

UNA TECNICA DI CONSOLIDAMENTO ATTIVO PER ARCHI E VOLTE IN MURATURA

Lorenzo Jurina

Dipartimento di Ingegneria Strutturale
Politecnico di Milano
piazza Leonardo da Vinci, 32
20133 Milano - Italia

Convegno:

“SEISMIC PERFORMANCE OF BUILT HERITAGE IN SMALL HISTORIC CENTERS”

Assisi – Italia, aprile 1999

SOMMARIO

Il consolidamento strutturale di archi e volte in muratura rappresenta un tema spinoso con cui confrontarsi negli interventi sul costruito. La tecnica più frequentemente adottata, quella che prevede l'uso di una cappa collaborante in cemento armato, risulta spesso invasiva e tale da modificare in modo sostanziale la distribuzione delle masse e delle rigidità nella struttura.

L'articolo propone una nuova tecnica di intervento attivo, denominata “*arco armato*”, che è in grado di aumentare notevolmente la resistenza a rottura dell'arco e consiste nel disporre all'estradosso (o intradosso) dell'elemento curvo una serie di cavi metallici, posti in trazione, in grado di impedire la formazione di cerniere con apertura estradosale (o intradosale) e di imporre contemporaneamente un incremento della forza assiale, con aumento della duttilità.

La soluzione proposta non comporta incrementi di massa (circostanza particolarmente favorevole in zone sismiche) ed i cavi risultano facilmente ritesabili e rimovibili all'occorrenza. Sono state eseguite prove a rottura su modelli di arco in scala ridotta e su modelli in muratura a grandezza naturale soggetti a carichi simmetrici ed asimmetrici, con l'obiettivo di confrontare la nuova tecnica proposta con tecniche di rinforzo tradizionali.

SUMMARY

The structural consolidation of ancient masonry arches and vaults always represents a difficult task. The most usual technique consists in grouting a reinforced concrete layer over the arch, but it is very invading and modifies strongly the mass and stiffness distribution in the structure.

A new active consolidation technique, named “*reinforced arch method*” is presented in the paper. It makes use of prestressed steel cables, externally distributed over (or under) the arch and cooperating with the masonry. Their presence avoids the opening of collapse hinges, huges the axial compression along the arch and represents a strong help for the ultimate resistance and ductility.

No new mass is added in the reinforced structure, and this fact is usefull in seismic zones.

The steel cables may be easily changed or re-tensioned, if needed.

Experimental tests have been performed with reduced scale wooden models and with real scale masonry models, under symmetrical and unsymmetrical loads, in order to compare the results of the new tecnique with traditional ones.

1. INTRODUZIONE

Gli 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 preesistenze 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 a 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 indesiderate modifiche nella distribuzione delle masse e delle rigidità.

2. 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.

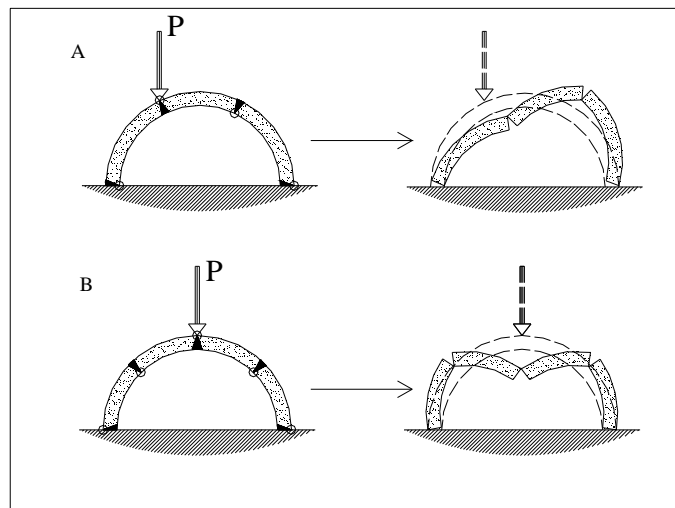


Figura 1

Meccanismi di collasso. (A) meccanismo a 4 cerniere, (B) meccanismo a 5 cerniere.

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 la eccentricità a valori minimi e comunque contenuti nello spessore strutturale.

Molte sono le tecniche finora adottate nel consolidamento degli archi e volte.

I principali interventi riguardano il rinforzo dei piedritti (figura 2a) per renderli adatti a sostenere le spinte orizzontali comunicate dall'arco e sono usualmente accompagnati da interventi di ripristino della geometria originaria oppure da interventi di rinforzo locale

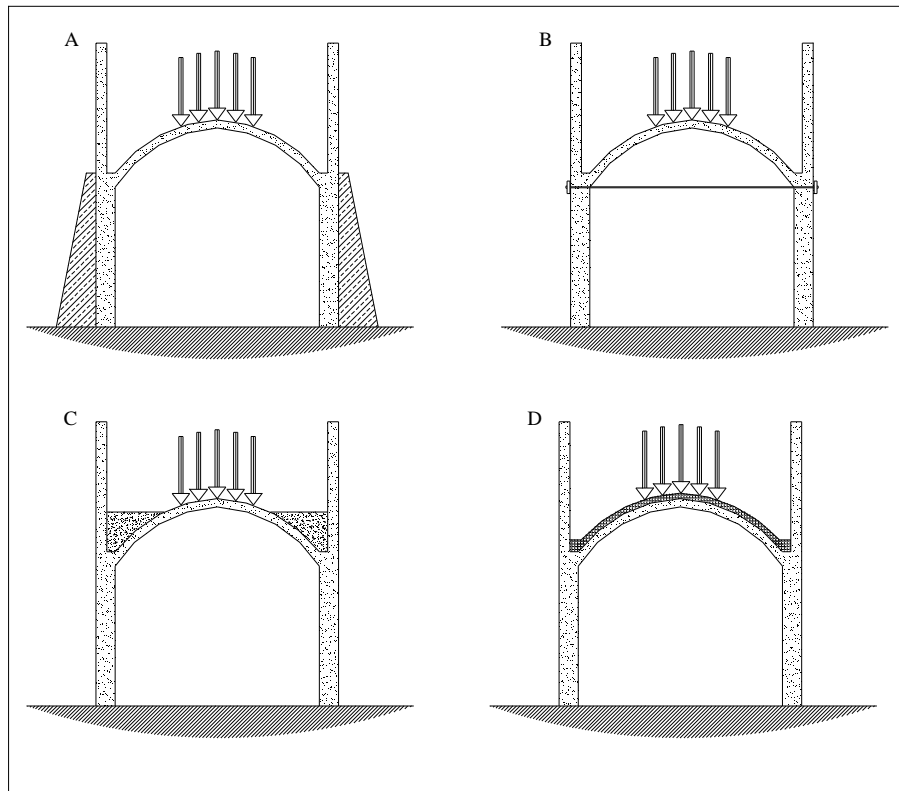


Figura 2

Tecniche di consolidamento di strutture voltate, (A) rinforzo dei piedritti, (B) utilizzo di catene di contrasto, (C) uso di rinfianchi, (D) aggiunta di cappa collaborante in cemento armato.

in grado di ricostituire la continuità strutturale. In pratica si modifica la situazione di vincolo alla base, e dunque l'entità delle reazioni vincolari, modificando la curva delle pressioni. Questi interventi influenzano tuttavia l'aspetto esterno delle pareti in modo talora non accettabile.

L'uso di catene di contrasto alle imposte (figura 2b) va nella medesima direzione ed è da sempre il principale strumento adottato, quando non sia possibile operare con contrafforti o comunque con strutture esterne. Le catene tuttavia, mentre impediscono efficacemente i movimenti orizzontali dell'arco, creano contemporaneamente un ingombro visuale e materiale talora eccessivo, soprattutto nel caso di volte affrescate.

L'uso di rinfianchi posti alle reni (figura 2c) introduce carichi aggiuntivi rispetto al peso proprio dell'arco, cui è affidata una funzione di centraggio della curva delle pressioni. Ogni intervento che comporti aggiunta di nuovo materiale introduce peraltro nuove masse in posizioni alte dell'edificio, con forti controindicazioni in zone sismiche.

Una soluzione che ha preso piede in questi ultimi vent'anni, molto interessante anche se decisamente invasiva, è il getto di una cappa collaborante in cemento armato all'estradosso delle volte (figura 2d), previa la posa in opera di connettori metallici tra la vecchia e la nuova struttura. Taluni interpretano questa tecnica come un incremento dello spessore complessivo dell'arco, altri più semplicemente la intendono come una struttura autonoma, a cui la vecchia volta risulta appesa. Anche questa tecnica presenta naturalmente pregi e difetti.

Indiscutibilmente si ottiene un incremento della resistenza e della rigidezza della volta ma talora l'eccessivo peso del materiale aggiunto provoca danni alle strutture verticali o alle fondazioni, per non parlare dell'incremento di massa disposta a livelli alti, dannoso in caso di terremoti.

Oltre alla evidente impossibilità di rimuovere l'intervento in futuro, va sottolineato anche il rischio che il calcestruzzo possa provocare danni di tipo fisico-chimico alla sottostante muratura, quali il percolamento di sali o l'impedimento della traspirazione, deleteri soprattutto in presenza di affreschi. E' 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** /

3. UNA NUOVA SOLUZIONE : "L'ARCO ARMATO"

Gli archi e le volte costituiti da materiale resistente a compressione ma non a trazione 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.

Quando siano note le posizioni delle cerniere, risulta semplice calcolare il carico di collasso. In assenza di tale informazione è ancora possibile individuare il carico di collasso come il minimo tra i carichi cinematicamente ammissibili / **4** /, analizzando tutte le possibili posizioni delle cerniere.

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 cinematicismo.

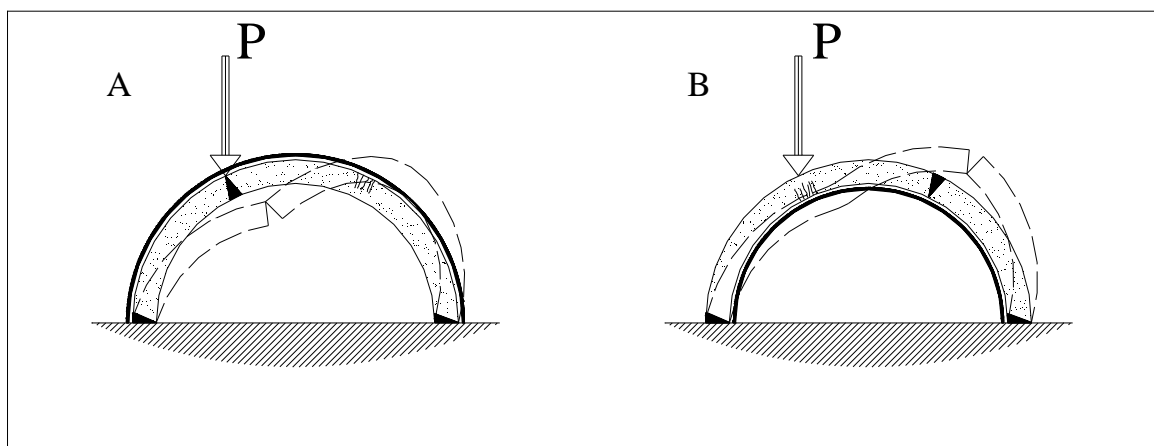


Figura 3

Armatura (A) posta all'estradosso, (B) posta all'intradosso.

In presenza dell'armatura, la struttura si comporta come un arco a 3 cerniere.

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 distribuzione 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.

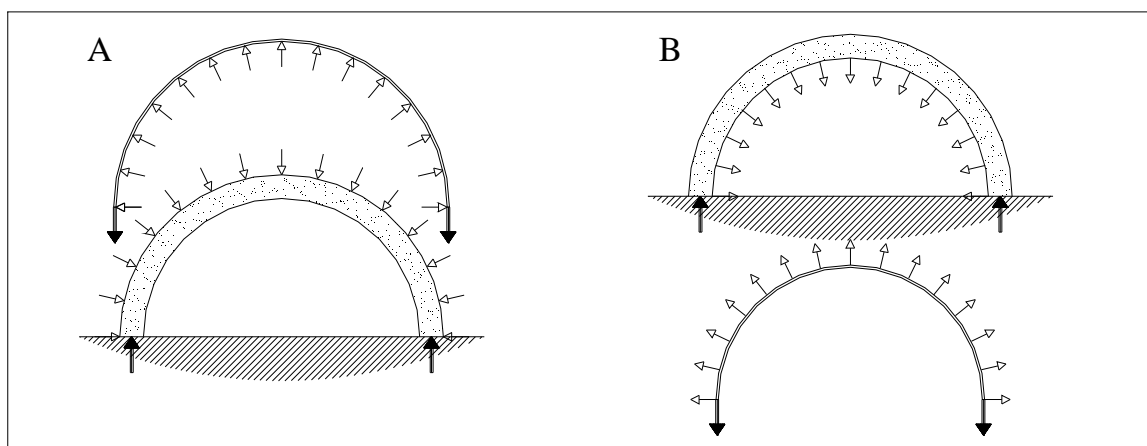


Figura 4
Forze di interazione tra cavo (in trazione) e arco (in compressione),
con cavo posto (A) all'estradosso, (B) all'intradosso

E' importante notare che la inefficienza dei piedritti, o la assenza di catene, renderebbe vano il rinforzo introdotto (sia all'estradosso che all'intradosso) in quanto si potrebbero presentare cinematismi che coinvolgono le sezioni di base.(figura.5abc.)

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 intradossale. Anche in questo caso nell'arco non si può formare la "quarta cerniera" e quindi non si può verificare il cinematismo di collasso (figura 6abcd). Rimane aperto il problema del fissaggio del cavo all'arco, che è certamente meno agevole rispetto al caso estradossale 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)

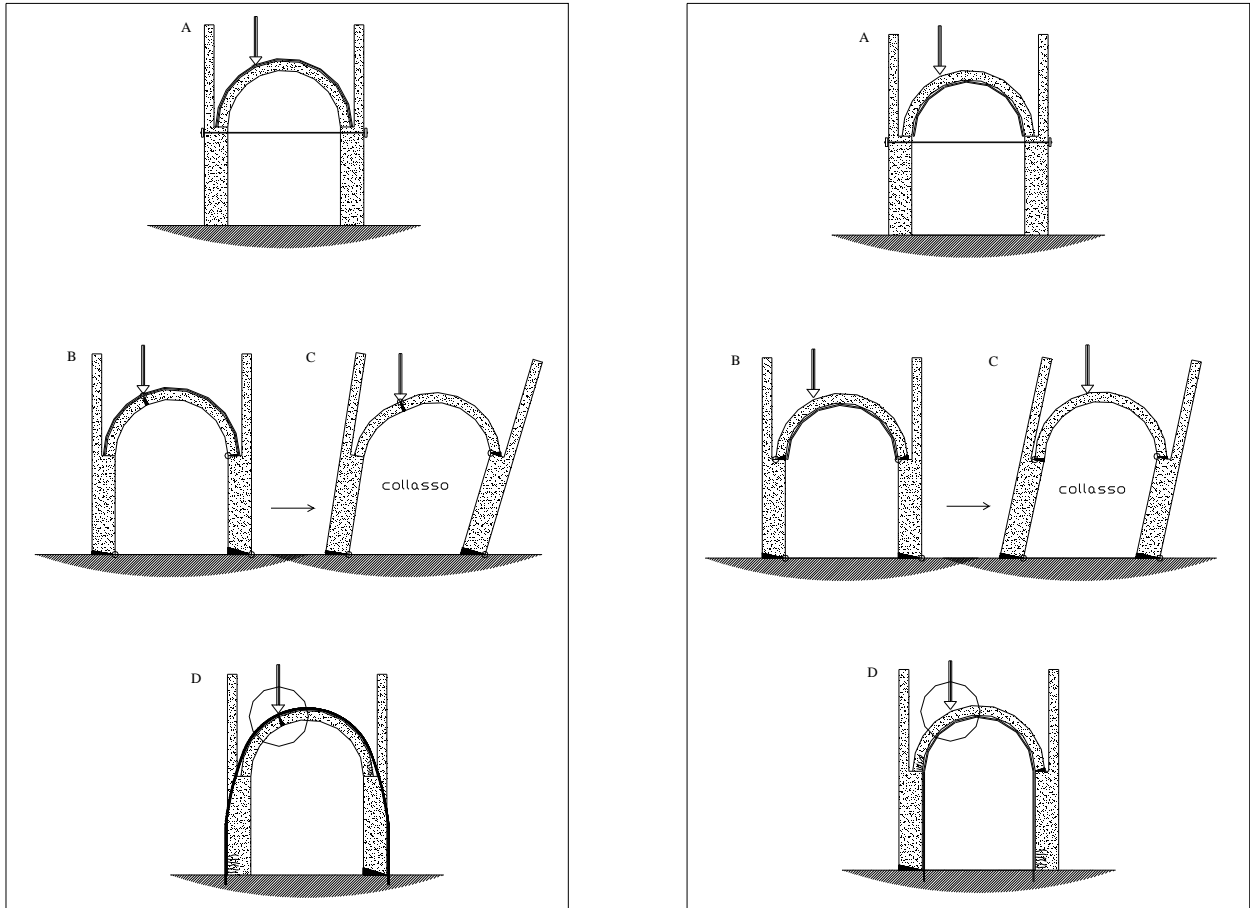


Figure 5 e 6

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

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

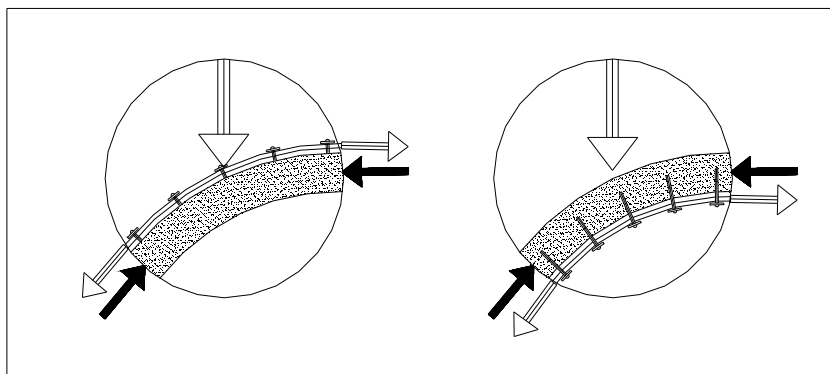


Figura 7

- Dettaglio dell'interfaccia tra tirante e muratura.
- (A) cavo estradossale con connettori in compressione
- (B) cavo intradossale con connettori in trazione

E' 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.

E' sufficiente infatti mantenere il cavo separato dalla muratura e forzare maggiormente la fune, e di conseguenza il sottostante l'arco, dove sia presente un maggiore imbozzamento (fig. 8).

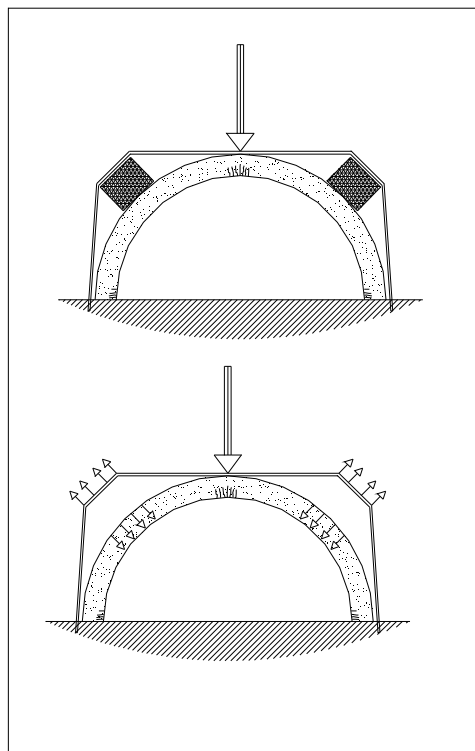


Figura 8

“Forzatura “ localizzata tra arco e tirante di estradosso per opporsi a imbozzamenti locali

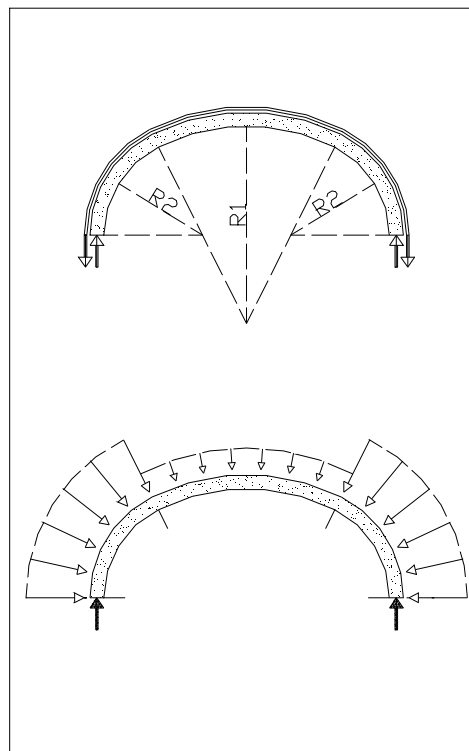


Figura 9

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

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 “rinfiacco alle reni” senza tuttavia alcun incremento delle masse in gioco.

Notiamo che la tecnica proposta è in grado di incrementare notevolmente il carico 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 estradosali 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. (fig.9)

La tecnica proposta, con cavi estradosali, si può utilizzare anche in archi con inversione locale della curvatura, a patto di introdurre degli ulteriori tirantini , come illustrato in fig.10.

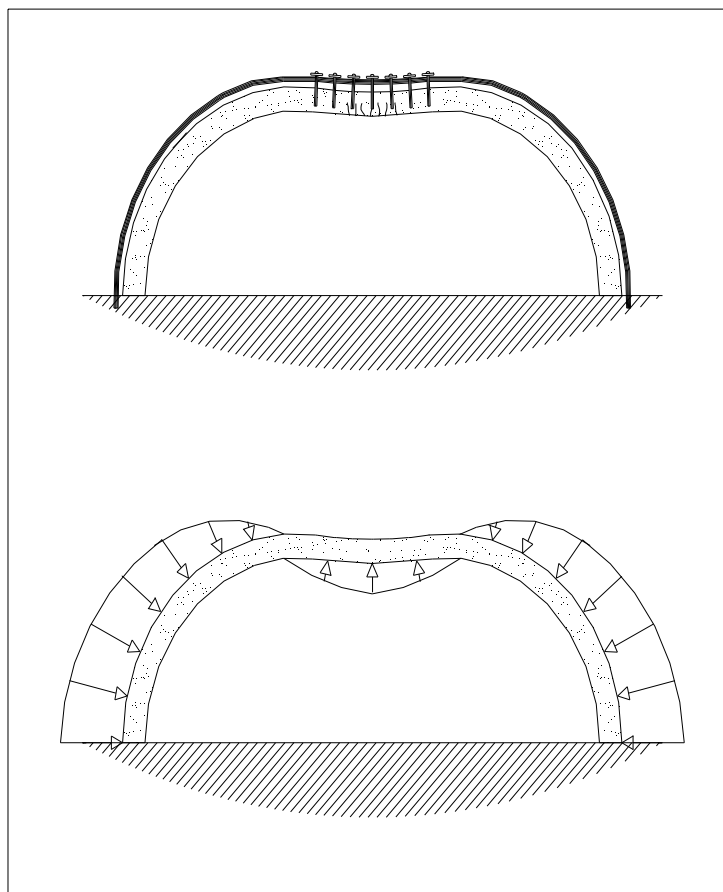


Figura 10

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

Il metodo dell'arco armato si propone in definitiva, anche in questo caso, di riportare la struttura ai preesistenti 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 fibrorinforzati, 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 sottoporre 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.

A livello di semplice congettura, l'adozione di resistenze elettriche distribuite sulla superficie muraria, in grado di mantenere alta la temperatura del composito durante la presa per poi ridurla in seguito, potrebbero andare nella direzione dell'intervento attivo.

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?"

4. VERIFICHE SPERIMENTALI

Allo scopo di validare il "metodo dell'arco armato" sono state eseguite due campagne sperimentali su archi a tutto sesto diversamente caricati. La prima ha utilizzato modelli a sala ridotta, in legno, di luce netta 60 cm, la seconda modelli a scala reale, in muratura, di luce netta 200 cm.

4.1 Modelli in scala ridotta

Si è realizzato un arco in concetti di legno, di luce 60 cm e spessore 6 cm, a cui sono stati applicati carichi di intensità crescente fino a rottura, modificando il punto di applicazione dei carichi stessi. Sono state eseguite una serie di 64 prove applicando carichi singoli in varie posizioni e carichi doppi simmetrici. Le fotografie 11ab illustrano il modello realizzato. / 9 /

Si è confrontata la risposta dell'arco semplice con quella dell'arco armato con rinforzo all'estradosso. Il rinforzo è costituito da un semplice nastro continuo, ossia una striscia di carta di spessore costante, appoggiata superiormente ai concetti e solidale all'arco ai concetti di estremità. Sono state eseguite numerose prove con due tipi di nastro, uno di resistenza a trazione 0,86 daN e l'altro con resistenza 1,74 daN. I risultati delle prove sono riassunti nella tabella A, utilizzando le notazioni della figura 12.

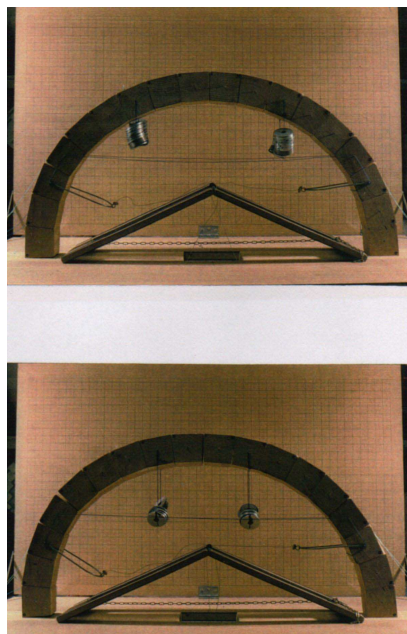


Figura 11

Modelli in legno di luce 60 cm, per prove a collasso con carichi in diverse posizioni

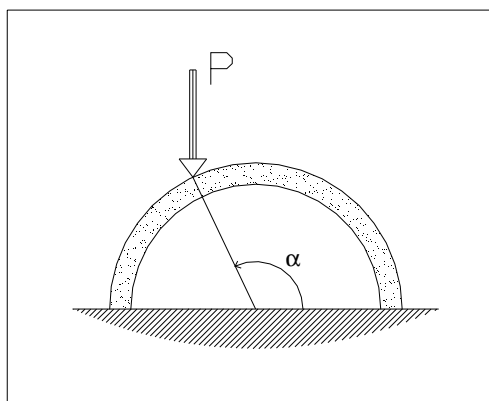


Figura 12
Posizione variabile del carico nei modelli a scala ridotta

Notiamo che ogni valore riportato nella tabella rappresenta il valore medio di almeno due prove. L'angolo "alfa" che indica il punto di applicazione del carico viene misurato a partire dall'imposta dell'arco. I carichi di collasso sono espressi in daN.

Nella tabella citata:

- (1) rappresenta il carico di collasso di un arco non armato
- (2) rappresenta il carico di collasso di un arco armato con cavo estradossale, di resistenza a trazione 0,86 daN e solidale ai soli conci estremi dell'arco,
- (3) è analogo a (2), ma con cavo estradossale solidale ad ogni concio dell'arco
- (4) è analogo a (2), ma con cavo estradossale di resistenza a trazione 1,74 daN

Tabella A

	<i>Carico P di collasso in funzione del punto di applicazione del carico (un solo carico P concentrato)</i>						
	alfa = 90	alfa = 105	alfa = 115	alfa = 125	alfa = 135	alfa = 145	
arco semplice (1)	0,22	0,22	0,23	0,33	0,51	0,95	
arco armato (2)	1,61	1,71	1,48	1,65	1,97	2,43	
arco armato (3)	2,16	2,22	2,12	2,27	2,60		
arco armato (4)	3,05	3,10	3,04	3,15	3,04	3,40	
P(4) / P (1)	13,86	14,09	13,21	9,54	5,96	3,58	
	<i>Carico P di collasso in funzione del punto di applicazione del carico (due carichi P simmetrici e concentrati)</i>						
	alfa = 90	alfa = 105	alfa = 115	alfa = 125			
arco semplice (1)	0,11	0,16	0,22	0,60			
arco armato (2)	0,80	0,97	1,30	3,40			
arco armato (4)	1,53	2,07	2,65	5,80			
P(4) / P (1)	13,86	12,94	12,04	9,67			

Malgrado la ridotta resistenza dei nastri di rinforzo utilizzati, l'incremento del carico di collasso risulta ragguardevole soprattutto quando i carichi vengono applicati nella parte centrale dell'arco. Il rapporto P(4)/P(1), tra arco armato e arco semplice, varia infatti da 3,58 a 14,09 ad illustrazione dei notevoli vantaggi ottenuti. Notiamo anche che al raddoppiare della resistenza del rinforzo si ottiene un proporzionale incremento del carico limite.

Il rapporto $P(4)/P(2)$ risulta circa pari a 2, in tutte le prove.

Nel corso delle prove di tipo (2) si è osservata una forte deformabilità della struttura prima di giungere al crollo, con fenomeni di scorrimento del nastro di rinforzo nei confronti dei conci.

Nelle prove di tipo (3), in cui il nastro è stato solidarizzato ad ogni singolo concio in modo da impedire scorrimenti, i risultati evidenziano un ulteriore miglioramento del 35% circa.

4.2 Modelli in scala reale

Parallelamente ai modelli in legno a scala ridotta, sono stati realizzati 12 archi in muratura di luce netta 200 cm e spessore 12 cm su cui sono stati effettuati confronti tra quattro diverse situazioni / 10 /:

- (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.



Figura 13

Modelli di archi in muratura predisposti per prove a scala reale

In figura 13 si illustrano i 12 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.

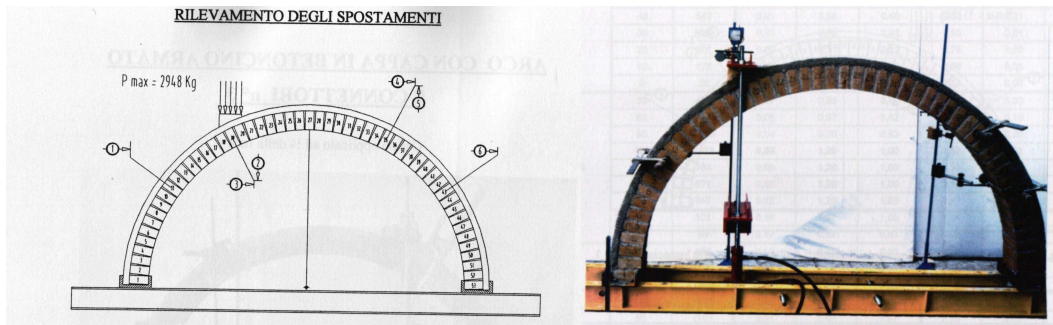


Figura 14 e 15

Posizionamento dei flessimetri e strumentazione nelle prove di carico su arco con cappa in c.a.

Gli archi di tutti i 12 modelli sono costituiti da sezioni 12x25 in mattoni pieni di tipo paramano, con resistenza a collasso, su provini da quattro mattoni, pari mediamente a 28 daN/cm².

La cappa in calcestruzzo degli archi di tipo (2) e (3) ha spessore 4 cm ed è armata con rete elettrosaldata Ø5/15x15. Il calcestruzzo adottato è di classe Rck250.

I connettori sono rappresentati da barre in acciaio Ø10, 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 Ø12 mm, con resistenza a rottura 2500 daN ed allungamento a rottura 4%. La tesatura dei trefoli è stata ottenuta mediante regolazione con chiave dinamometrica alle estremità. Nella Tabella B si indica in (Nm) il valore della coppia di serraggio del dado di contrasto.

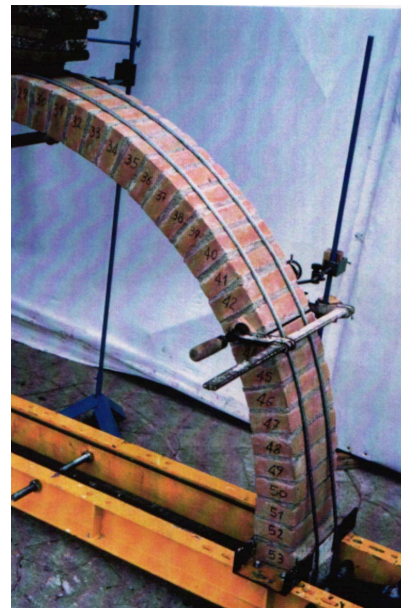
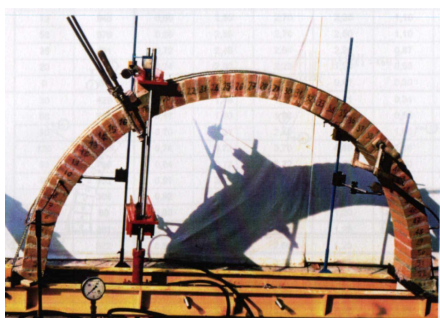
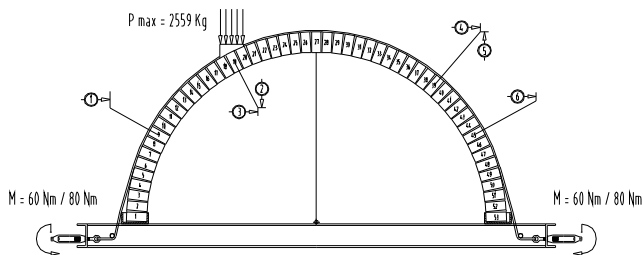


Figure 16,17,18

Arco armato: schema di posizionamento dei flessimetri, strumentazione di carico e misura, dettaglio delle armature estradossali

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 B seguente si riassumono i risultati di 5 prove, nelle quali il carico è stato applicato verticalmente ad $\frac{1}{4}$ 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.

Tabella B

	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	3,78	10,60	13,34	15,20	6,84	13,00
3- arco + cappa + conn.	2948	2,10	5,82	7,33	8,17	3,03	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	1,30	11,64	12,75	11,98	5,03	9,42

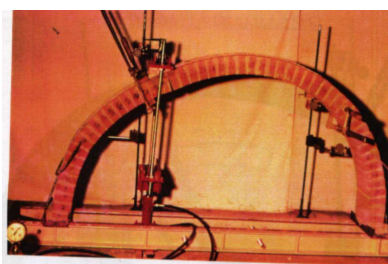


Fig. 9.237

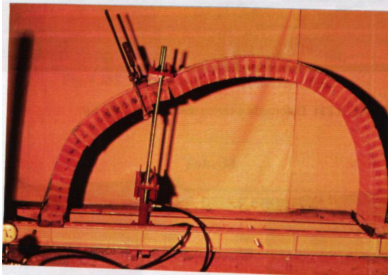


Fig. 9.238

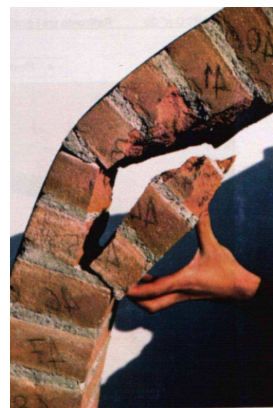
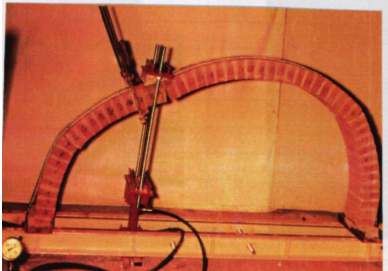


Figure 19,20,21

Arco armato: deformata a collasso, formazione di “cerniera” con fessura estradossale contenuta dai cavi, rottura dell’arco per compressione dei mattoni

Al termine delle prove effettuate si possono formulare le seguenti osservazioni:

- 1- 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),

- 2- 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.
- 3- 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.
- 4- La risposta dell'*arco armato*, dipende in modo sostanziale dalla entità della tensione applicata al cavo estradossale, o intradossale,
- 5- La duttilità ottenuta con la tecnica dell'*arco armato* è notevole e superiore a quella con cappa in c.a.

5. 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.

La 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.

6. BIBLIOGRAFIA

- 1- Benvenuto E., La Scienza delle Costruzioni e il suo sviluppo storico, Sansoni Ed., 1981
- 2- Di Pasquale S., L'arte del costruire, tra conoscenza e scienza, Marsilio Ed., 1996
- 3- Heyman J., The masonry arch, Chichester, United Kingdom, 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 voutes 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, relatore L.Jurina, 1997

RINGRAZIAMENTI

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