti aumenti di resistenza di elementi in conglomerato, compressi assialmente, rinforzati con tessuto di fibra di carbonio. Tale potenzialità fu sperimentata e constatata in precedenza su elementi di conglomerato e di muratura di mattoni di diversa natura rinforzati con un numero ridotto di strati di tessuto [20-22].

8. Conclusioni

Si è confermata la validità del criterio di rottura, unificato e generalizzato per muratura e conglomerato cementizio, attraverso prove sperimentali condotte su elementi cilindrici di conglomerato iperconfinato con un elevato numero di strati di tessuto di fibra di carbonio

In virtù delle alte pressioni di confinamento si sono conseguiti elevati valori di resistenza a compressione assiale e una consistente estensione del campo del rapporto di sforzo principale, quasi raddoppiato rispetto a quello finora riscontrato in letteratura.

9. Bibliografia

- [01] **L. BORTOLOTTI, S. CARTA, D. CIREDDU:** “Criterio di rottura unificato per muratura di mattoni e conglomerato cementizio in stato di sforzo pluriassiale”, Atti del XVI Congresso Nazionale dell'AIMETA, Ferrara, Sett. 2003.
- [02] **L. BORTOLOTTI, S. CARTA, AND D. CIREDDU:** “Unified yield criterion for masonry and concrete in multiaxial stress states”, *J. Mater. Civ. Eng.*, ASCE , 17(1), 54-62.
- [03] **A.W. PAGE:** The biaxial compressive strength of brick masonry”, *Proc. Intsn. Civ. Engrs.*, Part 2, 71, 893 – 906, 1981.
- [04] **A.W. PAGE:** “The strength of brick masonry under biaxial compression – tension”, *Int. J. Masonry Constr.*, 3 (1), 26 – 31,1983.
- [05] **K. NARAIN, S. SINHA:** Cyclic behavior of brick masonry under biaxial compression; *J.of Struct. Engineering*, 17(5), pp. 1336-1355 (1991).
- [06] **M.M. ALSHEBANI, S.N. SINHA:** Stress-strain characteristics of brick masonry under cyclic biaxial compression; *J. Struct. Engng.*, ASCE, 126(9), pp. 1004-1007 (2000).
- [07] **H. KUPFER, H.K. HILSDORF, H. RUSCH:** Behavior of concrete under biaxial stresses; *ACI Journal*, 66(52), pp. 656-666 (1969).
- [08] **S. LAN, Z. GUO:** Biaxial compression behavior of concrete under repeated loading; *J. of Mat. In Civ. Engng.*, 11(2), pp. 105-115 (1999).
- [09] **A. HUSSEIN, H. MARZOUK:** Behavior of high-strength concrete under biaxial stresses; *ACI Materials Journal*, 97(1), pp. 27-36 (2000).

- [10] **L.L. MILLS, R.M. ZIMMERMAN:** Compressive strength of plain concrete under multiaxial loading conditions; *ACI Journal*, 66(47), pp. 802-807 (1970).
- [11] **N. GARDNER:** Triaxial behavior of concrete; *ACI Journal*, 66(15), pp. 136-146 (1969).
- [12] **R. PALANISWAMY, S.P. SHAH:** Fracture and stress-strain relationship of concrete under triaxial compression; *J. Struct. Div., ASCE*, 100(5), No. St5, pp. 901-916 (1974).
- [13] **F. ANSARI, Q. LI:** High concrete subjected to triaxial compression; *ACI Materials Journal*, 95(6), pp. 747-755 (1998).
- [14] **Q. LI, F. ANSARI:** High-strength concrete in triaxial compression by different sizes of specimens; *ACI Materials Journal*, 97(6), pp. 684-689 (2000).
- [15] **D.C. CANDAPPA, J.G. SANJAYAN, S. SETUNGE:** Complete triaxial stress-strain curves of high-strength concrete; *J. of Mat. In Civ. Engng.*, 13(3), pp. 209-215 (2001).
- [16] **M.M. ATTARD, S. SETUNGE:** Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete; *ACI Mat. J.*, 93(5), pp. 432-442 (1996).
- [17] **K. K. B. DAHL:** A constitutive model for normal and high strength concrete; Project 5, Rep. 5.7, American Concrete Institute, Detroit, (1992).
- [18] **K. K. B. DAHL:** A failure criterion for normal and high strength concrete; Project 5, Rep. 5.6, American Concrete Institute, Detroit, (1992).
- [19] **J. XIE, A.E. ELWI, J.G. MACGREGOR:** Mechanical properties of three high-strength concretes containing silica-fume; *ACI Mat. J.*, 92(2), pp. 135-145 (1995).
- [20] **L. BORTOLOTTI, S. CARTA, D. CIREDU, S. LAI:** “ Comportamento sotto carico assiale di colonne in conglomerato rinforzate con tessuto di fibra di carbonio ”, atti del seminario internazionale sul tema: **COMPORAMENTO SISMICO DEL PATRIMONIO COSTRUITO NEI PICCOLI CENTRI**, Assisi, Aprile 1999, pp. 227-237
- [21] **BORTOLOTTI L., CARTA S., CIREDU D., LAI S.:** Comportamento sotto carico assiale di cilindri in conglomerato confinato con tessuto di fibre di carbonio atti del “XIV CONGRESSO NAZIONALE AIMETA 99” (Associazione Italiana Meccanica Teorica e Applicata) Como, 6-9 Ottobre 1999.
- [22] **BORTOLOTTI L., CARTA S., CIREDU D., LAI S.:** Comportamento a carico assiale di conglomerati ad alta resistenza confinati con tessuto di fibra di carbonio, atti del congresso “Giornate A.I.C.A.P. 99” (Associazione Italiana Cemento Armato e Precompresso) Torino, 4-6 Novembre 1999.
- [23] **BORTOLOTTI L., CARTA S., CIREDU D., LAI S.:** Consolidamento con tessuto di fibre di carbonio di elementi colonna in muratura ed in conglomerato, atti del 5th International Congress on Restoration of Architectural Firenze, 17-24 Settembre 2000