FLORE
Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

Adesione tra blocchi in laterizio e rinforzo in CFRP

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

Original Citation:

Adesione tra blocchi in laterizio e rinforzo in CFRP / S.Briccoli Bati, L.Rovero, U.Tonietti. - STAMPA. - (2007), pp. 213-220. (Materiali ed Approcci Innovativi per il Progetto in Zona Sismica e la Mitigazione della Vulnerabilità delle Strutture Fisciano, Salerno febbraio 2007).

Availability:

The webpage https://hdl.handle.net/2158/359996 of the repository was last updated on

Terms of use:

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf)

Publisher copyright claim:

La data sopra indicata si riferisce all'ultimo aggiornamento della scheda del Repository FloRe - The above-mentioned date refers to the last update of the record in the Institutional Repository FloRe

(Article begins on next page)

11 November 2026

Materiali ed Approcci Innovativi per il Progetto in Zona Sismica e la Mitigazione della Vulnerabilità delle Strutture
Università degli Studi di Salerno – Consorzio ReLUIS, 12-13 Febbraio 2007

Adesione fra blocchi in laterizio e rinforzo in CFRP

S. Briccoli Bati[1], L. Rovero[2] e U. Tonietti[3]

ABSTRACT: The key factor for evaluating mechanical behaviour in masonry reinforced with composite materials is the bond strength between composite material and masonry. In this paper, the said strength was tested using shear test on brick reinforced with CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) of varying dimensions.
The results made it possible to point out the influence played by the dimensions of the reinforcement sheet on the collapse load, ultimate slip, quality of the load-displacement diagram, and collapse modes. Lastly, identification of the local strains along the reinforcement sheet enabled us to formulate hypotheses regarding the local bond-slip relationship and then on the transfer mode of the stresses from the reinforcement to the brick.

1 INTRODUZIONE

Il placcaggio con materiali compositi a base polimerica rinforzata con fibre lunghe di carbonio (CFRP) è diventato una tecnica molto diffusa nel consolidamento di elementi strutturali in muratura.
L'impiego corretto dei materiali compositi come rinforzo per le strutture murarie è subordinato alla conoscenza del comportamento meccanico del sistema muratura-rinforzo, con particolare riferimento alle modalità di collasso che si manifestano per separazione del rinforzo dal supporto in muratura.
Il fattore chiave che caratterizza il comportamento meccanico muratura–rinforzo in CFRP è dunque la natura e la prestazione del legame, quest'ultima intesa come massimo carico trasferibile dalla muratura al rinforzo, che si instaura in virtù di meccanismi di adesione la cui crisi si manifesta come collasso fragile per perdita di unione.
In letteratura esistono molte ricerche di natura sperimentale e teorica riguardo al legame fra rinforzo in CFRP e elementi strutturali in calcestruzzo (Bizindavyi & Neale 1999; Chen & Teng 2001; Wu et al. 2002; Yao et al. 2004). Tali lavori sono mirati alla definizione della tipologia di prova sperimentale idonea per la descrizione del fenomeno, alla individuazione dei parametri influenti, alla messa a punto di modelli empirici e analisi numeriche e alla definizione di modelli teorici basati sulla meccanica della frattura. Per quanto riguarda la letteratura sulle murature, è disponibile una messe di risultati sperimentali molto più esigua e di conseguenza i modelli teorici proposti sono derivati da quelli suggeriti da sperimentazioni sul calcestruzzo (CNR DT 200/2004).
Le poche indagini sperimentali sull'adesione CFRP-muratura (Avorio & Borri 2000; Aiello & Sciolti 2005; Briccoli Bati et al. 2006) hanno evidenziato che la modalità di collasso è quasi sempre determinata dal fenomeno della delaminazione della muratura sottostante il placcaggio e che quindi la capacità di legame deve inevitabilmente fare i conti con la resistenza a trazione del supporto. Tale circostanza è infatti anche alla base di molte formulazioni teoriche nate per il calcestruzzo che legano la resistenza alla

[1] *Professore Ordinario, Dipartimento di Costruzioni, Università di Firenze*
[2] *Ricercatore, Dipartimento di Costruzioni, Università di Firenze*
[3] *Professore associato, Dipartimento di Costruzioni, Università di Firenze*

delaminazione all'energia di frattura liberata durante il processo di distacco (Chen et al. 200; Yao et al. 2004;). Oltre alla resistenza a trazione del supporto gli altri fattori che intervengono nella efficacia del legame sono ovviamente le dimensioni del rinforzo, il rapporto fra larghezza del rinforzo e larghezza del supporto e la rigidezza del rinforzo in quanto tutti capaci di guidare la distribuzione delle tensioni all' interfaccia. Inoltre, un aspetto importante riguardo alla forza di legame, messo in evidenza in tutte le sperimentazioni effettuate, è costituito dall'esistenza di una lunghezza efficace del placcaggio ovvero di quella lunghezza oltre la quale non si ottiene un aumento sensibile del carico di collasso.
Nel presente articolo vengono riportati i risultati di una indagine sperimentale, effettuata con prove di adesione su di un ragguardevole numero di provini costituiti da elementi in laterizio rinforzati con strisce di CFRP di dimensioni variabili, finalizzata allo studio del legame mattone-CFRP.

2 INDAGINE SPERIMENTALE

2.1 Apparato di prova

La prova scelto per testare il legame di aderenza mattone-CFRP, definita in letteratura (Yao et al. 2004) double-shear push test, è un pull-out test su un blocco di supporto soggetto a compressione sul quale sono applicate due strisce di CFRP alle cui estremità è applicata la forza di trazione. L'apparato di prova (Fig.1) consiste di un telaio di acciaio a contrasto del quale viene posto il blocco di laterizio sulle cui facce maggiori sono incollate due strisce di rinforzo costituite da un unico nastro di fibra imbevuto di matrice epossidica solo nelle parti a contatto con il laterizio. Mentre il laterizio è bloccato sulla faccia minore vicina all'incollaggio delle strisce, il nastro di rinforzo ruota intorno ad un cilindro di acciaio, di diametro pari allo spessore dell'elemento in laterizio, collegato mediante cerniera sferica alla cella di carico e quindi al martinetto idraulico con il quale viene impresso lo spostamento. Quattro trasduttori di spostamento misurano gli spostamenti verticali del cilindro di acciaio e due trasduttori registrano gli spostamenti in corrispondenza del vincolo a contrasto con la base del laterizio. L'azione esercitata dal martinetto idraulico sottopone le strisce di rinforzo a trazione e innesca uno stato di compressione sulla porzione di laterizio interessata dal placcaggio (Fig.1).

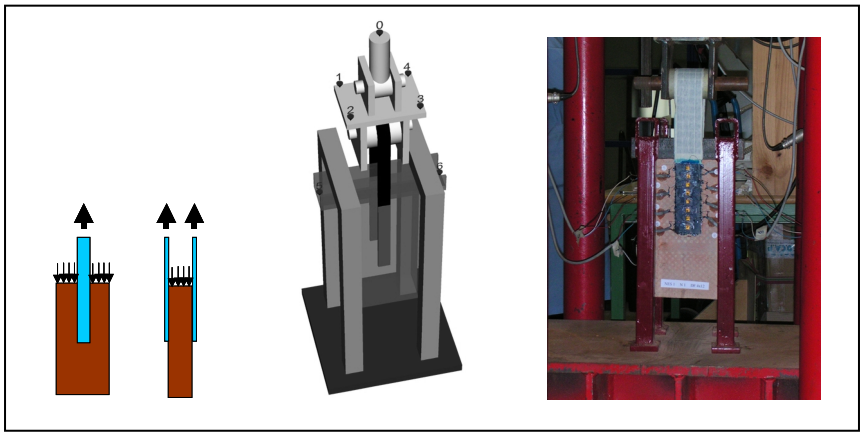

Figura 1. Apparato di prova: schema, assonometria e immagine di un campione sotto prova.

2.2 Caratteristiche meccaniche dei materiali

Prima di effettuare le prove su elementi placcati sono state eseguite prove meccaniche di caratterizzazione dell'elemento laterizio utilizzato. Trattasi di elementi laterizi standard pressati a mano (forniti dalla ditta "Laterizi S. Marco", Venezia) delle dimensioni di 55x120x250 mm; su provini di varia forma e dimensioni, da questi ricavati, sono state eseguite:

- prove di compressione su provini prismatici delle dimensioni di 22x22x45mm;
- prove di trazione diretta su provini prismatici delle dimensioni di 40x10x80mm con intagli;
- prove di trazione per flessione su provini prismatici delle dimensioni di 120x250x50mm.

I parametri meccanici ricavati da tali prove sono riportati nella Tabella 1.
Per placcare i provini confezionati per questa campagna sperimentale è stato utilizzato un materiale composito CFRP (carbon fiber reinforced polymer) costituito da fibre che vengono impregnate con la matrice quando poste in opera. Si tratta di un tessuto unidirezionale di fibre di carbonio (spessore 0,16mm) "MBrace Fibers C-130"ad alta resistenza e di una matrice epossidica, costituita da, "MBrace" primer e un adesivo bicomponente prodotti dalla ditta MAC S.p.A (Treviso, Italy).
Le principali caratteristiche meccaniche dei componenti il sistema"MBrace" sono riportate in Tabella 2.

Tabella 1. Parametri fisici e meccanici dei mattoni utilizzati nei campioni di prova

Peso specifico [kg/m3]	Modulo di Young [MPa]	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a trazione diretta (MPa)	Resistenza a trazione per flessione (MPa)
1800	1785	17,39	1,7	3,53

Tabella 2. Parametri fisici e meccanici dei componenti il sistema Mbrace (MAC S.p.A)

	Peso specifico [kg/l]	Modulo di Young a trazione [MPa]	Modulo di Young a flessione [MPa]	Resistenza a trazione diretta [MPa]	Resistenza a trazione per flessione [MPa]	Deformazione ultima [%]
Fibre	1820	230000		>3430		1,5
Primer	1067	>700	>580	>12	>24	3
Adesivo	1020	>3000	>3500	>50	>24	2,5

2.3 I Provini

Sono stati realizzati 51 provini utilizzando mattoni di dimensioni standard 55x120x250mm e strisce di CFRP di larghezza costante pari a 40mm e lunghezze variabili rispettivamente di10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 e 200mm. Per ogni tipo di provino placcato, caratterizzato da una determinata lunghezza delle strisce di rinforzo, sono stati realizzati tre elementi.

3 RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONI

3.1 Modalità di collasso

In tutte le prove il collasso dei campioni avviene in modo improvviso (fragile) ed è caratterizzato dalla seguente modalità di rottura:

- asporto di una porzione consistente di mattone, a forma semi-tronco conica, localizzata in corrispondenza del bordo vincolato del blocco in laterizio (estremità A del rinforzo);
- asporto di una porzione consistente di mattone, a forma semi-tronco conica, localizzata a partire dall' estremità finale della striscia di CFRP (estremità B del rinforzo);
- delaminazione di uno strato sottile di mattone sottostante al rinforzo compreso tra le estremità A e B.

La modalità di rottura consistente nella delaminazione di uno strato sottile di mattone (5mm circa) sottostante quello impregnato di primer può essere attribuita al superamento del valore limite della tensione tangenziale nel laterizio. Il distacco del prisma di laterizio, a forma semi-tronco conica in corrispondenza dell'estremità caricata della stri-

scia, può essere dovuto al fatto che l'azione radente del rinforzo si diffonde nel mattone generando stati tensionali triassiali responsabili delle fratture su piani inclinati.

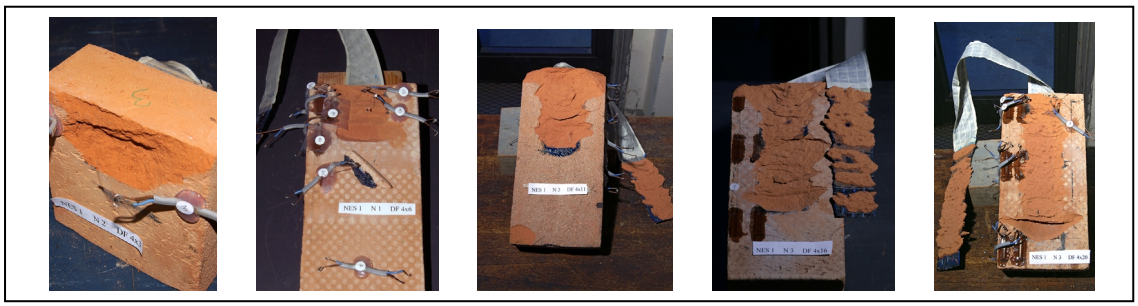

Figura 2. Modalità di collasso nei campioni con i seguenti rinforzi: 40x30mm, 40x60mm, 40x110mm, 40x160mm e 40x200.

La forma, la geometria e le dimensioni del cuneo variano leggermente con le dimensioni del rinforzo mentre in genere risulta pressoché costante, l'angolo che la generatrice forma con la superficie di incollaggio del mattone.
E' invece ragionevole pensare che l'asporto della porzione di mattone, a forma semitronco conica, localizzata a partire dall' estremità finale della striscia di CFRP (estremità B del rinforzo) sia un fenomeno secondario che si innesca in modo istantaneo successivamente alla delaminazione.

3.2 Carichi di collasso

In Figura 3 sono riportati in un istogramma i valori medi dei carichi di collasso registrati per ogni tipo di campione (Tab.3). E' possibile osservare che, per la larghezza di rinforzo considerata, la lunghezza efficace, intesa come quella lunghezza oltre la quale non si ottiene aumento della forza di legame, è dell'ordine di 110 mm.

Tabella 3. Carichi di collasso

Larghezza x lunghezza della striscia (mm)	Carico di collasso per ogni striscia (N)
40x 10	2390
40x 20	4490
40x 30	5390
40x 40	5910
40x 50	6680
40x 60	6465
40x 70	7900
40x 80	7760
40x 90	8140
40x 100	9065
40x 110	9775
40x 120	9340
40x 130	10130
40x 140	10135
40x 150	10960
40x 160	10030
40x 200	10460

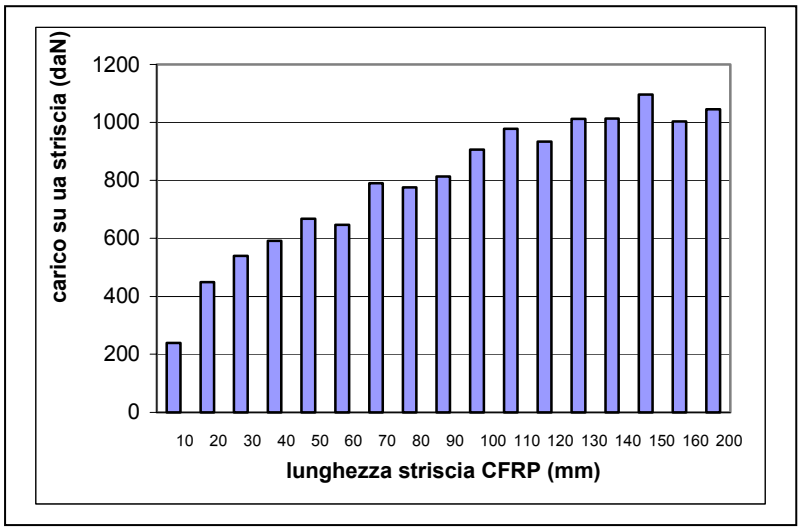

Figura 3. Carichi di collasso

3.3 Distribuzione delle deformazioni nelle strisce di rinforzo

In ogni campione testato gli strain gauges sono stati posizionati lungo tutta la striscia di rinforzo ad una distanza di 15mm uno dall'altro con lo scopo di rilevare la distribuzione delle deformazioni longitudinali lungo il rinforzo. In Figura 4 è rappresentata la disposizione degli strain gauge per i campioni con striscia di dimensioni 40x160mm e l'andamento delle deformazioni lungo la striscia di rinforzo per livelli di carico crescenti fino al collasso. Si può osservare che fino al 70% del carico di collasso le deformazioni interessano una lunghezza pari solo a 50mm e i valori delle microdeformazione sono minori di 3000; solo superato tale valore del carico si manifestano microdeformazioni pari a 10000. Nel rinforzo non si rilevano deformazioni ad una distanza dal bordo superiore ai 100mm qualunque sia il livello di carico raggiunto; ciò sembra confermare che la lunghezza efficace è pari circa a 100mm come già suggerito dai valori dei carichi di collasso (Fig. 3).

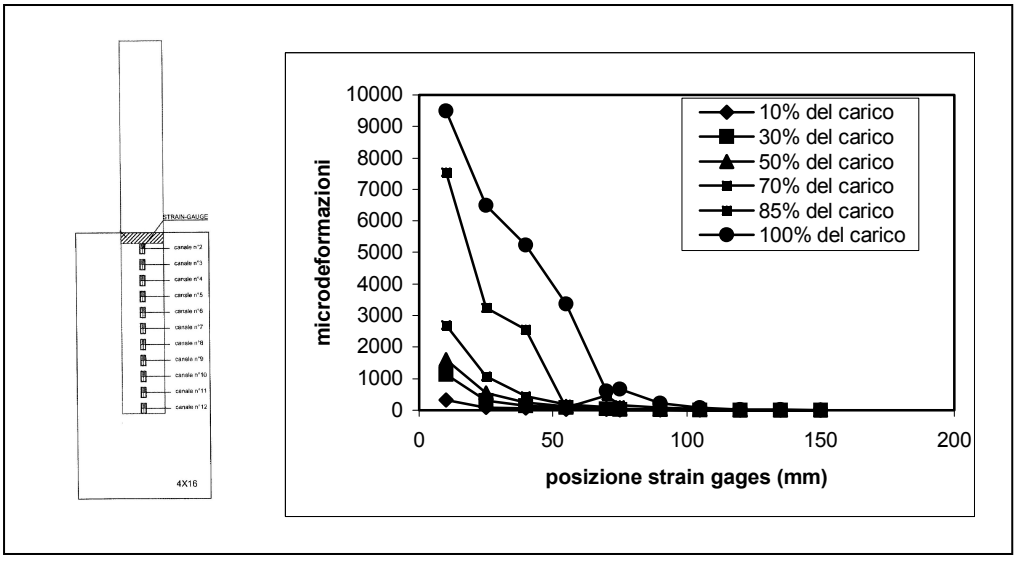

Figura 3. Disposizione degli strain gauges per i campioni con striscia di dimensioni 40x160 mm e l'andamento delle deformazioni lungo il rinforzo a differenti livelli di carico

Utilizzando le misure di deformazione locali fornite dagli strain gauges è possibile determinare in modo indiretto la distribuzione delle tensioni tangenziali di interfaccia rinforzo-laterizio e lo scorrimento fra il rinforzo e il laterizio attraverso le seguenti relazioni:

$$\tau_{frp}(x) = t_{frp} E_{frp} \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \qquad (1)$$

$$S_{frp}(x) = \sum_{i=1}^{k} (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)(x_{i+1} - x_i) \qquad (2)$$

$$x = (x_k + x_{k-1}) \qquad (3)$$

dove x_k e x_{k-1} sono le posizioni di due estensimetri successivi, ε_k e ε_{k-1} le corrispondenti deformazioni misurate, E_{frp} e t_{frp} sono il modulo elastico e lo spessore del rinforzo.
In Figura 4 sono rappresentati i valori delle tensioni tangenziali in funzione di diversi livelli di carico per ogni intervallo tra due punti sede di applicazione di strani gauges.
Dai dati acquisiti ed elaborati è possibile dedurre che solo per valori alti del livello di carico le tensioni migrano lungo la striscia, ma il picco di tensione si verifica comunque in corrispondenza del punto più vicino all'applicazione del carico.
In Figura 5 è riportato il diagramma tensioni tangenziali-scorrimento dedotto secondo la (2) dai risultati rilevati

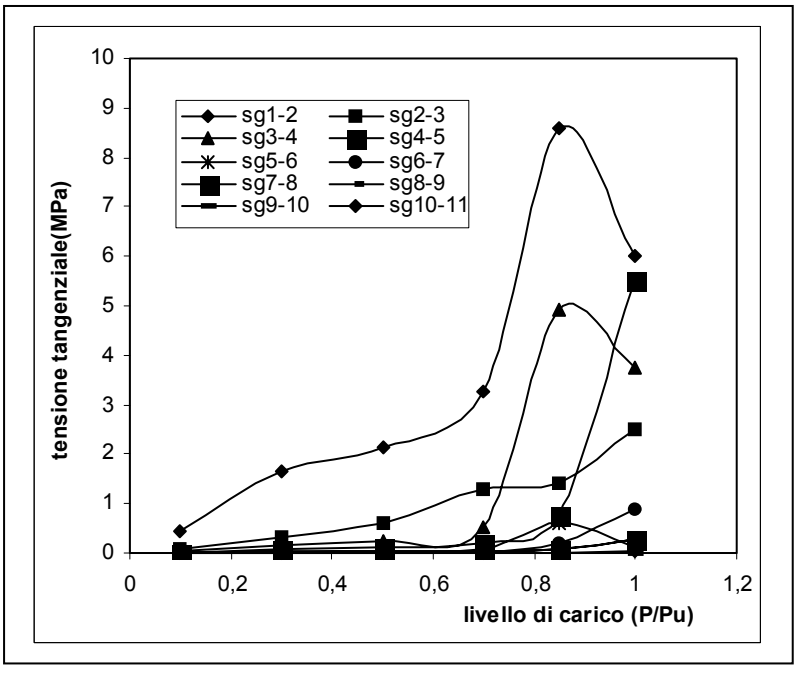

Figura 4. Tensioni tangenziali

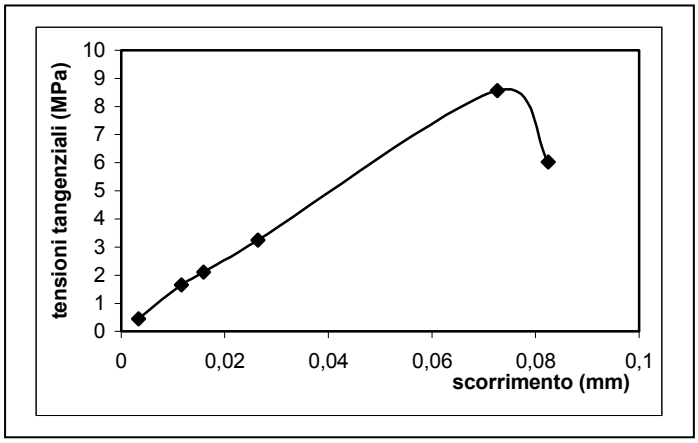

Figura 5. Diagramma tensioni tangenziali-scorrimento

3.4 Influenza della larghezza del rinforzo

A conforto di quanto asserito per la striscia di rinforzo di larghezza 40mm si ritiene utile riportare anche i risultati ottenuti su provini placcati con striscie di diversa larghezza (Briccoli Bati et al. 2006). Infatti dall'istogramma rappresentato in Figura 6 si nota chiaramente come il carico di collasso e conseguentemente la lunghezza efficace dipenda in ogni caso dalla larghezza della striscia e dal rapporto tra larghezza della striscia e larghezza del supporto.

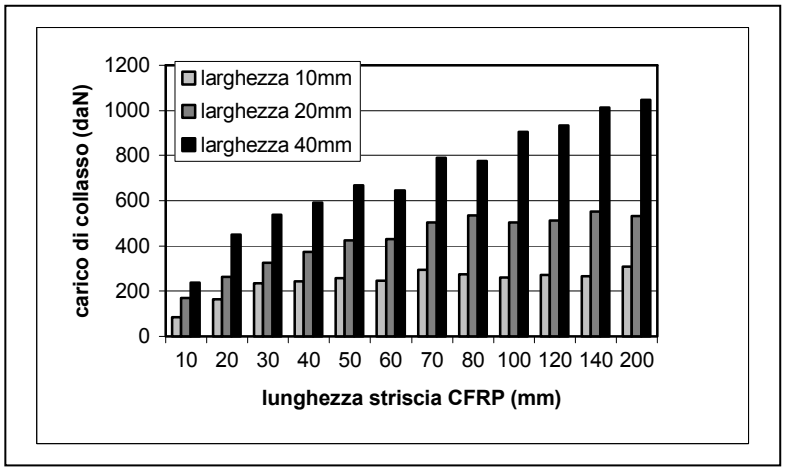

Figura 6. Carichi di collasso

4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

M.A. Aiello, S.M. Sciolti. Bond analysis of masonry structures strengthened with CFRP sheets // J. Construction and Building Materials, Elsevier. –2006.- 20, 90-100.

Avorio A., Borri A. 2000. "Problemi di collegamento tra materiali FRP e strutture murarie". In L. Ceriolo (ed.), Proceedings of national conference mechanics of masonry structures strengthened with FRP materials: modeling, testing, design, control, Venezia.

Bizindavji L., Neale KW.1999. "Transfer lengths and bond strength for composites bonded to concrete" J. Compos Construct. 3(4), 153-160.

Briccoli Bati S., Rovero L. 2001. "Experimental validation of a proposed numerical model for the FRP consolidation of masonry arches. Proc. of III International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions". Guimarães, Portugal.

Briccoli Bati S., Rotunno T., Rovero L., Tonietti U. 2004. "Innovative techniques and materials for the reinforcement of historical buildings". Proc. of IC-SGECT'04, Mansoura, Egypt.

Briccoli Bati S., Rotunno T., Rovero L., Tonietti U. 2006. "Experimental study on CFRP-Brick bonded joints". Conference on Mechanics of Composite Materials, Riga, Latvia

Ceroni F., Pecce M. 2006. "Procedure per prove di aderenza su elementi in c.a. e muratura rinforzati con FRP". In S.Russo e E.Siviero (ed.) Atti del Convegno Sperimentazione su materiali e strutture. Venezia.

CNR DT 200/2004. 2005. Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati.

Triantafillou T.C.1998. "Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates" J. Compos. for Constr., ASCE. 2(2), 96-104.

Valluzzi M. R., Valdemarca M., Modena C. 2001. "Behavior of Brick Masonry Vaults Strengthened by FRP Laminates" J. Compos. for Constr. ASCE. 5(3), 163-169.

Wu ZS., Yuan H., Niu H. 2002. „Stress transfer and fracture propagation in different kinds of adhesive joints" J. Eng Mech. ASCE. 128(5), 562-573.

Yao J., Teng J.G., Chen J.F. 2004. "Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints" J. Composites. Part B: engineering, Elsevier. XX, 1-15.