

Archi in muratura rinforzati con CFRP

Recenti ricerche su modelli hanno consentito di riscontrare come l'utilizzo dei compositi fibro-rinforzati, nel consolidamento di archi e volte in materiale murario, provochi un notevole aumento della capacità portante delle strutture. La sperimentazione condotta presso il Dipartimento di Costruzioni dell'Università degli Studi di Firenze ha permesso di verificare il comportamento di archi consolidati in intradosso con CFRP e soggetti a cedimenti orizzontali delle imposte

Questa nota tratta del comportamento di archi in muratura rinforzati mediante l'applicazione di un composito a fibre di carbonio in corrispondenza del loro intradosso, soggetti a carichi fissi e sottoposti a cedimenti orizzontali delle imposte.

Le prove sperimentali documentate sull'impiego di sistemi di compositi avanzati per consolidare le strutture in muratura mostrano che tali sistemi possono essere efficaci sia per pareti in muratura soggette a flessione nel piano e fuori piano, sia per strutture ad arco o a volta^[1-2-3-4-5-6] in presenza di carichi verticali crescenti.

Non è stato altrettanto studiato se le strutture ad arco e a volta in muratura, soggette a cedimenti delle imposte, rimangano efficaci qualora consolidate con CFRP; lo spostamento degli appoggi è però uno dei principali dissesti che si incontra nelle strutture murarie esistenti.

A questo proposito è stato testato sperimentalmente^[7] il comportamento di una volta a botte sottoposta a cedimenti orizzontali ciclici che avvicinavano ed allontanavano alternativamente un'imposta, sia in assenza di rinforzo, sia in presenza di un rinforzo estradossale in CFRP.

La campagna sperimentale ha mostrato che la presenza dei rinforzi modifica il meccanismo di collasso della volta e ne migliora la duttilità, mentre^[8] la letteratura sull'argomento ha messo in evidenza che esistono ancora numerosi problemi associati agli interventi su strutture in muratura effettuati utilizzando questo tipo di rinforzi^[9].

Punti critici di questo genere di consolidamento sono l'ancoraggio in zona tesa del CFRP e l'aderenza tra il materiale composito e il substrato di muratura.

Il cedimento di archi in muratura fibro-rinforzati

È noto come in un arco murario, in presenza di cedimenti orizzontali delle imposte, le tre cerniere iniziali, che si formano all'inizio del cedimento, si aprano, per la congruenza geometrica del cinematico, in maniera alternata verso l'intradosso o verso l'estradosso.

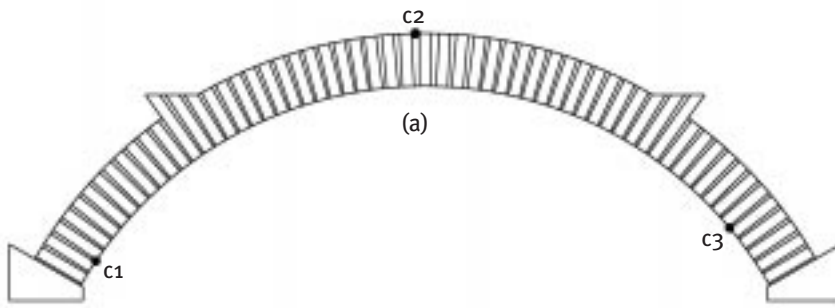
Il successivo incremento dello spostamento di una delle imposte provoca, come di consueto in una struttura isostatica, una variazione della configurazione cinematica senza che vi sia alcuna variazione allo stato di sollecitazione della struttura.

Si definisce *cedimento limite* quello relativo ad una configurazione di spostamenti tale che lo stato di sollecitazione denunci il formarsi di una quarta cerniera. L'applicazione del rinforzo però, impedendo l'apertura della terza cerniera, e quindi escludendo il formarsi di una struttura isostatica, modifica il comportamento dell'arco murario in caso di cedimento delle imposte.

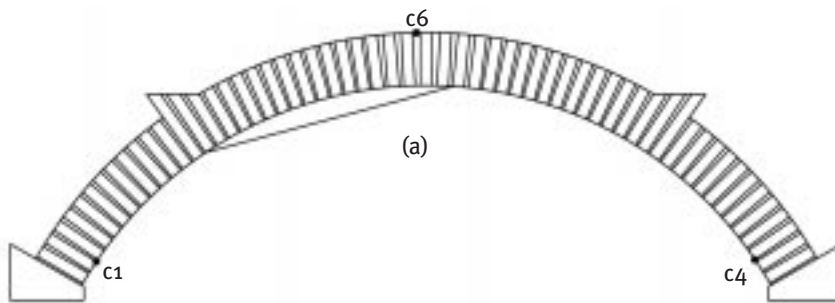
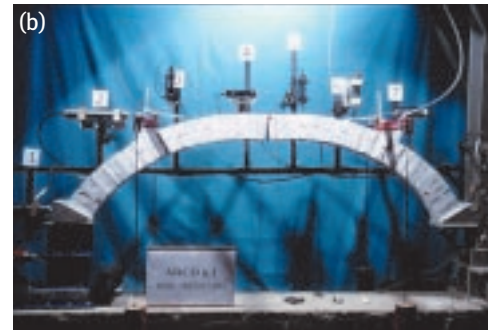
Per rendere efficace il rinforzo, in presenza di un cedimento imposto all'arco verso l'esterno, esso è stato incollato alla superficie intradossale dell'arco.

Le due cerniere alle imposte sono state lasciate libere di aprirsi: il rinforzo ha agito solo sulla formazione della cerniera in chiave all'arco.

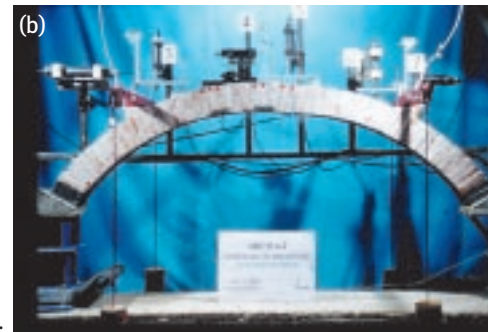
Con il progredire del cedimento, reso possibile con l'applicazione di una forza sempre crescente all'imposta, si determina il progressivo distacco della fibra riconducendo il comportamento della struttura a quello che si avrebbe in assenza di rinforzo.



1. La prova sull'arco non rinforzato: la posizione delle tre cerniere (a) e l'arco alla fine della prova sperimentale (b).



2. La prova su uno degli archi consolidati: la posizione delle cerniere (a) e l'arco alla fine della prova sperimentale (b).



I modelli e le prove Sono stati realizzati quattro modelli in muratura di mattoni pieni e malta bastarda in scala 1:2 (tab. 1)^[10,11].

Dopo aver definito le dimensioni dei prototipi, è stata individuata una configurazione di carico verticale abbastanza gravosa, ma non recante pregiudizio per la stabilità della struttura. Per mettere in evidenza l'efficacia del consolidamento mediante CFRP è stato inizialmente testato e monitorato il comportamento di un arco in muratura non consolidato. Successivamente sono stati sottoposti a prova tre modelli consolidati mediante l'incollaggio di una striscia di CFRP all'intradosso. Il problema ricade nell'ambito della ricerca del cedimento limite in strutture voltate sottoposte a configurazioni di carichi verticali per le quali esse risultano stabili.

La sperimentazione Nella prima prova condotta sul modello non rinforzato, l'arco non è stato portato a collasso ma, dopo un certo valore di spostamento orizzontale, le imposte sono state riavvicinate e la struttura consolidata nella configurazione originaria.

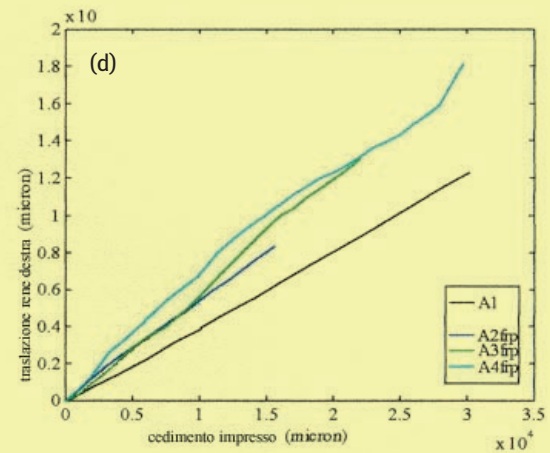
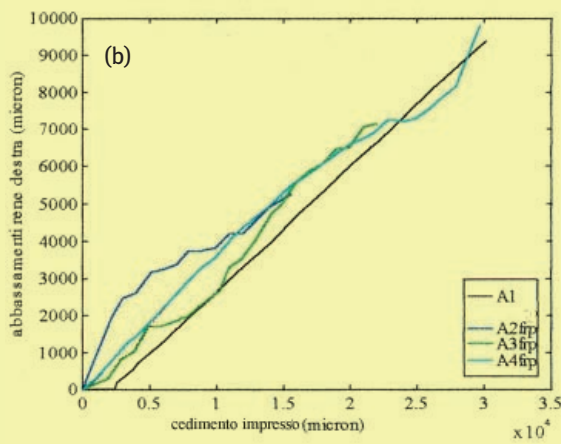
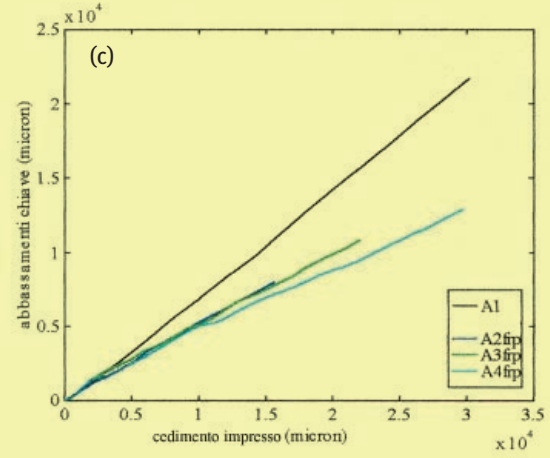
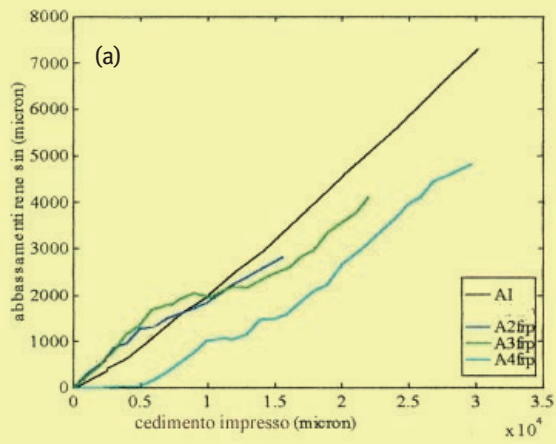
Sono state quindi condotte tre prove sperimentali con altrettanti modelli di arco consolidati: due archi sono stati consolidati in corrispondenza della superficie intradossale con una striscia di CFRP larga 10 cm; un arco è stato invece rinforzato con una striscia di CFRP larga 5 cm. In entrambi i casi la fibra è stata ancorata saldamente all'imposta dell'arco mediante due anelli di fibra che la sorreggono per un'altezza di circa 4 cm. Tale consolidamento è stato finalizzato ad impedire soltanto l'apertura della cerniera in mezzeria dell'arco, consentendo quindi l'apertura delle due cerniere intradossali alle quote delle imposte. Tale scelta è motivata dall'impossibilità di impedire questo spostamento nelle applicazioni ai casi reali di consolidamento.

1 Caratteristiche geometriche e meccaniche del modello

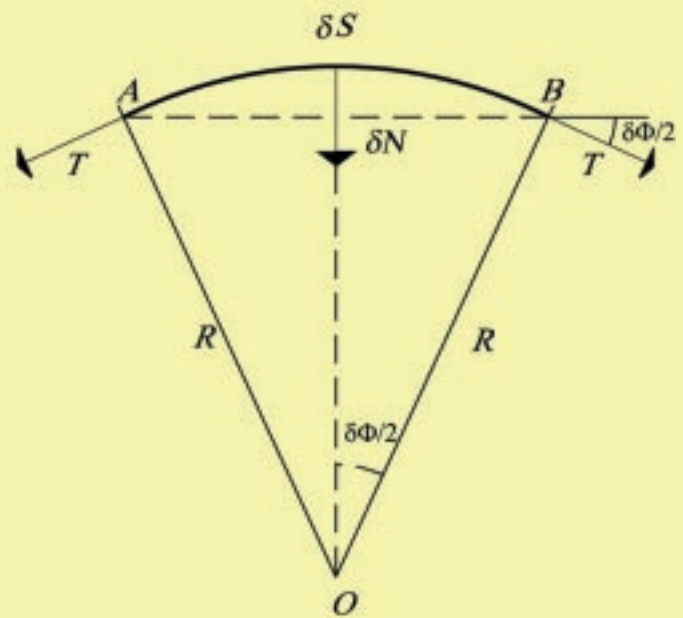
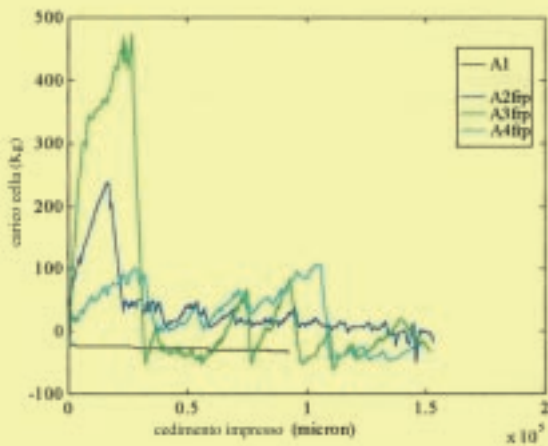
R_i = raggio interno	86,6 cm
R_e = raggio esterno	98,1 cm
t = spessore	11,5 cm
t/R_m	0,124
t/R limite	0,1958
Numero conci	59
Numero interfacce	60
Peso specifico muratura	180 N/m ³
Carico permanente esterno su ciascuna rene	353 N
Modulo elastico muratura	1146,7 MPa
Tensione di schiacciamento muratura	7,77 MPa
Modulo elastico CFRP	230 GPa
Tensione di rottura a trazione	4800 MPa

Analisi dei risultati delle prove sperimentali

Nell'arco non rinforzato, le tre cerniere del meccanismo classico dell'arco sottoposto a cedimento orizzontale verso l'esterno si formano contemporaneamente e quasi istantaneamente nel momento in cui si comincia a far traslare la struttura, quindi per valori del cedimento impresso prossimi allo zero. Nel progredire della prova si mantiene inalterata questa configurazione, nella quale l'arco risulta suddiviso in quattro tronchi collegati tramite tre cerniere. La struttura è isostatica e non collassa fino a che la configurazione deformata – indotta dal cedimento – non induce



3. Confronto tra i diagrammi di comportamento dei modelli durante le prove: abbassamento rene sinistra (a), abbassamento rene destra (b), abbassamento in chiave (c), traslazione rene destra (d).



4. Confronto tra i diagrammi carico-spostamento dei modelli durante le prove.

5. Tensione nel composito e sua componente radiale in un elemento dell'arco.

la linea delle pressioni a trovare un quarto punto di tangenza con la sagoma dell'arco provocando l'apertura della quarta cerniera che rende labile la struttura (fig.1).

Nell'arco rinforzato, invece, dopo un cedimento impresso, pari a circa 1/500 della luce dell'arco, si forma la cerniera intradossale dalla parte dell'imposta fissa.

Quando lo spostamento della struttura raggiunge un valore compreso tra 1/300 e 1/500 della luce si forma la cerniera intradossale dalla parte dell'imposta soggetta allo spostamento verso l'esterno.

All'aumentare del cedimento impresso, il rinforzo continua ad impedire la formazione della terza cerniera del meccanismo tipico, quella estradossale in chiave, assorbendo una forte sollecitazione di trazione, come denunciato dalla cella di carico (fig.2).

Superato il cedimento impresso pari a circa 1/100 della luce, il rinforzo si stacca visibilmente dalla superficie dell'arco in una zona tra una rene e la chiave, dove si forma istantaneamente una lesione all'intradosso.

La struttura perde un grado di libertà e, pertanto, può eseguire un certo spostamento ulteriore senza indurre sollecitazione nel rinforzo.

Una volta iniziato il distacco del composito, la forza necessaria ad imprimere lo spostamento orizzontale successivo, e quindi necessaria a far progredire il distacco del rinforzo dall'arco, è inferiore di un ordine di grandezza rispetto alla fase precedente.

Continuando a far traslare l'arco, il distacco del rinforzo progredisce, da un lato fino all'imposta, dall'altro fin'oltre la chiave.

Man mano che le fibre si staccano liberando i mattoni verso la chiave la lesione intradossale "si sposta" in questa direzione fino a raggiungere la sua posizione finale nei pressi della mezzeria, ovvero in un giunto prossimo a quello in cui si sarebbe formata in assenza di fascia consolidante. In questa ultima fase della prova è evidente una forte differenza di curvatura tra la parte di arco in cui il rinforzo rimane aderente alla struttura, molto ribassata a causa della deformazione elastica della fibra, in parte trasferita alla muratura, ed il tronco dal quale il composito è definitivamente venuto meno, che ha invece riacquisito la sua forma iniziale.

La struttura torna quindi ad essere un arco a tre cerniere che crolla per quel valore dello spostamento impresso per il quale la curva delle pressioni trova un quarto punto di tangenza sul contorno opposto ad un lato mai, o non più, rinforzato.

Considerazioni conclusive sulle prove sperimentali

L'applicazione di un cedimento anelastico orizzontale ad un'imposta di un arco fa sì che:

- nella struttura non rinforzata si aprano tre fratture che

la trasformano in un arco a tre cerniere. Il collasso avviene per la sua trasformazione in un meccanismo;

- l'arco rinforzato acquisisca una deformata "elastica" molto evidente dovuta alla deformazione elastica trasferita dalla fibra alla muratura che, microlesionandosi nei giunti di malta, si deforma di conseguenza. Tale struttura composita può essere considerata come costituita da un arco elastico, la fibra di carbonio, irrigidito da una serie di elementi rigidi sconnessi, i conci dell'arco.

Tali effetti possono anche essere riscontrati nel confronto dei diagrammi di comportamento dei quattro archi (fig.3). Infatti, rispetto al prototipo in muratura semplice, si può osservare che gli archi rinforzati si schiacciano alle reni, traslano di più ed hanno un comportamento più omogeneo e, nei modelli rinforzati, le lesioni si aprono per un valore finito del cedimento.

Dopo la formazione delle due cerniere alle imposte dell'arco, si assiste ad una fase in cui la struttura è stabile e gli spostamenti anelastici sono molto ridotti. Con il progredire dello spostamento (oltre a circa 1/100 della luce) si può assistere a due possibili modi di crisi:

- per scorrimento da taglio in una delle imposte sedi delle cerniere estradossali (*sliding*);
- per distacco del CFRP dalla superficie intradossale dell'arco (*ripping*).

Nei casi in cui si presenta viene raggiunto prima lo stato limite di *sliding*. Successivamente si raggiunge lo stato limite di *ripping* che determina sempre la modalità di collasso dell'arco come descritto nel paragrafo precedente (tab. 2). Dal confronto dei diagrammi carico-spostamento (fig.3) si evince che:

- l'arco non rinforzato, trasformandosi in una struttura isostatica, non oppone resistenza all'azione che ne induce lo spostamento e si muove rigidamente. La cella di carico misura dunque la spinta naturale che l'arco esercita sui suoi appoggi.

Tale spinta aumenta leggermente all'aumentare dello spostamento dell'imposta a causa del cambiamento di configurazione della struttura;

- la fibra di carbonio, impedendo l'apertura delle lesioni dal lato cui è applicata, è soggetta ad una sollecitazione di trazione indotta dalla forza impressa all'imposta mobile per far traslare la struttura.

La cella di carico misura in questo caso la forza necessaria ad imprimere il cedimento desiderato; tale forza subisce una netta diminuzione nel momento in cui la fibra si distacca nettamente dalla superficie intradossale dell'arco. Ciò infatti determina l'apertura della terza cerniera che rende la struttura isostatica.

Continuando a spostare la struttura, questo fenomeno si ripete (fig.4);

- nei modelli nei quali la fibra è rimasta attaccata più a

2 Modalità di crisi dei modelli in ciascuna prova

	Prova 2		Prova 3		Prova 4	
	slittamento	distacco	slittamento	distacco	slittamento	distacco
Cedimento (% luce)	-	1/85 L	1/100 L	1/65 L	1/75 L	1/50 L
Carico (kg)	-	238	370	469	77	102

3 Valori ammissibili e di esercizio nelle zone critiche della struttura

	Momento (N.mm)	Sforzo normale (N)	δ_M (MPa)	δ_{CFRP} (MPa)	$\delta_{amm M}$ (MPa)	$\delta_{amm CFRP}$ (MPa)	T_{CFRP} (N)
Chiave	551249	783,524	1,65196	359,367	2,5	4800	6022,99
Punto di distacco	506062	723,833	1,51608	330,003	2,5	4800	5530,85

4 Determinazione del parametro T/R

	R (mm)	T (N)	T/R (N/mm)
Chiave	980,2	6028	6,146
Punto di distacco	619,7	5531	8,925

lungo si presentano numerosi microdistacchi (denunciati da una maggiore discontinuità nel grafico) ed un carico di picco più basso.

Tali distacchi, che generano microlesioni nei giunti di intradosso dell'arco, fanno diminuire la tensione nella fibra e di conseguenza anche la componente radiale dello sforzo di trazione, responsabile del distacco del rinforzo, è inferiore. Pertanto il distacco totale della fibra dal supporto avviene per valori dello spostamento pari a circa il 50÷60 % della luce.

Si può infine osservare che i parametri che influenzano il comportamento dell'arco in muratura fibro-rinforzata, in aggiunta ovviamente alle caratteristiche meccaniche dei materiali, sono la dimensione della sezione resistente del composito CFRP e la superficie di aderenza tra esso e la superficie della struttura da consolidare, nonché la qualità dell'aderenza.

Verifica dell'aderenza della fibra

Nei tre modelli rinforzati la modalità di crisi che ha portato la struttura al collasso è stata lo scollamento della fibra in una zona tra la chiave e la rene dell'arco. La forza che determina questo distacco è la componente radiale δN della trazione T che sollecita la fibra in un settore di arco $\delta\phi$ (fig. 5):

$$\frac{\delta N}{2} = T_{sen} \frac{\delta\phi}{2}$$

Per angoli piccoli vale:

$$\delta N = T\delta\phi$$

e quindi:

$$\delta N = \frac{T}{R} \cdot \delta S$$

dove $\delta S = R\delta\phi$

è la lunghezza dell'arco di circonferenza sotteso da $\delta\phi$.

Il parametro che descrive la sollecitazione che determina

il distacco, la forza radiale per unità di arco di circonferenza, è

$$\frac{\delta N}{\delta S}$$

La trazione presente nel rinforzo vale:

$$T = \sigma_{CFRP} \cdot A_{CFRP}$$

Quindi, se il modello presentasse una curvatura R costante, come all'inizio della prova, il parametro

$$\frac{\delta N}{\delta S}$$

raggiungerebbe il valore massimo in corrispondenza della chiave, dove è massima la $T\delta$ (fig. 6).

Ma dal momento che R nella configurazione deformata non è costante, il punto nel quale si verifica il distacco della fibra dalla superficie intradosale dell'arco è quello in cui risulta massimo il valore di

$$\frac{\delta N}{\delta S} = \frac{N}{R}$$

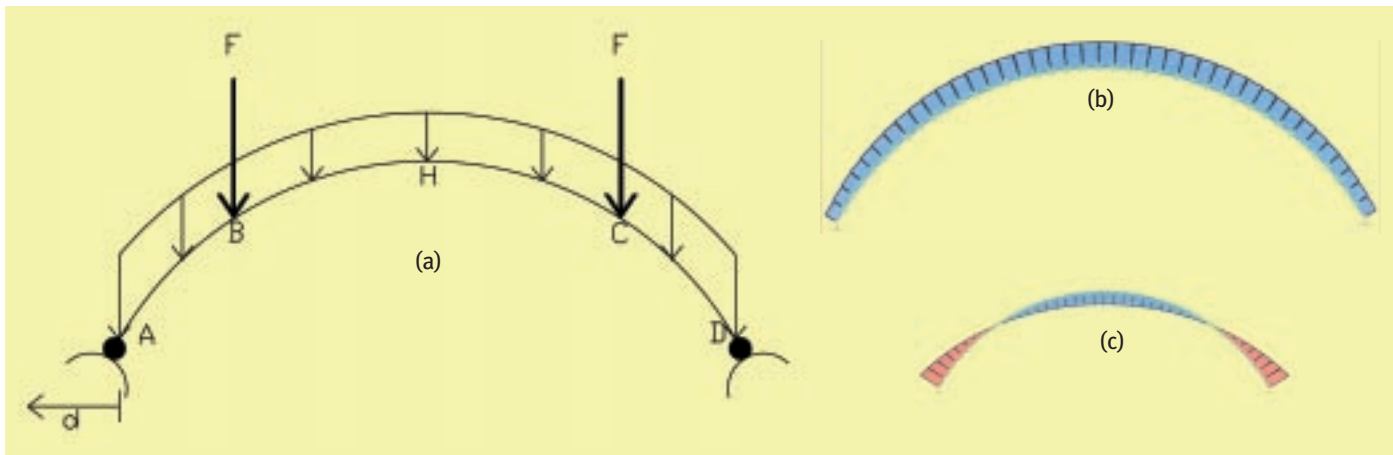
Si prenda in considerazione la prova nella quale il distacco è stata la prima modalità di crisi raggiunta; si calcolino le sollecitazioni nell'arco in chiave e nel punto in cui si è staccata la fibra per un valore del cedimento pari a quello che ha provocato il distacco totale della fibra in una zona del modello (tab. 3).

Applicando il metodo delle tensioni ammissibili alla sezione tensoinflessa si ricavano i corrispondenti valori delle tensioni nei due materiali che costituiscono il composito muratura-CFRP, e da questi si determina la trazione nella fibra T_{CFRP} in quelle due sezioni.

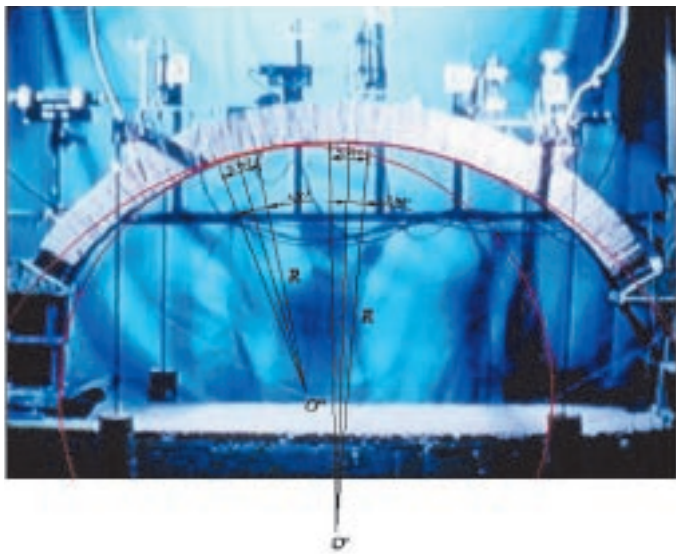
Per determinare

$$\frac{\delta N}{\delta S}$$

occorre quindi valutare, nella configurazione deformata dell'arco, in entrambe le zone della struttura, il raggio di curvatura (fig. 7).



6. Schema statico (a) e diagrammi caratteristiche di sollecitazione di sforzo normale (b) e momento flettente (c).



7. I raggi di curvatura delle due porzioni di arco prese in esame.

Determinato graficamente questo valore sulla configurazione deformata del modello, si ottengono i valori riportati nella tabella 4.

Come si può constatare, il valore di T/R , forza per unità di arco di circonferenza, responsabile del distacco, è maggiore nella sezione in cui si verifica effettivamente il distacco e non nella sezione cui corrisponde la maggiore trazione nel composito.

Conclusioni Negli archi testati, il cui rinforzo in CFRP ha un'area pari a circa lo 0.13 % della sezione, e una superficie di aderenza pari a circa l'87% della superficie di intradosso, il distacco del composito inizia a manifestarsi in media per un valore del cedimento impresso pari a circa 1/100 della luce.

Da questo valore del cedimento in poi si assiste al pro-

gressivo distacco della fibra e nella struttura tende a ristabilirsi la configurazione riscontrata nell'arco non rinforzato. ¶

Si ringrazia la MAPEI S.p.A. per il materiale composito CFRP fornito per consolidare i modelli di archi murari testati.

Bibliografia

- [1] Ehsani M.R., Saadatmanesh H., Velazquez-Dimas, J.I., *Behavior of retrofitted URM walls under simulated earthquake loading*, Jour. of Composites for Constr., v. 3, n. 3, 1999, pp. 134-142.
- [2] Di Marco R., Faccio P., Foraboschi P., Siviero E., *Volte in muratura rinforzate con FRP*, Costruire in Laterizio, n.69, mag.-giu. 1999, pp. 66-71.
- [3] Modena C., Valdemarca M., Valluzzi M.R., *Volte murarie rinforzate mediante FRP*, L'Edilizia, n.5-6, mag.-giu. 1999, pp. 26-32.
- [4] Triantafillou T.C., *Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates*, Jour. of Composites for Construction, v. 2, n. 2, may 1998, pp. 96-104; 203.
- [5] Briccoli Bati S., Rovero L., *Consolidamento di archi in muratura con nastri di composito a fibre lunghe di carbonio*, Atti del convegno: Meccanica delle strutture in muratura rinforzate in FRP: modellazione, sperimentazione, progetto, controllo, Venezia, 7-8 dicembre 2000, pp. 53-64.
- [6] Faccio P., Foraboschi P., *FRP formulazioni e metodi di calcolo*, L'Edilizia, n.9/10 settembre/ottobre 2000, pp.52-57.
- [7] Briccoli Bati S., Rapallini M., Tralli A., *Sul comportamento di volte cilindriche fibrorinforzate in presenza di cedimenti alle imposte di segno alterno*, Atti del convegno: Meccanica delle strutture in muratura rinforzate in FRP: modellazione, sperimentazione, progetto, controllo, Venezia, 7-8 dicembre 2000, pp. 65-74.
- [8] Paradiso M., Rapallini M., Tempesta G., *A numerical method for non linear analysis of masonry arches*, 4° GRACM Congress on computational Mechanics, Patraso, Grecia, 27-29 giugno 2002.
- [9] Christensen J.B., Gilstrap J., Dolan C., *Composite materials reinforcement of existing masonry walls*, Jour. of Architectural Engng., v. 2, n. 2, jun. 1996, pp.63-70.
- [10] Briccoli Bati S., Paradiso M., Tempesta G., *Archi in muratura soggetti a carichi e cedimenti delle imposte*, Costruire in Laterizio, n. 60, nov.-dic. 1997, pp. 436-443.
- [11] Pieri C., *Analisi teorico sperimentale su archi in muratura consolidati con CFRP soggetti a carichi e cedimenti vincolari*, tesi di laurea, relatore M. Paradiso, Università degli Studi di Firenze, 2002.