



## **PROVE A COLLASSO SU ARCHI IN MURATURA CONSOLIDATI CON LA TECNICA DELL'ARCO ARMATO: RISULTATI DI UNA SPERIMENTAZIONE.**

L. Jurina

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano*

### **SOMMARIO**

Il consolidamento strutturale di archi e volte in muratura ha sempre rappresentato una sfida per chi ha dovuto occuparsene ed è stato affrontato con approcci diversi, più o meno invasivi. A fianco della tecnica oggi più frequentemente adottata, quella della cappa collaborante in cemento armato, e di tecniche più recenti con impiego di fasce o membrane in FRP, l'articolo propone una campagna di prove sperimentali riferite ad una originale tecnica di intervento attivo, denominata "arco armato", che è in grado di aumentare notevolmente sia la duttilità che la resistenza a rottura dell'arco e consiste nel disporre uno o più cavi metallici, posti in trazione, all'estradosso (o intradosso) dell'arco, in grado di rallentare o impedire la formazione di cerniere, e quindi del meccanismo di collasso, e di indurre contemporaneamente un incremento della compressione tra concio e concio.

La soluzione proposta non comporta aumento di massa (circostanza utile in zone sismiche) ed i cavi risultano ritesabili oppure rimovibili all'occorrenza. Sono state eseguite prove a collasso su oltre 400 modelli di arco in scala ridotta, soggetti a carichi variabili per posizione, con l'obiettivo di determinare l'efficacia del metodo al variare della tensione applicata ai cavi ed al variare della sagoma geometrica dell'arco (adottando sei diverse geometrie).

### **ABSTRACT**

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 the method is invading and strongly modifies the mass and stiffness distribution in the structure. A second, vey useful, method makes use of FRP membranes, but in same cases it may cause aesthetical criticisms.

A new active consolidation technique, named "RAM-reinforced arch method" is presented in the paper. It makes use of pre stressed steel cables, externally distributed over (or under) the arch and cooperating with the masonry. Their presence avoids the opening of collapse hinges, increases 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 useful in seismic zones. Steel cables may be changed or re-tensioned, if needed.

More than 400 experimental tests have been performed with the help of reduced scale wooden models under unsymmetrical loads, in order to compare the results obtained with arches of different shapes and to estimate the increase of collapse load due to an increment of the tension applied to the cables.

## 1. INTRODUZIONE

Il consolidamento degli archi e delle volte in muratura costituisce un problema che è necessario affrontare frequentemente quando si debba intervenire su edifici storici. La perdita di conoscenze tecniche su questo argomento e la difficoltà di operare nel rispetto delle preesistenze, in contesti importanti e spesso vincolati, rende necessario attualizzare lo studio di metodi rispettosi ed efficaci, in grado di fornire incrementi significativi alla sicurezza dell'edificio.

La rinnovata sensibilità per un approccio conservativo al restauro strutturale richiede nuove ed affidabili proposte di intervento e ciò ha ridestato un interesse per l'argomento che non è solo teorico / 1,2 /. Gli eventi sismici che a intervalli frequenti interessano il patrimonio edilizio storico hanno evidenziato inoltre il fatto che interventi poco rigorosi del contesto possano portare ad un aumento della vulnerabilità, invece che ad una sua riduzione.

E' necessario individuare e sperimentare tecniche *attive* in cui le nuove strutture si pongano "*in parallelo*" alle strutture esistenti, limitandosi a collaborare con queste senza sostituirle, e che, contemporaneamente, incrementino la resistenza e la duttilità globale, senza indesiderate modifiche nella distribuzione delle masse e delle rigidità.

La tecnica dell'*arco armato*, proposta e sperimentata dall'autore negli ultimi 10 anni costituisce una soluzione efficace e adeguabile agli specifici contesti in cui si opera, che siamo convinti debbano essere trattati "caso per caso".

## 2. TECNICHE DI CONSOLIDAMENTO DI ARCHI E VOLTE

Nelle patologie di origine meccanica che più frequentemente si manifestano sugli archi e le volte è ricorrente imbattersi in lesioni concentrate in pochi punti, assimilabili a "*cerniere*" strutturali, che, quando superano il numero di tre, generano un meccanismo di collasso. L'arco, in origine tre volte iperstatico, si trasforma in un cinematismo ad un grado di libertà. con conseguente crollo. Si tratta pertanto di impedire la formazione di tali meccanismi di collasso che, come dimostrato sia dal punto di vista teorico che sperimentale, si manifestano con la presenza di cerniere che si aprono *in modo alternato*, all'intradosso e all'estradosso. Senza la pretesa di essere esaustivo, elenco, a grandi linee, i principali metodi finora adottati nel consolidamento degli archi e volte.

1. rinforzo dei piedritti mediante contrafforti per renderli adatti a sostenere le spinte orizzontali comunicate dall'arco. E' una soluzione efficace ma piuttosto invasiva, spesso adottata in passato in quanto fa uso di materiali murari, sollecitati a sola compressione.

2. aggiunta di catene di contrasto intradossali, inserite alla quota delle imposte al fine di opporsi ai carichi ribaltanti che agiscono sui piedritti. Anche questa soluzione, molto efficace e frequentemente adottata nel nostro paese, crea talora una aggiunta ingombrante e non sempre accettabile, specie in presenza di superfici affrescate. In alcuni contesti, in Spagna ad esempio, il consolidamento delle volte con aggiunta di catene permanenti lasciate a vista viene rifiutato a priori, in quanto rappresenta, per il professionista, una sorta di dichiarazione di resa incondizionata.

3. inserimento di catene di contrasto estradossali applicate orizzontalmente al di sopra della volta con il compito di vincolare tra loro le pareti su cui la volta si imposta. La soluzione risulta efficace solo a patto che le pareti siano molto caricate in direzione verticale (come avviene ai piani bassi di un edificio) così da rendere accettabile la pressoflessione indotta dalla spinta dell'arco, applicata in una posizione che non coincide con l'ancoraggio a muro

della catena. Talora, in passato, le catene orizzontali erano dotate di ulteriori spezzoni metallici disposti in diagonale (*catena a braga*), spinti fino alla quota delle imposte, che avrebbero dovuto assorbire la spinta dell'arco. Tale intervento non fornisce apprezzabili miglioramenti al sistema in quanto le diagonali, se lavorassero davvero in trazione, solleciterebbero la catena orizzontale (molto deformabile) con carichi diretti verso il basso, obbligandola ad inflettersi. Il sistema potrebbe risultare efficace solo a patto di sagomare la catena, ossia di darle una forma "a spezzata di tre segmenti", curva verso il basso.

4. aggiunta di "graffette" posizionate sopra all'arco o alla volta, che costituiscono una specie di morsetto estradosale rigido, in grado di contrastare le spinte alle imposte. Si tratta di una evoluzione della catena "a braga" sopra menzionata, in cui la differenza fondamentale è rappresentata dal fatto che la catena è costituita da una trave, ossia da una struttura flessionalmente rigida, così da poter resistere con modesta deformazione alle forze dirette diagonalmente verso il basso, comunicate dai tirantini diagonali / 6,7 /.

5. modifica della geometria dell'arco intervenendo dall'intradosso con l'aggiunta di un "sottarco" collaborante (che aumenta lo spessore dell'arco originario) oppure intervenendo da sopra con una modifica dei rinfianchi (dove il materiale sciolto viene sostituito da materiale coeso), oppure con l'introduzione di nuovi elementi irrigidenti estradosali, tipo "frenelli", oppure, ancora, con nervature. La necessità di mettere a nudo l'estradosso dell'arco o della volta rende complessa e costosa l'operazione, a meno che non si tratti di volte libere superiormente, come spesso si verifica negli edifici ecclesiastici.

Notiamo che l'incremento dell'altezza dei rinfianchi posti alle reni, cui è affidata una funzione di centraggio della curva delle pressioni, introduce masse aggiuntive rispetto a quelle originarie, con forti controindicazioni in zone sismiche.

6. creazione di un solaio indipendente, all'estradosso, con eventuale svuotamento o modifica dei rinfianchi, in grado di assorbire la totalità dei carichi accidentali, lasciando alla volta soltanto una funzione formale ed il compito di resistere al proprio peso. Tale intervento modifica sostanzialmente la funzione statica della volta, che viene esautorata dalla sua funzione e quindi dalla sua ragion d'essere. Un efficace collegamento realizzato con connettori tra solaio e muro potrebbe dare al solaio la funzione di catena estradosale passiva.

7. sospensione della volta mediante tirantini, a loro volta collegati ai muri d'ambito o a una struttura "ponte", soprastante. Anche questa soluzione, peraltro non frequente, modifica in modo sostanziale il comportamento statico della volta. La compressione tra concio e concio viene eliminata o ridotta, invece che condotta a seguire il percorso della linea d'asse, ciò che rappresenta il migliore modo di far funzionare un arco (ossia un elemento strutturale che potremmo definire un "*pilaastro curvo*", adeguato a sopportare compressioni baricentriche).

8. getto di cappa collaborante in cemento armato all'estradosso delle volte, previa posa in opera di connettori metallici tra la vecchia e la nuova struttura. Si può interpretare questa tecnica come un incremento dello spessore complessivo dell'arco, che risulta così un arco composito, oppure come la realizzazione di una struttura autonoma, a cui la volta esistente risulta "appesa". Si ottiene un aumento della resistenza e della rigidità ma il peso del materiale aggiunto può provocare inconvenienti alle strutture verticali o alle fondazioni, oltre a maggiori sollecitazioni in caso di evento sismico, dovute all'incremento di massa. La cappa, nella pratica, non è rimovibile e può provocare danni quali il percolamento di acqua e la modifica della traspirabilità della muratura, circostanza deleteria in presenza di affreschi.

9. posa di fascie o membrane in FRP, incollate all'estradosso o all'intradosso dell'arco. E' un intervento di tipo passivo, rapido da eseguire e con indubbi vantaggi strutturali. E' possibile circoscrivere il rinforzo a zone di estensione limitata, scegliendo solo quelle maggiormente sollecitate. Non è garantita la reversibilità e la traspirabilità soprattutto quando

si utilizzino aggrappi tra le fasce e la muratura a base di resina epossidica. Prodotti apparsi recentemente sul mercato, in cui la membrana “a rete” in FRP viene fissata al supporto mediante malte a base idraulica, ha un buona parte risolto quest’ultimo problema / 5 /.

I costi delle materie prime e dell’applicazione non sono contenuti e va tenuto presente il fattore estetico ed il rischio derivante da incendio, specie nel caso di interventi di fasciatura eseguiti all’intradosso.

Tenuto in conto che i parametri che caratterizzano la risposta meccanica di qualunque struttura si possono riassumere in “*geometria, materiali e carichi*”, faccio osservare che gli interventi sopra elencati cercano per lo più di migliorare le prestazioni dell’arco e della volta mediante modifiche che riguardano la sola *geometria* oppure i *materiali* di cui sono costituiti. Si tratta infatti di cambiamenti apportati alle aree o agli spessori, oppure la aggiunta di nuovi elementi (posti sopra, o sotto o di fianco) oppure la giustapposizione di materiali o elementi nuovi a quelli esistenti, dando luogo a strutture composte.

Gli interventi che si possono ricondurre alla modifica del terzo parametro caratterizzante la struttura (ovvero quello dei *carichi* agenti) paiono essere molto più trascurate nella pratica del consolidamento, almeno fino ad oggi, e si limitano, a quanto risulta, a variare i carichi verticali indotti dal rinfianco oppure a rimuovere i carichi accidentali.

Alcuni anni fa / 3,4 / è stato proposto dall’autore un metodo concettualmente diverso rispetto a quelli sopra elencati, a cui si è dato il nome di “*arco armato*”, che costituisce una nuova classe di interventi il cui principio fondamentale consiste nel modificare i soli carichi agenti sull’arco in modo tale che la geometria ed al materiale esistenti, che non vengono modificati, risultino adeguati.

Si ottiene così un ulteriore metodo di consolidamento che si può così descrivere:

10. uso di cavi post-tesati, posti all’estradosso o all’intradosso dell’arco, i quali inducono un benefico stato di coazione nel sistema, incrementando il carico di compressione trasmesso tra concio e concio dell’arco e contemporaneamente spostandone la risultante globale verso l’asse baricentrico. Il sistema ha il vantaggio di essere rimovibile e ritesabile, un sistema attivo, efficiente, poco invasivo e praticamente privo di masse aggiunte.

L’obiettivo principale di questo intervento di consolidamento (un obiettivo assolutamente analogo 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, ossia la sua forma geometrica, e la curva delle pressioni, o per lo meno di ridurne la eccentricità a valori minimi e comunque contenuti nello spessore strutturale. Al posto di modificare la geometria per adeguarla ai carichi, si modificano i carichi per renderli adeguati alla geometria esistente, nel rispetto della autenticità geometrica e materica della struttura originaria.

### 3. “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 agevole 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, analizzando tutte le possibili posizioni delle cerniere.

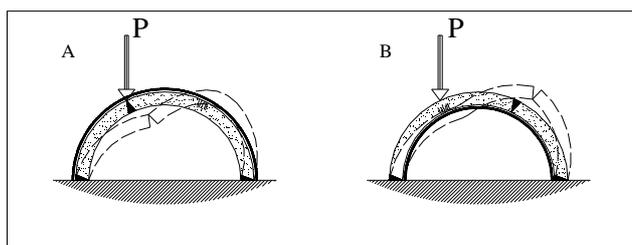
Si può constatare dalle prove realizzate da innumerevoli autori in varie epoche e dalle osservazioni in situ che, in fase di collasso, le cerniere danno sempre luogo a *fessurazioni*

*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 all'estradosso ed all'intradosso.

Se si potesse 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. L'arco iperstatico potrebbe al massimo degradarsi ad un "arco a tre cerniere", che è staticamente efficiente. In altre parole la struttura non potrebbe diventare ipostatica e quindi non si arriverebbe al collasso per cinematismo, a meno di rotture locali nel materiale, eccessivamente sollecitato.

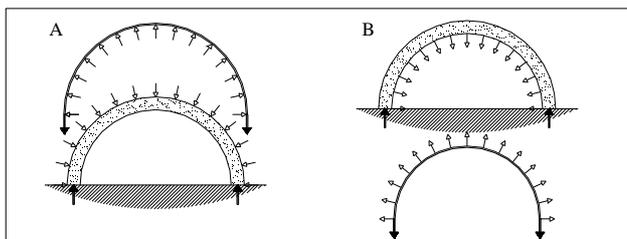
La soluzione per ottenere questo risultato è rappresentata da *una armatura diffusa resistente a trazione*, ad esempio una membrana in FRP applicata all'estradosso o all'intradosso della volta, oppure una cappa superiore in cemento armato. Si tratta tuttavia, in entrambi i casi, di soluzioni "passive", che si limitano a collaborare con la struttura muraria dopo l'innesco del meccanismo di danno, con fessurazione a trazione tra concio e concio.

L'arco armato comporta l'adozione di un rinforzo non continuo, realizzato mediante cavi a contatto con la muratura posti in trazione ("tiranti attivi"). Si ottiene così una distribuzione di forze mutue applicate dal cavo all'arco (e dall'arco al cavo) con direzione radiale, il che provoca una benefica compressione assiale della muratura e, di conseguenza, la centratura della curva delle pressioni.



**Figura 1:** armatura (A) posta all'estradosso, (B) posta all'intradosso. In presenza dell'armatura, la struttura si comporta come un arco a 3 cerniere deformabile.

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 murario mediante la interposizione di cunei, uniformemente ripartiti, oppure, in modo più semplice, utilizzando comuni tenditori SX-DX, posti alle estremità dei cavi. Il posizionamento dei cavi all'estradosso risulta 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 2:** forze di interazione tra cavo (in trazione) e arco (in compressione), con cavo posto (A) all'estradosso, (B) all'intradosso.

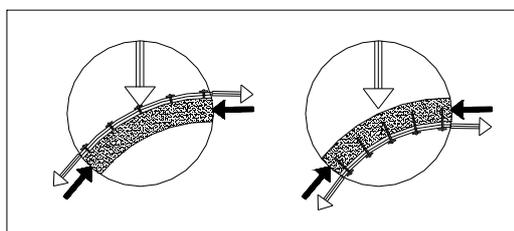
E' importante notare che la inefficienza dei piedritti, o la assenza di catene, renderebbe vano il rinforzo introdotto dall'arco armato (sia all'estradosso che all'intradosso) in quanto si potrebbero presentare cinematicismi che coinvolgono anche le sezioni di base, non armate.

In tali casi i tiranti vanno portati fino a terra e fissati alle fondazioni.

Se i cavi da post-tesare vengono posti all'intradosso invece che all'estradosso, si ottengono risultati assolutamente 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 cinematicismo di collasso, a meno di rotture del materiale.

Nel caso dei cavi intradossali il fissaggio del cavo alla muratura è certamente meno agevole rispetto al caso estradossale (dove è sufficiente il semplice accostamento) ed occorre fare ricorso a *tasselli* radiali ancorati alla muratura i quali mantengono il cavo in prossimità dell'arco. Anche in questo caso la trazione viene indotta mediante tenditori a vite SX-DX.

La eventuale presenza di piedritti inefficienti può essere ovviata con tiranti condotti fino a terra.



**Figura 3:** Dettaglio dell'interfaccia tra tirante e muratura. (A) cavo estradossale con connettori in compressione  
(B) cavo intradossale con connettori in trazione.

Va osservato che nel momento in cui si applica una coazione al cavo accostato all'arco, il cavo si tende (*in trazione pura*) ma la sua geometria resta invariata. Ciò significa che le forze trasversali di interazione applicate al cavo dall'arco sono tali per cui la curva delle pressioni risultante sul cavo coincide con la forma geometrica del cavo. Ma il cavo e l'arco hanno la medesima geometria. Ciò significa che le forze applicate dal cavo all'arco (le quali sono uguali per il principio di azione e reazione a quelle applicate dall'arco al cavo) sono tali da indurre nella muratura una curva delle pressioni sostanzialmente coincidente con l'asse geometrico dall'arco, vale a dire una azione di *compressione pura* nell'arco. Tale azione si somma alle azioni preesistenti, ottenendo il risultato di una curva delle pressioni maggiormente centrata in prossimità dell'asse baricentrico.

Ne consegue allora che nel caso di archi depressi o di particolari condizioni di esercizio, la tecnica dell'arco armato consente di applicare sull'arco forze concentrate o in generale distribuzioni di carico non uniformi, stabilizzanti.

*Si tratta soltanto di modificare la geometria iniziale del cavo, facendo in modo che non coincida con la geometria dell'arco !!.*

In altre parole è sufficiente separare il cavo dalla muratura e forzare maggiormente la fune, e di conseguenza il sottostante l'arco, dove sia presente un maggiore imbozzamento oppure avvicinare il cavo alla muratura dove esiste una depressione oppure un punto singolare di carico.

Portando all'estremo tale concetto, si potrebbe dire che le usuali catene orizzontali inserite all'altezza delle imposte e post-tesate sono un *particolare caso di arco armato*, in grado di applicare all'arco *due sole forze concentrate alla base.*

Il termini più generali, si osserva che la distribuzione delle forze agenti sul cavo, in grado di mantenere la corrispondenza tra asse geometrico e curva delle pressioni, è direttamente proporzionale alla curvatura locale. A curvatura zero corrisponde una forza distribuita che vale zero tra cavo ed arco, circostanza favorevole nel caso di archi "scemi" in cui la porzione centrale è orizzontale. Tanto più accentuata è la curvatura tanto più elevata è la forza mutua distribuita tra arco e cavo. Dove si abbia una discontinuità della curvatura, vale a dire la presenza di un punto angoloso, significa che arco e cavo si stanno scambiando un carico concentrato.

Per l'efficienza dell'arco armato non si richiedono pertanto archi con geometria particolare, ad esempio archi a tutto sesto, ma il metodo si applica indifferentemente a qualunque geometria di arco, anche ad archi policentrici, ribassati oppure a sesto acuto e perfino ad archi in cui la parte centrale risulti depressa.

In termini operativi, 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 ricentatura della curva delle pressioni, la quale è condizione necessaria per la stabilità dell'arco. Più la curva delle pressioni risulta coincidente con l'asse geometrico dell'arco e più aumenta la sicurezza nello spirito del "coefficiente di sicurezza geometrico" proposto da Heyman / 1,2 /, come rapporto tra lo spessore effettivo dell'arco e lo spessore dell'arco minimo, in grado di contenere totalmente la curva delle pressioni.

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 risulta meno efficiente quando il meccanismo di collasso è *a taglio*, caso peraltro molto più raro. Anche in tale situazione si ottiene tuttavia un aumento del carico limite di collasso legato all'incremento della compressione mutua tra i conci e di conseguenza all'aumento della resistenza limite per attrito. La tecnica proposta, sia con cavi estradossali che intradossali, si può utilizzare anche in archi con inversione locale della curvatura, a patto di introdurre dei collegamenti capaci di trasferire trazione tra cavo e 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 e talora impossibile..

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 anche l'uso di materiali diversi, quali i compositi fibrorinforzati, con l'avvertenza di adottare materiali che siano poco influenzati da fenomeni viscosi, pena la necessità di frequenti ritesature.

I vantaggi dell'uso di tiranti di rinforzo post-tesati sono 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.

#### 4. NUOVE VERIFICHE SPERIMENTALI

Allo scopo di validare ulteriormente il “metodo dell’arco armato”, a integrazione di precedenti prove su archi in muratura / 8,9 /, è stata eseguita una nuova campagna sperimentale con prove a collasso su 414 archi modello, realizzati con conci in legno, di luce 120 cm e spessore 10 cm, con sei diverse sagome (archi a tutto sesto, policentrici, ribassati, a sesto acuto, depressi in chiave in due diversi modi), armati con cavi post-tesati all’estradosso o all’intradosso, sottoposti a carichi variabili in posizione lungo lo sviluppo dell’arco. Sono stati testati 330 archi armati all’estradosso (di cui 314 con cavi scorrevoli e 24 con cavi bloccati alle estremità) e 84 archi armati all’intradosso, tutti a cavi scorrevoli.

Le prove sono state eseguite con grande perizia e grande pazienza dall’arch. Maurizio Giglio, che ringrazio, nell’ambito della sua tesi di laurea / 10 /.

Le fotografie seguenti illustrano i modelli sottoposti a prova.



**Figure 4, 5:** arco a tutto sesto e arco circolare ribassato.



**Figure 6, 7:** arco policentrico e arco a sesto acuto



**Figure 8, 9:** arco con modesta depressione e arco con accentuata depressione.

Le foto seguenti illustrano la apparecchiatura di prova ed alcuni dettagli costruttivi. In tutti i casi si è misurato il carico di collasso e solo in alcuni casi si sono misurati anche gli spostamenti verificatisi al crescere del carico applicato.



Figure 10, 11, 12: modello di laboratorio.

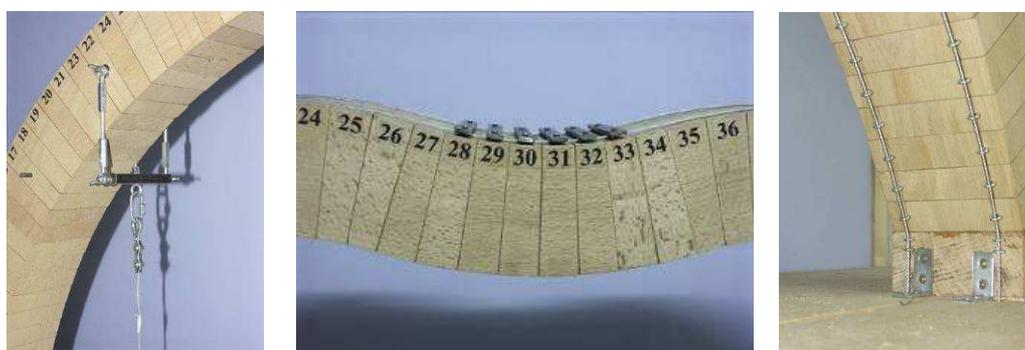


Figure 13, 14, 15: particolari costruttivi del modello di laboratorio

I risultati ottenuti dalla sperimentazione appaiono decisamente interessanti e si possono riassumere con l'ausilio di alcuni diagrammi, riferiti, per brevità, solo al caso di archi circolari ribassati, con cavi all'estradosso (grafici in figura 16 e 17) o con cavi all'intradosso (grafici in figura 18 e 19).

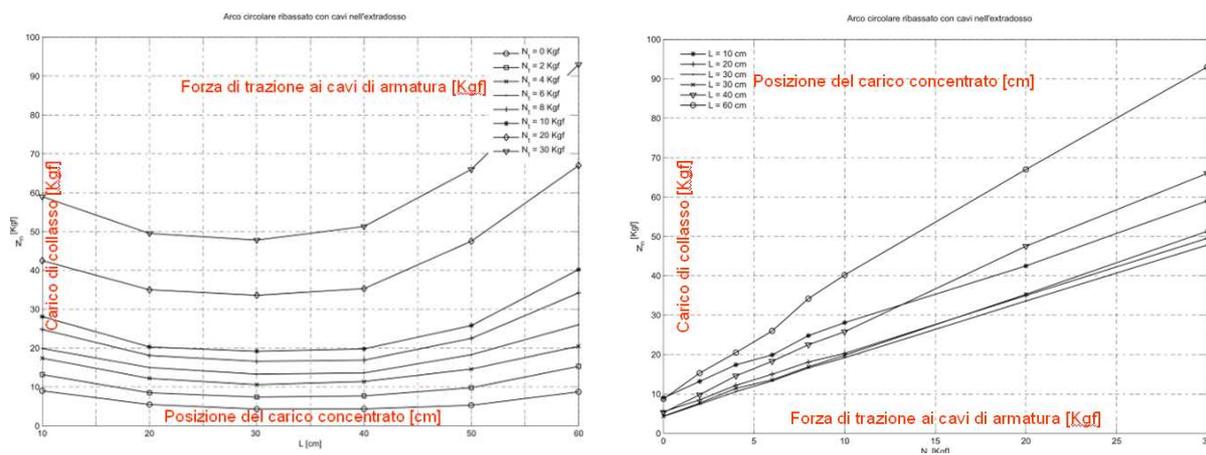


Figure 16, 17: i grafici si riferiscono a un arco circolare ribassato,  $L=120$  cm con cavi all'estradosso ( $N^o$  = carico di collasso; L = posizione del carico;  $N_t$  = trazione applicata ai cavi particolari).

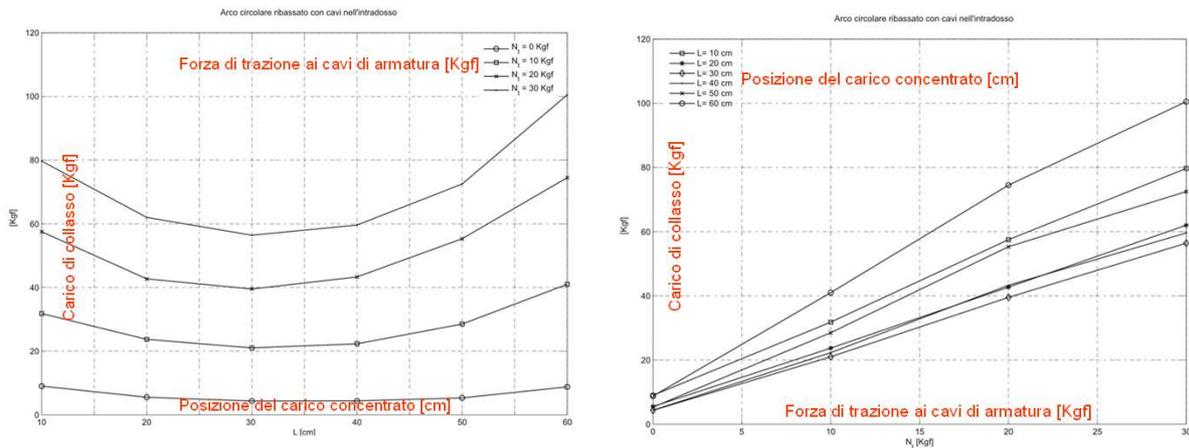


Figure 18, 19: i grafici si riferiscono a un arco circolare ribassato,  $L=120$  cm con cavi all'intradosso ( $N^\circ$  = carico di collasso;  $L$  = posizione del carico;  $N_t$  = trazione applicata ai cavi particolari).

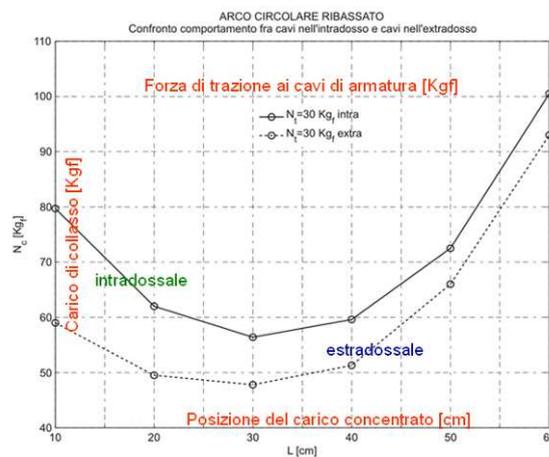


Figura 20: il grafico si riferisce a un arco circolare ribassato  $L=120$  cm e  $N_t=30$  Kgf in cui si confrontano la soluzione con cavi all'estradosso e all'intradosso, che risulta piú efficiente ( $N^\circ$  = carico di collasso;  $L$  = posizione del carico;  $N_t$  = trazione applicata ai cavi particolari).

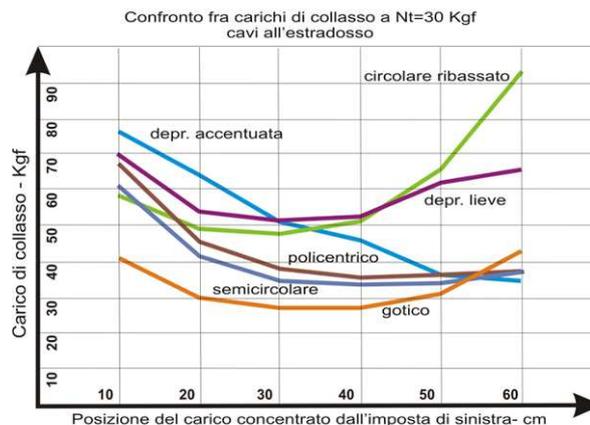


Figura 21: Confronto tra archi di diversa geometria, con cavi all'estradosso  $L=120$  cm e tensione nei cavi pari a  $N_t=30$  Kgf.

Dall'analisi dei risultati si possono dedurre le seguenti considerazioni riassuntive:

- 1- la applicazione dei cavi di armatura ha portato a buoni risultati in termini di collasso, indipendentemente dalle particolari sagome geometriche degli archi soggetti a prova
- 2- i carichi di collasso in presenza di cavi superano di un ordine di grandezza i carichi ottenuti nei casi di arco semplice, non armato
- 3- la posizione più svantaggiosa per applicare un carico concentrato è ubicata in prossimità di 1/4 della luce.
- 4- i carichi di collasso crescono con l'aumentare della tensione applicata ai cavi cerchianti ed il legame tra il tiro applicato ai cavi ed il carico di collasso dell'arco presenta, con ottima approssimazione, un andamento lineare.
- 5- le considerazioni precedenti valgono per entrambe le disposizioni dell'armatura, e quindi sia per i cavi all'estradosso che per i cavi all'intradosso.
- 6- Gli archi con cavi all'intradosso, a parità di tutte le altre condizioni, presentano carichi di collasso superiori a quelli con armatura all'estradosso, circostanza dovuta al fatto che il cavo intradosale, allontanandosi dall'arco durante il tiro, dà luogo ad una struttura mista (arco+cavo) di maggiore spessore complessivo..
- 7- A parità di tutte le altre condizioni, la sagoma di arco circolare ribassato ha fornito, in media, le migliori risposte al collasso

A fianco delle prove precedenti, con cavi soggetti a tiro noto e costante durante tutta la prova, sono state eseguite ulteriori 24 prove in cui i cavi, dopo la applicazione di tiri noti, sono stati ancorati alla apparecchiatura di supporto, in prossimità delle imposte.

In tutti questi casi le risposte sperimentali sono state notevolmente migliori rispetto ai casi con tiro noto e costante, ottenuto con l'ausilio di pesi legati alle due estremità libere del cavo. La spiegazione risiede nel fatto che durante la applicazione del carico verticale l'arco si deforma, con una apertura dei giunti tra i vari conci.

In definitiva, sia il perimetro superiore dell'arco che quello inferiore si allungano e l'asse geometrico dell'arco si inflette. Ne conseguono due fatti:

a)- anzitutto il tiro nei cavi, rigidi e di lunghezza definita all'inizio della prova, si incrementa in modo notevole in seguito alla deformazione dell'arco, con un forte aumento della trazione del cavo cerchiante e, di conseguenza, un forte incremento del carico di collasso dell'arco.

b)- in secondo luogo, durante la deformazione dell'arco, cambia in modo sensibile la curvatura nelle porzioni di arco dove tenderebbe a formarsi una cerniera. Di conseguenza, in presenza di attrito cavo-arco, le pressioni stabilizzanti esercitate dal cavo sull'arco crescono nelle zone dove cercano di formarsi cerniere con fessura all'estradosso (ossia le zone in cui la curvatura aumenta), mentre decregono le pressioni mutue tra cavo e arco nelle zone in cui cerca di formarsi una cerniera con fessura all'intradosso (ossia le zone in cui la curvatura diminuisce). In altre parole, la distribuzione di pressioni stabilizzanti esercitata dai cavi sull'arco si modifica durante la prova così da fornire una migliore risposta a collasso.

Come conseguenza, in nessuno dei 24 archi testati con questa modalità si è potuto giungere al collasso, malgrado la applicazione di carichi verticali di valore elevato, pari a 240 daN.

Si noti, per confronto, che i carichi di collasso ottenuti nei casi analoghi, ma con cavi scorrevoli, non hanno superato i 100 daN.

## 5. CONCLUSIONI

Le numerose prove sperimentali qui sopra descritte e le osservazioni tratte dalla esperienza applicativa sviluppata nel corso di vari progetti dimostrano che la tecnica dell'*arco armato* è estremamente efficace e di semplice utilizzo, consentendo di ottenere considerevoli incrementi di resistenza e di duttilità nei confronti dell'arco non armato. La sua applicazione in zone simicamente attive è indubbiamente interessante, soprattutto tenendo in conto il trascurabile incremento delle masse in gioco. Le prove hanno permesso di confrontare il comportamento di cavi posti all'estradosso e all'intradosso, i quali hanno fornito risposte sostanzialmente analoghe. La posizione in cui applicare i cavi dipenderà pertanto, nelle applicazioni, dalla effettiva esistenza o meno di ingombri su uno dei due lati dell'arco. La diversa sagoma geometrica degli archi non costituisce un problema in quanto le pressioni applicate dal cavo sull'arco sono più accentuate nelle zone di maggior curvatura, che vengono così maggiormente cerchiare. L'incremento del carico di collasso è linearmente proporzionale al tiro imposto ai cavi, consentendo così la possibilità di formulare criteri di dimensionamenti semplificati. Nel caso in cui i cavi vengano fissati alle estremità (situazione che, tra l'altro, è usualmente adottata nella applicazione) la risposta a collasso è nettamente migliore e dipende dalla deformazione dell'arco, che si allunga inducendo un incremento nel tiro dei cavi. La sperimentazione condotta consentirà la definizione di abachi applicabili a casi concreti, da utilizzare per il dimensionamento dei cavi e del loro tiro.

## BIBLIOGRAFIA

1. Heyman J., The safety of masonry arch, Int.J.Mech.Sci., vol.11, 1969
2. Heyman J., The masonry arch, Chichester, United Kingdom, 1982
3. Jurina L., I tiranti metallici nel consolidamento degli edifici monumentali, XVI Convegno CTA, Ancona, 1997
4. Jurina L., Mazzoleni M., Un sistema di "cerchiatura interna" per il consolidamento di ciminiere in muratura, Tercer coloquio latinoamericano sobre rescate y preservación del patrimonio industrial, Santiago de Chile, 2001
5. Jurina L., Corrieri L., Squarcina T., Biblioteca Braidense di Milano, rinforzo strutturale della volta con un sistema composito innovativo, Recupero e Conservazione, n. 62, pp. 34-42, 2005
6. Breyman G. A., Trattato generale di costruzioni civili, Vol. 1 Costruzioni in pietra e strutture murarie, Milano, 1926
7. Galimberti U., Interventi di consolidamento su archi e volte con particolare riferimento al metodo delle "graffette", Tesi Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore L. Jurina, 2007
8. Fumagalli C., Le catene nella progettazione e nel consolidamento strutturale di archi e volte, Tesi Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore L. Jurina, 1996
9. Cultreri O., Savoldelli G., Arco armato, Tesi Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore L. Jurina, 1997
10. Giglio M., Consolidamento di archi e volte in muratura mediante la tecnica dell'arco armato. Approccio sperimentale, Tesi Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore L. Jurina, 2008