

Rinforzo di volte in muratura

Uno studio sperimentale per la valutazione dell'efficacia di un rinforzo mediante intonaco armato con rete in GFRP

Natalino Gattesco, Ingrid Boem

PREMESSA

La presenza di volte non portanti in muratura nel patrimonio dell'edilizia storica italiana ed europea è abbastanza frequente. Tali elementi strutturali manifestano, in genere, buone caratteristiche di capacità portante nei confronti dei carichi verticali, ma resistenze molto limitate nei confronti delle sollecitazioni orizzontali indotte dall'eccitazione sismica.

Nel seguito sono riportati i risultati di un studio sull'efficacia di una moderna tecnica di rinforzo sulle prestazioni di volte in muratura sottoposte ad azioni orizzontali agenti in direzione perpendicolare all'asse. La tecnica è basata sull'applicazione, all'estradosso o all'intradosso, di un intonaco rinforzato con reti in materiale composito in fibre di vetro (*Glass Fiber Reinforced Mortar - GFRM*).

Il setup di prova è stato appositamente progettato in modo da riprodurre il più fedelmente possibile l'azione di un carico orizzontale trasversale proporzionale al peso della volta. Gli autori hanno infatti recentemente evidenziato (Gattesco e Boem, 2016), mediante alcune simulazioni numeriche, che le configurazioni di carico semplificate generalmente adottate in letteratura, basate su carichi verticali concentrati a 1/4 o 1/3 della luce, non sono le più adatte per evidenziare correttamente le prestazioni delle volte rinforzate.

CARATTERISTICHE DEI CAMPIONI

Sono state eseguite tre prove sperimentali su volte a botte a scala reale (luce 4000 mm, larghezza 770 mm, spessore 120 mm, rapporto freccia/raggio = 0.75) - Figura 1a. È stato testato un primo campione non rinforzato (V01-75-NR), per confronto; il secondo campione è stato rinforzato all'estradosso (V02-75-RE), mentre il terzo è stato rinforzato all'intradosso (V03-75-RI).

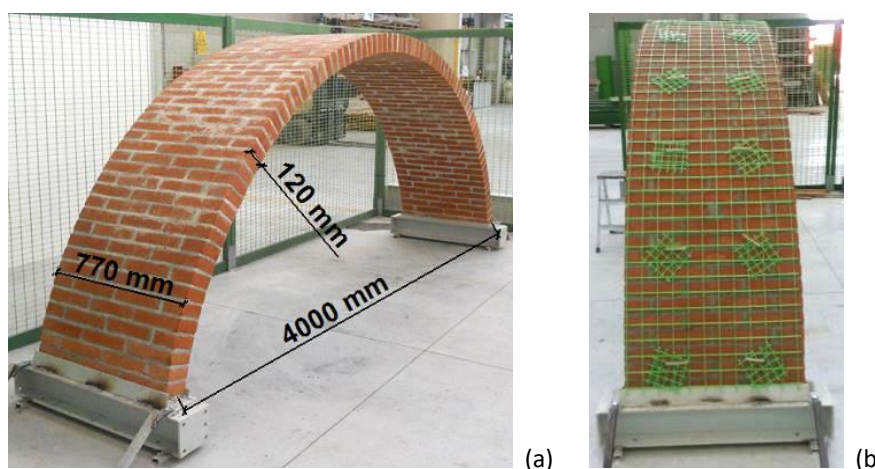


Figura 1 - Volta non rinforzata V01-75-NR, con indicazione delle caratteristiche dimensionali (a), volta rinforzata all'estradosso V02-75-RE, prima dell'applicazione dell'intonaco (b).

Le volte sono state realizzate in muratura di mattoni pieni UNI in laterizio ($f_{comp} = 15.7$ MPa) e giunti in malta di calce idraulica naturale ($f_{comp} = 2.93$ MPa, $f_{traz} = 0.4$ MPa), aventi spessore medio pari a 10 mm.

Il rinforzo è stato realizzato applicando uno strato di malta bastarda ($f_{comp} = 6.90$ MPa, $f_{traz} = 1.10$ MPa, $E_{Young} = 14.4$ GPa) di spessore 30 mm in cui è stata annegata una rete preformata in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), avente maglia di 66×66 mm². Prima dell'applicazione della malta, sono stati inoltre inseriti connettori a "L" in GFRP, in ragione di 6 al m², mediante inserimento in fori eseguiti nella muratura e iniettati con resina epossidica tixotropica. Per migliorare l'ancoraggio del connettore all'intonaco sono stati impiegati dei fazzoletti di rete GFRP aggiuntivi di dimensione 150×150 mm² e maglia di 33×33 mm² (Figura 1b).

I fili della rete in GFRP (Figura 1b) sono costituiti da fibre di vetro AR (Alkali-Resistant) inglobate in una matrice polimerica termo-indurente (vinilestere epossidica con perossido di benzoile come catalizzatore); per formare le maglie della rete, i fili longitudinali (trama) sono intrecciati, in modo da fissare quelli trasversali (ordito) in corrispondenza delle intersezioni. Le principali caratteristiche degli elementi in GFRP sono riassunte in Tabella 1. I fili di rete con le fibre intrecciate sono stati orientati nella direzione dell'arco.

Tabella 1 - Caratteristiche degli elementi in GFRP: area netta di fibre A_{fib} , area lorda A_{tot} , resistenza a trazione T_w (CNR DT 200/2006), rigidezza assiale EA

Elemento in GFRP	A_{fib} [mm]	A_{tot} [mm]	T_w [kN]	EA [kN]
Rete				
Filo a fibre parallele	3.80	9.41	5.62	296
Filo a fibre intrecciate	3.80	7.29	4.49	264
Connettore a "L"	57.6	70.0	36.01	-

APPARATO DI PROVA

L'apparato di contrasto è costituito da profili metallici HEA assemblati in due telai piani collegati tra loro mediante due traversi orizzontali, su cui sono stati fissati due martinetti idraulici a doppio effetto (24 kN, ± 60 mm corsa) collegati in parallelo, agenti in direzione orizzontale e orientati nello stesso verso (Figura 2a). L'intero apparato è stato dimensionato in modo da garantire un'elevata rigidezza al sistema.

Ciascuna volta è stata costruita su dei profili metallici HEA, atti a simulare la presenza delle imposte, fissati al basamento in calcestruzzo e collegati, alle estremità, ai profili di base dell'apparato di contrasto.

Per simulare il più realisticamente possibile l'effetto di una distribuzione del carico orizzontale proporzionale alla massa della volta, ciascun attuatore è stato collegato al campione di prova attraverso un sistema a telaio a nodi incernierati, sorretto da guide scorrevoli (Figura 2b). In particolare, su ogni lato della volta sono stati predisposti otto bracci per l'applicazione del carico, strumentati con celle di carico (3 kN).

Il carico globale applicato dai due martinetti è inoltre, stato misurato attraverso un trasduttore di pressione. Alcuni potenziometri lineari e rotativi, fissati su supporti in acciaio indipendenti dall'apparato di contrasto, hanno permesso di rilevare lo spostamento verticale e orizzontale di sette punti per ciascun lato della volta. Le prove sono state eseguite imponendo una variazione ciclica del carico orizzontale tra due valori opposti, via via crescenti (passo ± 1 kN, velocità ≈ 35 N/s), fino al raggiungimento della fessurazione alle imposte e alle reni (potenziale innesco del cinematismo). Le prove sono state poi proseguite, sempre ciclicamente, ma controllando lo spostamento orizzontale nella sezione in chiave (passo ± 10 mm, velocità 0,5 mm/s).

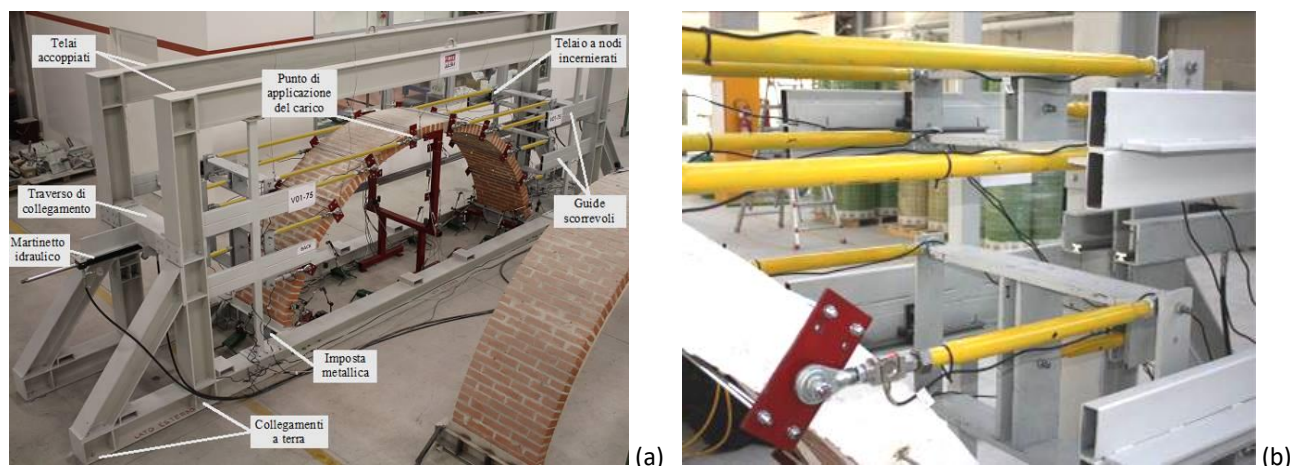


Figura 2 - Apparato di prova: (a) vista globale e (b) dettaglio del sistema a telaio predisposto per la distribuzione del carico sulla volta

RISULTATI

I risultati relativi ai tre campioni testati sono illustrati in Figura 3a, Figura 4a e Figura 5a in termini di curve $F_h - \delta_h$, che esprimono il carico orizzontale in funzione dello spostamento orizzontale in chiave. Sono inoltre riportati gli schemi fessurativi per entrambe le direzioni di carico: i simboli in linea spessa distinguono l'apertura delle fessure nella muratura, che hanno indotto la formazione di una "cerniera", mentre quelli in linea sottile indicano fessure parziali che hanno coinvolto solo lo strato di intonaco. La diffusione delle fessure nell'intonaco è indicata con una linea spezzata.

La volta non rinforzata V01-75-NR (Figura 3) ha raggiunto un carico di circa -3.8 kN (verso negativo, $\delta_h = -0.8$ mm), per poi crollare in conseguenza alla formazione del meccanismo (comparsa sequenziale di quattro cerniere: "N_A", "N_D", "N_E" ed N_F" - Figura 3b).

Nella volta rinforzata all'estradosso, V02-75-RE (Figura 4), la formazione sequenziale di quattro fessure, sia nel verso positivo ("E_A", "E_C", "E_F", "E_F") che in quello negativo ("E_B", "E_D", "E_H", "E_I") non ha invece determinato il collasso immediato del campione. Infatti, la presenza della rete in GFRP a cavallo di "E_A" ed "E_B" ha contrastato efficacemente l'apertura delle fessure in quei punti, non permettendo la formazione del cinematismo fino alla rottura dei fili di rete ortogonali alla fessura, in corrispondenza di un carico di -14.1 kN e di uno spostamento orizzontale della sezione in chiave pari a -82.2 mm.

Analogamente, anche nel campione rinforzato all'intradosso, V03-75-RI (Figura 5), la formazione delle fessure "I_A"-"I_B"-"I_C"-"I_I" (verso positivo) e "I_D"-"I_E"-"I_F"-"I_G" (verso negativo) non ha determinato l'attivazione del meccanismo di collasso fino alla rottura dei fili di rete in GFRP a cavallo delle fessure all'intradosso. Il carico massimo raggiunto è stato di -11.6 kN, mentre il collasso della volta si è verificato a -9.5 kN ($\delta_h = -96.7$ mm). In entrambi i campioni rinforzati è emersa un'ampia diffusione della fessurazione nell'intonaco (Figura 4b, Figura 5b), che risulta conforme con il comportamento tipico di elementi rinforzati sottoposti a trazione (Gattesco e Boem, 2017a), (Gattesco e Boem, 2017b). È stata riscontrata, inoltre, la comparsa di alcune fessure aggiuntive sul lato non rinforzato, che si aprono e si richiudono a seconda della direzione del carico (Figura 5a).

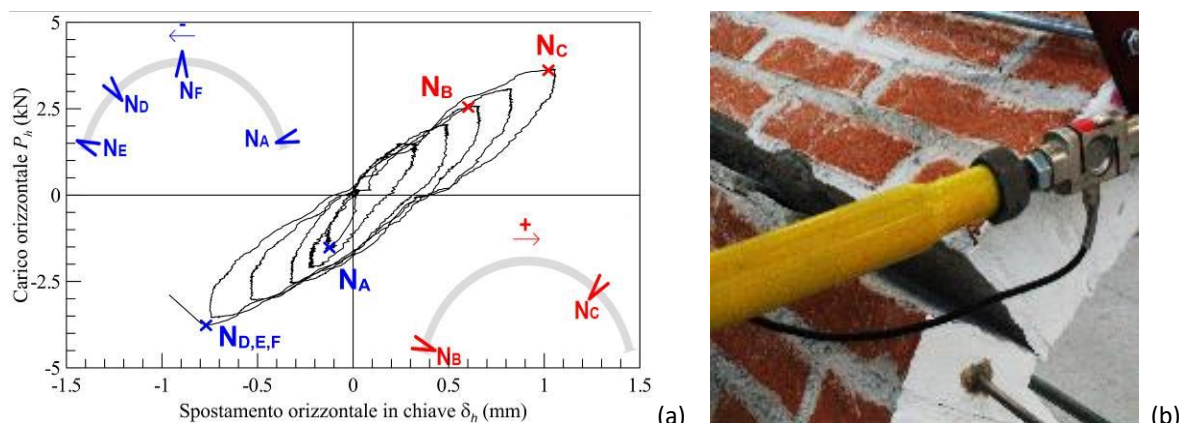


Figura 3 - Volta non rinforzata V01-75-NR: (a) curva carico orizzontale F_h – spostamento orizzontale in chiave δ_h e (b) dettaglio della fessura “Nb” a fine prova

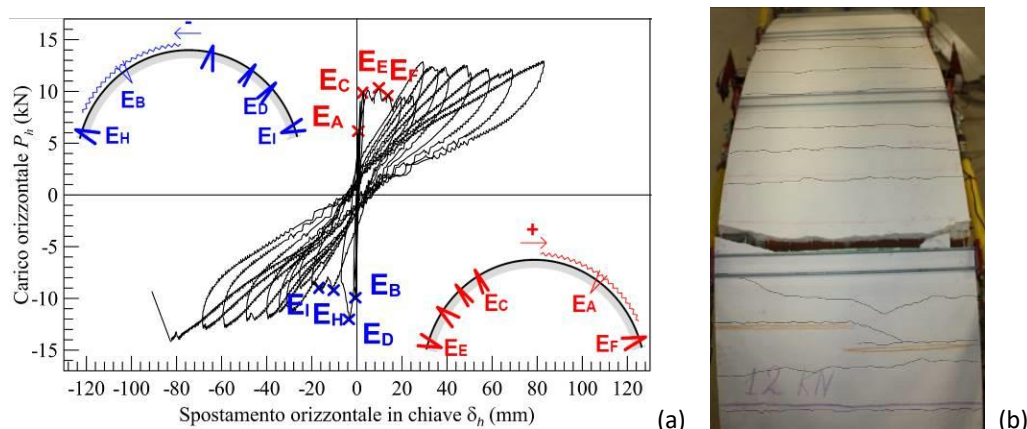


Figura 4 - Volta rinforzata V02-75-RE: (a) curva carico orizzontale F_h – spostamento orizzontale in chiave δ_h e (b) dettaglio delle fessure presenti all’estradosso, lato sinistro, a fine prova

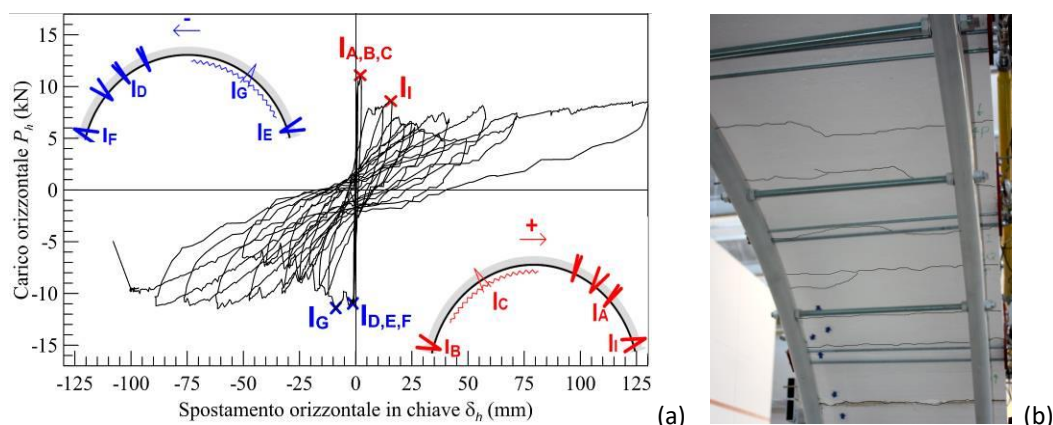


Figura 5 - Volta rinforzata V03-75-RI: (a) curva carico orizzontale F_h – spostamento orizzontale in chiave δ_h e (b) dettaglio delle fessure presenti all’intradosso, lato destro, a fine prova

Si osserva che non è emerso alcun distacco dell’intonaco dalla muratura; è stato invece riscontrato uno scorrimento orizzontale delle sezioni d’imposta una volta che è avvenuta la formazione delle fessure passanti. In fase di prova, è stato quindi aggiunto un elemento atto ad impedire tale scorrimento, in quanto, nelle reali condizioni d’esercizio, tali spostamenti non sono, in generale consentiti per la presenza delle spalle laterali. Dal confronto dei risultati è emerso un consistente aumento della resistenza: il carico finale è stato infatti pari a 3.8 e 3.1 volte quello della volta non rinforzata, rispettivamente per il campione V02-75-RE e V03-75-RI (Figura 5). Le volte rinforzate, inoltre, hanno permesso di raggiungere valori della capacità di spostamento orizzontale in chiave di entità molto elevati (80-90 mm); nella volta non rinforzata si è avuto invece un brusco calo di capacità portante a partire da uno spostamento in chiave inferiore a 1 mm (Figura 5).

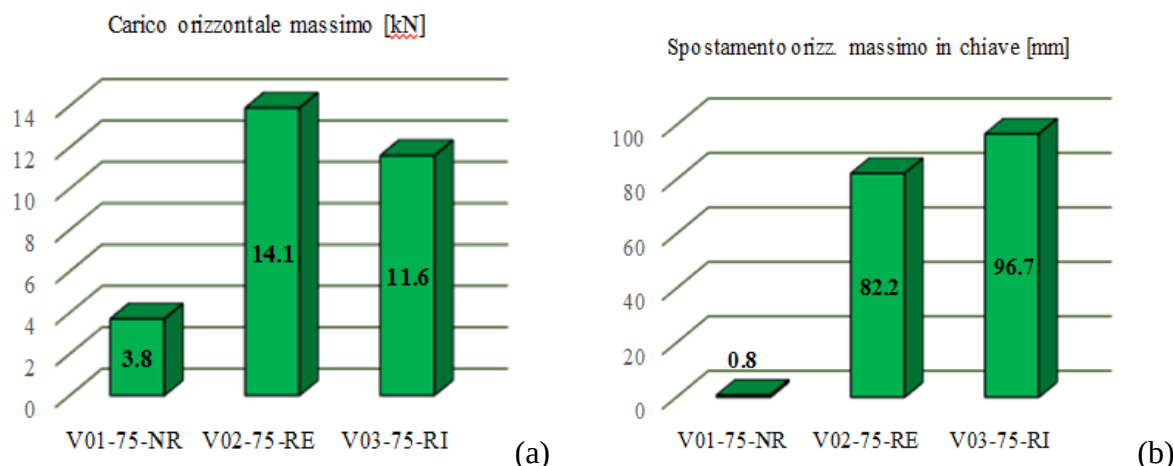


Figura 6 - Confronto tra le prestazioni dei tre campioni testati in termini di (a) carico orizzontale massimo e (b) spostamento orizzontale massimo in chiave

RINGRAZIAMENTI

Lo studio riporta alcuni risultati di un progetto di ricerca finanziato da FibreNet s.r.l. (Pavia di Udine, Italia). Si ringrazia inoltre il sostegno finanziario di "Reluis 2017". Gli autori desiderano ringraziare Allen Dudine, Carlos Passerino, Enrico Zanella, Davide Menegon, Norman Bello e Alessandra Gubana per l'aiuto fornito durante la progettazione e l'esecuzione delle prove sperimentali.

BIBLIOGRAFIA

- Gattesco, N., Boem, I., 2016. Strengthening of masonry vaults through a thin extradosal layer of fiber reinforced lime mortar. *10th SAHC, Int. Conf. on Structural Analysis of Historical Constructions*, 13-15 Settembre, Leuven, BE.
- Gattesco, N., Boem, I., 2017a. Characterization tests of GFRM coating as a strengthening technique for masonry buildings. *Composite Structures*, **165**, 209-222.
- Gattesco, N., Boem, I., 2017b. Out-of-plane behavior of reinforced masonry walls: experimental and numerical study. In corso di pubblicazione sulla rivista *Composites part B: Engineering*.