



## TECNICHE DI CERCHIATURA NEL CONSOLIDAMENTO DI ARCHI E DI COLONNE IN MURATURA

Lorenzo Jurina

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

**Sommario.** *Il consolidamento strutturale degli elementi in muratura ha sempre rappresentato una sfida per chi ha dovuto occuparsene ed è stato affrontato con approcci diversi, più o meno invasivi. Gli elementi architettonici curvi (archi, volte, colonne) rappresentano un ulteriore ed interessante capitolo nella ricerca e nello sviluppo di metodi di intervento capaci di rispondere alle necessità statiche e a criteri di rispetto e conservazione della materia storica e delle peculiarità strutturali degli elementi. L'articolo si propone di presentare, a fianco delle tecniche note, due campagne di prove sperimentali che hanno riguardato da un lato le volte e gli archi, dall'altro le colonne in laterizio. La tecnica di consolidamento delle volte e degli archi, denominata "arco armato" 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 di indurre contemporaneamente un incremento della compressione tra concio e concio. 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).*

*Il consolidamento delle colonne in laterizio soggette a carichi elevati, oppure fessurate, ha avuto come obiettivo il miglioramento strutturale, sia in termini di resistenza che di duttilità, cui consegue la messa in sicurezza di apparati costruttivi compromessi da degradi che ne inficiano il normale comportamento.*

*Il presente lavoro analizza varie tecniche adottate nello scenario architettonico e strutturale e propone una nuova alternativa di cerchiaggio, di minimo impatto visivo, su colonne murarie con mattoni "faccia a vista". Anche in questo caso una sperimentazione condotta in laboratorio su sei campioni in scala reale ha fornito risultati molto promettenti.*

# TÉCNICAS DE ZUNCHADO EN LA CONSOLIDACIÓN DE ARCOS Y COLUMNAS DE MAMPOSTERÍA

Lorenzo Jurina

Politécnico de Milán

Departamento de Ingeniería Estructural

Piazza Leonardo da Vinci, 20133 Milán - Italia

**Sumario.** *La consolidación estructural de los elementos de mampostería, representa desde siempre un reto para los que se ocupan de ella, que han ido aplicando enfoques distintos, más o menos invasivos. Los elementos arquitectónicos curvos (arcos, bóvedas, columnas), representan otro interesante capítulo en la búsqueda y el desarrollo de métodos de intervención capaces de responder a las necesidades estáticas y los criterios de cumplimiento y conservación de la materia histórica y las peculiaridades estructurales de los elementos. El artículo se plantea presentar, al lado de las técnicas conocidas, dos campañas de pruebas experimentales que se ocuparon, por una parte, de bóvedas y arcos, y, por otra parte, de columnas de ladrillo. La técnica de consolidación de bóvedas y arcos, llamada "arco armado", es capaz de aumentar considerablemente tanto la ductilidad como la resistencia a la rotura del arco; consiste en disponer uno o más cables metálicos, colocados en tracción, en el extradós (o intradós) del arco, capaces de ralentizar o impedir la formación de articulaciones y, al mismo tiempo, inducir un incremento de la compresión entre dovela y dovela. Se realizaron pruebas de agotamiento sobre más de 400 modelos de arco a escala reducida, sujetos a cargas variables por posición, con el objetivo de determinar la eficacia del método al variar la tensión aplicada a los cables y al variar el perfil geométrico del arco (adoptando seis geometrías distintas).*

*La consolidación de columnas de ladrillo sujetas a cargas elevadas, o bien fisuradas, tuvo como objetivo la mejora estructural, tanto en términos de resistencia como de ductilidad, a la que consigue la puesta en seguridad de aparatos constructivos comprometidos por deterioros que afectan a su comportamiento normal.*

*Este trabajo analiza varias técnicas adoptadas en el escenario arquitectónico y estructural y propone una nueva alternativa de zunchado, de impacto visual mínimo, sobre columnas de mampostería con ladrillos "cara vista". También en este caso, una experimentación llevada a cabo en el laboratorio sobre seis muestras a escala real, dio resultados muy alentadores.*

## 1. INTRODUZIONE

Il consolidamento degli elementi curvi in muratura (volte, archi, colonne) rappresenta un problema che è necessario affrontare frequentemente quando si deve 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 aggiornare 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. 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.

Le tecniche dell'*arco armato* e delle cosiddette *cerchiature invisibili*, proposte e sperimentate dall'autore nel corso degli ultimi anni, costituiscono una soluzione efficace e adeguabile agli specifici contesti in cui si opera, che siamo convinti debbano essere trattati "caso per caso".

## 2. TECNICHE DI CERCHIATURA

La cerchiatura è l'applicazione di una legatura intorno ad un oggetto con l'obiettivo di limitarne o impedirne le deformazioni laterali e l'insorgere della rottura. Nel campo delle costruzioni, l'applicazione di cerchiature è utilizzata sia per confinare singoli elementi strutturali sia interi edifici o parti di essi. Fin dall'antichità il funzionamento delle cerchiature era ben noto e utilizzato in vari campi, a iniziare dalle botti, per proseguire con le colonne e le cupole.

Il contributo della ricerca sulla caratterizzazione fisico-meccanica dei materiali ha portato all'evoluzione delle tecniche di cerchiatura, affinando metodologie e dimensionamenti. In particolare aumentando la compressione laterale in un elemento caricato assialmente si ottiene uno stato di tensione tridimensionale, benefico in termini di carico limite, come ben noto dalla applicazione dei criteri di rottura ai materiali da costruzione. La cerchiatura inoltre presenta indubbi vantaggi nel caso in cui la eterogeneità dei materiali (come ad esempio nelle colonne in muratura con alternanza di malta e mattoni) induce tensioni di trazione in uno dei componenti.

Avendo come comune obiettivo il confinamento degli elementi, le tecniche di cerchiatura sono molteplici. Ne illustreremo alcune.

Una prima distinzione può essere condotta in base alla collocazione della cerchiatura nei confronti dell'elemento confinato: la cerchiatura infatti può essere esterna o interna alla struttura. Le cerchiature esterne sono le più diffuse e sono facilmente individuabili.

La seconda distinzione si può esprimere in base al materiale utilizzato che spazia dall'acciaio, alle fibre sintetiche, ai materiali compositi a base resinosa o cementizia.

Un'ulteriore distinzione riguarda il "quando" la cerchiatura diviene operante. La cerchiatura infatti può essere *passiva*, fornendo sicurezza solo nel caso di un'eventuale aggravamento della situazione di degrado, oppure può essere *attiva*, entrando in

funzione al momento della posa e contribuendo da subito a migliorare il comportamento strutturale dell'elemento cerchiato.

Infine possiamo menzionare i parametri geometrici ed applicativi, che variano caso per caso e sono legati al dettaglio costruttivo adottato per la particolare necessità.

Le tecniche più tradizionali di cerchiatura sono quelle passive, o debolmente attive, realizzate con fasce metalliche aderenti alla colonna. Tale sistema presenta spesso un grande impatto visivo e in alcuni casi implica un disturbo nella lettura della struttura originaria.

Si trovano esempi recenti di fasciature passive con materiali fibro-sintetici a base resinosa o cementizia, la cui applicazione consiste nel posare una base/matrice per garantire il buon collegamento tra l'elemento strutturale e le fasce di rinforzo in fibre, annegate poi nella matrice. La possibilità di utilizzare cerchiature di questo tipo dipende dal pregio della superficie di applicazione in quanto l'uso di basi resinose o cementizie non permette la conservazione dello strato di finitura. Questa tecnica tuttavia presenta il vantaggio di essere realizzabile con spessori molto contenuti, ciò che permette un rivestimento ulteriore con materiali di finitura, nascondendo la cerchiatura.

Tecniche più recenti prevedono l'uso di iniezioni armate, ovvero l'inserimento di barre metalliche di ridotto diametro all'interno dell'elemento, in direzione radiale. Il risultato, oltre a garantire un buon confinamento delle spinte orizzontali, ripristina un funzionamento monolitico dell'elemento grazie al diffuso collegamento della corteccia esterna con il nucleo interno, che intercetta le eventuali fessure presenti.

Per le colonne in pietra si adottano talora confinamenti con cavi metallici, metodo utilizzato anche per grandi strutture cilindriche, ad esempio la Torre di Pisa

Una tecnica recente, proposta per il Monastero di S.Monica a Cremona, ha dato luogo alla ricerca sperimentale qui di seguito illustrata, che prevede l'uso di cavi metallici esterni, sostanzialmente invisibili, posti a intervalli prestabiliti. La tecnica prevede la posa di fili metallici di piccolo diametro, inferiori al millimetro, all'interno dei giunti tra i corsi di muratura della colonna, formando un fascio cerchiante post-tesato che fornisce il confinamento dei settori desiderati dell'elemento.

Le tecniche di cerchiatura delle colonne trovano analogie negli interventi di cerchiatura di strutture di grandi dimensioni. Torri, ciminiere, ma anche interi edifici se necessario, vengono cerchiati con barre metalliche rigide oppure con cavi flessibili oppure con fasce di materiale fibro-sintetico, oppure ancora mediante cuciture armate disposte con particolari conformazioni geometriche.

Nel caso di cerchiature di strutture complesse, le variabili in gioco nella progettazione sono più numerose rispetto al consolidamento delle colonne, e di pari passo anche i vincoli aumentano. Le peculiarità materiche e geometriche dell'elemento da porre in sicurezza devono essere alla base delle scelte di progettazione di un buon intervento. Il rispetto dovuto nei confronti dell'oggetto esistente deve portare a definire interventi con aspetti quali la durabilità, la limitata invasività, la verificabilità, la manutenibilità e infine la reversibilità.

### **3. 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 cinematisma 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, in grado di resistere 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 in Italia, crea talora una aggiunta ingombrante e non sempre accettabile, specie in presenza di superfici affrescate. In altri contesti geografici caratterizzati da tradizioni costruttive diverse, 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.

4. aggiunta di "graffette" posizionate sopra all'arco o alla volta, che costituiscono una specie di morsetto estradossale rigido, in grado di contrastare le spinte alle imposte. Si tratta di una evoluzione della catena "a braga" 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 .

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 estradossali, tipo "frenelli", oppure, ancora, con nervature. 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 possibili 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 estradossale 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 "*pilastrò 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 rigidezza 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.

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 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.

#### 4. “L'ARCO ARMATO”

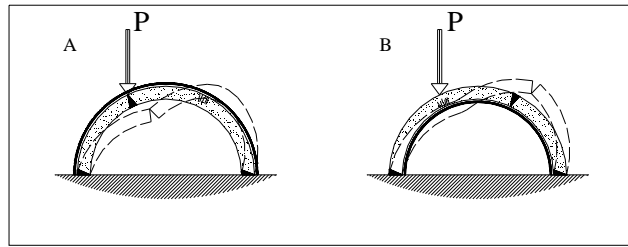
Gli archi e le volte costituiti da materiale resistente a compressione ma non a trazione raggiungono il collasso quando, all'incrementarsi dei carichi, la curva delle pressioni risulta tangente in più punti ai profili esterni dell'arco dando luogo a rotazioni localizzate tra i conci (con formazione di 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 cinematicismo, a meno di rotture locali nel materiale, eccessivamente sollecitato.

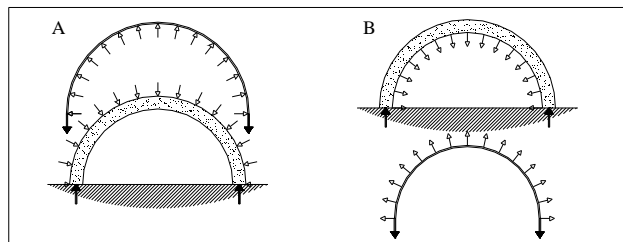
La soluzione ovvia per ottenere questo risultato è rappresentata da *una armatura diffusa resistente a trazione*, ad esempio una membrana in FRP applicata all'estradosso o all'intradosso della volta, oppure una cappa superiore in cemento armato. Si tratta tuttavia, in entrambi i casi, di soluzioni “passive”, che si limitano a collaborare con la struttura muraria dopo l'innescò 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 con filetto 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 cinematici che coinvolgono anche le sezioni di base, non armate.

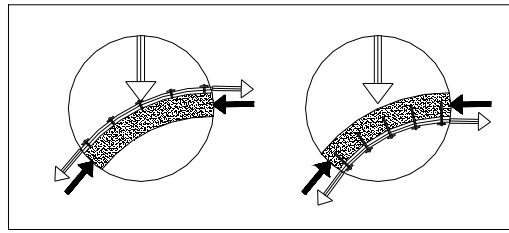
In tali casi i tiranti vanno portati fino a terra e fissati alle fondazioni.

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 cinematico 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, anche in questo caso, 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, 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 fibro-rinforzati, 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.

## **5. VERIFICHE SPERIMENTALI DELL'ARCO ARMATO**

Allo scopo di validare ulteriormente il “metodo dell'arco armato”, a integrazione di precedenti prove su archi in muratura, 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.

Le fotografie seguenti illustrano i modelli sottoposti a prova.



**Figure 4, 5, 6:** arco a tutto sesto, arco circolare ribassato e arco policentrico.

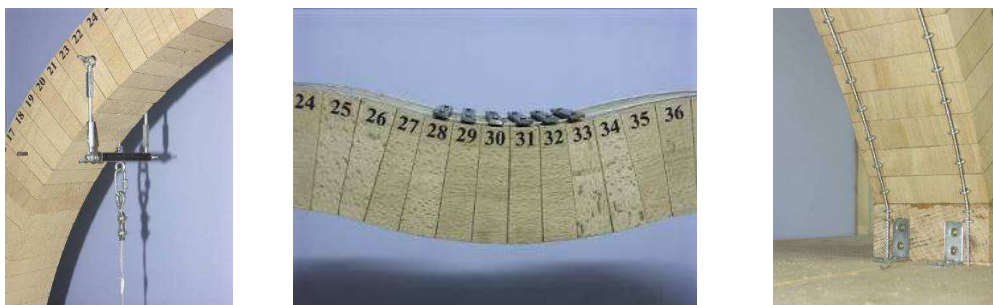


**Figure 7, 8, 9:** arco a sesto acuto, arco con modesta depressione e arco con accentuata depressione.

Le foto seguenti illustrano la apparecchiatura di prova ed alcuni dettagli costruttivi. In tutti i casi si è misurato il carico di collasso ed in una parte di questi 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 ottenuto 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 o con cavi all'intradosso.

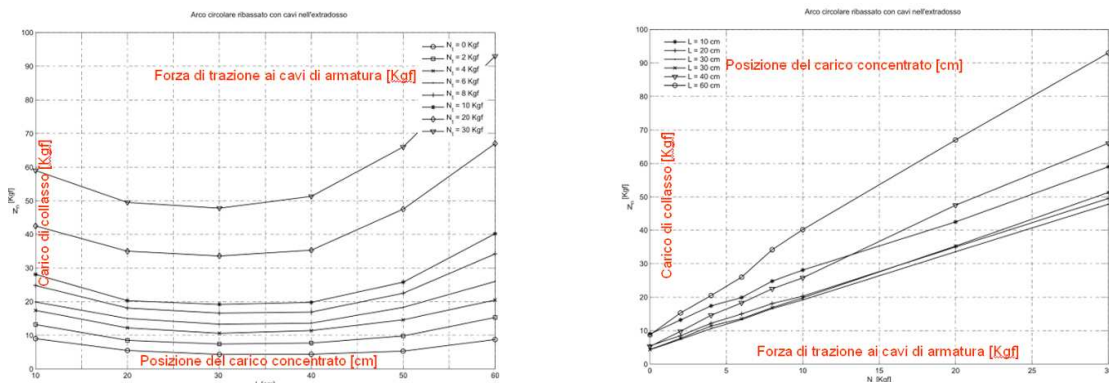


Figure 16, 17: i grafici si riferiscono a un arco circolare ribassato,  $L=120$  cm con cavi all'estradosso ( $N^{\circ}$  = carico di collasso;  $L$  = posizione del carico;  $N_t$  = trazione applicata ai cavi ).

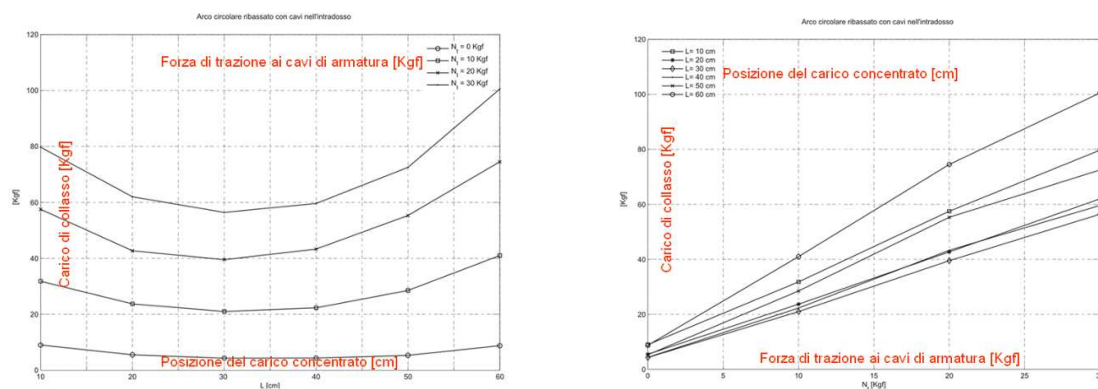


Figure 18, 19: i grafici si riferiscono a un arco circolare ribassato,  $L=120$  cm con cavi all'intradosso ( $N^{\circ}$  = carico di collasso;  $L$  = posizione del carico;  $N_t$  = trazione applicata ai cavi ).

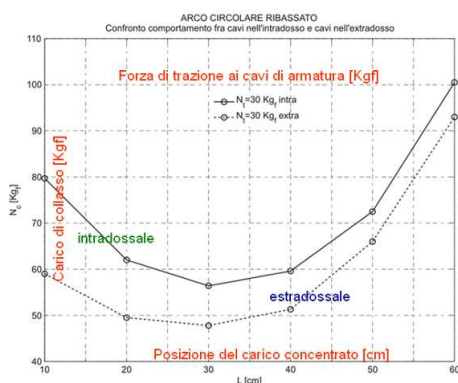
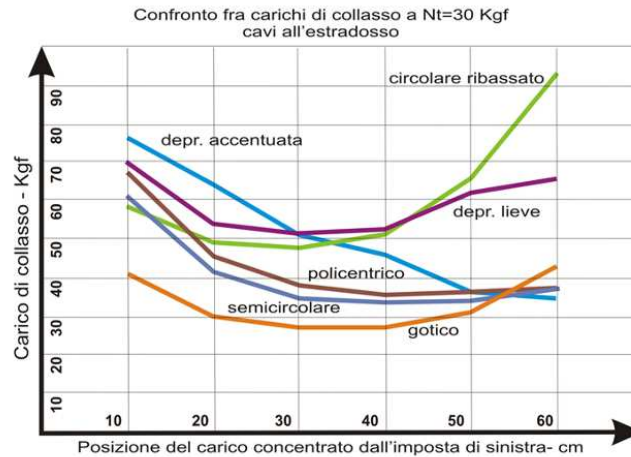


Figura 20: il grafico si riferisce a un arco circolare ribassato  $L=120$  cm e  $N_t=30$  Kgf in cui si confrontano la soluzione con cavi all'estradosso e all'intradosso, la quale risulta più efficiente ( $N^{\circ}$  = carico di collasso;  $L$  = posizione del carico;  $N_t$  = trazione applicata ai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



**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 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  $\frac{1}{4}$  della luce.
- 4- i carichi di collasso crescono con l'aumentare della tensione applicata ai cavi cerchiati 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 intradosso, 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 prosecuzione delle prove precedenti, con cavi soggetti a trazione nota 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 superiori 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. Di conseguenza, 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 dell'effetto cerchiante e quindi 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 assenza di attrito cavo-arco, le pressioni stabilizzanti esercitate dal cavo sull'arco cregono 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 radiali 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 molto 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.



**EFigure 29 e 30** – Consolidamento di una volta del castello di Masino mediante la tecnica dell'arco armato e l'applicazione di FRP, su una volta "depressa"

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 sismicamente 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 cerchiate. 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.

## 6. ESEMPI DI CERCHIATURA DI COLONNE

Il concetto di cerchiatura riporta spesso alla memoria immagini di grandi fasce di acciaio che avvolgono le colonne, tecnica molto usata ancora oggi, soprattutto per gli interventi cosiddetti “provvisori” (...che poi provvisori non sono).



**Figure 31, 32, 33 e 34:** immagini di cerchiature con fasce in acciaio delle colonne d'ingresso della Camera di Commercio di Catania e delle colonne affrescate interne dell'abbazia di Chiaravalle a Milano.

Le cerchiature con fasce in acciaio si possono ritenere interventi solo moderatamente attivi, in quanto la pretensione viene realizzata con bullonature o, più anticamente, con cunei, previo riscaldamento del cerchio. Le chiusure adottate (cerniere, forchette o bullonature) sono necessarie ai fini operativi di posa e garantiscono la buona aderenza con l'oggetto esistente ma risultano di grande impatto visivo e alterano la lettura dell'elemento originario.



**Figura 35 e 36:** cerchiature delle colonne del chiostro dell'ex Monastero di San Michele a Lonate Pozzolo.

Una variante del sistema di cerchiature con fasce metalliche è stato proposto ed utilizzato dall'autore nel 2005, nell'ex Monastero di San Michele a Lonate Pozzolo. La



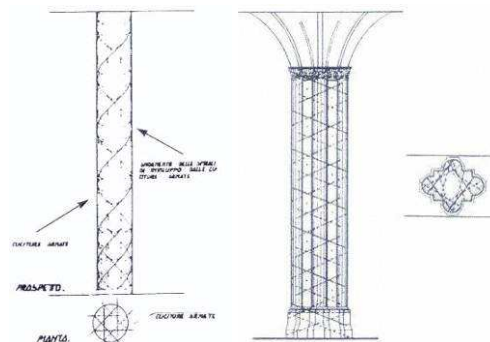
fascia è ancora metallica, in acciaio inox, ma sono stati eliminati gli ingombranti elementi di chiusura e serraggio, per garantire un aspetto migliore all'intervento.

I due semicerchi della fascia metallica vengono saldati in opera intorno alle colonne e l'anello viene successivamente reso attivo e confinante grazie all'inserimento di malta espansiva nell'intercapedine fascia-colonna.

Nell'ex Monastero di Santa Monica a Cremona i progettisti incaricati hanno realizzato la cerchiatura delle colonne del chiostro con il sistema CAM, che fa uso di bandelle in acciaio di limitato spessore, ma esteticamente invasive. Il sistema consente una successiva finitura con intonaco di rivestimento, ma naturalmente non consente che la muratura resti "faccia a vista".



**Figura 37 e 38:** cerchiatura delle colonne del chiostro dell'ex Monastero di Santa Monica a Cremona.



**Figura 39 e 40:** schema di consolidamento per mezzo di iniezioni armate delle colonne delle chiese di San Francesco a Fermo e di San Lorenzo Maggiore a Napoli.

Un'altra tecnica di cerchiatura di colonne che ancora vede l'uso dell'acciaio, ma limita l'impatto visivo dell'intervento, è quello delle *cuciture armate*. Si realizzano perforazioni radiali delle colonne inghisando all'interno di queste alcune barre metalliche che contribuiscano a confinare le deformazioni trasversali dovute all'eccessivo carico assiale e conferiscono nuovamente monoliticità all'elemento. Realizzazioni con questa tecnica sono state eseguite, tra le altre, nella chiesa di San Francesco a Fermo e nella chiesa di San Lorenzo Maggiore a Napoli, dove le perforazioni armate seguono uno schema a doppia elica incrociata.

In parallelo all'utilizzo dell'acciaio si adottano fasce esterne in materiali fibrosi. La

cerchiatura mediante materiali compositi a base resinosa o cementizia è più frequentemente usata nelle opere in calcestruzzo armato, perché presentano superfici “sacrificabili” e quindi copribili. Il meccanismo di contenimento delle deformazioni è il medesimo delle fasce in acciaio ma trattandosi di un materiale più flessibile e di minore spessore, a parità di resistenza, è talora preferibile e permette, se necessario, una fasciatura completa dell’elemento. L’incollaggio diffuso evita l’uso di elementi appariscenti di fissaggio esterno.

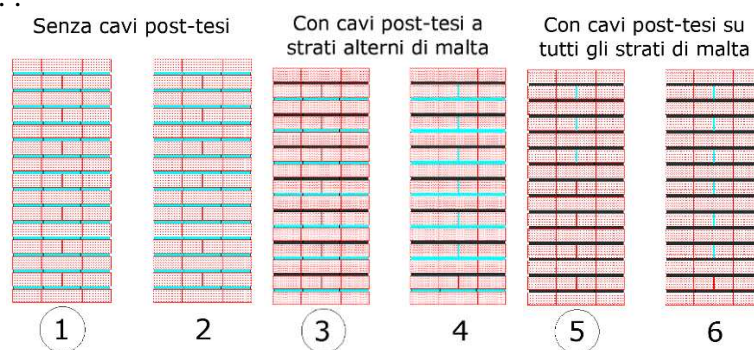
Tecniche recenti consentono l’adozione di un tiro applicato alle fasce in FRP durante la loro posa, trasformandole in sistemi di cerchiatura attivi.



**Figura 41, 42 e 43:** schema ed esempi di cerchiatura con fasce in FRP di elementi strutturali in calcestruzzo armato.

## 7. UNA TECNICA INNOVATIVA DI CERCHIATURA CON CAVI

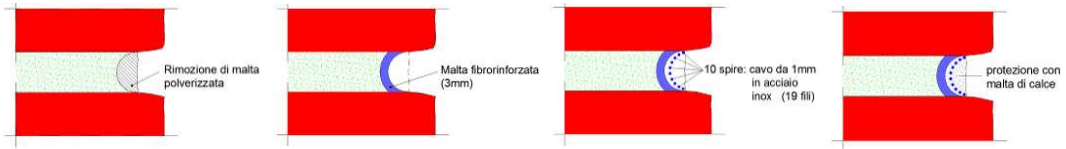
Un nuovo metodo di cerchiatura di colonne murarie con l’uso di cavi di piccolo spessore inseriti nei giunti di malta è stato sottoposto a verifica sperimentale da parte dell’autore presso il Laboratorio Prove materiali del Politecnico di Milano. Le prove sono state eseguite su sei pilastri in muratura a base ottagonale, di diametro 52 cm ed altezza 120 cm. .



**Figura 44:** schema di posa delle cerchiature nei pilastri della sperimentazione.

Su due pilastri non si è eseguito alcun intervento di consolidamento e la loro resistenza a collasso per compressione è stata considerata come riferimento per valutare il miglioramento conseguito nei pilastri cerchiati. La cerchiatura applicata sugli altri quattro pilastri consiste in cavi post-tesi (trefoli in acciaio inox di diametro 1mm) avvolti con 10 spire all’interno dei giunti di malta orizzontali così da applicare sulla superficie laterale uno stato di coazione. Due pilastri sono stati cerchiati a giunti alternati, mentre altri due sono stati cerchiati in corrispondenza di tutti i giunti.

In base ad una pre analisi numerica si è stabilito di applicare un cerchiaggio costituito da dieci spire di cavo per ogni giunto, con una tesatura costante applicata al cavo pari a 25 daN. Il cavo è stato disposto all'interno dei giunti di malta dopo averne regolarizzato la superficie. Le spire sono state bloccate con morsetti ed infine ricoperte con un sottile strato di malta, con un risultato estetico particolarmente apprezzabile.



**Figura 45:** schema esecutivo della cerchiatura con spire di cavi.



**Figura 46, 47 e 48:** cerchiatura con fili in acciaio inseriti all'interno dei giunti di malta dei pilastri in muratura sperimentati .

I pilastri rispecchiano la geometria ottagonale delle colonne dell'ex Monastero di Santa Monica a Cremona, e sono stati realizzati con mattoni pieni faccia a vista. I giunti sono stati realizzati con calce magra formata da grassello di calce, sabbia ed acqua.



**Figura 49, 50, 51 e 52:** pianta e fasi esecutive di realizzazione dei pilastri in muratura.

L'esecuzione dei provini ha previsto la costruzione dei pilastri, la stagionatura, la cerchiatura mediante le spire di cavo tensionate, il bloccaggio dei cavi con morsetti duttili e la ristilatura dei giunti.

La prova di carico a compressione è stata eseguita inserendo i provini in una pressa a circuito chiuso, a controllo di spostamenti, del tipo MTS 2500kN, avendo curato l'eliminazione degli errori di posizionamento (centratura del provino sul piatto, pulizia dei piatti, etc.).

Quattro spostamenti verticali sono stati misurati con trasduttori induttivi del tipo WA50mm (precisione 1/1000mm) disposti sulle facce A,C,E,G del provino.

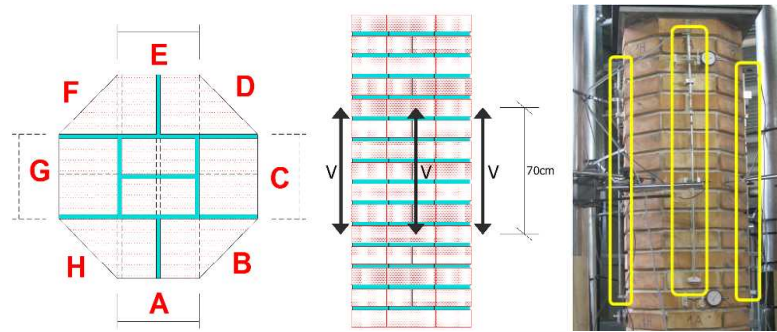


Figura 53, 54 e 55: posizionamento dei trasduttori verticali.

Quattro spostamenti relativi orizzontali, a cavallo di giunti di malta, sono stati misurati con trasduttori induttivi del tipo WI10mm (precisione 1/1000mm) disposti sulle facce A,C,E,G del provino.

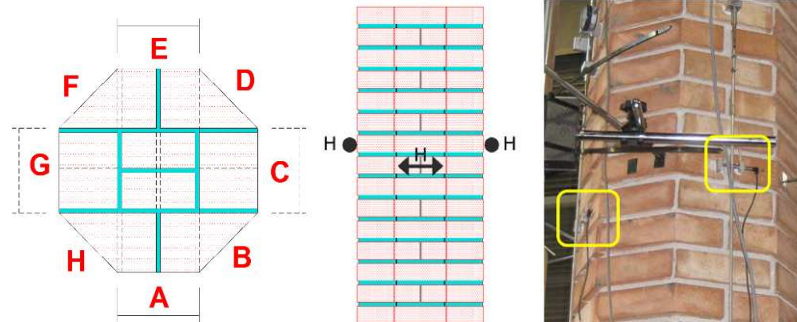


Figura 56, 57 e 58: posizionamento dei trasduttori orizzontali.

Quattro spostamenti radiali sono stati misurati con trasduttori induttivi di cui due del tipo WA50mm (precisione 1/1000mm) e due tipo WA100mm (precisione 1/1000mm) disposti a metà altezza del provino sulle facce B,D,F,H.

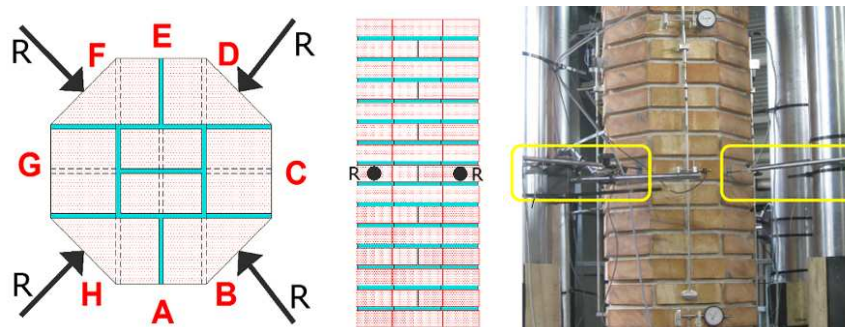


Figura 59, 60 e 61: posizionamento dei trasduttori radiali.

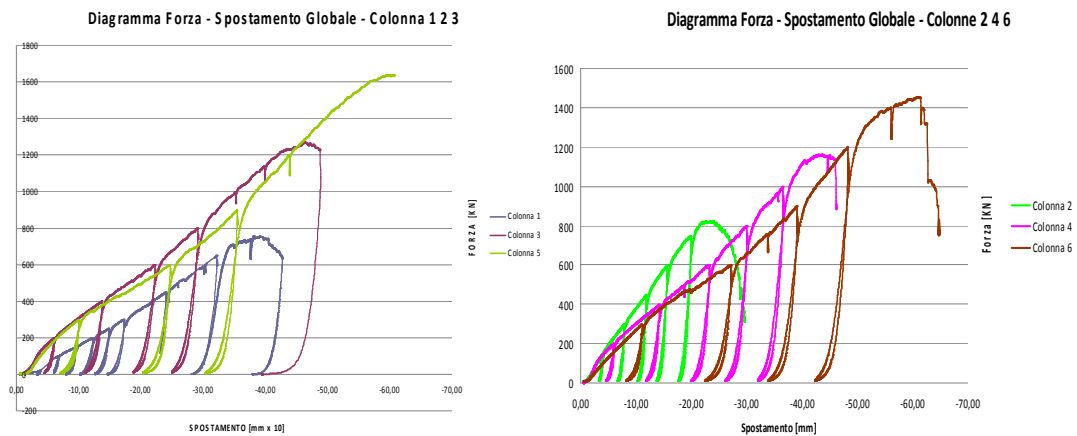
La prova è stata condotta con modalità ciclica incrementando il carico ad ogni ciclo, fino a giungere a rottura. Si riportano nel seguito i grafici carico-spostamento dei quattro strumenti verticali e dei quattro strumenti radiali. Dai grafici ottenuti con le

misurazioni dei trasduttori verticali si osserva che, nel complesso, la rigidezza delle colonne non subisce apprezzabili cambiamenti all’aumentare delle cerchiature, mentre è importante evidenziare che il valore del carico a collasso aumenta aumentando le cerchiature.

Colonne non cerchiare: la COLONNA 1 crolla a 75.7 ton di carico, la COLONNA 2 a 82.5 ton di carico, con evidenti fessure verticali in zone molto concentrate

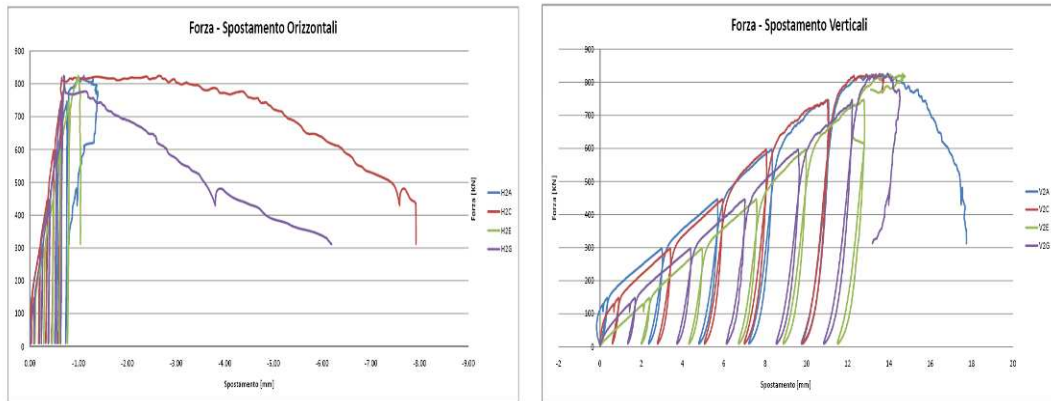
Colonne poco cerchiare: la COLONNA 3 crolla a 127.5 ton di carico, la COLONNA 4 a 116.2 ton di carico, con la formazione di numerose piccole fessure distribuite. Quando i cavi di cerchiaggio giungono a rottura la colonna cede e si evidenzia un apprezzabile comportamento duttile.

Colonne molto cerchiare: la COLONNA 5 crolla a 163.7 ton di carico, la COLONNA 6 a 145.4 ton di carico, con formazione di numerosissime fessure distribuite che interessano quasi tutta la superficie.

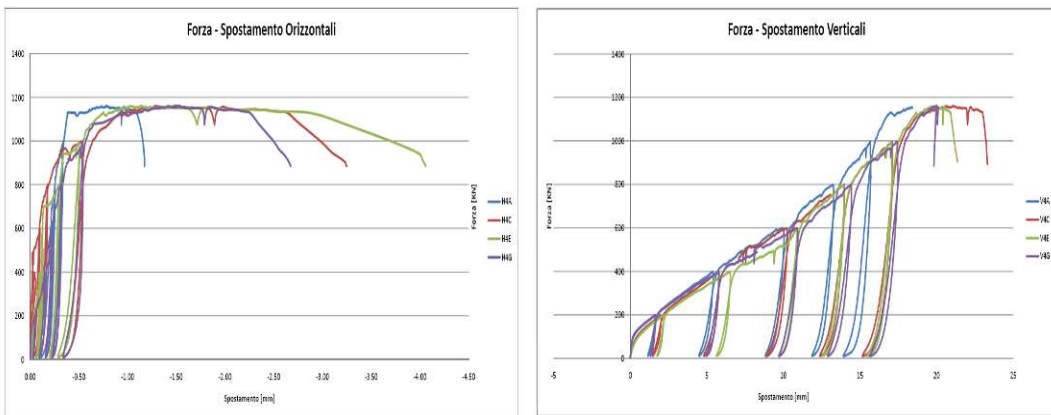


	<i>Carico Max [kN]</i>	<i>Spostamento Max verticale [mm]</i>
<b>COLONNA 1</b>	756,6	14,66
<b>COLONNA 2</b>	824,8	29,60
<b>COLONNA 3</b>	1274,9	48,97
<b>COLONNA 4</b>	1161,7	46,20
<b>COLONNA 5</b>	1636,7	60,79
<b>COLONNA 6</b>	1454,2	61,28

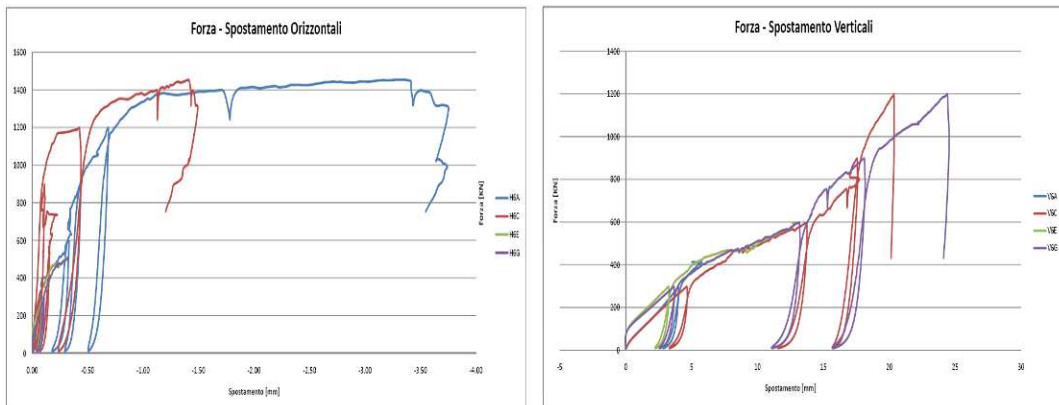
**Figura 62 e 63:** diagramma carico-spostamento verticale (globale, sull’intera colonna)



**Figura 64 e 65:** diagramma carico-spostamento riferito ai trasduttori orizzontali e verticali della COLONNA 2.



**Figura 66 e 67:** diagramma carico-spostamento riferito ai trasduttori orizzontali e verticali della COLONNA 4.



**Figura 68 e 69:** diagramma carico-spostamento riferito ai trasduttori orizzontali e verticali della COLONNA 6.

Le fotografie seguenti illustrano le modalità di rottura nelle sei colonne, la cui causa scatenante è dovuta alla deformabilità della malta la quale, deformandosi in direzione orizzontale oltre che verticale, trasmette forti tensioni di trazione ai mattoni adiacenti. Quando la resistenza a trazione dei mattoni viene superata, questi si rompono dando



Figura 70, 71 e 72: immagini dei provini dopo le prove: COLONNA 1, 3 e 5.

luogo a fessure verticali che segmentano la colonna in numerose sotto-colonne di sezione ridotta, soggette a fenomeni di instabilità.

Dai risultati delle prove è evidente il contributo della cerchiatura con i cavi inox, che avendo limitato l'espansione libera della malta in direzione orizzontale, rallenta la formazione delle fessure e aumenta la resistenza a rottura del provino.

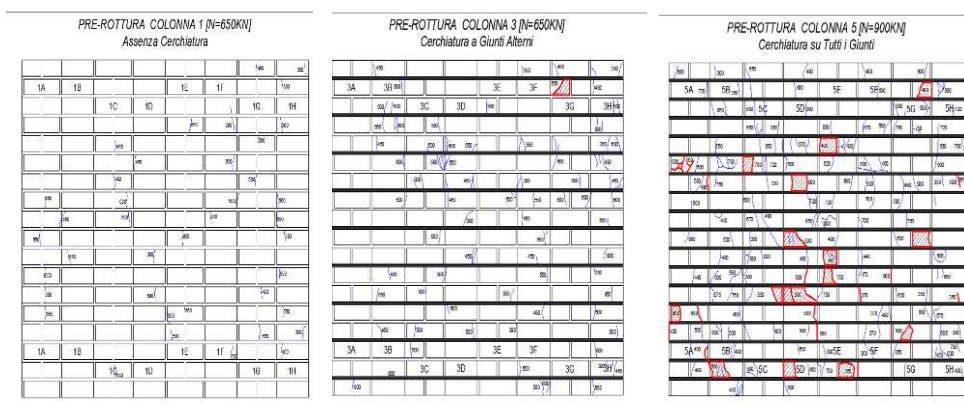


Figura 73, 74 e 75: quadri fessurativi in fase di **pre-rottura** della COLONNA 1, 3 e 5.

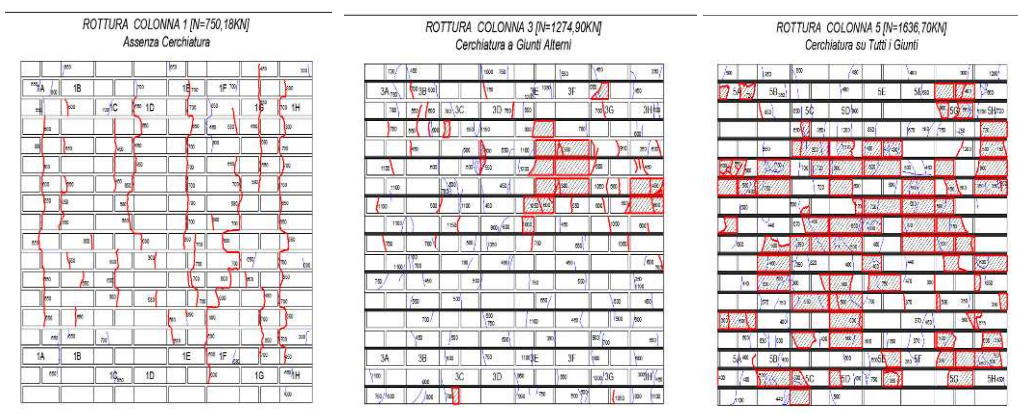


Figura 76, 77 e 78: quadri fessurativi in fase di **rottura** della COLONNA 1, 3 e 5.

Analizzando i risultati numerici si osserva che:

1. il carico a rottura delle colonne poco cerchiato, (media tra 3 e 4) manifesta un incremento del 54.2% rispetto ai provini non cerchiati (media tra 1 e 2)

2. il carico a rottura delle colonne molto cerchiato (media tra 5 e 6) manifesta un incremento del 95.6% rispetto ai provini non cerchiati (media tra 1 e 2).

Questi risultati giustificano ampiamente l'efficacia dell'intervento di consolidamento proposto, lasciando adito a possibili ulteriori miglioramenti tecnologici ed esecutivi.

3. i sei diagrammi forza verticale-spostamento hanno pendenze simili, ovvero il confinamento non modifica significativamente la rigidità della colonna e quindi non crea punti rigidi e pericolosi all'interno dell'edificio monumentale.

4. all'aumentare delle cerchiature aumenta la duttilità degli elementi cerchiati come si evince dal forte incremento di fessurazioni locali prima del collasso, in grado di dissipare energia. I provini 1 e 2 hanno un comportamento poco duttile e presentano fessure larghe e localizzate solo in zone limitate; i provini 3 e 4 hanno un comportamento più dissipativo con fessure piccole e diffuse lungo tutta la superficie; i provini 5 e 6 hanno un comportamento ancora più dissipativo dei precedenti, le fessure sono di piccola entità e ampiamente diffuse sulla intera superficie.

5. l'uso di malta di ristilatura, di modesto spessore ma piuttosto rigida, usata per ricoprire le spire metalliche ha causato una fessurazione corticale, ossia una sfogliatura superficiale ad inizio prova, che può aver influito sul carico a rottura, diminuendolo.

Sono previste ulteriori prove, in cui verrà eliminato lo strato di malta di protezione.

Le prove sperimentali a collasso su colonne cerchiato, qui descritte, hanno dimostrato il buon funzionamento della tecnica garantendo un rilevante incremento della portata ed un miglioramento della duttilità. Il metodo proposto tiene conto delle esigenze estetiche e del fondamentale criterio di reversibilità finalmente introdotto nella pratica di cantiere, garantendo la buona convivenza con l'esistente. Da ultimo la applicazione di questa innovativa tecnica si presenta di facile esecuzione anche con colonne non circolari, ottagonali ed anche a base quadrata, eliminando temporaneamente la malta in corrispondenza degli spigoli.

## 8. CONCLUSIONI

Nel consolidamento statico di elementi strutturali, la conoscenza dell'oggetto e delle sue caratteristiche devono influenzare le scelte progettuali e le tecniche da adottare per garantire il prolungamento in sicurezza della vita della struttura, basandosi sui criteri di necessità, di efficacia, di durabilità e dove possibile di limitata invasività ed elevata reversibilità, il tutto racchiuso nel termine "rispetto" per l'esistente.

Nell'ottica di far coesistere il criterio di conservazione alle decisioni di consolidamento statico bisogna tenere in considerazione le *risorse residue* degli elementi esistenti e affiancare a questi ultimi un sostegno in grado di sopperire alla deficienza strutturale, garantendo la sicurezza dovuta.

Sia la tecnica dell'arco armato, sia quella delle cerchiature delle colonne con cavi rispondono alle esigenze di mantenere in vita (nel pieno delle loro funzioni e lasciando la possibilità di interventi futuri) di particolari elementi strutturali che ci sono arrivati dal passato come testimonianza di una cultura organica, ancora attuale.



## BIBLIOGRAFIA

- [1]. Benvenuto E., La Scienza delle Costruzioni e il suo sviluppo storico, Sansoni Ed., 1981
- [2]. Breymann G. A., Trattato generale di costruzioni civili, Vol. 1 Costruzioni in pietra e strutture murarie, Milano, 1926
- [3]. Di Pasquale S., L'arte del costruire, tra conoscenza e scienza, Marsilio Ed., 1996
- [4]. Heyman J., The safety of masonry arch, Int.J.Mech.Sci., vol.11, 1969
- [5]. Heyman J., The masonry arch, Chichester, United Kingdom, 1982
- [6]. Jurina L., I tiranti metallici nel consolidamento degli edifici monumentali, XVI Convegno CTA, Ancona, 1997
- [7]. Jurina L., Mazzoleni M., Un sistema di "cerchiatura interna" per il consolidamento di ciminiere in muratura, Tercer coloquio latinoamericano "Rescate y preservaciòn del patrimonio industrial", Santiago de Chile, 2001
- [8]. 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
- [9]. Jurina L., L'arco armato: una nuova tecnica di consolidamento di archi e volte in muratura con uso di tiranti metallici, ZVI Convegno CTA, Ancona 1999
- [10]. Jurina L., Mazzoleni M., Un sistema di "cerchiatura interna" per il consolidamento di ciminiere in muratura, Tercer coloquio latinoamericano sobre rescate y preservaciòn del patrimonio industrial, Santiago de Chile, 2001
- [11]. Cultreri O., Savoldelli G., Arco armato, Tesi Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore L.Jurina, 1997
- [12]. Fumagalli C., Le catene nella progettazione e nel consolidamento strutturale di archi e volte, Tesi Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore L.Jurina, 1996
- [13]. 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
- [14]. 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
- [15]. Livraghi C., Colonne e pilastri cerchiati, Tesi di laurea, Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore L. Jurina, co-relatore M. Mazzoleni, 2004

