



# *L'Arco armato*

*nel consolidamento di  
archi e volte in muratura*

*di Lorenzo Jurina*

*Dip. di Ingegneria Strutturale  
Politecnico di Milano*

**G**li interventi di consolidamento su archi e volte in muratura rappresentano un tema di difficile soluzione nel restauro degli edifici storici. Ciò è dovuto alla progressiva perdita di conoscenza tecnica su questo argomento ed alla obiettiva difficoltà di operare nel rispetto delle pressioni in contesti importanti e spesso vincolati. La rinnovata sensibilità di questi ultimi anni per un approccio conservativo al restauro strutturale richiede ai progettisti nuove ed affidabili proposte di intervento e ciò ha ridestato un interesse per l'argomento che non è solo teorico. Ricerche storiche sui principali

autori che nel passato si sono occupati del tema [1,2] ed una interpretazione del comportamento di archi e volte in termini di calcolo a rottura [3,4] hanno contribuito ad una ripresa di conoscenza sul tema.

Gli eventi sismici, che ad intervalli purtroppo frequenti interessano il patrimonio edilizio storico, hanno evidenziato inoltre come interventi poco riguardanti del contesto possano portare ad un incremento della vulnerabilità, invece che ad una sua riduzione.

Risulta necessario individuare e sperimentare tecniche in cui le nuove strutture si pongano "in parallelo" alle strutture esistenti, limitandosi a collaborare con queste senza sostituirle, e che assieme incrementino la resistenza e la duttilità globale, senza alcuna indesiderata modificazione nella distribuzione delle masse e delle rigidità.

## Le usuali tecniche di consolidamento di archi e volte

Nelle patologie più frequenti sugli archi e le volte si evidenziano per lo più lesioni concentrate in pochi punti, assimilabili a vere e proprie "cerniere" strutturali, che, quando superano il numero di tre, generano un meccanismo di collasso. La struttura, che in origine è tre volte iperstatica, si trasforma in un cinematismo ad uno o più gradi di libertà (Figura 1), con conseguente crollo.

Talora non si raggiunge la situazione limite, in quanto entrano in gioco elementi non-strutturali in grado di collaborare alla portata ultima, ma anche in questi casi avvallamenti e depressioni eccessive possono risultare inaccettabili.

L'obiettivo dell'intervento di consolidamento (analogo peraltro a quello che a suo tempo si era proposto il progettista originario) è quello di ottenere la massima corrispondenza tra forma d'asse dell'arco e curva delle pressioni, o per lo meno di ridurne l'eccentricità a valori minimi e comunque contenuti nello spessore strutturale. Molte sono le tecniche finora adottate nel consolidamento degli archi e volte. I principali in-

terventi riguardano il rinforzo dei piedritti (Figura 2a), l'uso di catene di contrasto alle imposte (2b), l'uso di rinfianchi posti alle reni (2c), il getto di una cappa collaborante in cemento armato all'estradosso delle volte (2d).

L'esperienza tuttavia ha dimostrato che l'applicazione di queste tecniche di intervento, a fronte della loro efficacia in termini di sicurezza, molto spesso comporta implicazioni tali da alterare, o addirittura snaturare, la realtà strutturale e costruttiva dell'arco. Non vanno trascurati inoltre i cosiddetti "effetti collaterali":

- il forte carattere di invasività delle soluzioni con rinforzo dei piedritti o con l'uso di catene intradossi,
- la dannosità sulle strutture verticali e sulle fondazioni di incrementi di peso per l'aggiunta di rinfianchi, nonché le notevoli controindicazioni della loro presenza in caso di eventi sismici,
- l'irreversibilità della tecnica con cappa collaborante in cemento armato, nonché i relativi problemi relativi alla traspirabilità della muratura.

È necessario allora proporre e sperimentare sistemi alternativi, meno invasivi e capaci di adattarsi ai singoli casi. Nel seguito si illustra una tecnica originale che consente di consolidare archi e volte in muratura con un minimo apporto di nuovo materiale, e che comporta la semplice aggiunta di cavi metallici post-tesati posti in aderenza alla muratura [5, 6, 7, 9, 10].

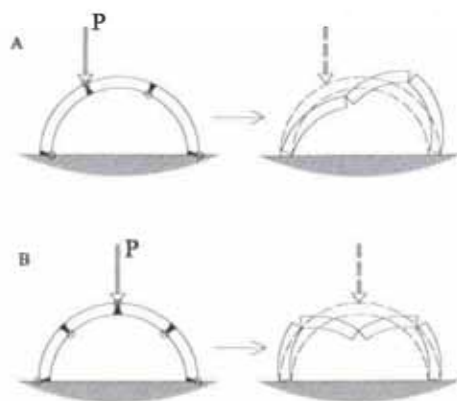


FIGURA 1 (sinistra). Meccanismi di collasso a 4 (A) e 5 cerniere (B).

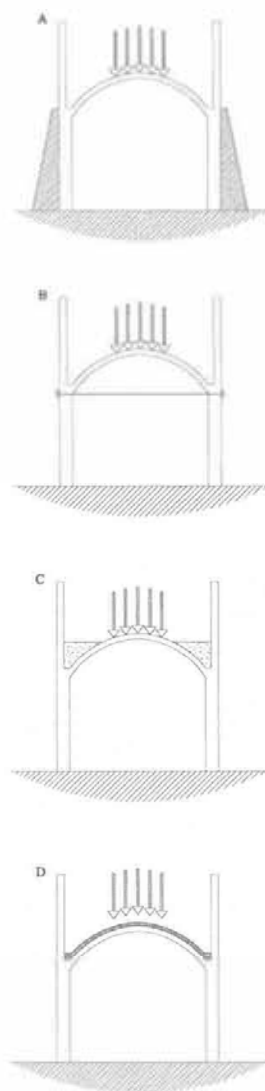
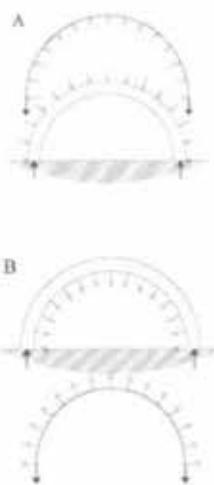
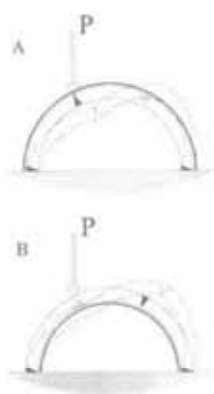


FIGURA 2 (destra, verticale). Tecniche di consolidamento di strutture voltate: A) rinforzo dei piedritti, B) uso delle catene di contrasto, C) uso di rinfianchi, D) aggiunta di cappa collaborante in c.a..



**FIGURA 3.**  
Armatura posta all'estradosso (A) e all'intradosso (B). In presenza dell'armatura, la struttura si comporta come un arco a 3 cerniere.

**FIGURA 4.**  
Forze di interazione tra cavo (in trazione) e arco (in compressione), con cavo posto all'estradosso (A) e all'intradosso (B).

## Una nuova soluzione: l'arco armato

Le patologie più frequenti sugli archi e sulle volte evidenziano per lo più lesioni concentrate in pochi punti, così da dar luogo a "cerniere" strutturali facilmente riconoscibili che, concatenandosi generano un meccanismo di collasso. Gli archi e le volte costituiti da materiale resistente a compressione ma non a trazione infatti raggiungono il collasso quando, all'incrementarsi dei carichi, la curva delle pressioni risulta tangente in più punti ai profili esterni dell'arco dando luogo a rotazioni localizzate tra i conci (con formazione di cerniere) in numero tale da generare un meccanismo di collasso.

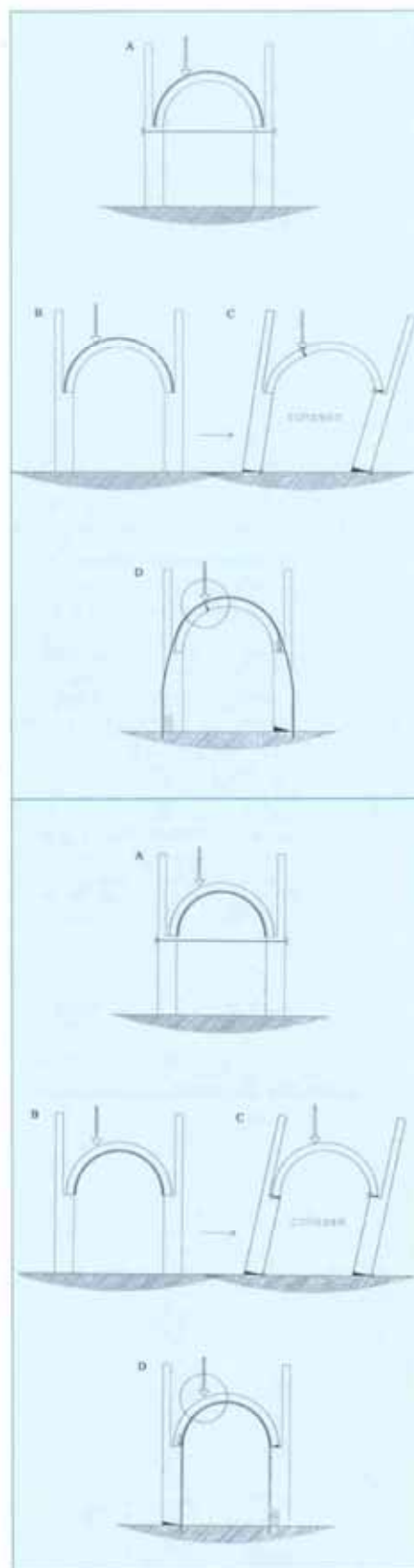
Si può constatare dalle numerose prove realizzate in varie epoche [8] e dalle osservazioni in situ che in fase di collasso le cerniere danno sempre luogo a *fessurazioni alternate* tra le fibre di estradosso e quelle di intradosso dell'arco. In altre parole i punti attorno a cui avvengono le rotazioni mutue rigide tra i vari segmenti di arco sono situati in modo alternato sulle fibre superiori e su quelle inferiori (si faccia ancora riferimento alla Figura 1).

Se si fosse in grado, lungo lo sviluppo dell'arco, di impedire almeno una tra le due famiglie di cerniere (tutte quelle di estradosso oppure tutte quelle di intradosso) nella struttura non si potrebbero formare alcun meccanismo con cerniere alternate. La struttura, originariamente continua, potrebbe al massimo degradarsi ad "arco a tre cerniere", di cui due al piede, che staticamente è ancora efficiente. In altre parole la struttura non può diventare ipostatica e quindi non si arriva al collasso per cinematismo.

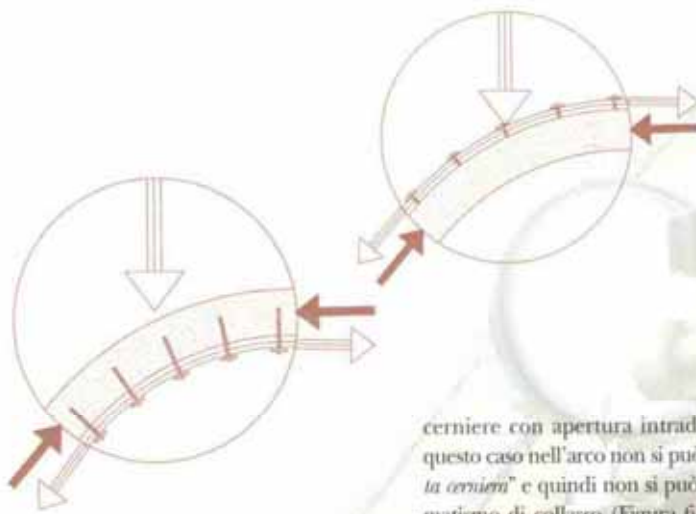
La soluzione più semplice per ottenere questo risultato è rappresentata da una *armatura diffusa resistente a trazione*, ad esempio una membrana applicata su un lato della volta, all'estradosso, oppure, in modo duale, all'intradosso (Figura 3).

Come già osservato per gli interventi mediante cappa in cemento armato, anche l'uso di una membrana potrebbe causare problemi legati alla traspirabilità della muratura, a meno di particolari accorgimenti. Ritengo quindi preferibile l'adozione di una armatura non continua, realizzata mediante una rete di cavi a contatto con la muratura.

Se invece di limitarsi ad un semplice accostamento tra muratura e cavi, questi ultimi vengono anche posti in trazione (facendoli funzionare da "tiranti attivi") si ottiene una dis-







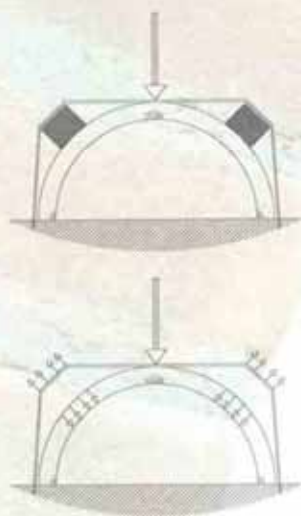
tribuzione di forze applicate sull'arco in direzione radiale, il che provoca una benefica compressione assiale e, di conseguenza, la centratura della curva delle pressioni (Figura 4).

Per realizzare una adeguata "forzatura" tra le funi e l'arco (mediante coazioni imposte che inducono una trazione nelle funi ed una contemporanea compressione nell'arco) è sufficiente fissare le funi agli estremi dell'arco ed allontanarle dall'estradosso mediante cunei o distanziatori a vite, uniformemente ripartiti. Analogo risultato si ottiene con comuni tenditori, posti ad esempio alle estremità dei cavi, a patto di consentire lo scorrimento tra il cavo e la muratura lungo la linea di contatto.

Il posizionamento dei cavi all'estradosso risulta particolarmente semplice in assenza di materiale di riempimento, come capita frequentemente nelle volte di copertura. In caso contrario si deve procedere ad una rimozione, almeno parziale, del riempimento stesso.

È importante notare che la inefficienza dei piedritti, o la assenza di catene, renderebbero vano il rinforzo introdotto (sia all'estradosso che all'intradosso) in quanto si potrebbero presentare cinematismi che coinvolgono le sezioni di base (Figura 5 a,b,c). In tali casi i tiranti vanno portati fino a terra e fissati alle fondazioni (Figura 5d).

Se la rete di cavi viene posta all'intradosso invece che all'estradosso, si ottengono risultati concettualmente analoghi in quanto si impedisce ovunque la formazione di



cerniere con apertura intradosale. Anche in questo caso nell'arco non si può formare la "quarta cerniera" e quindi non si può verificare il cinematismo di collasso (Figura 6 a,b,c,d). Rimane aperto il problema del fissaggio del cavo all'arco, che è certamente meno agevole rispetto al caso estradosale dove è sufficiente il semplice accostamento. Nel caso di utilizzo di membrane può essere sufficiente l'uso di un adeguato collante, nel caso di uso di tiranti occorre invece fare ricorso a tasselli radiali ancorati alla muratura i quali, accorciandosi, avvicinano il cavo all'arco (Figura 7).

Anche in questo caso la presenza di piedritti inefficienti può essere oviata con tiranti condotti fino a terra, come schematicamente illustrato in Figura 6d.

È interessante notare ancora che nel caso di archi particolarmente deformati la tecnica attiva sopra proposta consente di applicare carichi distribuiti anche in modo non uniforme sulla struttura in mattoni. È sufficiente infatti mantenere il cavo separato dalla muratura e forzare maggiormente la fune, e di conseguenza il sottostante arco, dove sia presente un maggiore imbozzamento (Figura 8).

In altre parole, al posto di modificare la geometria dell'arco per consentirgli di sopportare i carichi esistenti, è possibile modificare i carichi applicati in modo da rendere ottimale la geometria esistente, ottenendo una ricentratura della curva delle pressioni, condizione necessaria per la stabilità dell'arco. Si agisce in sostanza con la stessa strategia del "rinfranco alle reni" senza tuttavia alcun incremento delle masse in gioco.

Notiamo che la tecnica proposta è in grado di incrementare notevolmente il carico

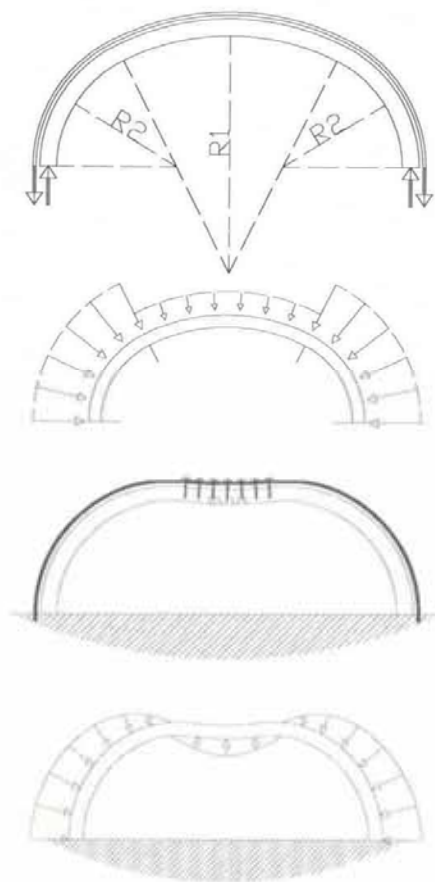
Nel box di pagina precedente: FIGURE 5 e 6.

(A) arco efficiente, con tirante estradosale (intradosale) e catena (B) arco inefficiente, con tirante estradosale (intradosale) ma senza catena (C) conseguente meccanismo di collasso (D) arco efficiente, con tirante estradosale (intradosale) condotto fino a terra.

In questa pagina: FIGURA 7.

Dettaglio dell'interfaccia tra tirante e muratura. (A) cavo estradosale con connettori in compressione (B) cavo intradosale con connettori in trazione.

FIGURA 8. "Forzatura" localizzata tra arco e tirante di estradosso per opporsi a imbozzamenti locali.



di rottura degli archi e delle volte quando il meccanismo di collasso sia di tipo prevalentemente *flessionale*. Ciò è legato al fatto di aggiungere una armatura di rinforzo parallela alle fibre più esterne della sezione.

Il metodo proposto risulta meno efficiente quando il meccanismo di collasso è *a taglio*, caso peraltro molto più raro. Anche in tale situazione ottiene tuttavia un aumento del carico limite di collasso legato all'incremento della compressione tra i conci e di conseguenza all'aumento della resistenza limite per attrito. Per l'efficienza dell'armatura con cavi metallici estradossali non si richiedono archi con geometria a tutto sesto. La tecnica descritta può essere utilizzata anche nel caso di archi notevolmente depressi in quanto in un cavo curvo, che sia teso in modo uniforme su tutta la lunghezza, l'entità delle forze radiali applicate è inversamente proporzionale al raggio di curvatura (Figura 9).

La tecnica proposta, con cavi estradossali, si può

FIGURA 9 a, b (nemi).

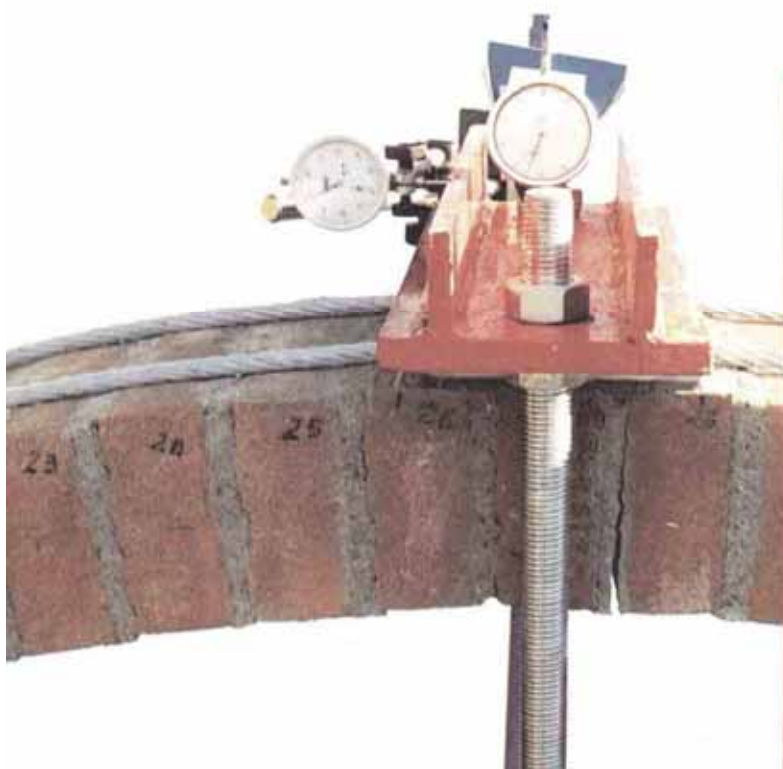
Le forze applicate dal cavo teso all'arco dipendono dal raggio di curvatura locale.

FIGURA 10 a, b (in grigio).

(A) Cavo estradossale teso, ancorato alla muratura nella zona centrale, adottabile nel caso di archi depressi, (B) rappresentazione delle forze applicate sulla muratura.

FIGURA 11 a, b (sotto).

Fase di prova su modello di arco armato in scala reale.





utilizzare anche in archi con inversione locale della curvatura, a patto di introdurre degli ulteriori tirantini, come illustrato in Figura 10.

Il metodo dell'arco armato si propone in definitiva, anche in questo caso, di riportare la struttura ai precendenti livelli di sicurezza senza necessariamente provvedere ad un ripristino o ad una modifica della geometria originaria, ciò che soprattutto in presenza di superfici affrescate risulta inopportuno.

Si è parlato finora genericamente di "tiranti", e naturalmente la preferenza va accordata a quei materiali che siano in grado di garantire la maggiore resistenza e la maggiore durabilità, come l'acciaio inox. Sarebbe possibile tuttavia anche l'uso di materiali diversi, quali i compositi fibro-rinforzati, ma trattandosi di interventi di tipo "attivo" è importante adottare materiali che siano poco influenzati da fenomeni viscosi, pena la necessità di frequenti ritesature.

Qualunque sia il materiale adottato, i vantaggi dell'uso di tiranti di rinforzo post-tesati sono comunque evidenti e si possono riassumere nel ridotto ingombro, unito a costi contenuti, leggerezza, grande resistenza, elevata duttilità globale dell'insieme muratura-cavi, immediata riconoscibilità e possibile reversibilità dell'intervento.

A livello di pura ipotesi, una soluzione interessante potrebbe essere rappresentata da membrane di ridotto spessore e grande resistenza a trazione, traspiranti, spalmabili in modo da essere bene aderenti alla muratura di estradosso e dotate della proprietà di "ritirarsi" in modo controllato dopo la presa, così da diventare "attive" e da sopportare la volta a compressione.

L'introduzione di materiali in grado di ridurre le loro dimensioni nel tempo per azioni chimiche oppure per azioni termiche potrebbe risultare interessante.

Il metodo dell'arco armato è stato sottoposto a prove sperimentali per controllarne la validità.

In modo specifico si sono confrontati i carichi di collasso di archi semplici, di archi rinforzati con cappa in c.a. e di archi "armati" all'estradosso con cavi inox, tutti delle stesse caratteristiche geometriche e di materiale.

Oltre ad un confronto tra l'arco armato ed il più diffuso metodo tradizionale, si voleva dare risposta ad una domanda: "nella soluzione di consolidamento che prevede il getto di una cappa collaborante in c.a., è davvero fondamentale la presenza del conglomerato cementizio oppure il rinforzo strutturale vero e proprio è costituito in modo prevalentemente dalla armatura metallica, resistente a trazione, che vi è contenuta?"



## Verifiche sperimentali

Allo scopo di validare il "metodo dell'arco armato" è stata eseguita una campagna sperimentale su archi a tutto sesto diversamente caricati.

Sono stati realizzati 12 archi in muratura di luce netta 200 cm e spessore 12 cm su cui sono stati effettuati confronti tra 4 diverse situazioni [9]:

- (1) arco semplice in muratura,
  - (2) arco rinforzato con cappa superiore in c.a., senza connettori, ma con armatura saldata alla base,
  - (3) arco rinforzato con cappa superiore in c.a., con connettori metallici tra arco e cappa,
  - (4) arco armato con due cavi in acciaio posti in trazione, semplicemente appoggiati all'estradosso.
- In Figura 12 si illustrano gli archi approntati per la campagna sperimentale dove sono presenti modelli di arco semplice, modelli di arco con cappa in c.a. e modelli di *arco armato*.

Tutti i modelli sono stati assoggettati a carichi concentrati applicati sia a metà sia al quarto della luce mediante una semplice strumentazione costituita da un tirante metallico e da un martinetto idraulico. Il contrasto è fornito da una trave a doppio C, posta a supporto dell'arco ed in grado di assorbire le spinte orizzontali. Il carico è stato applicato con cicli ripetuti di carico e scarico, misurando gli spostamenti assoluti in 6 punti mediante comparatori centesimali fissati a terra. Gli archi di tutti i 12 modelli sono costituiti da sezioni 12x25 in mattoni pieni di tipo paramano, con resistenza al collasso, su provini da quattro mattoni, pari mediamente a 28 daN/cm<sup>2</sup>.

La cappa in calcestruzzo degli archi di tipo (2) e

FIGURA 12 (sopra).  
Modelli di archi in muratura predisposti per prove a scala reale.



(3) ha spessore 4 cm ed è armata con rete elettrosaldata  $\phi 5/15 \times 15$ . Il calcestruzzo adottato è di classe Rck 250.

I connettori sono rappresentati da barre in acciaio  $\phi 10$ , disposte una ogni 22 cm.

L'armatura adottata nei modelli di tipo (4), vale a dire

per l'arco armato, è costituita da due trefoli in acciaio zincato  $\phi 12$  mm, con resistenza a rottura 2500 daN ed allungamento a rottura 4%. La tesitura dei trefoli è stata ottenuta mediante regolazione con chiave dinamometrica alle estremità.

Per brevità e per riferirci in modo specifico al caso di archi soggetti a carichi asimmetrici, simili a quelli generati da sollecitazioni sismiche, vengono illustrati solo una parte dei risultati ottenuti.

Nella tabella A seguente si riassumono i risultati di 5 prove, nelle quali il carico è stato applicato verticalmente ad  $1/2$  della luce. Vengono indicati il valore del carico di collasso (in daN) e gli spostamenti (in cm) in corrispondenza dei 6 comparatori utilizzati, misurati per un carico pari all'85% del collasso. Vedi tabella A.

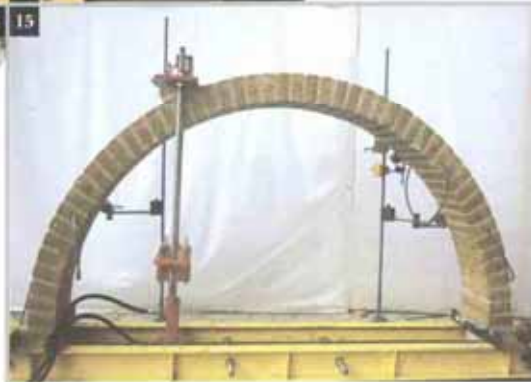
A sintesi delle prove effettuate si possono formulare le seguenti osservazioni:

- le tecniche dell'arco con cappa in c.a. (2 e 3) e dell'arco armato (4 e 5) portano a risposte nel carico di collasso nettamente superiori rispetto al caso di arco semplice (1);

- la tecnica (2), con cappa in c.a. senza connettori e con armatura metallica saldata alla base, ha dato risultati migliori della tecnica (3), con connettori;

- la tecnica dell'arco armato, ha dato risultati confrontabili con quelli ottenuti negli archi con cappa in c.a. Il principale elemento resistente è dunque l'armatura resistente a trazione. In entrambi i casi il collasso si è verificato per rottura dei mattoni compressi.

La risposta dell'arco armato, dipende in modo sostanziale dall'entità della tensione applicata al cavo estradosale o intradosale. La duttilità ottenuta con questa è notevole e superiore a quella con cappa in c.a.



**FIGURA 13.**  
(A) Cavo estradosale teso, ancorato alla muratura nella zona centrale, adottabile nel caso di archi depressi, (B) rappresentazione delle forze applicate sulla muratura.

**FIGURE 14, 15.**  
Arco armato: strumentazione di carico e misura, dettaglio delle armature estradosali.

Posizionamento dei flessimetri sugli archi di studio		TABELLA						
		P ultimo	flex 1	flex 2	flex 3	flex 4	flex 5	flex 6
1 - arco semplice		191	0,04	0,84	1,35	1,16	0,60	1,50
2 - arco + cappa		3379	5,78	10,60	13,34	15,20	6,84	13,00
3 - arco + cappa + conti.		2948	2,10	5,82	7,33	8,17	5,03	7,36
4 - arco armato (60 Nm)		2559	5,18	20,22	19,70	23,10	10,50	16,73
5 - arco armato (80 Nm)		2886	1,80	11,64	12,75	11,98	5,03	9,42



## Conclusioni

Dalle prove sperimentali eseguite e dalle osservazioni formulate la tecnica dell'*arco armato* qui proposta appare decisamente promettente e di semplice utilizzo, con considerevoli incrementi di resistenza e di duttilità nei confronti dell'arco semplice e con risposte simili a quelle ottenute con la più tradizionale tecnica della cappa in c.a. La sua applicazione in zone caratterizzate da eventi sismici appare pertanto interessante, soprattutto tenendo in conto il trascurabile incremento delle masse in gioco. Sono in corso ulteriori sperimentazioni su modelli in muratura in varie scale. Tali prove consentiranno di confrontare il proposto *metodo attivo* dell'arco armato con tecniche alternative, quali l'utilizzo di membrane passive, estradossali oppure intradossali, costituite da resine caricate con fibre resistenti a trazione.

L'applicazione a casi concreti consentirà di valutare più approfonditamente le difficoltà operative in fase di posa in opera dei cavi, sia all'estradosso che all'intradosso, e l'effettivo raggiungimento dei livelli di portata limite che sembrano ottenibili con questa soluzione mista acciaio-muratura.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Benvenuto E., *La Scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Sansoni, 1981.
- [2] Di Pasquale S., *L'arte del costruire, tra conoscenza e scienza*, Marsilio, 1996.
- [3] Heyman J., *The masonry arch*, Chichester, UK, 1982
- [4] Heyman J., *The safety of masonry arch*, Int.J.Mech.Sci., vol.11, 1969.
- [5] Jurina L., *L'arco armato: una nuova tecnica di consolidamento di archi e volte in muratura con uso di tiranti metallici*, XVI Convegno CTA, Ancona 1997.
- [6] Jurina L., *I tiranti metallici nel consolidamento degli edifici monumentali*, XVI Convegno CTA, Ancona, 1997.
- [7] Jurina L., *Il miglioramento sismico degli edifici storici*, Ambiente Costruito, n.3/98.
- [8] Frezier A.F., *La theorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois pour la construction des voûtes et autres parties des batimens civils et militaires*, Strasburgo, 1737.
- [9] Fumagalli C., *Le catene nella progettazione e nel consolidamento strutturale di archi e volte*, Tesi di laurea, Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore L.Jurina, 1996.
- [10] Cultreri O., Savoldelli G., *Arco armato*, Tesi di laurea, Fac. Architettura, Politecnico di Milano, rel. L.Jurina, 1997

**RINGRAZIAMENTI**  
Ringrazio gli architetti Carla Fumagalli, Giosuè Savoldelli e Orazio Cultreri per il prezioso aiuto e la collaborazione prestata nello sviluppo della parte sperimentale.

FIGURE 16 a/b/c, 17.

Arco armato: deformata a collasso, formazione di "cerniera" con fessura estradossale contenuta dai cavi, rottura dell'arco per compressione dei mattoni.

