



Rinforzo Intradossale Di Archi In Muratura Con Lamine Pultruse In FRP

Antonio Borri, Giulio Castori, Marco Corradi

Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università degli Studi di Perugia. Via Duranti 93, 06125 Perugia

Keywords: Archi; Muratura; Materiali Compositi; Lamine in Carbonio.

ABSTRACT

In questo lavoro vengono presentati i risultati di una campagna sperimentale riguardante lo studio relativo alle possibilità di applicazione, per il rinforzo intradossale di strutture ad arco in muratura, di lamine pultruse in FRP, ovvero di elementi che per le proprie caratteristiche intrinseche possono risolvere talune delle problematiche proprie degli interventi con nastri o tessuti in FRP. Sebbene l'utilizzo degli FRP per il rinforzo di archi e volte sia ormai entrato nella prassi operativa corrente, nell'ipotesi di interventi intradossali varie campagne di indagine sperimentale hanno evidenziato come il comportamento all'interfaccia influenzi notevolmente le prestazioni della struttura: il distacco del rinforzo, a seguito della crisi del supporto o del sistema di incollaggio, può infatti determinare l'innescò di fenomeni di collasso prematuro che risulta necessario prevedere in fase progettuale. In questa ottica la scelta delle lamine è dettata dalla volontà di sfruttare la resistenza a trazione di elementi provvisti di rigidità a flessione e resistenza a compressione. Ammettendo l'utilizzo di connettori (anche in numero limitato), in grado di impedire meccanicamente lo scorrimento all'interfaccia tra rinforzo e supporto, è possibile infatti ottenere elementi di rinforzo che, a differenza di nastri e tessuti, sono in grado di resistere per forma.

A supporto dello studio effettuato è stata impostata una campagna sperimentale su 15 modelli di archi murari rinforzati intradossalmente utilizzando nastri in GRFP e lamine in CFRP. La sperimentazione ha consentito di verificare la validità dell'intervento proposto individuando, contemporaneamente, alcune delle problematiche più comuni alle tecniche di rinforzo correntemente utilizzate.

1 INTRODUZIONE

Le strutture ad arco sono caratterizzate, in linea generale, da una buona capacità di adattamento alle variazioni della configurazione geometrica, potendo distribuire le deformazioni sui giunti di malta senza determinare, entro certi limiti, la formazione di lesioni significative. Risulta dunque evidente come l'innescò dei cinatismi di dissesto non sia condizionato tanto dal superamento dei limiti di resistenza dei materiali, quanto dall'incapacità dei vincoli di contrastare le azioni trasmesse dalla volta, ovvero dall'incapacità della struttura di adattarsi a quegli spostamenti orizzontali e verticali delle imposte, che, benché responsabili dell'insorgere di fessurazioni, consentono alla struttura stessa di ritrovare sufficienti condizioni di equilibrio per la configurazione variata (Heyman 1982).

E' chiaro come una simile possibilità di movimento debba essere necessariamente considerata in sede progettuale in modo adeguato, evitando di introdurre dispositivi diversi da quelli di semplice presidio: obiettivo dell'intervento dovrebbe essere, in altri termini, quello di inserire elementi di rinforzo che si manifestano solo nel caso di eventi straordinari (quali un sisma), senza alterare, quindi, l'assetto statico ordinario, onde conservare, inalterati, i caratteri costruttivi della struttura originaria (ICOMOS 2003).

Un'attenta analisi delle soluzioni di tipo tradizionale (archi di rinforzo intradossali, tiranti, catene, ecc.), quando supportata da una conoscenza approfondita dei materiali messi a disposizione dalla moderna tecnologia, può fornire però spunti interessanti per la proposta di soluzioni alternative, la cui efficacia va

chiaramente dimostrata attraverso una opportuna fase di sperimentazione.

L'utilizzo degli FRP per il rinforzo di archi e volte è ormai entrato nella prassi operativa corrente (Basilio et al. 2004; Borri et al. 2009a; De Lorenzis et al. 2007; Valluzzi et al. 2001). Gli interventi di questo tipo vengono realizzati o all'estradosso o all'intradosso della struttura, a seconda delle diverse possibilità e dei vari condizionamenti (quali ad es., la presenza di pavimenti di pregio o, all'intradosso, di affreschi o pitture). Correntemente vengono utilizzati nastri in tessuto, anche per una maggiore semplicità di adattamento alle superfici; numerosi sono però anche i casi di rinforzi realizzati con lamine in FRP.

Dopo una prima introduzione delle problematiche relative al rinforzo intradossale di archi in muratura con materiali compositi, nel presente lavoro viene esaminato l'utilizzo, sempre all'intradosso, di lamine pultruse in FRP, ovvero di elementi che per le proprie caratteristiche intrinseche sembrano essere adatti a risolvere parte delle problematiche precedentemente citate. Nello specifico, viene riportata la descrizione di una campagna di prove sperimentali condotta su quindici prototipi di archi in muratura di mattoni soggetti ad un carico verticale applicato a metà della propria luce. Nel lavoro vengono descritte alcune problematiche specifiche degli interventi intradossali, evidenziando quelle situazioni che possono condizionare in misura rilevante la buona riuscita dell'intervento e confrontando il comportamento degli archi rinforzati con le fibre con quello degli archi rinforzati con le lamine, ovvero con elementi che per le proprie caratteristiche intrinseche possono risolvere talune delle problematiche proprie degli interventi con FRP intradossali

2 INTERVENTI DI RINFORZO INTRADOSSALE

L'incollaggio di elementi resistenti a trazione sul contorno di strutture in muratura, ne modifica in maniera sostanziale il comportamento statico: l'applicazione di nastri in composito, conferendo al materiale murario quella resistenza a trazione, che congenitamente non possiede, ne elimina l'aspetto meccanico più sfavorevole, assicurando indubbi vantaggi strutturali (Briccoli Bati e Rovero 2008; Foraboschi 2004).

Tale tecnica elimina quindi l'aspetto meccanico più sfavorevole che caratterizza le murature, assicurando indubbi vantaggi

strutturali. Ma non solo. I rinforzi possono essere localizzati sui soli contorni in trazione ed avere sezione estremamente ridotta, comportando quindi contenuti apporti materici; inoltre, sono rimovibili. Infine, i rinforzi tendono a non alterare il comportamento d'esercizio e, nelle situazioni estreme, essi si limitano a collaborare con la muratura.

Tutto ciò considerato, la tecnica in questione assicura indubbi vantaggi anche nella prospettiva del restauro e della conservazione, sebbene un suo esame più approfondito ponga in evidenza alcune questioni teoriche fondamentali.

Come noto (Borri e Castori 2004; De Lorenzis e Zavarise 2009; Eshwar et al. 2005), nell'ipotesi di interventi intradossali il comportamento all'interfaccia influenza notevolmente le prestazioni della struttura: il distacco del rinforzo (Figura 1), a seguito della crisi del supporto o del sistema di incollaggio, può infatti determinare l'innescò di fenomeni di collasso prematuro che risulta necessario prevedere in fase progettuale.

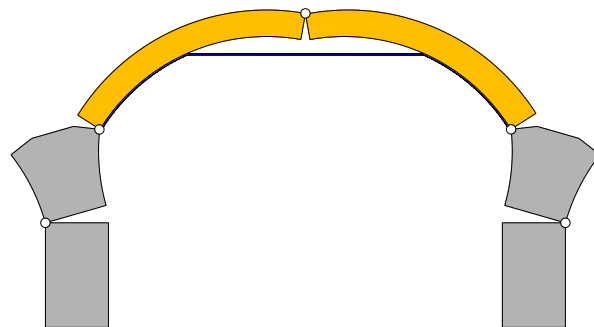


Figura 1. Cinematismo di crisi per distacco del rinforzo.

La presenza della curvatura (Figura 2) determina infatti l'insorgere, in accoppiamento alle tensioni tangenziali τ , cui è deputato il trasferimento della forza di trazione al rinforzo, di uno stato di tensione radiale σ , il cui valore può essere determinato per via analitica:

$$\sigma = \frac{T}{b_{reinf} \cdot R} \quad (1)$$

dove con b_{reinf} si è indicata la larghezza del rinforzo e con R il raggio di curvatura dell'arco.

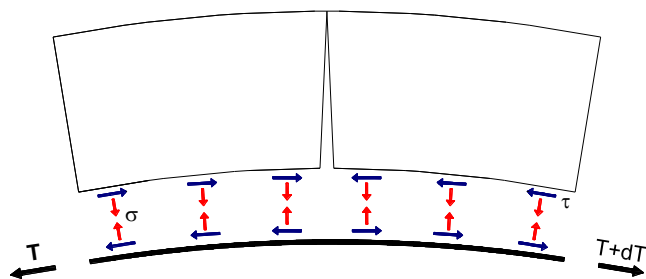


Figura 2. Stato di tensione all'interfaccia rinforzo-muratura.

In queste condizioni l'equilibrio è garantito solo dall'aderenza tra la resina e la superficie

dell'arco. Nel momento in cui, a seguito della crisi del supporto o del sistema di incollaggio, tale equilibrio viene meno, i nastri, non avendo rigidità flessionale, si distaccano (Figura 3) e non possono più trasmettere all'arco quella resistenza a trazione necessaria ad impedire l'apertura della cerniera e, con essa, l'attivazione del cinematismo di collasso per labilità.

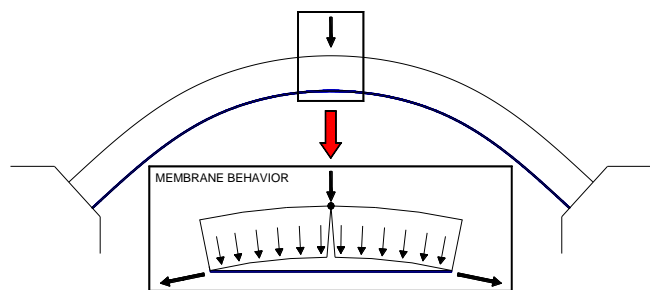


Figura 3. Stato di tensione radiale agente all'intradosso dell'arco: comportamento dei rinforzi senza rigidità flessionale.

In questa ottica la scelta delle lamine è dettata dalla volontà di sfruttare la resistenza a trazione di elementi provvisti di rigidità a flessione e resistenza a compressione (Figura 4). Ammettendo l'utilizzo di connettori (anche in numero limitato), in grado di impedire meccanicamente lo scorrimento all'interfaccia tra rinforzo e supporto, è possibile infatti ottenere elementi di rinforzo che, a differenza di nastri e tessuti, sono in grado di resistere per forma.

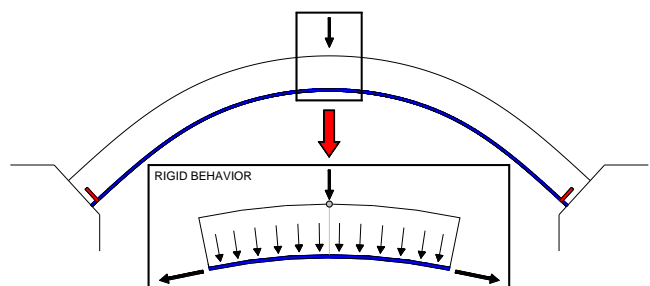


Figura 4. Stato di tensione radiale agente all'intradosso dell'arco: comportamento dei rinforzi con rigidità flessionale.

L'equilibrio di cui sopra non viene così più a dipendere dalla tenuta dell'adesione tra rinforzo e supporto. Le lamine possono continuare a trasmettere all'arco quella resistenza a trazione necessaria ad impedire l'apertura della cerniera, anche dopo l'eventuale crisi del supporto o del sistema di incollaggio (Borri et al. 2009b).

Si ritorna in qualche modo ad una tecnica premoderna di presidio, che è la costruzione di archi di rinforzo intradossali (AAVV 1999). Laddove la presenza dell'arco non ha più lo scopo di aumentare lo spessore in chiave, consentendo così una variazione maggiore della linea dei carichi e dunque una maggiore stabilità,

quanto bensì quello di sostenere gli sforzi di trazione che si sviluppano al bordo teso. Si va ad aggiungere un arco resistente a trazione che pur non potendo prevenire la formazione di fessure nel supporto murario, ne impedisce però l'apertura.

3 CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

3.1 Malta cementizia

La malta utilizzata nella costruzione degli archi è la WA 500 della Premier, è una malta secca premiscelata composta di calce idrata, cemento Portland, sabbie classificate ed additivi specifici per migliorare la lavorazione e l'adesione.

Una serie di 6 provini è stata sottoposta a prove di flessione; i rimanenti 12 semiprismi sono stati sottoposti a prove di compressione. Le prove di caratterizzazione della malta sono state condotte secondo le indicazioni contenute nelle ASTM C 348 e C 349. Per quanto riguarda le prove di flessione, i risultati dei test, calcolati con l'equazione:

$$R_f = \frac{6M}{b^3} = \frac{6Pl}{b^3 \cdot 4} = 1.5 \frac{Pl}{b^3} \quad (2)$$

dove P è il carico massimo, l l'interasse tra gli appoggi e b il lato della sezione quadrata, hanno fornito un valore medio della resistenza pari a 0.36 ± 0.03 MPa.

I 12 rimanenti semiprismi ricavati dalle prove a flessione sono stati poi sottoposti a prove di compressione. Dai risultati dei test, secondo l'espressione:

$$R_c = \frac{P}{b^2} \quad (3)$$

si è ottenuta una resistenza media a compressione di 6.95 ± 0.14 MPa.

3.2 Laterizi

Per la costruzione dei pannelli sono stati utilizzati mattoni pieni delle dimensioni nominali di 250x125x55 mm, realizzati da Fornaci Briziarelli Marsciano S.p.A. Anche per quanto riguarda i mattoni di laterizio pieno si è proceduto ad una caratterizzazione meccanica attraverso prove di compressione e flessione.

Le prove di compressione uniassiale sono state condotte su sei provini che hanno fornito una tensione media di rottura a compressione pari a 20.99 ± 2.31 MPa. Per ricavare la resistenza a trazione dei mattoni sono state effettuate sei

prove di flessione che hanno fornito una tensione di rottura a flessione media di 0.81 ± 0.22 MPa.

3.3 Materiale di rinforzo

Le caratteristiche delle fibre e delle matrici impiegate per la realizzazione dei rinforzi sono riportate nella tabella seguente.

Tabella 1. Proprietà meccaniche dei rinforzi.

Proprietà	Reinforcement Type	
	Fibre vetro	Lamine carbonio
Spessore (mm)	0.231	1.400
Tensione rottura (N/mm ²)	1940	3252
Modulo Elastico (N/mm ²)	70804	205381
Deformazione ultima (%)	2.8	1.6

Le caratteristiche meccaniche, per entrambe le tipologie di rinforzo, sono state determinate attraverso di prove di trazione eseguite secondo le indicazioni contenute nelle ASTM D 3039. Le prove pertanto sono state eseguite in controllo di spostamento alla velocità di 1 mm/min utilizzando un dinamometro Instron tipo 4505. Tali prove condotte su 6 provini hanno confermato i dati riportati nella scheda tecnica del produttore.

3.4 Connettori in aramide

I connettori messi in opera per l'ancoraggio delle lamine in carbonio all'intradosso dell'arco sono stati realizzati in laboratorio utilizzando fibre di aramide e resina epossidica.

Le fasi della preparazione sono state le seguenti:

- La fibra unidirezionale di aramide è stata tagliata in pezzi di lunghezza 16 cm così da poter realizzare connettori con 8 cm di fibra resinata (parte scoperta), più 8 cm non resinati (parte protetta dal nastro).
- La resina epossidica è stata stesa, tramite un rullo, sulla parte libera della fibra (Figura 5a), che è stata quindi arrotolata su se stessa e inserita all'interno di un tubo forma con diametro interno di 8 mm.
- Atteso il tempo di maturazione della resina il tubo-forma è stato rimosso e con esso la parte di fibra in eccesso (Figura 5b).

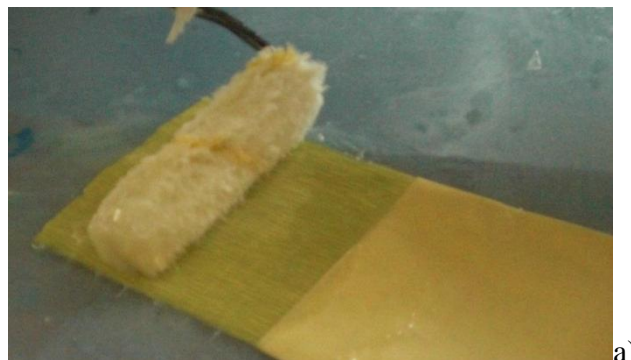


Figura 5. a) Resinatura fibra; b) Essiccamento e rimozione fibra in eccesso.

Per caratterizzare il collegamento tra la muratura e i connettori sono state realizzate prove di pull out, cioè di estrazione del connettore solidarizzato alla muratura per una determinata lunghezza d'ancoraggio

Per determinare la resistenza dell'adesione dei connettori sono state effettuate delle prove di pull-off su sedici provini. Nella configurazione adottata, i provini sono stati impregnati per tutta la loro lunghezza e inseriti all'interno di campioni cubici, confezionati con malta idraulica, con quattro diverse lunghezze di ancoraggio (25 mm, 50 mm, 75 mm e 100 mm). Ciascun connettore è stato quindi collegato all'apparecchio per la prova di strappo, costituito da un martinetto idraulico cavo, in grado di fornire il valore della forza di picco allo strappo tangenziale.

Il valore medio della forza di estrazione per le quattro differenti lunghezze di ancoraggio è stato pari rispettivamente a 22 kN, 29 kN, 36 kN e 31 kN. Sulla base di tali risultati si è deciso quindi di adottare per gli interventi di rinforzo sugli archi una lunghezza di ancoraggio di 80 mm.

3.5 Prove di pull-off

Per determinare la resistenza dell'adesione a sforzi di trazione perpendicolari alle fibre di rinforzo sono state effettuate delle prove di pull-off (Figura 6a) su dodici provini costituiti da mattoni rinforzati con nastri in GFRP e lamine in carbonio. Il valore medio della tensione di trazione è stato di 1.27 MPa per i provini rinforzati con nastri in GFRP e di 1.13 MPa per quelli rinforzati con lamine in carbonio.

Per quanto riguarda invece la modalità di rottura, in ciascuna prova la crisi è stata di tipo coesivo (FIB 2001), ovvero è avvenuta per distacco della superficie esterna del mattone, senza alcun coinvolgimento dell'interfaccia con l'adesivo (Figura 6b, c). I valori di resistenza ottenuti corrispondono pertanto alla tensione di trazione massima sopportabile dal mattone per trazioni perpendicolari alla sua superficie maggiore, piuttosto che alla tensione d'aderenza tra rinforzo e cortecchia muraria.

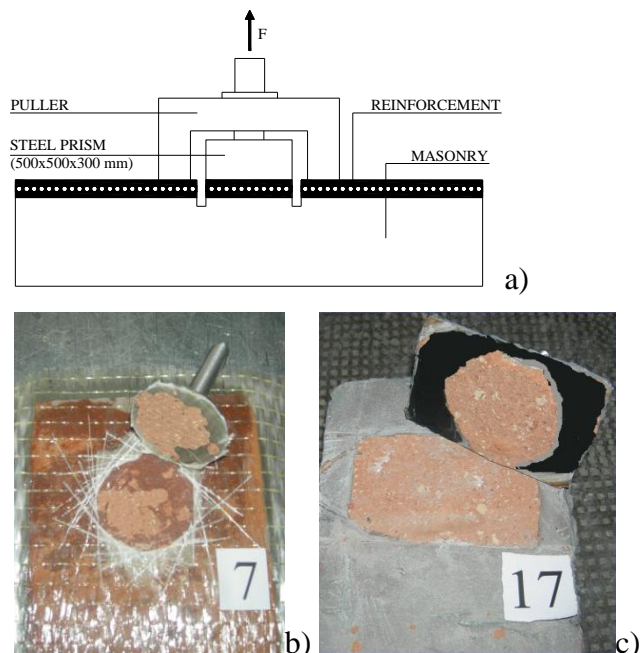


Figura 6. a) Test set up delle prove di pull-off; b) crisi dei provini rinforzati con GFRP; c) crisi dei provini rinforzati con lamine di carbonio.

4 PROVE SPERIMENTALI SUGLI ARCHI RINFORZATI

Per determinare il comportamento a rottura della struttura rinforzata, sono stati confezionati quindici archi a tutto sesto (luce di 2000 mm) in muratura di mattoni, apparecchiati a una testa (spessore di 125 mm).

Al fine di avere un campione di riferimento, un arco (UN.01) è stato testato senza applicare alcun tipo di rinforzo, mentre per i restanti archi sono state impiegate due diverse tipologie di rinforzo (Tabella 2): nastri in fibra di vetro (archi GF) e lamine in fibra di carbonio (archi CP). In entrambi i casi il rinforzo è stato posizionato lungo lo sviluppo dell'intera superficie intradossale, mediante l'applicazione di un singolo strato di nastro o di lamina, aventi larghezza pari rispettivamente a 150 mm e 100 mm, le cui caratteristiche tecniche sono già state descritte in precedenza (Tabella 1).

Per quanto concerne la prima tipologia di rinforzo, i test sono stati pianificati con l'obiettivo di studiare tutta una serie di problematiche specifiche, tipiche degli interventi intradossali, capaci di compromettere l'effettiva tenuta del sistema di incollaggio.

Tabella 2. Programma delle prove sperimentali sugli archi.

Arco	Rinforzo	Numero e posizione connettori	Condizioni al contorno
UN.01	-	-	-
GF.01	-	-	-
GF.02	-	-	-
GF.03	-	22	-
GF.04	Fibre di vetro	(da 15° a 160°, ogni 7°)	-
GF.05	-	-	Malta regolarizzante
GF.06	-	-	-
GF.07	-	-	Difetti substrato
GF.08	-	-	-
CP.01	-	2 (15°-165°)	-
CP.02	-	2 (15°-165°)	-
CP.03	Lamine di carbonio	3 (15°-90°-165°)	-
CP.04	-	4 (15°-60°-120°-165°)	-
CP.05	-	4 (15°-60°-120°-165°)	-
CP.06	-	5 (15°-60°-90°-120°-165°)	-

A questo proposito, a fronte di due archi rinforzati all'intradosso con nastri in fibra di vetro impregnati con resina epossidica (GF.01 e GF.02) e di un arco (GF.03) consolidato applicando, oltre al rinforzo, dei connettori realizzati in laboratorio utilizzando fibre di aramide e resina epossidica (vd par. 3.4), negli archi GF.04 e GF.05 il rinforzo è stato applicato interponendo uno strato di malta regolarizzante (Figura 7a), che se da un lato ha contribuito a limitare quei tipici difetti del sistema di incollaggio, dovuti alla presenza di asperità nel supporto murario, dall'altro, innegabilmente, ha introdotto un elemento di debolezza nel sistema, mentre gli archi GF.06, GF.07 e GF.08 sono stati confezionati introducendo dei "difetti" nel supporto (Figura 7b), ovvero sostituendo la porzione di mattone a ridosso della superficiale intradossale con un materiale avente scadenti proprietà meccaniche.



a)



b)

Figura 7. a) Strato di malta regolarizzante; b) Difetti nel supporto.

Per quanto riguarda invece la seconda tipologia di rinforzo, la sola variabile presa in considerazione è rappresentata dal numero e dalla posizione dei connettori in aramide utilizzati per l'ancoraggio delle lamine in carbonio all'intradosso dell'arco (Figura 8).



a)



b)

Figura 8. Connettori in aramide.

Si sono effettuate prove monotoniche con carico concentrato applicato in chiave (Figura 9).

Il carico, impartito gradualmente mediante un martinetto idraulico montato su un telaio a portale sufficientemente rigido, è stato trasferito al concio di chiave mediante l'interposizione di un coltello di carico, costituito da una piastra in acciaio (350×350mm). Gli archi sono stati posizionati su una struttura di contrasto, costituita da due elementi piatti 50×4×2250 mm collegati con ferri a L alle estremità, per impedire spostamenti orizzontali sul piano dell'arco.

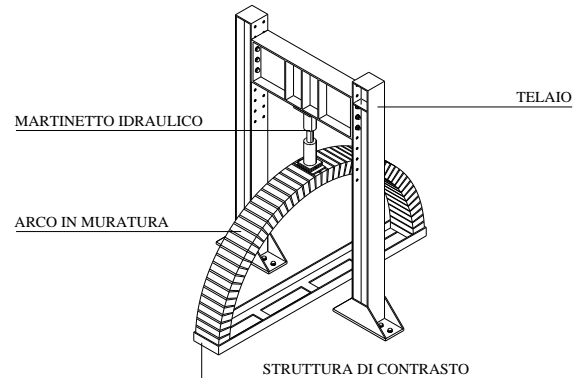


Figura 9. Layout della prova.

Per monitorare gli spostamenti della struttura e le deformazioni nel rinforzo sono stati applicati dei trasduttori di spostamento di tipo induttivo (LVDT: linear variable differential transformer) e degli estensimetri, posizionati secondo lo schema in Figura 10.

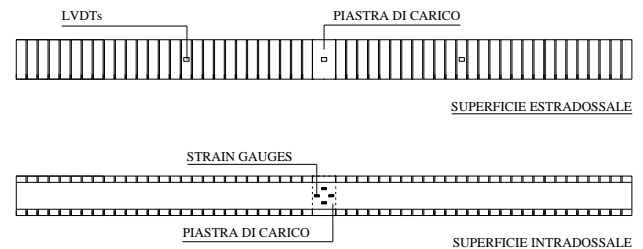


Figura 10. Disposizione dei trasduttori di spostamento (LVDT) e degli estensimetri.

5 RISULTATI DEI TEST

5.1 Arco UN

L'arco non rinforzato (UN.01), in accordo ai dati riportati in letteratura (Heyman 1982), ha mostrato una crisi fragile, per meccanismo (meccanismo a cinque cerniere), con un valore del carico ultimo molto modesto (0.7 kN).

5.2 Archi GF

Gli archi rinforzati con nastri in fibra di vetro hanno presentato tre differenti modalità di rottura: distacco del rinforzo, schiacciamento della muratura e scorrimento tra mattone e malta.

Più nel dettaglio, negli archi GF.01 e GF.02 il collasso è per distacco del rinforzo, a seguito della crisi del supporto murario, al di sotto del punto di applicazione del carico (Figura 11a) per un valore medio del carico ultimo pari a 6.73 kN.

Gli archi GF.04 e GF.05, in cui il rinforzo è stato applicato interponendo uno strato di malta regolarizzante, hanno evidenziato la medesima modalità di crisi (distacco del rinforzo), con la differenza che in questo caso il distacco è avvenuto all'interfaccia tra la muratura e la malta regolarizzante (Figura 11b) e non per crisi del supporto e che il valore medio del carico ultimo è stato significativamente inferiore (4.60 kN).

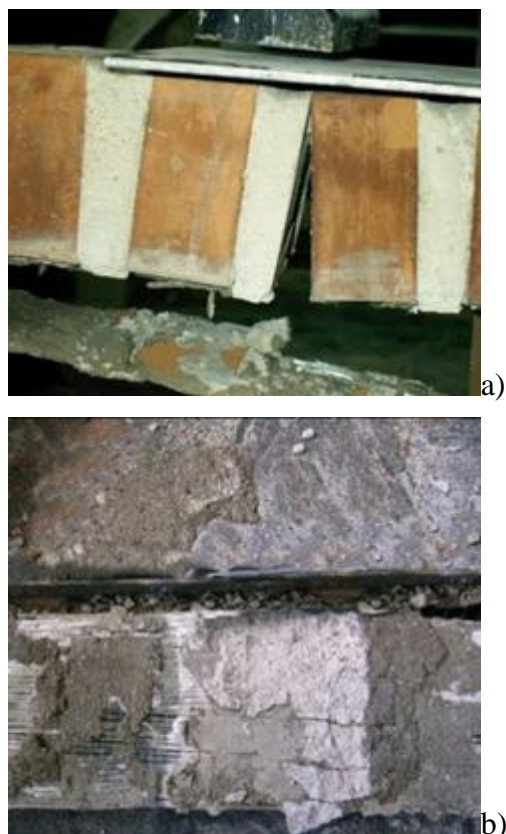


Figura 11. Crisi per distacco del rinforzo: a) arco GF.01; b) arco GF.05.

Al contrario, l'arco GF.03, rinforzato con i connettori in aramide utilizzati per contrastare il distacco del rinforzo il collasso è avvenuto a causa dello schiacciamento della muratura in corrispondenza del concio in chiave (Figura 12), per un valore del carico ultimo pari a 6.90 kN.

A questo proposito, è importante evidenziare come in quest'ultimo caso, così come nei precedenti, la struttura non abbia subito alcun crollo, grazie all'azione di fasciatura delle fibre rimaste incollate alla muratura.



Figura 12. Crisi per schiacciamento della muratura: arco GF.03.

Infine, gli archi GF.06, GF.07 e GF.08, caratterizzati dalla presenza di un supporto con scadenti proprietà meccaniche, hanno presentato una diversa modalità di collasso dovuta allo scorrimento tra malta e mattone nel giunto in prossimità del punto di applicazione del carico (Figura 13), con conseguente distacco del rinforzo, ad un valore medio del carico ultimo pari a 5.22 kN.

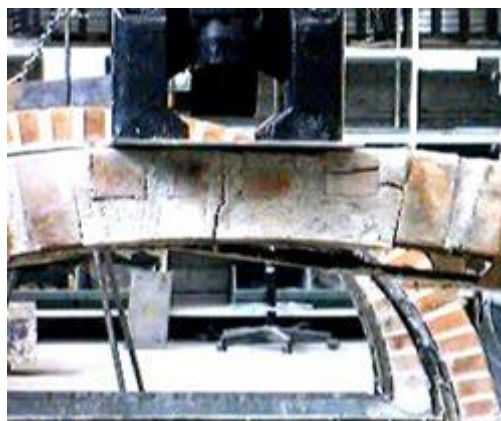


Figura 13. Crisi per scorrimento tra mattone e malta con conseguente distacco del rinforzo: arco GF.07.

5.3 Archi CP

Per quanto riguarda gli archi rinforzati con lamine in carbonio, i risultati dei test hanno presentato due differenti modalità di rottura: schiacciamento della muratura e scorrimento tra mattone e malta (sliding).

Nello specifico, negli archi CP.01 e CP.02, in cui le lamine sono state ancorate con due soli connettori, il collasso è avvenuto per scorrimento tra mattone e malta (sliding) in corrispondenza delle reni dell'arco (Figura 14), ad un valore medio del carico ultimo pari a 13.82 kN.



Figura 14. Crisi per scorrimento tra mattone e malta: arco CP.02.

Al contrario nell'arco CP.03, rinforzato con tre connettori, la crisi è avvenuta a seguito della rottura per compressione della muratura in chiave (Figura 15), dove si sviluppano le tensioni maggiori, seguita dal distacco della bandella dall'intradosso dell'arco. Il valore del carico ultimo in questo caso è risultato essere pari a 15.81 kN.



Figura 15. Crisi per schiacciamento della muratura: arco CP.03.

Infine gli archi CP.04 e CP.05, rinforzati con quattro connettori, e l'arco CP.06, rinforzato con cinque connettori, hanno presentato valori di resistenza differenti, nonostante abbiano avuto la medesima modalità di crisi (schiacciamento della muratura). Più in particolare, mentre l'arco CP.04 ha fatto registrare un significativo incremento del carico ultimo (18.55 kN), negli archi CP.05 e CP.06 la crisi è avvenuta per valori del carico decisamente inferiori (11.50 kN e 11.18 kN, rispettivamente).

6 ANALISI DEI RISULTATI

L'analisi dei risultati sperimentali ha consentito di mettere in luce aspetti significativi legati alle possibilità di applicazione, per il rinforzo intradosso di strutture ad arco in muratura, di lamine pultruse in FRP, ovvero di elementi che per le proprie caratteristiche

intrinseche possono risolvere talune delle problematiche proprie degli interventi con nastri o tessuti in FRP.

La Figura 16 e la Figura 17 consentono di confrontare le curve carico-spostamento (misurata nel punto in cui il carico è stato applicato) e carico-deformazione ricavate dai test sperimentali sugli archi rinforzati.

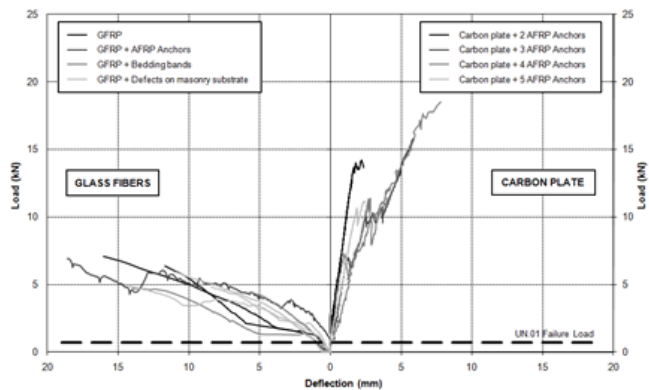


Figura 16. Diagramma carico-spostamento.

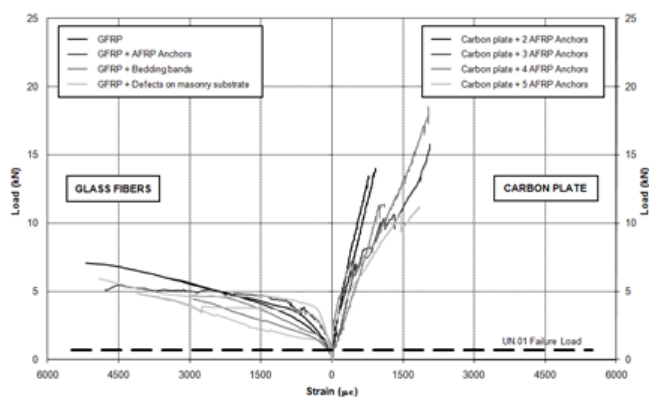


Figura 17. Diagramma carico-deformazione.

Sulla base di tali confronti è possibile trarre le seguenti considerazioni:

1. Per quanto concerne gli archi rinforzati con nastri in fibra di vetro è stato possibile osservare come l'efficacia del rinforzo sia fortemente influenzata dal comportamento all'interfaccia tra rinforzo e muratura. I risultati dei test sperimentali hanno permesso di evidenziare come la capacità portante degli archi GF sia strettamente correlata alle modalità di applicazione del rinforzo (uso di malte regolarizzanti) e alle proprietà del supporto murario. Più nello specifico, rispetto agli archi GF.01 e GF.02, gli archi rinforzati interponendo uno strato di malta regolarizzante (archi GF.04 e GF.05) hanno determinato un decremento della capacità ultima nell'ordine del 30%, mentre la presenza di un supporto con scadenti proprietà meccaniche (archi GF.06, GF.07 e GF.08) ha determinato una riduzione del carico ultimo pari al 23%. Infine, la presenza di connettori (arco GF.03) pur modificando la modalità di crisi, schiacciamento della muratura in luogo del

distacco del rinforzo, non ha consentito significativi guadagni in termini di capacità portante. Il carico ultimo dell'arco GF.03 è risultato infatti del tutto simile (+2%) a quello degli archi senza connettori (GF.01 e GF.02).

2. L'uso delle lamine in carbonio unitamente ad un numero limitato di connettori in aramide consente di ottenere elementi di rinforzo che, a differenza di nastri e tessuti, sono in grado di resistere per forma, ovviando così a fenomeni di collasso prematuro legati al distacco del nastro. A questo proposito gli incrementi in termini di carico ultimo forniti dalle lamine sono stati considerevolmente maggiori di quelli forniti dai nastri in vetro. Indipendentemente dal numero di connettori utilizzati, le lamine in carbonio hanno consentito carichi ultimi tra le 16 e le 26 volte superiori a quello dell'arco non rinforzato, mentre il valore massimo del carico ultimo ottenuto con i nastri in fibra di vetro è stato non più di 10 volte rispetto a quello dell'arco UN.01.

3. Per quanto riguarda gli archi rinforzati con lamine in carbonio, è stato poi possibile osservare come il numero e la posizione dei connettori abbiano una limitata influenza sulle prestazioni del rinforzo. Rispetto agli archi rinforzati con due connettori (archi CP.01 e CP.02), gli archi CP.03 e CP.04, rinforzati rispettivamente con tre e quattro connettori, hanno permesso incrementi del carico ultimo compresi tra l'11 e il 38%, mentre negli archi CP.05 e CP.06, rinforzati con quattro e cinque connettori rispettivamente, si è avuto un decremento del carico ultimo nell'ordine del 20%.

4. L'andamento delle curve carico-spostamento e carico-deformazione per gli archi GF e CP evidenzia un differente comportamento a rottura. Mentre negli archi CP i diagrammi hanno un andamento bi-lineare con riduzione della rigidità, gli archi GF sono caratterizzati da un comportamento pseudo-duttile a rottura, con spostamenti ultimi fino a 11 volte superiori rispetto a quelli degli archi CP.

7 CONCLUSIONI

– L'uso di connettori in aramide per l'ancoraggio dei nastri in vetro, sebbene sia stato in grado di ovviare al problema del debonding, si è rivelato particolarmente oneroso dal punto di vista realizzativo (l'interesse tra i connettori era contenuto) e poco efficace dal punto di vista prestazionale (l'incremento in termini di resistenza, +2%, è di fatto del tutto trascurabile). Un simile risultato potrebbe essere motivato dal

danneggiamento conseguente all'inserzione dei connettori. La presenza di un numero elevato di connettori, inseriti ad una profondità pari a 2/3 dello spessore dell'arco, sembrerebbe infatti sufficiente a giustificare un significativo indebolimento della muratura.

- L'uso delle lamine in carbonio, unitamente ad un numero limitato di connettori in aramide, ha consentito di ovviare a fenomeni di collasso prematuro legati al distacco del nastro, determinando incrementi del carico di rottura considerevolmente maggiori di quelli forniti dai nastri in vetro.
- A differenza dell'arco non rinforzato, in tutti gli archi rinforzati, fatta eccezione per quelli caratterizzati dalla presenza di un supporto con scadenti proprietà meccaniche, la struttura non ha subito alcun crollo, grazie all'azione di fasciatura delle fibre rimaste incollate alla muratura.

8 RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano la FIDIA s.r.l. per la fornitura del materiale di rinforzo. Si ringrazia inoltre il personale del laboratorio della TEC.INN. per l'assistenza fornita durante la preparazione dei connettori in fibra di aramide. La ricerca è stata finanziata dal Dipartimento di Protezione Civile "Consorzio ReLUIS".

BIBLIOGRAFIA

- AAVV, 1999. *Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione postsismica degli edifici*, Edizioni DEI Tipografia del Genio Civile.
- Basilio, I., Oliveira, D., Lourenço, P., 2004. Optimal FRP strengthening of masonry arches. *13th International Brick and Block Masonry Conference*. July, Amsterdam, ND.
- Borri, A., Castori, G., 2004. Influence of bonding defects in masonry vaults and arches strengthened at their intrados with FRP. *2nd National Conference on Mechanics of masonry structures strengthened with FRP*. December 8-10, Venice, Italy.
- Borri, A., Casadei, P., Castori, G., Hammond, J., 2009. Strengthening of brick masonry arches with externally bonded steel reinforced composites. *Journal of Composites for Construction*, **13**(6), 468-475.
- Borri, A., Castori, G., Vetturini, R., 2009. Interventi di rinforzo intradossale su archi in muratura con lamine pultruse in FRP. *13th National Conference on Seismic Engineer in Italy*. June 28- July 2, Bologna, Italy.
- Briccoli Bati, S., Rovero, L., 2008. Towards a methodology for estimating strength and collapse mechanism in masonry arches strengthened with fibre reinforced

- polymer applied on external surfaces. *Materials and Structures*; **41**, 1291-1306.
- De Lorenzis, L., Dimitri, R., La Tegola, A., 2007. Reduction of the lateral thrust of masonry arches and vaults with FRP composites. *Construction and Building Materials*, **21**(7), 1415-1430.
- De Lorenzis, L., Zavarise, G., 2009. Interfacial stress analysis and prediction of debonding for a thin plate bonded to a curved substrate. *International Journal of Non-Linear Mechanics*; **44**(4); 358-370.
- Eshwar, N., Ibell, T., Nanni, A., Porter, A.D., 2005. Effectiveness of CFRP strengthening on curved soffit RC beams. *Advances in Structural Engineering*; **8**(1); 55-68.
- Fédération International du Béton (FIB), 2001. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. *Technical Bulletin No. 14*.
- Foraboschi, P., 2004. Strengthening of masonry arches with fiber-reinforced polymer strips. *Journal of Composites for Construction*; **8**(3), 96-104.
- Heyman, J., 1982. *The masonry arch*. West Sussex: Ellis Horwood-Wiley.
- ICOMOS, 2003. International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage. Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage. *Guidelines of ICOMOS 14th General Assembly*. October, Victoria Falls, US.
- Valluzzi, M.R., Valdemarca, M., Modena, C., 2001. Behaviour of brick masonry vaults strengthened by FRP laminates. *Journal of Composites for Construction*, **5**(3), 163-169.