



Sperimentazione su pilastri in muratura confinati con FRP

C.Faella, M.A.Aiello, E.Nigro, E.Martinelli, F.Micelli, S.Paciello, L.Valente

Introduzione:

Si presenta una estesa campagna sperimentale condotta presso i laboratori delle Università di Lecce e Salerno su pilastri in muratura rinforzati con FRP.

Obiettivo principale è quello di presentare i risultati e le osservazioni scaturite nel corso della sperimentazione.

Si mostrano i confronti tra i risultati sperimentali e quelli analitici calcolati con la formula predittiva per la resistenza della muratura confinata proposta nel recente documento normativo CNR DT-200/2004.



Descrizione della campagna sperimentale:

La campagna sperimentale consta di 54 prove di compressione centrata su pilastri di varia dimensione (in altezza e sezione), tessitura e natura dei blocchi.

Per controllare l'efficacia del confinamento sono stati preparati campioni con *differenti raggi di curvatura degli spigoli*.

Ulteriore elemento di varietà è rappresentato dall'utilizzo di compositi sia a base di *fibre di carbonio* che di *vetro*.

Sono state effettuate sia prove su elementi non rinforzati che su pilastri fasciati con un numero variabile di *strati* di composito.



Pietra Leccese



Laterizio



Tufo e Laterizio



Descrizione della campagna sperimentale:

Sono stati effettuati test di compressione sul materiale base:
Pietra Leccese, Tufo Giallo, Tufo Grigio.

Prove di compressione su campioni cubici di tufo giallo

Provino	Tensione (Mpa)
1	3.419
2	4.643
3	3.737
4	3.899
5	4.566
6	4.573
7	3.82
8	4.195
9	3.786
10	3.941
Media	4.06

Prove di compressione su campioni cilindrici di tufo grigio

Provino	Dimensioni [d, h] (mm)		Tensione (Mpa)
1	100	200	5.6
2	100	200	6.8
3	150	300	5.1
4	150	300	3.7
5	200	400	1.1
6	200	400	2.3
Media			4.10

Prove di compressione su campioni cubici di pietra leccese

Provino	Tensione (Mpa)
1	10,79
2	12,92
3	15,92
4	17,12
5	13,71
6	17,11
7	13,04
Media	14,37

La resistenza a compressione del laterizio è dell'ordine di $f_m = 15 \div 20$ MPa, maggiore di quella riscontrata per il tufo e simile ai valori di resistenza della pietra leccese.



Descrizione della campagna sperimentale:

La malta di allettamento è di tipo M4 (D.M. 20/11/1987).

Composizione della Malta						
Classe	Tipo	Cemento	Calce	Calce Idraulica	Sabbia	Pozzolana
M4	Pozzolonica	-	1	-	-	3

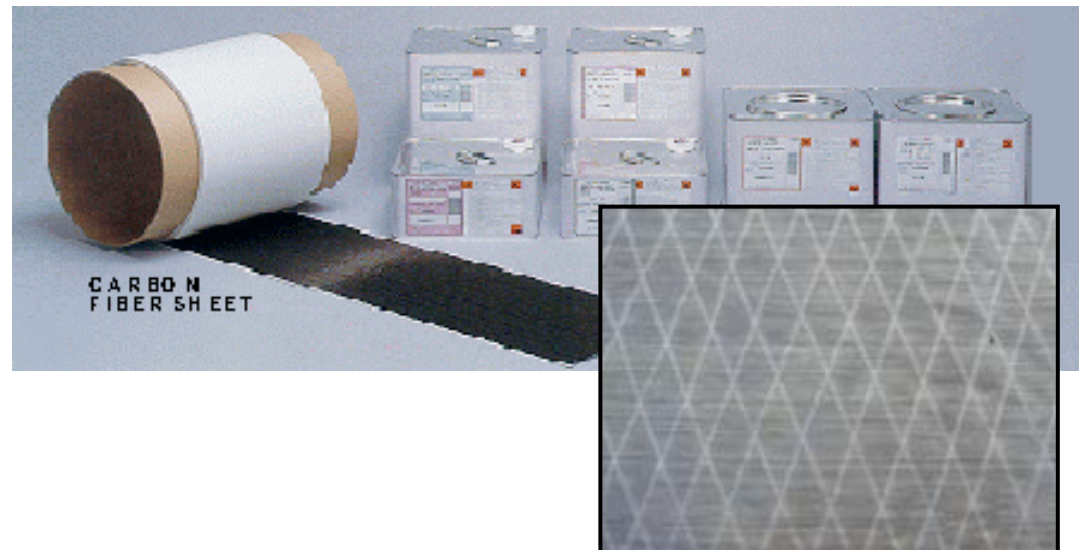
Sono state condotte prove di flessione e di schiacciamento su campioni di malta al fine di valutarne la resistenza a trazione e a compressione, rispettivamente. Esse hanno fatto registrare un valore medio della resistenza a compressione $f_{m,c}=1.027$ MPa e di quella a trazione per flessione $f_{m,t}=0.372$ MPa; in entrambi i casi la dispersione è caratterizzata da un valore del coefficiente di variazione di circa 0.20.



Descrizione della campagna sperimentale:

I sistemi di rinforzo sono in *fibra di vetro* ed in *fibra di carbonio*.

<i>Tipo di Rinforzo</i>	<i>Denominazione Commerciale</i>	<i>Spessore equivalente</i>	<i>Modulo elastico</i>	<i>Resistenza a trazione caratteristica</i>	<i>Deformazione ultima</i>
		[mm]	[MPa]	[MPa]	
Fibra di Carbonio (C)	RUREDIL - Replark30	0.167	230000	3400	0.013
Fibra di Vetro (G _A)	DEGUSSA - MBT Mbrace	0.230	65000	1300	0.025
Fibra di Vetro (G _B)	MAPEI - Mapewrap G uni-ax	0.480	80700	2560	0.030



Descrizione della campagna sperimentale:

Preparazione dei campioni:



Sperimentazione su pilastri in muratura confinati con FRP

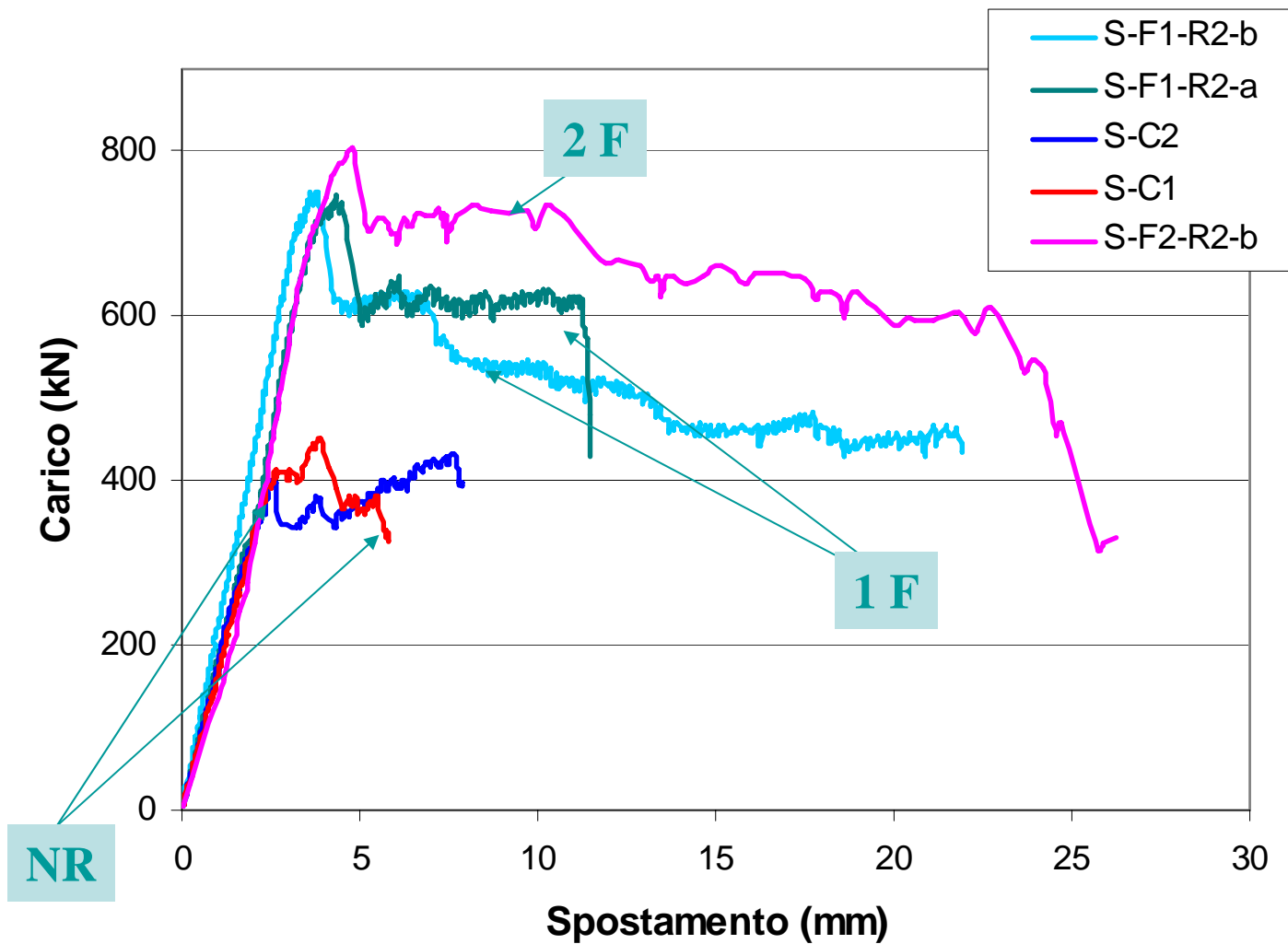
Descrizione della campagna sperimentale:

Test	Dimensioni			TIPO	Densità Media	Rinforzo			Raggio	
	B	D	h			Fibra	n _i	t _{eq}		r _c
# Codice	[mm]	[mm]	[mm]	[Pietra leccese Tufo/Laterizio]	(Kg/m ³)	[C/G]		[mm]	[mm]	
1	L01UR	250	250	500	Pietra lecc.	1600	-			
2	L02UR	250	250	500	Pietra lecc.	1600	-			
3	L03UR	250	250	500	Pietra lecc.	1600	-			
4	L04G1	250	250	500	Pietra lecc.	1600	G _A	1	0,48	10
5	L05G1	250	250	500	Pietra lecc.	1600	G _A	1	0,48	10
6	L06G1	250	250	500	Pietra lecc.	1600	G _A	1	0,48	20
7	L07G1	250	250	500	Pietra lecc.	1600	G _A	1	0,48	20
8	L08G1	250	250	500	Pietra lecc.	1600	G _A	2	0,96	20
9	B19UR	250	250	500	Laterizio	1700	-			
10	B20UR	250	250	500	Laterizio	1700	-			
11	B21G1	250	250	500	Laterizio	1700	G _A	1	0,48	10
12	B22UR	250	250	250	Laterizio	1700	-			
13	B23UR	250	250	250	Laterizio	1700	-			
14	B24UR	250	250	250	Laterizio	1700	-			
15	B25G1	250	250	250	Laterizio	1700	G _A	1	0,48	10
16	B26G1	250	250	250	Laterizio	1700	G _A	1	0,48	10
17	B27G2	250	250	250	Laterizio	1700	G _A	2	0,96	10
18	B28G2	250	250	250	Laterizio	1700	G _A	2	0,96	10
19	T01UR	395	395	525	Tufo Grigio	1250	-	-	-	25
20	T02UR	388	393	509	Tufo Grigio	1250	-	-	-	25
21	T03UR	392	387	500	Tufo Grigio	1250	-	-	-	25
22	T04C1	389	391	499	Tufo Grigio	1250	C	1	0.167	25
23	T05C1	403	397	499	Tufo Grigio	1250	C	1	0.167	25
24	T06C1	397	393	486	Tufo Grigio	1250	C	1	0.167	25
25	T07C1	386	394	500	Tufo Grigio	1250	C	2	0.167	25
26	T08C2	392	393	492	Tufo Grigio	1250	C	2	0.334	25
27	T09C2	394	386	511	Tufo Grigio	1250	C	2	0.334	25
28	T10UR	382	399	479	Tufo Giallo	1250	-	-	-	25
29	T11UR	381	400	477	Tufo Giallo	1250	-	-	-	25
30	T12UR	392	394	492	Tufo Giallo	1250	-	-	-	25
31	T13G1	398	400	503	Tufo Giallo	1250	G _B	1	0.230	25
32	T14G1	400	400	490	Tufo Giallo	1250	G _B	1	0.230	25
33	T15G1	400	388	485	Tufo Giallo	1250	G _B	1	0.230	25
34	T16G2	394	389	505	Tufo Giallo	1250	G _B	2	0.460	25
35	T17G2	402	405	486	Tufo Giallo	1250	G _B	2	0.460	25
36	T18G2	395	392	480	Tufo Giallo	1250	G _R	2	0.460	25
37	B01UR	372	371	489	Laterizio	1650	-	-	-	25
38	B02UR	377	378	499	Laterizio	1650	-	-	-	25
39	B03UR	371	371	487	Laterizio	1650	-	-	-	25
40	B04G1	380	383	492	Laterizio	1650	G _B	1	0.230	25
41	B05G1	387	375	485	Laterizio	1650	G _B	1	0.230	25
42	B06G1	377	380	488	Laterizio	1650	G _B	1	0.230	25
43	B07G2	383	378	486	Laterizio	1650	G _B	2	0.460	25
44	B08G2	377	378	481	Laterizio	1650	G _B	2	0.460	25
45	B09G2	383	374	492	Laterizio	1650	G _B	2	0.460	25
46	B10UR	240	248	472	Laterizio	1650	-	-	-	25
47	B11UR	243	244	477	Laterizio	1650	-	-	-	25
48	B12UR	243	245	474	Laterizio	1650	-	-	-	25
49	B13G1	250	248	470	Laterizio	1650	G _B	1	0.230	25
50	B14G1	250	249	470	Laterizio	1650	G _B	1	0.230	25
51	B15G1	250	247	470	Laterizio	1650	G _B	1	0.230	25
52	B16G2	248	247	462	Laterizio	1650	G _B	2	0.460	25
53	B17G2	245	248	471	Laterizio	1650	G _B	2	0.460	25
54	B18G2	246	251	473	Laterizio	1650	G _B	2	0.460	25



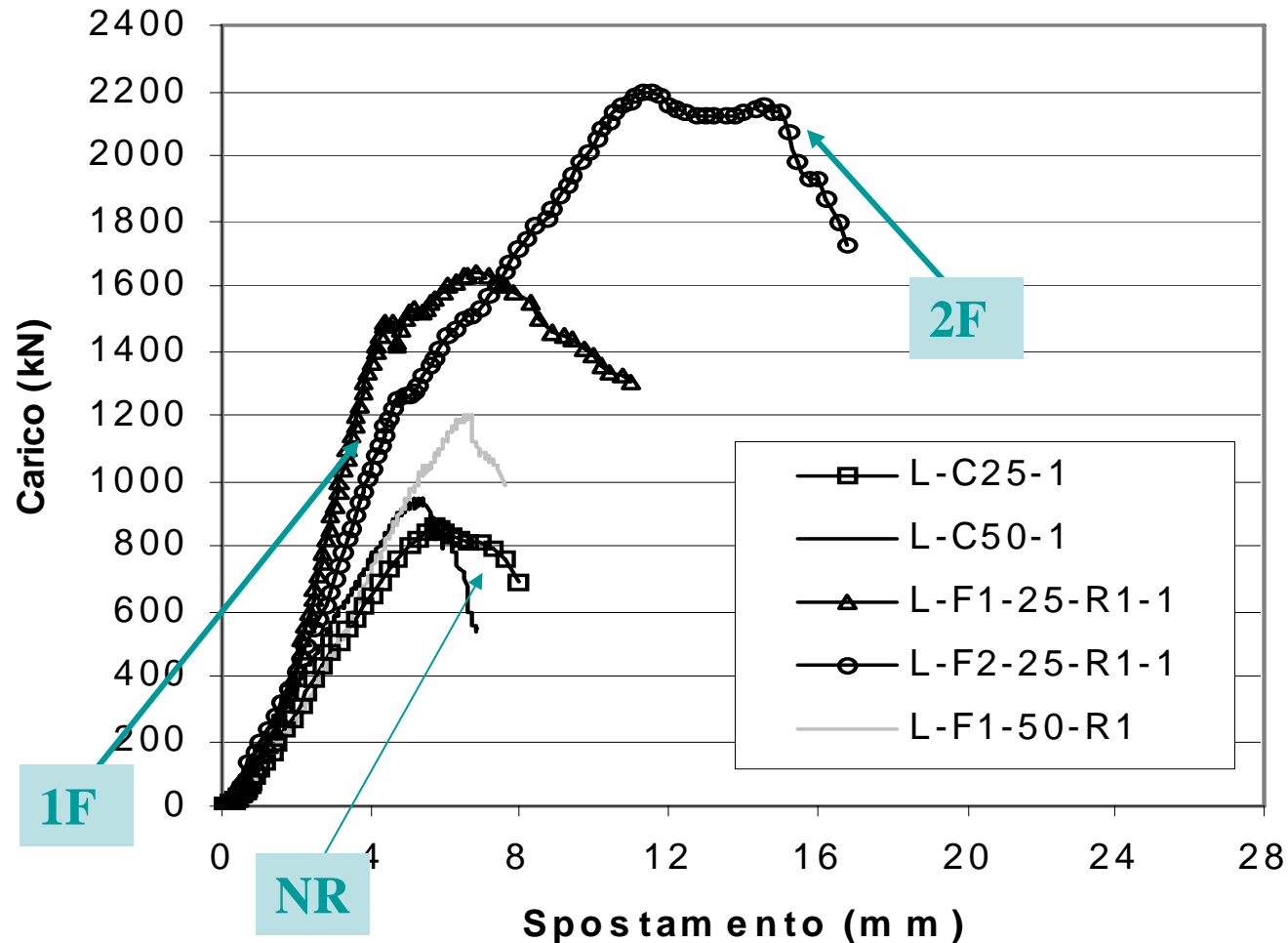
Risultati della sperimentazione:

Confronto tra i campioni a sezione quadrata in **pietra leccese**.
B=25 cm, rinforzo in **fibra di vetro**.



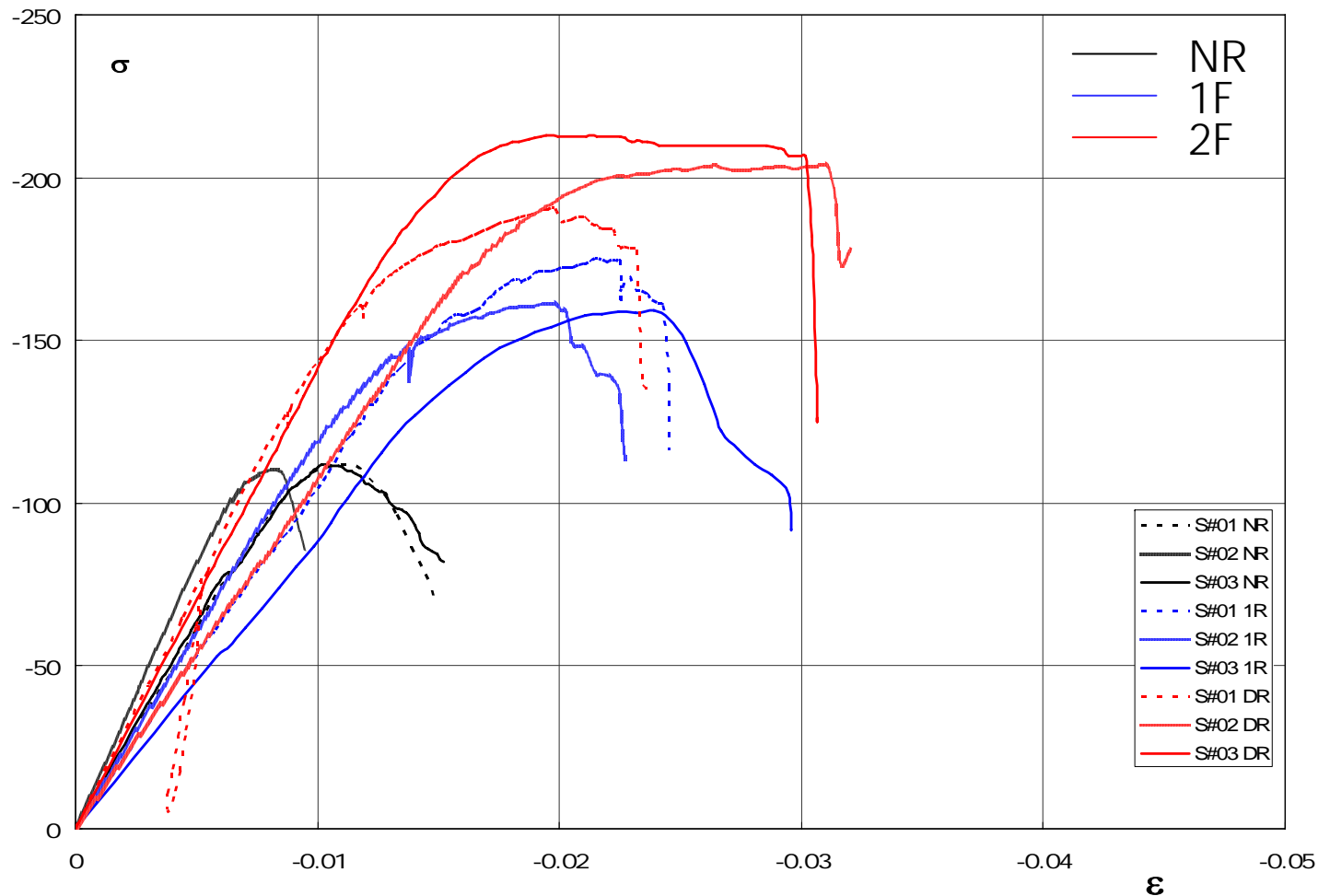
Risultati della sperimentazione:

Confronto tra i campioni a sezione quadrata in laterizio. $B=25$ cm, rinforzo in fibra di vetro.



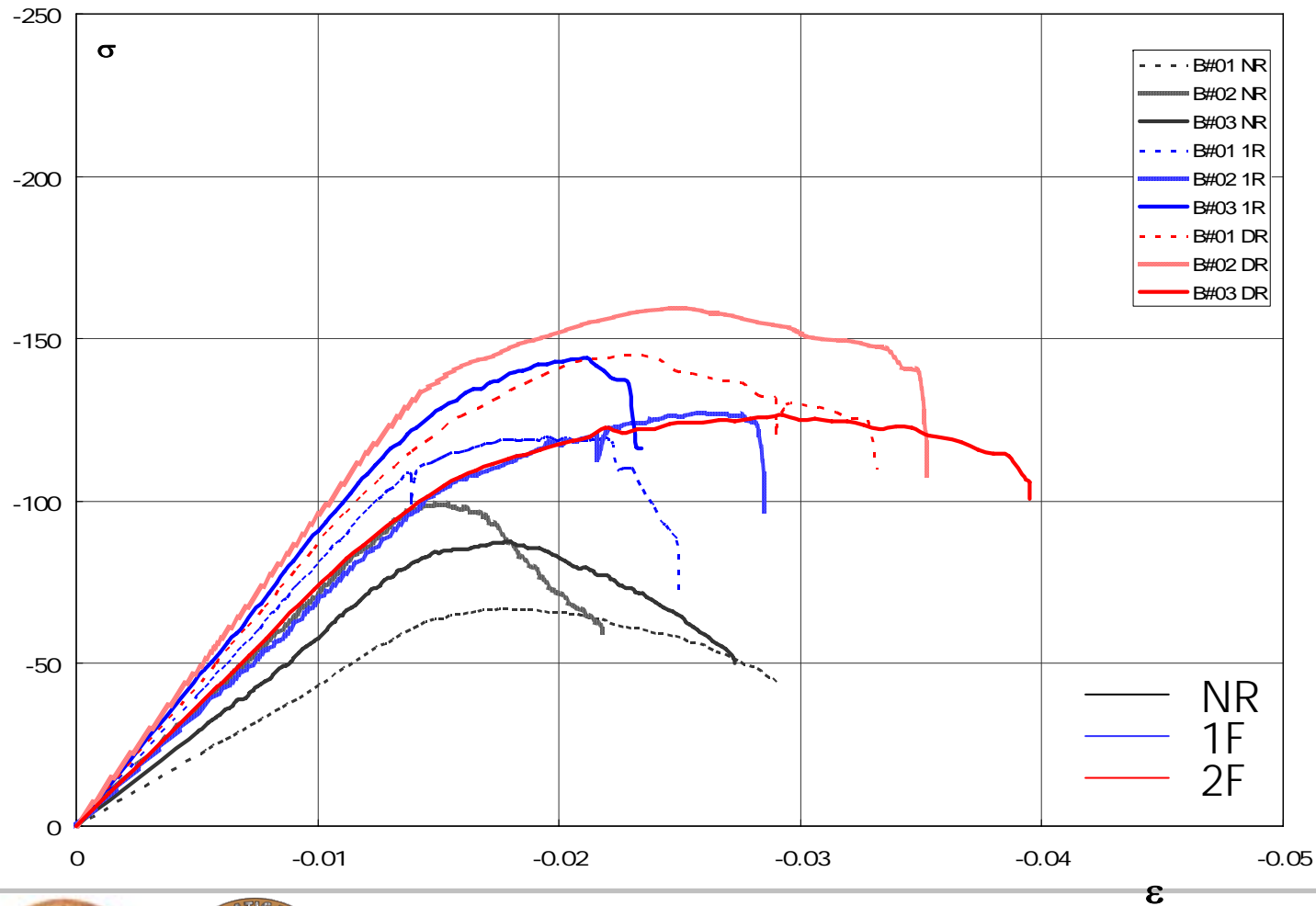
Risultati della sperimentazione:

Confronto tra i campioni a sezione quadrata in laterizio.
 $B=25\text{ cm}$, rinforzo in fibra di vetro.



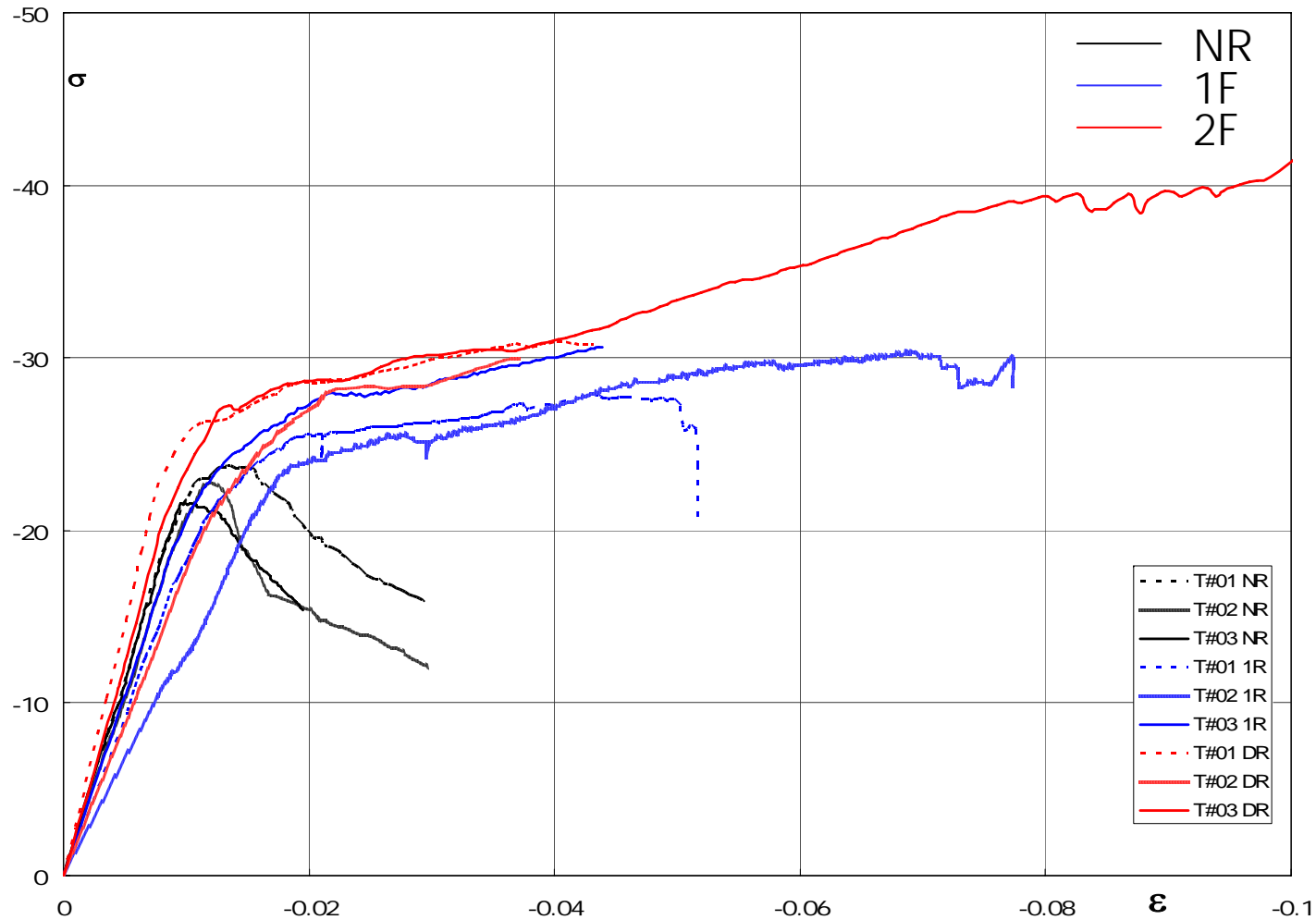
Risultati della sperimentazione:

Confronto tra i campioni a sezione quadrata in laterizio. $B=40$ cm, rinforzo in fibra di vetro.



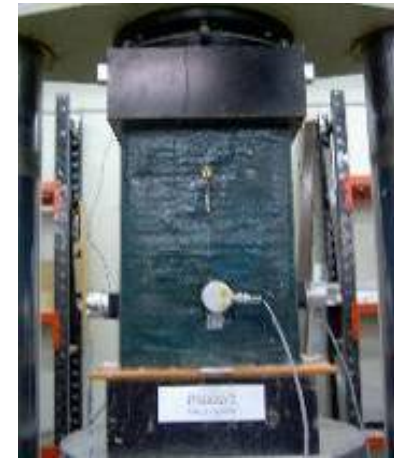
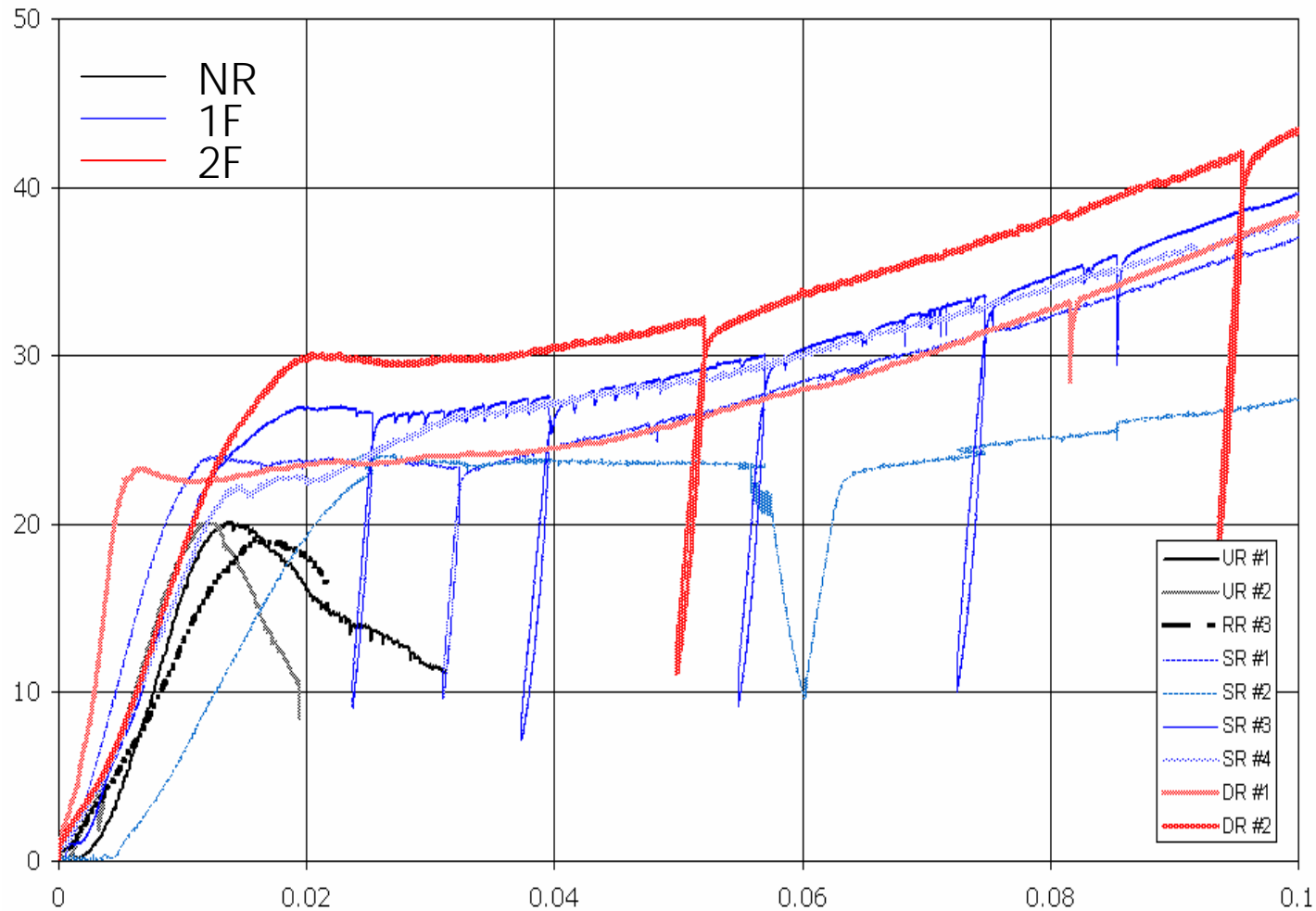
Risultati della sperimentazione:

Confronto tra i campioni a sezione quadrata in tufo giallo. $B=40$ cm, rinforzo in fibra di vetro.



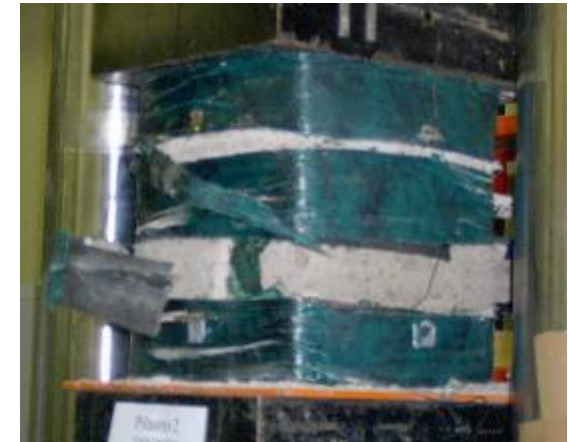
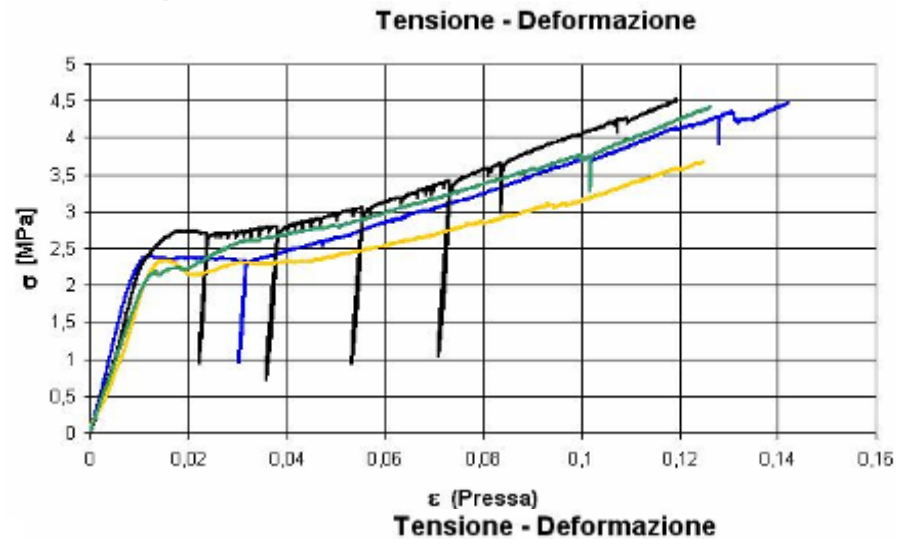
Risultati della sperimentazione:

Confronto tra i campioni a sezione quadrata in tufo grigio, $B=40$ cm, rinforzo in fibra di carbonio.

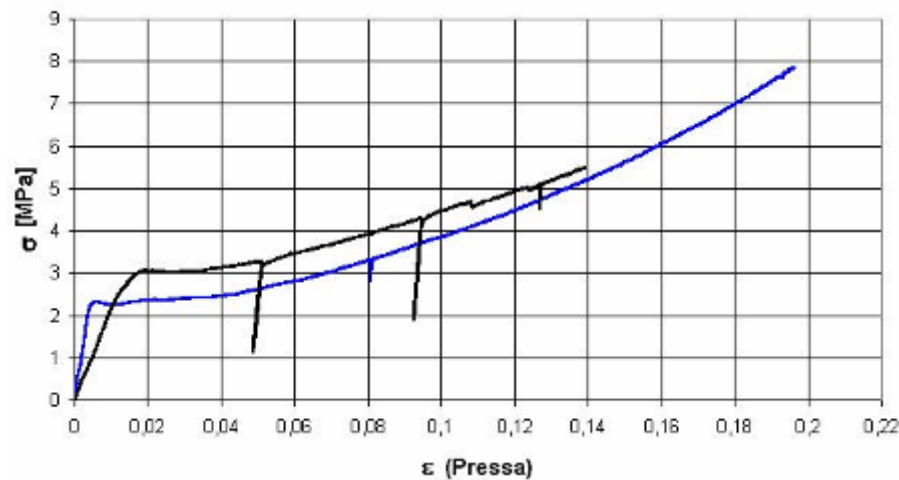


Risultati della sperimentazione:

La rottura si attinge a prezzo di elevatissime deformazioni



Tufo Grigio - B = 40 - Carbonio 1 Strato



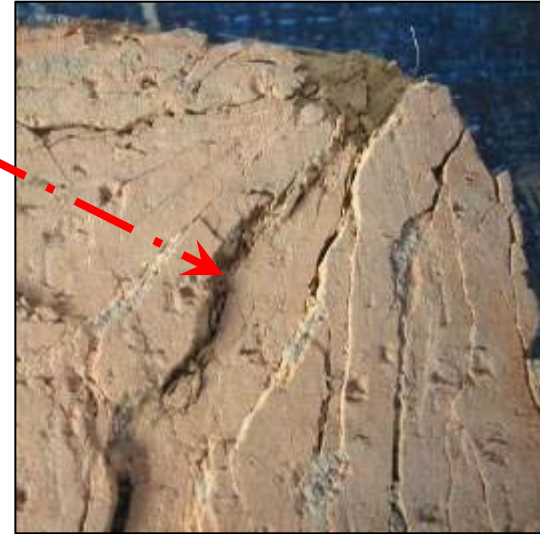
Tufo Grigio - B = 40 - Carbonio 2 Strati



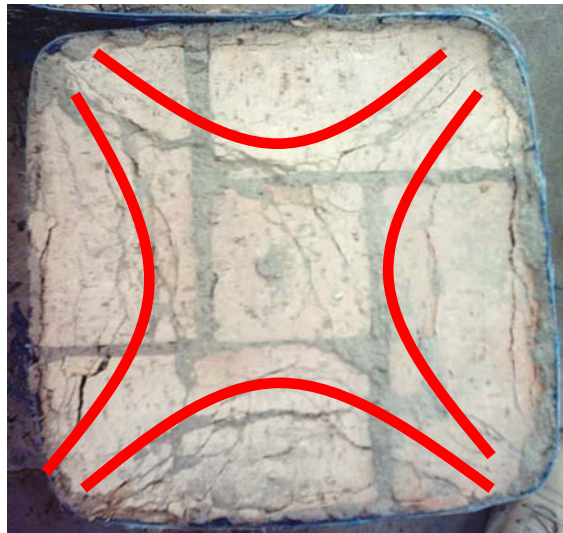
Risultati della sperimentazione:

Area efficacemente confinata

Laterizio
B=25 cm



Laterizio
B=40 cm

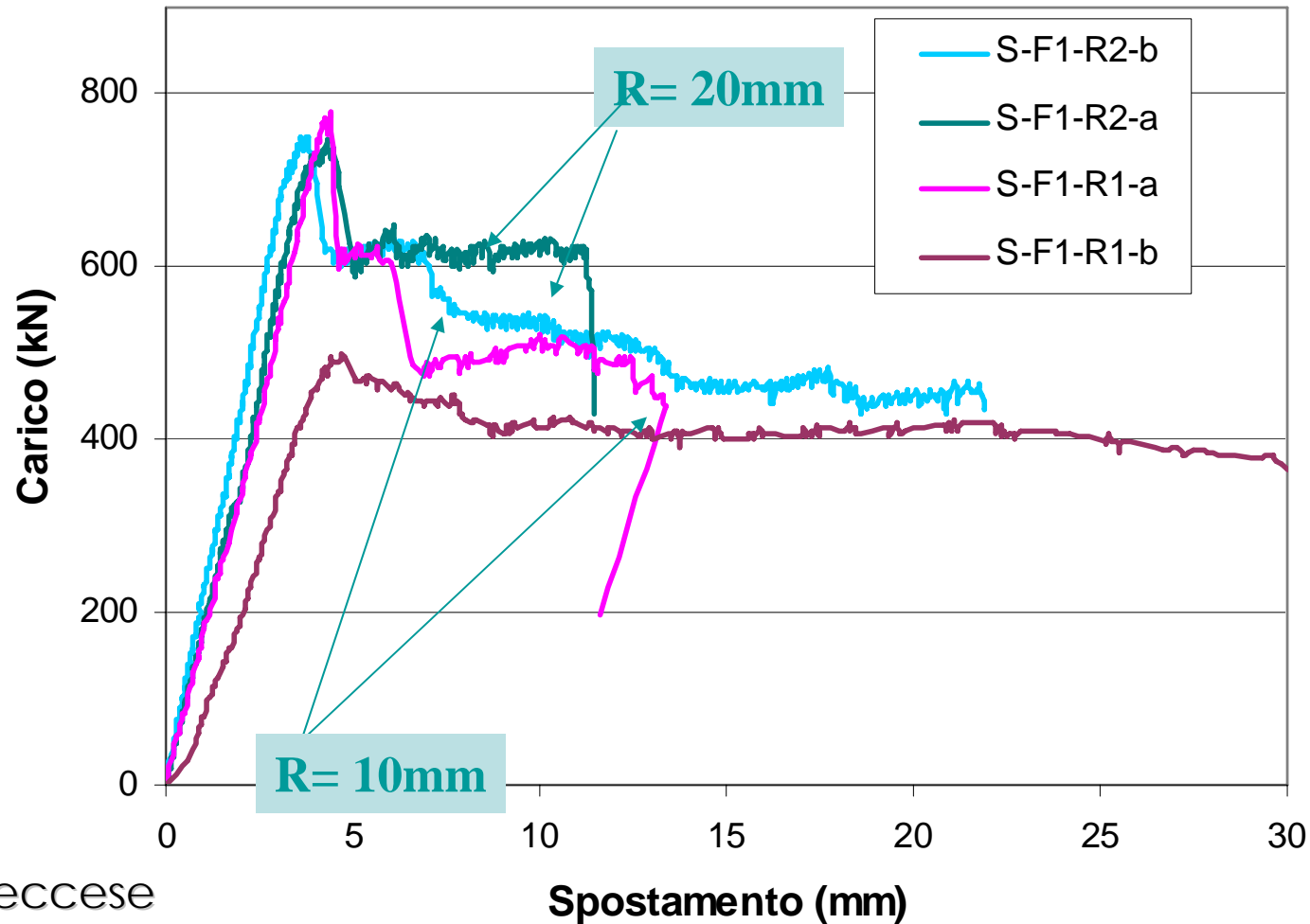


Tufo giallo
B=40 cm



Risultati della sperimentazione:

Influenza del raggio di curvatura degli spigoli:



Pietra Leccese



Sperimentazione su pilastri in muratura confinati con FRP

Risultati della sperimentazione:

La Tabella riassume i principali risultati desunti dalle prove di schiacciamento e permette di valutare il rapporto f_{mc}/f_m tra la resistenza f_{mc} riscontrata sui provini fasciati rispetto al valor medio f_m della resistenza dei corrispondenti provini di riferimento. I valori assunti dal rapporto f_{mc}/f_m mostrano come esso vari generalmente tra un minimo di 1.23 ed un massimo di 3.94, confermando che esso tende ad essere tanto maggiore quanto minore è la resistenza f_m del materiale base quanto maggiore è la pressione di confinamento.

#	Test Codice	Resistenza		Deformaz. Ultima $\epsilon_{0,\mu}$	$f_{i,eff}$ [MPa]	f_m [MPa]	f_{mc}/f_m
		F_u [KN]	f_u [Mpa]				
1	L01UR	452.3	7.23	0.0089		6.92	
2	L02UR	399.8	6.39	0.0054			
3	L03UR	446.8	7.14	0.0076			
4	L04G1	780.1	12.48	0.0268	2.13		1.803
5	L05G1	502	8.03	0.0703	2.13		1.160
6	L06G1	748.2	11.97	0.0230	2.59		1.729
7	L07G1	752.1	12.03	0.0438	2.59		1.738
8	L08G1	812.1	12.99	0.0211	5.18		1.877
9	B19UR	945.6	15.13	0.0137		13.71	
10	B20UR	768.6	12.3	0.0081			
11	B21G1	1204	19.26	0.0153	2.13	1.404	
12	B22UR	859	13.74	0.0318			
13	B23UR	801.6	12.83	0.0300			
14	B24UR	960.3	15.36	0.0356			
15	B25G1	1637	26.19	0.0408	2.13	13.97	1.874
16	B26G1	1324	21.18	0.0826	2.13	1.516	
17	B27G2	2196	35.13	0.0669	4.26	2.514	
18	B28G2	1905	30.48	0.0871	4.26	2.181	
19	T01UR	323	2.08	0.0100	-	-	
20	T02UR	302	1.99	0.0112	-	-	
21	T03UR	293	1.94	0.0158	-	-	
22	T04C1	680	4.49	0.1421	1.37	2.242	
23	T05C1	722	4.53	0.1194	1.31	2.263	
24	T06C1	573	3.69	0.1250	1.34	1.842	
25	T07C1	671	4.43	0.1263	1.36	2.213	
26	T08C2	1210	7.88	0.1963	2.71	3.939	
27	T09C2	836	5.52	0.1392	2.71	2.757	

#	Test Codice	Resistenza		Deformaz. Ultima $\epsilon_{0,\mu}$	$f_{i,eff}$ [MPa]	f_m [MPa]	f_{mc}/f_m
		F_u [KN]	f_u [Mpa]				
28	T10UR	362	2.38	0.0341	-		-
29	T11UR	347	2.28	0.0364	-		-
30	T12UR	333	2.17	0.0233	-		-
31	T13G1	443	2.79	0.0505	0.78	2.28	1.226
32	T14G1	485	3.04	0.0774	0.78		1.336
33	T15G1	469	3.03	0.0534	0.78		1.331
34	T16G2	706	4.62	0.1032	1.60		2.029
35	T17G2	751	4.63	0.1366	1.54		2.033
36	T18G2	668	4.33	0.0931	1.59		1.902
37	B01UR	921	6.70	0.0449	-		-
38	B02UR	1415	9.97	0.0358	-		-
39	B03UR	1206	8.80	0.0312	-		-
40	B04G1	1744	12.03	0.0320	0.83	8.49	1.417
41	B05G1	1850	12.79	0.0310	0.82		1.507
42	B06G1	2019	14.15	0.0349	0.84		1.666
43	B07G2	2095	14.52	0.0373	1.67		1.711
44	B08G2	2273	16.01	0.0452	1.70		1.886
45	B09G2	1804	12.64	0.0426	1.67		1.489
46	B10UR	665	11.28	0.0215	-		-
47	B11UR	652	11.10	0.0155	-		-
48	B12UR	666	11.29	0.0225	-		-
49	B13G1	1085	17.66	0.0316	1.60	11.22	1.573
50	B14G1	1004	16.27	0.0284	1.60		1.449
51	B15G1	976	15.95	0.0344	1.60		1.421
52	B16G2	1160	19.10	0.0266	3.24		1.702
53	B17G2	1239	20.57	0.0371	3.24		1.833
54	B18G2	1313	21.45	0.0351	3.18		1.911



Confronto con la proposta normativa:

Una recente proposta che mira a determinare le proprietà meccaniche di colonne in muratura tenendo conto sia di quelle del sistema confinante che del materiale di base, è contenuta nel [CNR-DT200/2004](#) nel quale il valore di progetto f_{mcd} della resistenza ultima della muratura confinata si determina in funzione di quello f_{md} della muratura non confinata e della pressione efficace di confinamento $f_{l,eff}$ secondo la seguente relazione lineare:

$$f_{mcd} = f_{md} + k' f_{l,eff}$$

Il coefficiente k' rappresenta il fattore di proporzionalità tra incremento di resistenza nella muratura e pressione laterale di confinamento e viene denominato **fattore di efficacia del confinamento**.

Tale fattore dipende direttamente dalle caratteristiche della muratura.



Confronto con la proposta normativa:

Poiché si ritiene che l'effetto di confinamento sia tanto più apprezzabile quanto più la muratura sia organizzata e priva di vuoti, è stata proposta la seguente espressione:

$$k' = \frac{g_m}{1000}$$

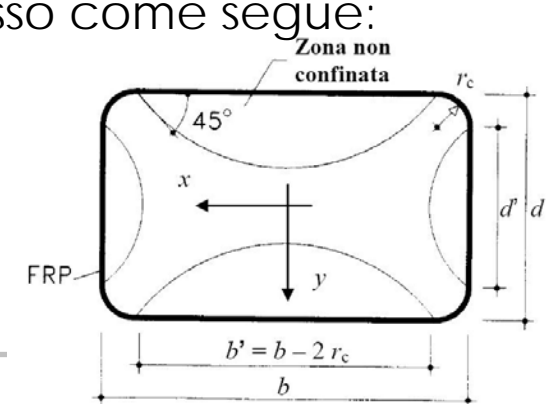
dove g_m rappresenta proprio la densità di massa (in kg/m^3) della muratura; la formula proposta nel DT è stata calibrata a partire da considerazioni basate sul valore che per tale coefficiente si adotta nel caso del calcestruzzo confinato con FRP.

L'espressione adottata per la pressione efficace di confinamento è la seguente:

$$f_{l,eff} = k_H \cdot k_V \cdot f_l$$

dove il coefficiente di efficienza orizzontale k_H corrisponde al rapporto tra la sezione confinata e quella globale e può essere espresso come segue:

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3 \cdot A_m}$$



Confronto con la proposta normativa:

Il coefficiente di efficienza verticale k_v tiene conto dell'eventuale effetto di diffusione delle pressioni di confinamento sul volume dell'elemento quando questo non risulta fasciato con continuità lungo il suo asse; nel caso di fasciatura continua il coefficiente k_v assume valore unitario.

Il valore $f_{l,eff}$ della pressione efficace di confinamento è stato calcolato assumendo per $\varepsilon_{f,rid}$ il valore determinato in accordo con il DT-200/2004 secondo le formule seguenti:

$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f E_f \cdot \varepsilon_{f,rid}$$

$$\varepsilon_{f,rid} = \frac{\eta_a \cdot \varepsilon_{f,k}}{\gamma_f}$$

in cui:

η_a è il cosiddetto fattore di conversione ambientale. Nella presente campagna si è adottato un valore unitario.

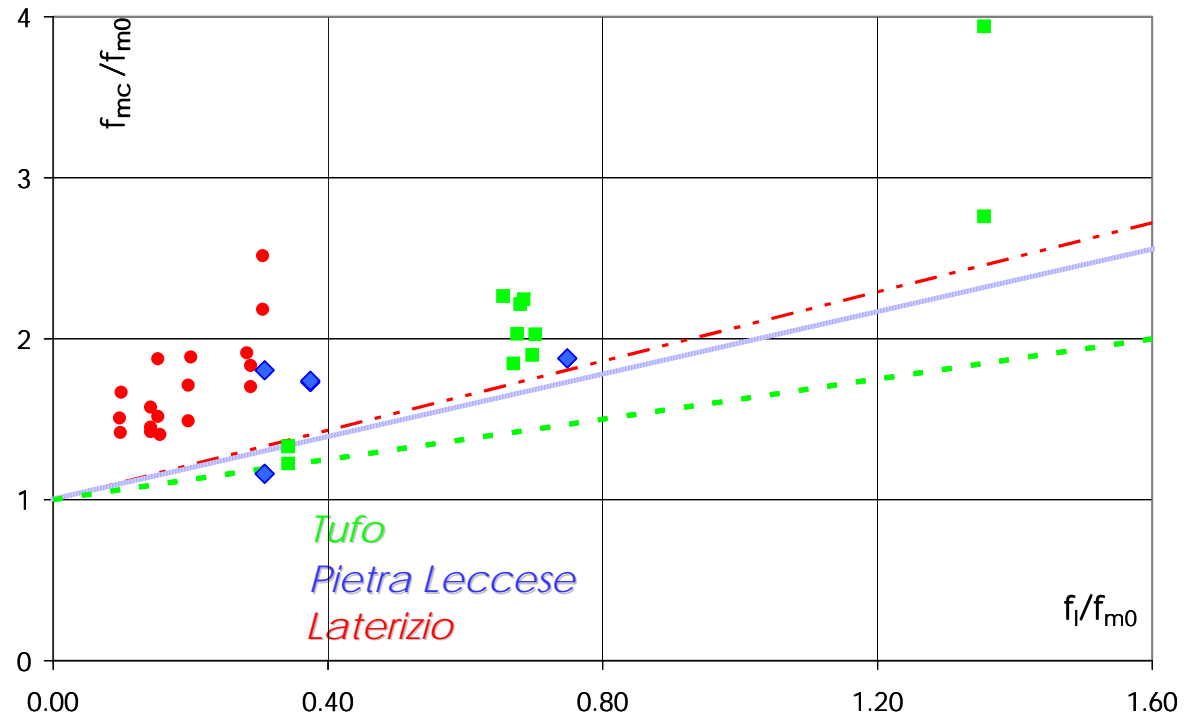
$\varepsilon_{f,k}$ è il valore caratteristico della deformazione ultima per il quale si assumono forniti dai produttori;

γ_f è coefficiente parziale di sicurezza che per i sistemi di rinforzo non certificati vale 1.25.



Confronto con la proposta normativa:

Confronto tra i valori sperimentali della resistenza della muratura confinata in funzione della pressione laterale efficace di confinamento e la proposta normativa.



La proposta del documento CNR risulta nella maggior parte dei casi cautelativa.

Appaiono sottostimati i valori di resistenza della muratura confinata nel caso del laterizio.

Nel caso della pietra naturale, invece, la relazione CNR fornisce solo in pochi casi valori a svantaggio di sicurezza.



Conclusioni:

I risultati della campagna sperimentale condotta su colonne in muratura in pietra naturale (tufo giallo e grigio, pietra leccese) o in blocchi artificiali (laterizi pieni) hanno mostrato che la tecnica del confinamento incrementa le prestazioni dell'elemento confinato. Questo risultato è in alcuni casi raggiunto a prezzo di deformazioni elevatissime, non compatibili con la pratica tecnica.

La proposta contenuta nel CNR-DT200/2004 fornisce generalmente una stima della resistenza dal lato della sicurezza di elementi in muratura confinati con materiali compositi, soprattutto nel caso di pilastri in laterizio.

Si prevede di ricalibrare la formulazione normativa sulla base delle prove della presente campagna sperimentale e di altre eventualmente disponibili al fine di migliorarne l'affidabilità.

Modelli meccanici per la valutazione dell'effetto del confinamento di elementi in muratura con FRP che tengano conto delle specificità derivanti da tessitura e qualità della muratura stessa non sono stati ancora messi a punto; nel futuro della ricerca si intende investigare anche con riferimento a questo obiettivo.



RINGRAZIAMENTI:

La ricerca presentata è parzialmente finanziata dal Progetto DPC-ReLUIIS, nell'ambito della Linea 8 – Task 3 (Valutazione dell'effetto di Confinamento)

FINE

