



Modelli di arco rinforzati con materiali compositi

S.Briccoli Bati¹ e L. Rovero²

ABSTRACT: Assessment of the effects of the application of advanced materials and new technologies on traditional structures has assumed a major relevance within the ongoing debate on the preservation of historical buildings. In the paper, some results of a wide experimental analysis carried out at the Laboratory of Dipartimento di Costruzioni of the University of Florence are reported. The results regard mechanical tests on scale models of masonry arches reinforced with CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) and GFRCM (Glass Fiber Reinforced Cement Matrix) strips, bonded at the intrados or extrados with distinct configurations. The results of the experimental trials allowed to evaluate the impact of different reinforcement configurations on the strength of masonry arches and then to deduce considerations on sizing criteria for the CFRP strengthening of traditional masonry structures.

1 INTRODUZIONE

L'impiego di materiali compositi per il consolidamento di strutture murarie, sebbene ormai di uso corrente per le indubbe potenzialità offerte da questa nuova tecnologia, viene praticato ancora in assenza di criteri o regole certe e validate. Mentre da un lato ne appaiono evidenti i pregi, dall'altro molti sono ancora gli aspetti da chiarire. L'utilizzo di placcaggi con materiali compositi su strutture murarie sembra particolarmente adatto come presidio antisismico poiché esse risultano particolarmente vulnerabili a sollecitazioni di segno alternato non compatibili con la scarsa resistenza a trazione della muratura. L'uso dei materiali compositi appare dunque come un superamento delle tecniche tradizionali di rinforzo antisismico con le quali alla struttura esistente vengono affiancati elementi di rinforzo con funzione portante in sostituzione della struttura originaria. Questi elementi, più rigidi e resistenti, comportano inevitabilmente un aumento dei carichi ed alterazione del comportamento del sistema originario. Al contrario il rinforzo in FRP e GFRCM in virtù dell'esiguo peso e scarsissima rigidità non influenza il comportamento della struttura sotto carichi verticali mentre è in grado di intervenire qualora sia necessario un presidio nei confronti di azioni orizzontali come quelle prodotte dal sisma. Inoltre, le problematiche relative alla progettazione di interventi di consolidamento di strutture murarie investono molte e complesse questioni tra cui l'esigenza della conservazione; è infatti ormai parere condiviso che l'intervento di consolidamento debba essere rispettoso anche dell'identità strutturale originale dell'edificio su cui si interviene. Questa istanza implica la messa in opera di presidi che non stravolgano il funzionamento strutturale del complesso murario originario ovvero, l'impiego corretto dei materiali compositi come rinforzi per le strutture murarie è subordinato alla conoscenza del comportamento meccanico del sistema muratura-rinforzo. Si tratta infatti di un sistema costituito da due materiali, ambedue unilateri, completamente diversi anche per quanto riguarda il comportamento meccanico, fra i quali non

¹ Professore Ordinario, Dipartimento di Costruzioni, Università di Firenze

² Ricercatore, Dipartimento di Costruzioni, Università di Firenze

si instaura una vera e propria unione in quanto il rinforzo è applicato su una superficie ridotta rispetto a quella del supporto che peraltro non è in grado di diffondere le sollecitazioni. L'efficacia del placcaggio è comunque subordinata sia all'efficienza del collegamento d'interfaccia fra i due materiali sia a quello tra fibre e matrice.

Nel presente lavoro vengono riportati alcuni risultati derivanti da indagini sperimentali svolta su numerosi modelli di arco in muratura rinforzati sulle superfici di intradosso o di estradosso con nastri di CFRP e GFRCM.

2 INDAGINE SPERIMENTALE

2.1 Caratteristiche meccaniche dei materiali

Prima di effettuare le prove su modelli in scala di archi in muratura sono state eseguite prove meccaniche di caratterizzazione dei materiali impiegati nella costruzione dei modelli. Questi sono stati costruiti utilizzando elementi in laterizio delle dimensioni di 100x48x24mm ottenuti per taglio da mattoni standard pressati a mano (forniti dalla ditta "Laterizi S. Marco", Venezia) e da malta bastarda confezionata in laboratorio costituita da una parte di calce idrata tipo "Fiore", una parte di cemento Portland Composito tipo II/a-L UNI ENV 197-1 R 32,5, otto parti di sabbia del Ticino, due parti di acqua. Per caratterizzare i materiali impiegati sono state eseguite prove di compressione su: provini prismatici di laterizio delle dimensioni di 22x22x45mm; provini cubici delle dimensioni di 40x40x40mm di malta; elementi prismatici di muratura delle dimensioni di 100x225x264mm costruiti con gli stessi elementi impiegati nei modelli. Inoltre sono state effettuate anche prove di: trazione diretta su provini prismatici in laterizio delle dimensioni di 40x10x80mm con intagli; trazione per flessione su provini prismatici delle dimensioni di 110x250x50mm e su provini prismatici in malta delle dimensioni di 40x40x160mm. I parametri meccanici ricavati da tali prove sono riportati nella Tabella 1.

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati per la costruzione dei modelli

	Modulo di Young (MPa)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a trazione diretta (MPa)	Resistenza a trazione per flessione (MPa)
Mattone	1785	17.39	1.7	3.53
Malta	133	0.78	-	0.23
Muratura	830	8.6	-	-

Per rinforzare i modelli considerati nella sperimentazione sono stati utilizzati due differenti materiali compositi, entrambi costituiti da fibre che vengono impregnate da una matrice quando poste in opera: CFRP (carbon fiber reinforced polymer) and GFRCM (glass fiber reinforced cement). Il primo, costituito da un tessuto unidirezionale di fibre di carbonio (spessore 0,16mm) e da una matrice epossidica, è il sistema MBrace prodotto dalla ditta MAC S.p.A (Treviso, Italy), il secondo è costituito da una rete di fibre di vetro (maglia 5x5,9mm) prodotta dalla ditta GAVAZZI S.p.A. (Lecco, Italy), generalmente impiegata per gli intonaci armati, e da una matrice cementizia prodotta ad hoc presso il Laboratorio del Dipartimento di Costruzioni dell'Università di Firenze. La malta cementizia utilizzata come matrice è composta da cemento Portland titolo 425, sabbia, acqua, fumi di silice e agenti fluidificanti nel rapporto di 1:3:0.65:0.19:0.19. Per caratterizzare tale malta sono state eseguite prove di flessione su tre punti su provini 40x40x160mm per la determinazione della resistenza a trazione per flessione, prove di trazione diretta su provini 40x40x160mm, prove di compressione sui monconi risultanti dalla prova di flessione. I valori dei parametri meccanici derivati da tali prove, eseguite sia a 14 che a 28 giorni di maturazione della malta, sono riportati nella Tabella 2.

Le principali caratteristiche meccaniche dei componenti i due sistemi di rinforzo impiegati (CFRP e GFRCM) sono riportate in Tabella 3.

Tabella 2. Valori dei parametri meccanici della malta cementizia del composito GFRCM.

Maturazione	Resistenza a trazione per flessione (MPa)	Resistenza a trazione diretta (MPa)	Modulo di Young (MPa)	Resistenza a compressione (MPa)
14 giorni	5,5	3,1	-	35,0
28 giorni	6,0	3,3	15000	38,0

Tabella 3. Caratteristiche meccaniche delle fibre di carbonio e della matrice epossidica (componenti il sistema MBrace, MAC S.p.A., Treviso, Italia), della rete di vetro (GAVAZZI S.p.A., Lecco, Italy) e della malta cementizia confezionata in laboratorio.

	Modulo di Young a trazione (MPa)	Modulo di Young a compressione (MPa)	Resistenza a trazione diretta (MPa)	Resistenza a trazione unitaria (N/cm)	Coefficiente di espansione termica (1/°C)	Deformazione ultima (%)
Fibre di carbonio	230000	-	3500	5660	-	1.5
Matrice epossidica	3000	-	50	-	60	2.5
Fibre di vetro	87000	-	-	-	5	5.5
Rete di vetro	-	-	-	900	-	-
Matrice cementizia	-	15000	3.3	-	6	0.01

2.2 Prove su modelli di arco

Sono stati realizzati 16 modelli di arco in laterizio e malta bastarda, contrassegnati dalla lettera N seguita da un numero di ordine progressivo, con luce di 150cm, raggio di curvatura di 91.5cm, freccia di 43.25cm e sezione retta di 10x10cm. Tutti i modelli sono stati sottoposti alla stessa condizione di carico consistente in una forza concentrata verticale applicata in chiave. Ad esclusione di due modelli N1 e N2, portati a collasso senza rinforzo, tutti gli altri sono stati rinforzati tramite placcaggio, con nastri di materiali compositi o CFRP o GFRCM, sulle superfici di intradosso o di estradosso secondo tre distinti schemi (Fig.1). Per gli schemi di rinforzo B e C (Fig.1) sono state applicate tre differenti larghezze della striscia di rinforzo, rispettivamente di 1.25cm, 2.5cm e 5cm, con l'obiettivo di valutare la differente efficacia del rinforzo al variare del rapporto fra la larghezza dell'arco e quella del rinforzo. Il set up di prova a spostamento impresso (Fig.1) è stato messo a punto nel Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture del Dipartimento di Costruzioni dell'Università di Firenze; il carico applicato in chiave è stato incrementato step by step e registrato tramite una cella di carico della capacità di 5kN per gli archi non rinforzati e della capacità di 10kN per gli archi rinforzati (Fig.1).

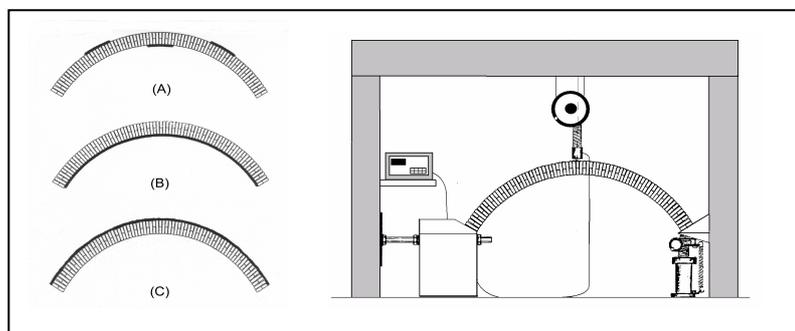


Figura 1. Schemi di rinforzo e apparato di prova

Con l'intento di applicare le strisce di rinforzo su strutture danneggiate, tutti i modelli di arco sono stati sottoposti ad un processo preliminare di carico fino all'apertura di tre

cerniere alternate, la prima, in corrispondenza dell'estradosso in chiave e le altre due poste, in posizione simmetrica, alle reni rispettivamente per valori medi del carico di 300N e di 400N. Per avere un termine di riferimento i modelli N1 e N2 sono stati portati al collasso in assenza di rinforzo. In entrambi i casi, dopo l'apertura delle prime tre cerniere all'imposta e alle reni, si è attivato il meccanismo di collasso per l'apertura di due ulteriori cerniere all'estradosso in corrispondenza delle sezioni di imposta per un valore medio del carico di 450N.

I modelli contrassegnati N3 e N4, rinforzati attraverso l'applicazione di tre strisce di CFRP poste (Fig.1A) a cavallo delle fratture (intradosso in chiave ed estradosso alle reni) sono collassati per la formazione di un meccanismo di apertura di quattro cerniere alternate intradosso/estradosso posizionate in prossimità del bordo delle strisce di rinforzo, secondo uno schema non simmetrico, per un valore medio del carico pari a 700N; la qualità del meccanismo di collasso non è stata alterata dal rinforzo mentre il valore del carico di collasso è passato da 450N a 700N come d'altronde era prevedibile.

I modelli, contrassegnati N5 ed N6, rinforzati attraverso l'applicazione di una striscia continua di CFRP larga 5cm su tutta la superficie di intradosso, hanno esibito un meccanismo di collasso caratterizzato prima dalla formazione di due cerniere all'intradosso in corrispondenza delle reni per un valore del carico pari a 2460N e successivamente da schiacciamento della muratura in chiave per un valore del carico pari a 6580 N mentre la striscia di CFRP è rimasta ovunque perfettamente aderente alla superficie di intradosso (Fig.2A).

I modelli contrassegnati N7 e N8, rinforzati attraverso l'applicazione di una striscia continua di CFRP larga 2.5cm su tutta la superficie di intradosso, hanno esibito un meccanismo di collasso caratterizzato prima dalla formazione di due cerniere all'intradosso in corrispondenza delle reni per un valore del carico pari a 1900N e successivamente da schiacciamento della malta dei giunti adiacenti il blocco in chiave accompagnato dal contemporaneo scollamento della striscia di rinforzo sempre in prossimità della chiave dell'arco per un valore del carico pari a 4520N (Fig.2B).

I modelli contrassegnati N9 e N10, rinforzati attraverso l'applicazione di una striscia continua di CFRP larga 1.25cm su tutta la superficie di intradosso, hanno esibito un meccanismo di collasso caratterizzato, di nuovo, prima dalla formazione di due cerniere all'intradosso in corrispondenza delle reni per un valore del carico pari a 1050N e successivamente per scollamento del rinforzo in prossimità della chiave dell'arco, senza schiacciamento della muratura, per un valore del carico pari 3560N. Dopo il completo scollamento del rinforzo, l'arco si è trasformato nel classico meccanismo di cerniere alternate esibito dai modelli di arco senza rinforzo (Fig.2C).

I modelli rinforzati con striscia continua di CFRP applicata per tutta la lunghezza dell'estradosso, indipendentemente dalla larghezza (rispettivamente 5cm nei modelli N11 e N12, 2.5cm nei modelli N13 e N14 e 1.25cm nei modelli N15 e N16) hanno esibito tutti comportamenti qualitativamente identici ma a livelli di carico differenti. In particolare il meccanismo di collasso ricorrente in ogni caso è caratterizzato da:

- formazione di una prima cerniera all'estradosso in corrispondenza della sezione di chiave per valori del carico rispettivamente di 2210N per i modelli contrassegnati N11 e N12; di 1700N per i modelli contrassegnati N13 e N14 e di 1080N per i modelli contrassegnati N15 e N16;

- comparsa di fratture (che non investono l'intera altezza delle sezioni poiché la presenza del rinforzo impedisce la formazione delle cerniere in intradosso alle reni) in prossimità dell'estradosso sotto al rinforzo nei giunti di malta ortogonali all'asse in corrispondenza delle reni per valori medi del carico rispettivamente di 5850N per i modelli contrassegnati N11 e N12, di 2850N per i modelli contrassegnati N13 e N14 e di 2455N per i modelli contrassegnati N15 e N16;

- scorrimento in corrispondenza dei giunti alle imposte per valori medi del carico rispettivamente di 8030N per i modelli contrassegnati N 11 e N12, di 7130N per i modelli contrassegnati N 13 e N14 e di 5920N per i modelli contrassegnati N 15 e N16 (Fig.2D).

I modelli contrassegnati N17 e N18, rinforzati con una striscia di GFRCM su tutta la superficie di intradosso dell'arco hanno esibito un comportamento qualitativamente simile a quello degli archi senza rinforzo per cui il collasso si verifica per formazione successiva di cinque cerniere alternativamente all'intradosso ed estradosso. Questa circostanza denuncia chiaramente che il funzionamento della struttura non viene alterato dalla presenza del rinforzo il cui unico effetto consiste dunque semplicemente nell'innalzamento della capacità portante della struttura. Infatti l'arco arriva a collasso con formazione in successione di:

- due cerniere in intradosso alle reni per un valore medio del carico di 3060N;
- di una cerniera in chiave all'estradosso, consentita prima dalla grande deformabilità della rete in fibre di vetro e poi dalla rottura per strappo della stessa, per un valore medio del carico di 4520N;
- due cerniere alle imposte in estradosso per un valore medio del carico di 5570N (Fig.2E).

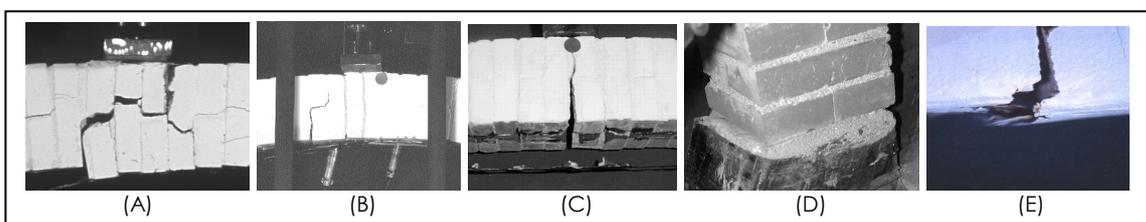


Figura 2. Modalità di rottura: (A)CFRP di 5cm in intradosso; (B) CFRP di 2.5cm in intradosso; (C) CFRP di 1.25cm in intradosso; (D) CFRP di 5cm in estradosso; (E)GFRCM di 10cm in intradosso.

Le Figure 3-5 presentano a confronto alcuni diagrammi carico-spostamento, registrati durante le prove. In particolare in Figura 3 sono messi a confronto i diagrammi dei modelli, con rinforzi in CFRP della stessa larghezza, applicati in estradosso e in intradosso; in Figura 4 sono messi a confronto, nella prima immagine i diagrammi dei modelli rinforzati in CFRP in intradosso e nella seconda quelli dei modelli rinforzati in estradosso ambedue al variare della larghezza delle strisce applicate. Infine in Figura 5 sono riportati a confronto i diagrammi di un modello con rinforzo in intradosso di CFRP largo 2,5 cm e di uno con rinforzo, sempre in intradosso, in GFRCM largo 10cm. il confronto fra questi ultimi due modelli, con rinforzi di materiali e dimensioni diverse si basa sul fatto che la forza di trazione sopportabile dalle fibre nei due casi è sostanzialmente la stessa.

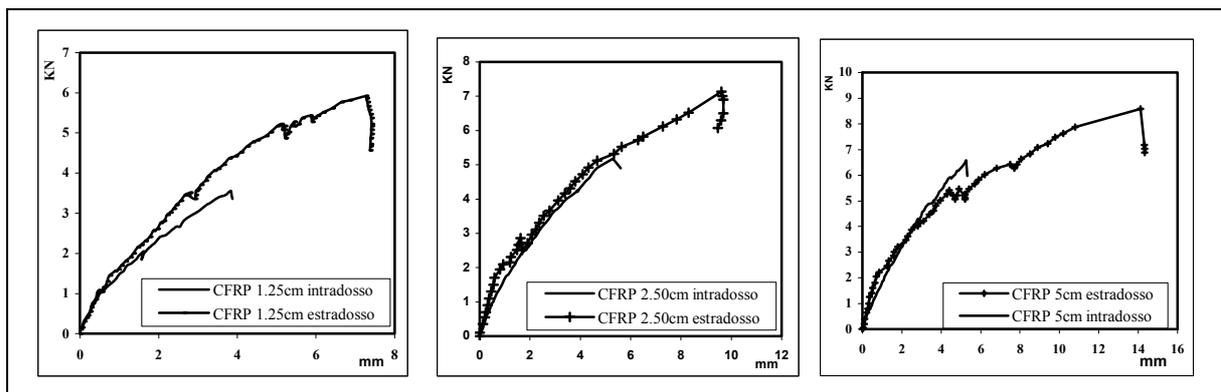


Figura 3. Diagrammi carico-spostamento

I diagrammi carico-spostamento di tutti i modelli esibiscono un primo tratto lineare che nel caso degli archi rinforzati in estradosso finisce con l'apertura della cerniera in chiave mentre nel caso degli archi con rinforzo in intradosso, termina con l'apertura delle

due cerniere alle reni. Dopo il primo tratto lineare i diagrammi si differenziano esibendo nel caso di rinforzo in estradosso un comportamento più duttile rispetto a quello indotto dal rinforzo in intradosso. Tale maggiore duttilità è da mettere in relazione alle numerose fratture che si manifestano alle reni dove la presenza del rinforzo impedisce l'apertura delle cerniere all'intradosso.

In ogni diagramma carico spostamento sono stati identificati i seguenti punti caratteristici: l_i , inizio del tratto lineare; l_f , fine del tratto lineare; m , carico di picco; l' , intersezione tra la retta del tratto lineare e la retta orizzontale corrispondente al carico di picco m ; u , carico ultimo, convenzionalmente uguale a $2/3$ del carico di picco. Utilizzando i valori delle ascisse e delle ordinate dei punti caratteristici individuati sui diagrammi carico spostamento sono stati determinati i seguenti parametri meccanici: rigidezza tangente $K_t = (y_l - y_{l_i}) / (x_l - x_{l_i})$, rigidezza secante $K_s = (y_l / x_l)$, duttilità cinematica $\mu_c = (x_m / x_{l'})$ e duttilità cinematica disponibile $\mu_{ac} = (x_u / x_m)$. I valori dei parametri meccanici calcolati per ogni tipo di modello sono riportati nella Tabella 4 insieme ai valori dei carichi di collasso.

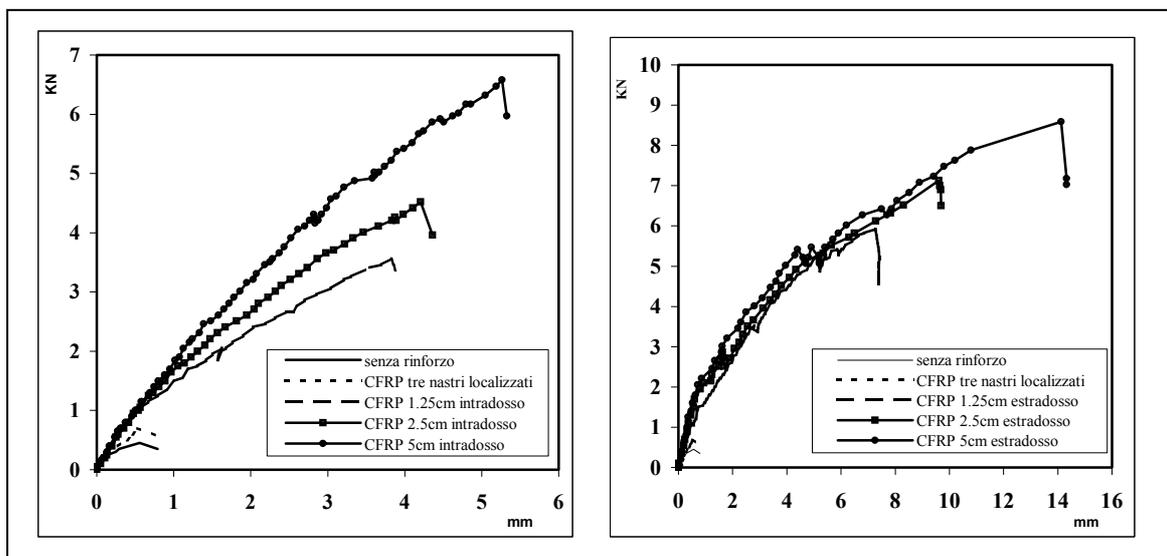


Figura 4. Diagrammi carico-spostamento

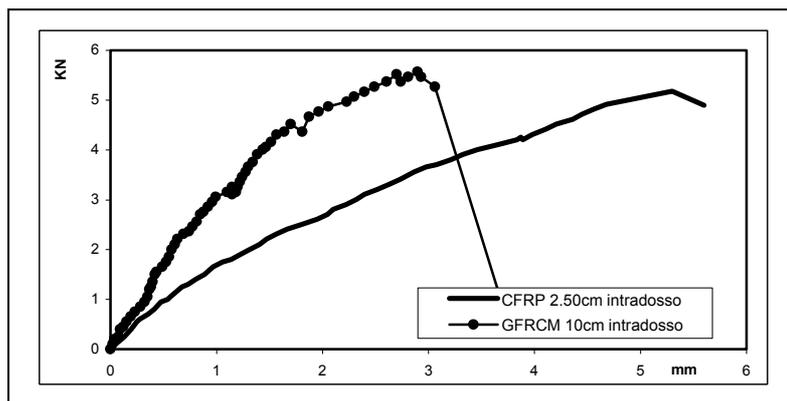


Figura 5. Diagrammi carico-spostamento

3 CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI SPERIMENTALI

L'analisi dei risultati sperimentali raccolti nella Tabella 4 ha permesso le seguenti considerazioni:

1. Il valore del carico alla fine del tratto lineare aumenta con la larghezza del rinforzo in CFRP sia per i rinforzi in intradosso che per quelli in estradosso. Il rinforzo di 1.25cm

produce un aumento dell'ordine del 250% rispetto al modello non rinforzato. Il raddoppio della larghezza del rinforzo (2.5cm) produce un aumento del 500%, mentre un ulteriore raddoppio (5cm) produce l'aumento del 700%. Indipendentemente dalla larghezza del rinforzo, la fine del tratto lineare coincide, nel caso di rinforzo in intradosso, nell'apertura completa delle cerniere alle reni, mentre nel caso di rinforzo in estradosso, nella completa apertura della cerniera in chiave.

Tabella 4. Valori dei parametri meccanici dei modelli di arco

Modelli di archi	Carico alla fine del tratto lineare (N)	Aumento del carico elastico lineare (%)	Fratture alle reni (N)	Carico di picco (N)	Aumento del carico di picco (%)	Rigidezza tangente (N/μm)	Rigidezza secante (N/μm)	Duttilità cinematica	Duttilità cinematica disponibile
Senza rinforzo (N1-N2)	300	-	400	450	-	2	0.81	2.43	1.07
CFRP 3 nastri (N3-N4)	300	0	-	700	55	2	1.32	1.89	3.96
CFRP 1.25cm intradosso (N9-N10)	1050	250	1050	3560	691	1.95	0.93	2.36	1.06
CFRP 1.25cm estradosso (N15-N16)	1080	260	2455	5870	1204	2.10	0.81	2.50	1.02
CFRP 2.50cm intradosso (N7-N8)	1900	533	1900	5180	1051	1.95	1.08	2.27	1.21
CFRP 2.50cm estradosso (N13-N14)	1700	466	2850	7130	1484	2.10	0.66	3.63	0.90
CFRP 5.00cm intradosso (N5-N6)	2460	720	2460	6580	1362	1.95	0.57	1.80	1.67
CFRP 5.00cm estradosso (N11-N12)	2210	637	5850	8590	1808	2.10	1.25	3.92	1.17
GFRCCM 10cm intradosso	3000	900		5570	1138	3.28	1.93	1.7	0.79

2. Per quanto riguarda il carico di collasso al variare della larghezza della striscia di rinforzo in CFRP, si osservano risultati differenti se trattasi di rinforzo in intradosso o in estradosso. I valori dei carichi di collasso dei modelli rinforzati in estradosso sono maggiori rispetto a quelli con rinforzo in intradosso della stessa larghezza; si osserva inoltre che tale differenza diminuisce con l'aumentare della larghezza della striscia: in particolare per larghezze del rinforzo di 1.25cm, 2.5cm e 5 cm i carichi di collasso degli archi con rinforzo in estradosso sono superiori rispettivamente del 65%, del 37% e del 31% rispetto a quelli che competono agli archi con rinforzo in intradosso.

3. L'aumento del valore del carico di collasso all'aumentare della larghezza della striscia di rinforzo è circa costante nel caso di rinforzo estradosso (691% per 1.25cm, 1051% per 2.5cm e 1362% per 5cm, rispetto al modello senza rinforzo). L'aumento del valore del carico di collasso all'aumentare della larghezza della striscia di rinforzo applicata in intradosso varia al variare della larghezza della striscia; si registra infatti un aumento elevato del carico di collasso passando dal rinforzo di 1.25cm a quello di 2.5cm e uno decisamente minore passando da 2.5cm a 5cm. La regolarità nell'aumento del carico di collasso per i modelli con rinforzo in estradosso può essere ascritta al fatto che la modalità di collasso manifestata è sempre la stessa indipendentemente dalla larghezza del rinforzo; infatti, al contrario, come già osservato nel caso

dei modelli con il rinforzo in intradosso le modalità di collasso sono completamente diverse al variare della larghezza del rinforzo.

4. Le variazioni del parametro duttilità cinematica in funzione della larghezza del rinforzo differiscono sostanzialmente nei due casi di rinforzo in intradosso e in estradosso. Infatti nei modelli rinforzati in intradosso il valore di tale parametro diminuisce all'aumentare della larghezza del rinforzo, mentre aumenta nei modelli con rinforzo in estradosso. Infatti nel caso di modelli rinforzati in intradosso l'aumento della larghezza del rinforzo produce meccanismi di rottura sempre più fragili, finì allo schiacciamento della muratura.

5. Il confronto fra i risultati forniti dai modelli rinforzati in intradosso con GFRCM largo 10cm e CFRP largo 2.5cm mostra che:

-il primo tipo di rinforzo rende l'arco ovviamente più rigido in virtù di un aumento del 10% dell'area della sezione;

- il carico alla fine tratto lineare dell'arco con GFRCM è quasi il doppio di quello dell'arco con rinforzo in CFRP mentre il carico di collasso è maggiore solo del 10%;

- la modalità di collasso indotta dal rinforzo in GFRCM, legata al superamento della resistenza a trazione della rete di vetro, suggerisce un facile criterio di dimensionamento del rinforzo da applicare.

4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Briccoli Bati, S., Rovero, L., 2000. "Consolidation of masonry arches with carbon fibers reinforced plastics", 12th international Brick Block Masonry Conference, Madrid

Briccoli Bati, S., Rovero, L., Tonietti, U., 2003. " Four points bending test on masonry elements reinforced with composite materials", Composites in Construction, Editoriale Bios, Cosenza

Briccoli Bati, S., Rovero, L., Tonietti, U., 2004. "Mechanical behavior of masonry specimens reinforced with CFRCM (Carbon Fibre Reinforced Cement Matrix) sheets", RRRTEA '04, Aracne, Roma

Briccoli Bati, S., Rovero, L., Tonietti, U., 2004. "Strengthening of masonry arches with composite materials", Proceedings of the First International Conference on Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration, Liguori Editore, Napoli

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

Briccoli Bati, S., Marilli, F., Rovero, L., Tonietti, U., 2004. "Prove di trazione su placcaggi in GFRCM e confronto con rinforzi in CFRCM", Atti del II Convegno Nazionale MMSS-FRP, Venezia, Italia.

Briccoli Bati, S., Rovero, L., Tonietti, U., 2007. "Strengthening of masonry arches with composite materials", in stampa su ASCE Journal of Composite Material, per febbraio

Foraboschi, P. 2004. "Strengthening of Masonry Arches with Fiber-Reinforced Polymer Strips". J. Compos. for Constr., ASCE, 8(3): 191-202

Triantafillou, T.C., Fardis, M.N. 1997. "Strengthening of hystoric masonry structures with composite materials". Materials and Structures, RILEM, 30(202): 486-496

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.