

# **PROCEDIMENTI TRADIZIONALI ED INNOVATIVI PER I RINFORZO DI ARCHI E VOLTE**

**Prof. ing. Paolo Napoli**

Politecnico di Torino  
Dipartimento di Architettura e Design  
Viale Mattioli 39, 10125 Torino, Italy

## ***Sommario***

*Gli archi e le volte sono forme strutturali in cui un materiale non resistente a trazione come la muratura acquisisce la capacità di resistere a sollecitazioni di flessione grazie alla compressione prodotta dalla forma. Vengono esaminate le possibili modalità di collasso sotto azioni statiche e sismiche e per ciascuna di esse le metodologie di consolidamento più appropriate, con riferimento sia alle tecniche tradizionali che ai procedimenti proposti di recente.*

## 1 MODALITÀ DI CRISI DI ARCHI E VOLTE

La muratura è un materiale da costruzione privo di resistenza a trazione. Per questo motivo esso può resistere a sollecitazioni di flessione solo se è contemporaneamente presente uno sforzo normale di compressione di entità tale da dar luogo ad una risultante complessiva la cui retta d'azione all'interno della sezione resistente.

Sin dai tempi antichi è noto che la forma ad arco, con la concavità verso il basso, è in grado di far nascere la necessaria compressione tra i conci della struttura muraria soggetta a carichi gravitazionali, sino ad annullare del tutto l'eccentricità della risultante se la forma dell'arco coincide con la funicolare dei carichi (fig. 1).

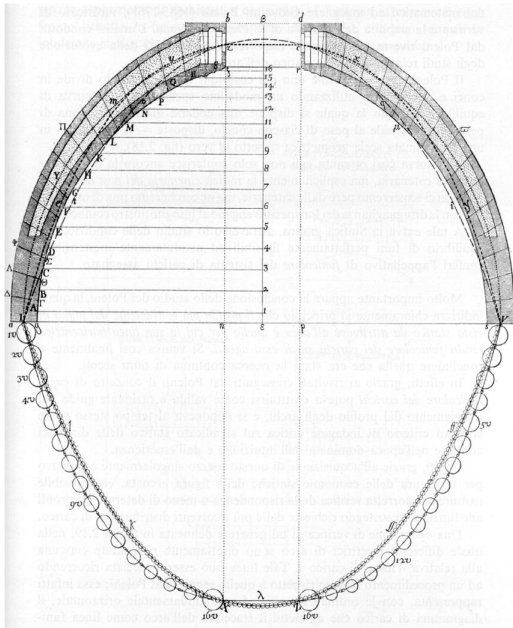


Fig. 1 – G. Poleni (1748). Funicolare dei carichi e curva delle pressioni nella cupola di S. Pietro

In effetti un arco in muratura raggiunge una condizione di crisi essenzialmente con 4 modalità:

1. Per formazione di un meccanismo;
2. Per spostamenti delle imposte
3. Per scorrimenti tra i conci
4. Per schiacciamento della muratura compressa.

La crisi per **formazione di un meccanismo** avviene quando nell'arco si forma un numero di cerniere interne tale da rendere la struttura labile. Poiché un arco in muratura è nel suo piano una struttura 3 volte iperstatica, affinché si manifesti una situazione di labilità occorre che si formino almeno 4 cerniere interne, 5 nel caso simmetrico (fig. 2).

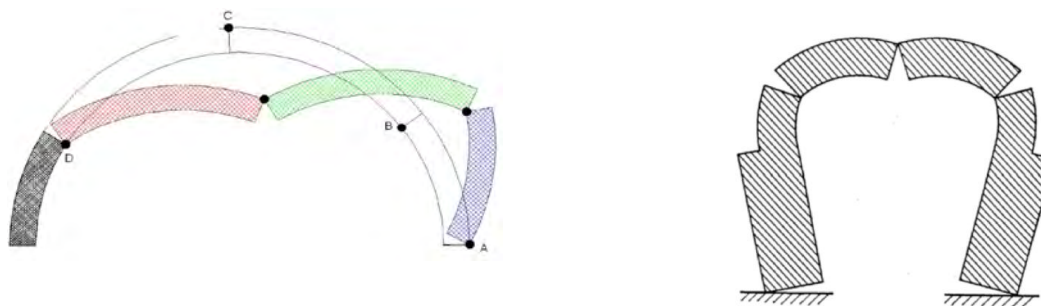


Fig. 2 - Meccanismi di crisi per carichi asimmetrici e simmetrici.

Le cerniere interne si formano nelle sezioni in cui la curva delle pressioni si colloca in prossimità di un estremo della sezione: in esse, infatti, la sezione risulta quasi interamente fessurata, e lo sforzo di compressione si concentra su una piccola parte della sezione, intorno alla quale può avvenire la rotazione. Questo tipo di crisi presuppone che la resistenza a compressione del materiale che costituisce i conci sia sovrabbondante rispetto alle sollecitazioni e che quindi sia possibile che si instauri una rotazione localizzata senza che avvenga la rottura per compressione della porzione reagente.

Si osserva ancora che in caso di carico simmetrico questo meccanismo può avvenire solo se provoca il contemporaneo allontanamento delle imposte, e perciò in questo caso deve essere considerato come un tutt'uno con la modalità di crisi di cui al punto 2. La rottura per formazione di un meccanismo perciò, se non accompagnata da spostamento delle imposte, è tipica delle condizioni di carico non simmetriche, tra le quali va incisa la condizione sotto il sisma, a causa delle forze d'inerzia orizzontali alle quali la volta è sottoposta.

Lo **spostamento delle imposte** obbliga l'arco a formare 3 cerniere interne per potersi adattare allo spostamento dei suoi punti di estremità (Fig. 3).

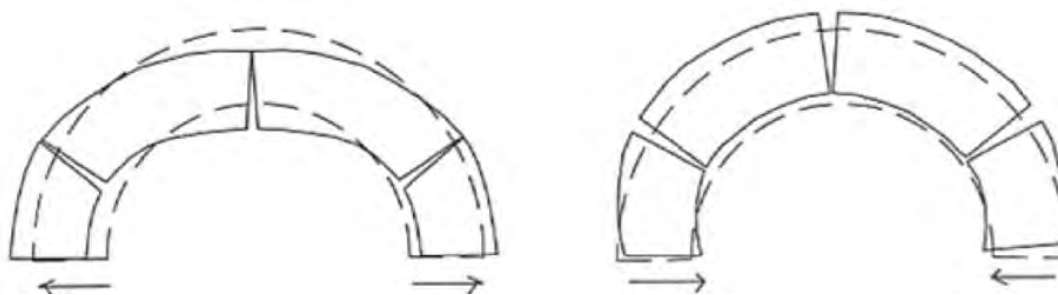


Fig. 3 - Fessurazioni conseguenti ad un allontanamento (a sinistra) e ad un avvicinamento (a destra) delle sezioni di imposta.

In questi casi la struttura rimane isostatica, ma la forma della linea d'asse varia. Di conseguenza vi sono sezioni in cui essa si allontana dalla curva delle pressioni: è quindi sufficiente che in una o più sezioni la curva delle pressioni raggiunga il lembo della sezione perché si formino ulteriori cerniere, rendendo così labile la struttura.

Questa modalità di rottura è tipica del collasso degli edifici in condizioni sismiche: avviene infatti che le murature perimetrali sotto l'effetto del sisma subiscano spostamenti orizzontali ai livelli in cui si impostano gli archi o le volte, mentre quelle interne, maggiormente legate alla compagine muraria, non si muovono in sincronia con esse. Le conseguenze sono quelle rappresentate in fig. 3, di solito con la modalità di

sinistra (spostamento del muro perimetrale verso l'esterno). Lo spostamento della linea d'asse dalla curva delle pressioni può provocare il crollo: soprattutto nel caso di volte sottili, in cui uno spostamento di pochi centimetri è sufficiente a far uscire la curva delle pressioni dalla sezione. Questo comportamento è stato responsabile di numerosi crolli di volte nel centro storico a L'Aquila, a causa del gran numero di volte in foglio presenti, soprattutto ai piani alti.

La terza modalità di collasso riguarda lo **scorrimento di un concio sull'altro**. Nelle prime trattazioni sugli archi (De La Hire, 1699) essa era considerata la modalità principale di crisi (fig. 4), ma in realtà lo scorrimento dei conci per effetto del taglio è raramente causa della crisi dell'arco o della volta.

Tale scorrimento è osservabile nelle volte che hanno subito un sisma, a causa della accelerazione orizzontale imposta alla muratura, ma raramente esso è di entità tale da provocare il crollo, essendo di solito limitato a pochi millimetri (fig. 5). In caso di sisma generalmente i due meccanismi di crisi precedentemente descritti risultano ben più pericolosi.

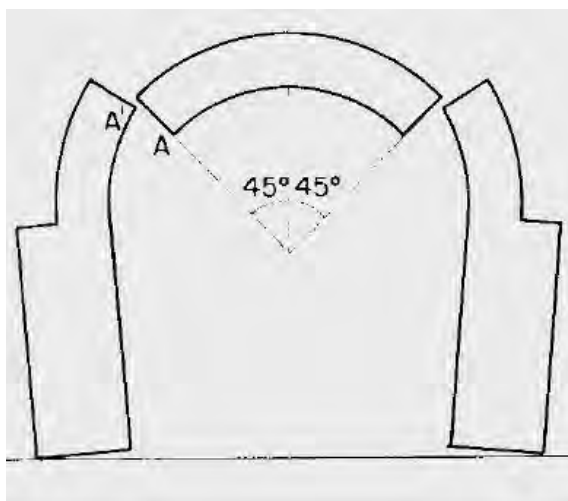


Fig. 4 - Scorrimento dei conci secondo De La Hire



Fig. 5 - Scorrimento lungo i giunti per sisma

L'ultima modalità di crisi (schiacciamento della muratura compressa) è in realtà molto rara. Si può affermare che essa non si verifica mai in caso di archi in pietra da taglio, grazie alla elevata resistenza a compressione della pietra stessa (ad esempio il metodo di Heyman (1966) per il calcolo plastico degli archi in pietra assume come ipotesi resistenza a compressione infinita). Essa comunque è piuttosto rara anche in caso di archi in laterizio.

## 2 PROCEDIMENTI DI CONSOLIDAMENTO TRADIZIONALI

I procedimenti tradizionali di consolidamento sono essenzialmente rivolti a contrastare le prime due modalità di crisi, in quanto di gran lunga le più frequenti e pericolose.

## ***2.1 Interventi di riparazione***

Gli interventi di riparazione hanno lo scopo di eliminare situazioni di dissesto verificatesi per eventi accidentali, ad esempio scosse sismiche. Essi si limitano a ripristinare la condizione della struttura prima dell'evento accidentale, e sono preliminari a qualsiasi intervento di consolidamento.

Il procedimento di elezione per la riparazione di un'arco o di una volta danneggiata consiste nella ricostruzione a scuci e cucì, utilizzando i conci originali recuperati integrati da conci nuovi il più simili possibile a quelli originali per proprietà meccaniche e, se necessario, per caratteristiche estetiche.

Poichè la struttura è normalmente soggetta a compressione, prima di operare la "scucitura", cioè la rimozione dei conci danneggiati, occorre ovviamente scaricare il più possibile gli sforzi con adeguate puntellazioni.

La procedura a scuci e cucì può essere utilizzata anche per ripristinare la forma di porzioni di volta dislocate, operando dall'interno per piccole porzioni, senza l'ausilio di centine (fig. 6, 7, 8), oppure per parti più estese, con la posa di una centina interna e operando dall'estradosso (fig. 9). In qualche caso, specie operando dall'interno senza centina, per semplificare la ricostruzione potrà essere opportuno sostituire la malta dei giunti del rifacimento con resine sintetiche di confrontabile rigidità ma di immediata efficacia (Fig. 6)

La stessa procedura (con centina e dall'estradosso) può essere utilizzata per ricostruire parti di volta crollate: in quest'ultimo caso la "scucitura" riguarderà solo il contorno della parte rimasta in opera e sarà finalizzato ad ottenere un perfetto ammorsamento.



Fig. 6 - La volta di fig. 5 riparata a scuci e cucì (Chiesa di S. Biagio Amiternum, L'Aquila)



Fig. 7 - Particolare di fig. 6: scucitura dell'arco in chiave.



Fig. 8 - Particolare di fig. 6: rifacimento a scuci e cuci della volta, operando dall'interno senza centina.



Fig. 9 - Rifacimento a scuci e cuci dall'estradosso con l'ausilio di centina.

## 2.2 *Procedimenti di contrasto allo spostamento delle imposte.*

L'inserimento di tiranti, atti a raccogliere la spinta dell'arco e a contrastare l'allontanamento dei piedritti di appoggio, è uno dei primi procedimenti di consolidamento ad essere stati applicati ed è uno dei più efficaci.

I tiranti ("catene") dovrebbero preferibilmente essere posti alla quota della spinta dell'arco (all'imposta o poco sopra di essa, in prossimità del punto di momento nullo dell'arco incastrato), ma ovviamente in questa posizione essi risultano all'interno dell'ambiente (fig. 10).

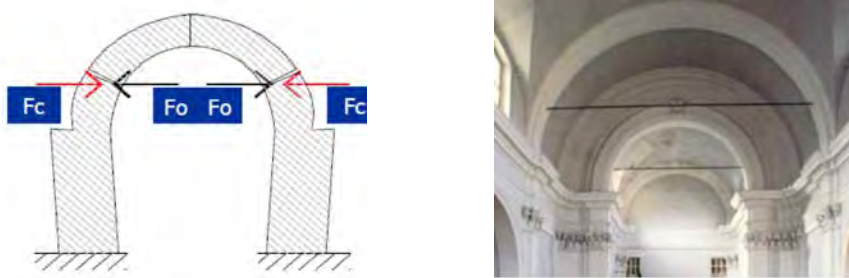


Fig. 10 - Posizionamento del tirante alla quota della spinta.

Poichè la rigidezza dei tiranti è comunque modesta rispetto a quella delle murature di imposta, affinché essi siano efficaci è necessario applicare una pretensione, in modo da eliminare tutti i giochi di montaggio e gli assestamenti dei piani di contrasto. E' opportuno che la pretensione applicata sia pari alla spinta dell'arco sotto l'effetto dei carichi permanenti presenti al momento della tesatura, in modo da scaricare completamente i muri dalla flessione; essa non deve comunque superare tale valore, altrimenti l'arco stesso potrebbe dissesarsi per eccessivo inarcamento. In caso di successive aggiunte di carichi permanenti significativi (pavimenti...) la tesatura potrà eventualmente essere ripresa.

All'interno di questa categoria rientrano i provvedimenti di cerchiatura delle cupole a base circolare, di cui è da secoli ben nota l'efficacia: basti citare il classico intervento dei Poleni e Vanvitelli sulla cupola di S. Pietro (1743), con l'inserimento di 5 cerchiature in ferro fucinato (A-E) in aggiunta a quelle esistenti, più una sesta (Z) aggiunta successivamente dopo aver constatato che una di quelle preesistenti era spezzata (fig. 11).

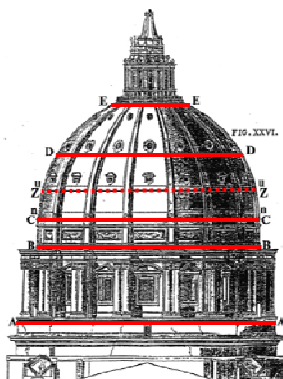


Fig. 11 - Cerchiature metalliche aggiunte da G. Poleni alla cupola di S. Pietro



Quando è presente un sufficiente carico verticale al di sopra dell'imposta dell'arco o della volta è possibile utilizzare **tiranti posti all'estradosso**, quindi non visibili all'interno. In questo caso i muri di imposta si comportano come una trave verticale, inflessa tra il punto di applicazione della catena ed il vincolo al piano inferiore (spesso costituito dal tirante del piano inferiore) e sollecitata dalla spinta dell'arco (fig. 12). Se invece di un arco si tratta di una volta, la spinta è distribuita, mentre i tiranti applicano forze concentrate poste ad una certa distanza tra loro. Quindi i muri laterali sono inflessi anche nel piano orizzontale, e la stabilità è assicurata da un effetto arco all'interno del loro spessore. Per contrastare la spinta che ne deriva, è opportuno inserire tiranti longitudinali immediatamente accanto ai muri stessi (fig. 13).

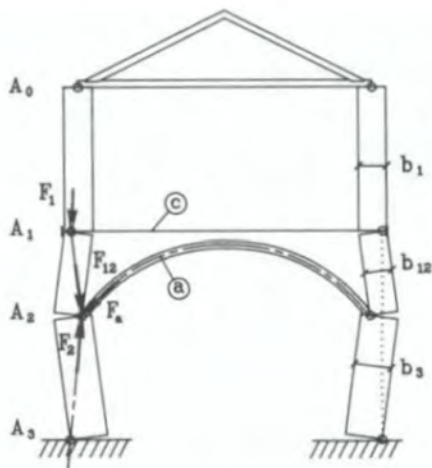


Fig. 12 e 13 - Inflessione dei muri laterali in caso di tiranti estradosso e tiranti all'estradosso di una volta.

Nella tradizione storica i tiranti estradosso sono spesso corredati da appendici inclinate che cercano di riportare l'azione in basso: esse tuttavia non sono efficaci, come ben illustrato dal Valadier già nel 1831 (fig. 14).

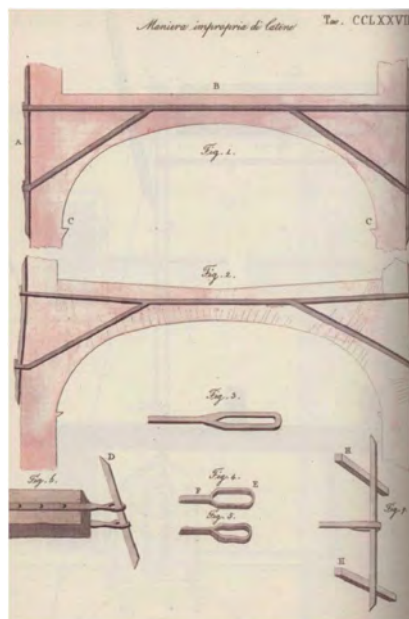


Fig. 14 - Inefficacia delle appendici inclinate ai tiranti estradosso (Valadier, 1831)

I tiranti estradossoali sono invece utilmente associati ai **frenelli**, che consistono in muretti costruiti sopra la volta (fig. 15): essi svolgono una funzione altamente positiva nel contrastare la perdita di forma della volta (vedi paragrafo seguente), ma sono anche presidi preziosi per evitare gli spostamenti orizzontali dei muri di imposta: infatti mentre il tirante impedisce l'allontanamento dei muri di imposta tra loro, il frenello ne impedisce l'avvicinamento, che si può verificare sotto sisma. Inoltre se il tirante è inglobato completamente nel frenello, la pretensione può essere innalzata fino alla massima spinta prevedibile a pieno carico, in quanto a vuoto è il frenello che, comprimendosi, impedisce l'avvicinamento delle imposte: in questo modo la rigidità del tirante alla applicazione dei carichi variabili diviene pari a quella del frenello compresso.

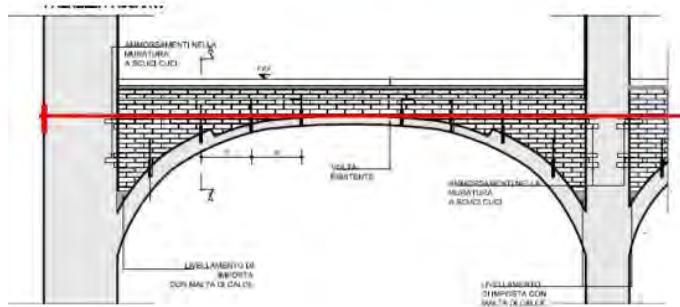


Fig. 15 - Inserimento di tiranti e frenelli per il consolidamento di una volta a botte.

### 2.3 Procedimenti di contrasto alla deformazione della volta.

Sotto l'effetto dei carichi concentrati o dissimmetrici gli archi e le volte si deformano e si allontanano dalla linea d'asse ottimale. Una funzione stabilizzante è svolta dagli elementi disposti sopra l'estradosso: il riempimento e i frenelli.

**Il riempimento** non ha solo la funzione di livellare la forma arcuata consentendo la creazione di un orizzontamento piano: esso fornisce anche un carico distribuito simmetrico che, producendo uno sforzo normale significativo (centrato se la forma è quella ottimale) riduce gli spostamenti della curva delle pressioni provocati dai carichi concentrati, ed inoltre esercita delle spinte favorevoli per evitare lo spostamento verso l'alto della volta (fig. 16).

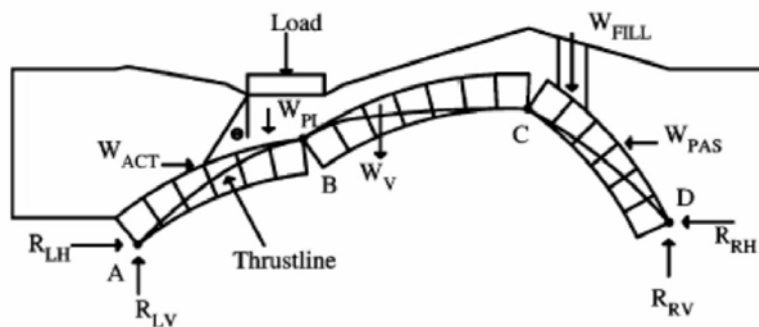


Fig. 16 - Effetto favorevole del riempimento (Ng K.H. - Fairfield C.A. - 2003)

Esso tuttavia rappresenta una massa elevata che genera forze sismiche: per questa ragione è generalmente opportuno ridurne la massa sostituendolo con materiali più leggeri. Per evitare di indebolire la volta nei confronti dei carichi dissimmetrici, è opportuno dotare il nuovo riempimento leggero di una pur modesta coesione, ad esempio legando con boiaccia i granuli di argilla espansa, in modo che grazie a questa coesione esso possa contrastare con immutata efficacia l'innalzamento della volta nella metà non caricata.

Studi sperimentali (fig. 17) hanno dimostrato che ancora più efficaci del riempimento nel contrastare la perdita di forma dell'arco o della volta risultano i **frenelli** costruiti al di sopra di essa, preferibilmente se legati in modo puntuale alla struttura voltata.



Fig. 17 - Prove sperimentali dell'efficacia dei frenelli (E. Tomasoni, 2008)

Assommando il duplice ruolo di contrastare lo spostamento dei muri e di migliorare il mantenimento della forma della struttura voltata, la realizzazione di frenelli sufficientemente ravvicinati rappresenta un metodo tradizionale di consolidamento altamente consigliabile anche alla luce degli studi recenti.

## ***2.4 Procedimenti di rinforzo della struttura voltata.***

Per il rinforzo vero e proprio degli archi e delle volte, il procedimento tradizionale più comune consiste porre a nudo l'estradosso e nel gettare una cappa in calcestruzzo sopra la struttura esistente, usufruendo del cassero costituito dalla struttura stessa. Il nuovo getto è armato con uno o due strati di barre d'acciaio, e normalmente è collegato alla struttura muraria con connettori costituiti da tasselli chimici o ad espansione (fig. 18).

Se l'intervento è correttamente realizzato, ed in particolare se è garantita l'aderenza tra nuovo getto e muratura (estradosso della muratura pulito e con giunti scarificati,

connettori in numero sufficiente inseriti nel centro dei conci, ecc.) si ottiene una struttura composta in cui calcestruzzo e muratura collaborano tra loro.

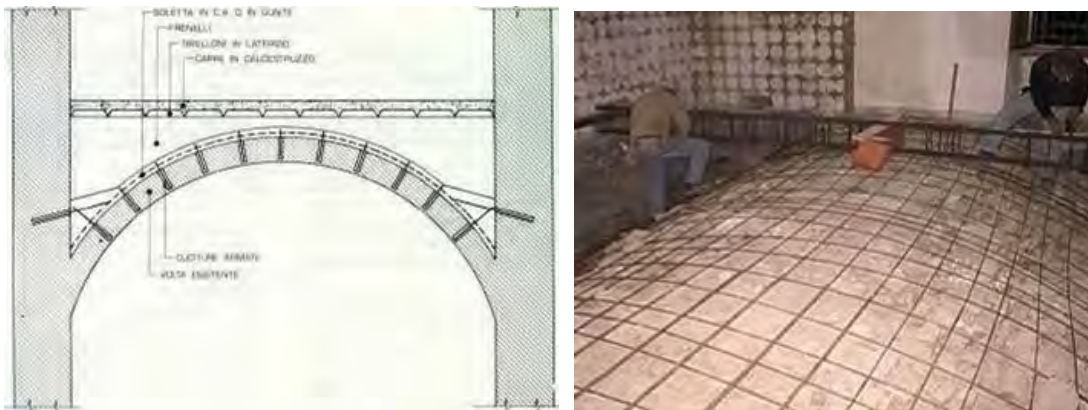


Fig. 18 - Rinforzo estradossale con cappa in calcestruzzo armato

Le ipotesi usuali sotto cui l'intervento viene concepito prevedono di affidare lo sforzo normale ed il momento flettente negativo alla struttura composta, mentre la resistenza al momento flettente positivo risulta garantita dalla sola cappa armata in calcestruzzo. Questo tipo di rinforzo è stato largamente utilizzato in passato, e consente di incrementare anche notevolmente la capacità portante. E' opportuno che lo spessore del getto sia il minimo possibile (4-8 cm) in quanto, con spessori maggiori, sussiste il rischio che lo sforzo di compressione si trasferisca prevalentemente nella più rigida struttura in calcestruzzo, con conseguente decompressione della volta (fig. 19).

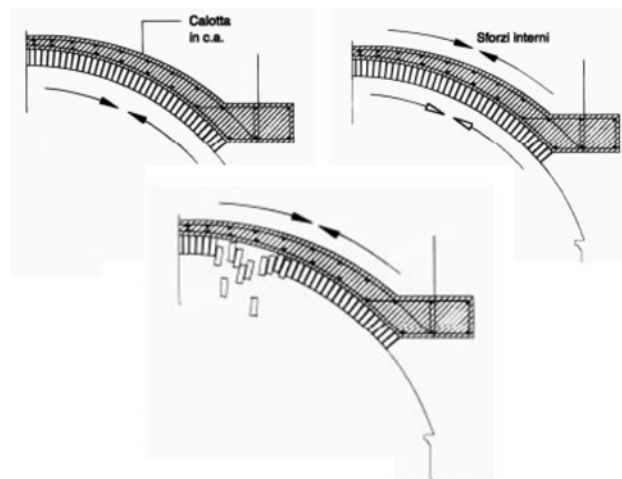


Fig. 19 - Decompressione nella muratura in presenza di una controvolta massiccia in calcestruzzo.

Questo intervento è oggi sconsigliato per i Beni architettonici vincolati, perché irreversibile e per " *l'impovertimento che induce, in termini di valori culturali e testimoniali, nel manufatto storico.* "

### 3 PROCEDIMENTI DI CONSOLIDAMENTO INNOVATIVI.

#### 3.1 *Procedimenti di contrasto allo spostamento delle imposte.*

I procedimenti di contrasto allo spostamento delle imposte non differiscono sostanzialmente da quelli tradizionali dedicati allo stesso fine, se non per la sostituzione dei tiranti in acciaio con elementi resistenti a trazione ottenuti con fibre in matrice polimerica.

E' ben noto come siano oggi disponibili sul mercato materiali aventi elevatissime prestazioni in termini di resistenza a trazione, ottenuti inserendo fibre appropriate (di carbonio, di basalto, d'acciaio, ecc.) in una matrice polimerica: si parla allora di FRP (fiber reinforced polymers).

Con questi materiali è relativamente semplice realizzare tiranti di grande resistenza, utilizzando una adeguata sezione di fibre. Le problematiche riguardano piuttosto le modalità di ancoraggio, in quanto l'incollaggio di tali materiali alle murature è soggetto ai fenomeni di delaminazione che possono penalizzare in modo molto sensibile la resistenza disponibile.

L'utilizzo degli FRP è particolarmente semplice nelle cupole a base circolare o poligonale, in cui le fibre possono essere incollate direttamente su se stesse a formare un anello chiuso, quindi con ottima efficacia di ancoraggio (fig. 20). Rispetto ad una cerchiatura in acciaio si rileva che non è possibile imprimere una pretensione, ma d'altra parte il tipo di applicazione non comporta giochi di montaggio e quindi la cerchiatura è immediatamente efficace.



Fig. 20 - Anello di cerchiatura in fibra di carbonio alla base di una cupola (Chiesa di S. Biagio Amiternum, L'Aquila). E' presente anche un rinforzo estradossale diametrale.

Le fibre possono essere utilizzate anche per effettuare cerchiature esterne dell'intero corpo di fabbrica, con il vantaggio di non richiedere di perforare le murature per realizzare i capochiavi di ancoraggio (fig. 21). Quando invece essi sono posti all'interno, in aderenza ai muri, è generalmente necessario prevedere un dispositivo metallico terminale per l'ancoraggio (fig. 22).



Fig. 21 e 22- Costruzione di tiranti in fibre applicati all'esterno ed all'interno.

### 3.2 *Procedimenti di rinforzo della struttura voltata*

I procedimenti innovativi di rinforzo della struttura voltata possono dividersi in due grandi categorie:

- Procedimenti finalizzati a fornire alla muratura resistenza a flessione, in modo da poter fronteggiare l'eccentricità della curva delle pressioni
- Procedimenti finalizzati a ridurre l'eccentricità della curva delle pressioni, in modo che la muratura, pur priva di resistenza a flessione, possa resistere.

I due approcci possono anche essere combinati tra loro, anche in pratica questo raramente è necessario.

I procedimenti finalizzati a **fornire resistenza a flessione alla muratura** utilizzano le proprietà delle fibre che, opportunamente solidarizzate alla muratura, raccolgono su di sé le tensioni di trazione, mentre la muratura stessa resiste a quelle di compressione.

Poiché in una struttura ad arco i momenti flettenti associati all'eccentricità della curva delle pressioni variano di segno lungo la luce, per ottenere che la muratura possa resistere sia a momento positivo che negativo occorre applicare fibre resistenti a trazione sia all'estradosso che all'intradosso (fig. 23).

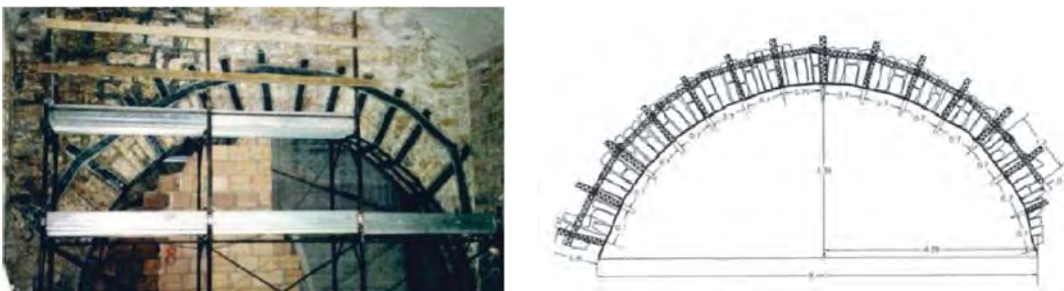


Fig. 23 - Intervento di rinforzo di un arco mediante incollaggio di fibre sia all'estradosso che all'intradosso, con collegamenti sulle facce laterali.

Con un intervento di questo tipo si trasforma la muratura in un corpo elastico resistente a flessione e taglio, e perciò l'arco può essere studiato con gli usuali procedimenti di analisi elastica e le sezioni verificate per le sollecitazioni che ne risultano.

Questa tipologia di intervento è peraltro molto impegnativa e piuttosto invasiva per diverse ragioni:

- Le fibre poste all'intradosso quando entrano in trazione tendono a staccarsi dalla muratura: per questa ragione possono essere incollate solo con resine (le malte sarebbero inefficaci) ed è necessario prevedere connettori che impediscano la rottura dell'aderenza;
- Spesso l'intradosso delle volte è affrescato, ed un intervento di questo tipo risulterebbe devastante.

Per queste ragioni la tipologia di rinforzo con fibre applicate sia all'estradosso che all'intradosso è raramente utilizzata in pratica.

La modalità di rinforzo più comune consiste attualmente nella applicazione di fibre resistenti a trazione solo su una delle superfici della volta (o dell'arco): di solito l'estradosso. Sotto l'aspetto pratico l'applicazione all'estradosso risulta molto semplice in quanto non occorre lavorare in quota; inoltre le condizioni di aderenza sono le migliori, in quanto grazie alla convessità la fibra tesa esercita compressioni sulla superficie voltata, tanto che è anche possibile applicare le fibre con malte inorganiche, evitando il ricorso a resine sintetiche: in questo modo si realizza un intervento reversibile e compatibile con i materiali preesistenti.

Con questa impostazione è evidentemente possibile dotare la struttura muraria di resistenza flessionale nei confronti dei momenti di un solo segno (negativo se il rinforzo viene applicato all'estradosso). Esso è però normalmente sufficiente per ottenere la portanza necessaria.

Se infatti sono stati precedentemente realizzati gli interventi atti ad impedire gli spostamenti delle murature di imposta, le modalità di collasso residue sono:

- Formazione di un meccanismo;
- Scorrimento lungo i giunti
- Rottura per compressione della muratura.

Nel paragrafo 1 si è visto come gli ultimi due meccanismi di crisi siano raramente condizionanti per la sicurezza. Resta quindi da fronteggiare la formazione di un meccanismo del tipo di quelli rappresentati in fig. 2, rispetto alla quale l'intervento con le fibre da un solo lato risulta efficace. Facendo riferimento per comodità ad un rinforzo applicato all'estradosso, si osserva infatti che non possono più formarsi le cerniere in cui la fessura risulta aperta all'estradosso: di conseguenza, anche formandosi le restanti cerniere, l'arco rimane isostatico nel meccanismo 2b oppure 1 volta iperstatico nel meccanismo 2a ed è in grado di portare i carichi sia statici che sismici.

L'analisi può avvenire in modo elastico, su uno schema statico che include sin da subito la cerniera con apertura all'intradosso, e di conseguenza calcola il momento agente in tutte le altre sezioni, che dovrebbe risultare interamente negativo: in base al valore di esso è possibile dimensionare la quantità di fibra da applicare all'estradosso. Per ragioni di costo, ma soprattutto per assicurare il mantenimento della traspirabilità al vapore acqueo, nel caso delle volte le fibre vengono generalmente applicate sotto forma di

strisce, il cui interasse non deve superare la capacità di ripartizione trasversale della volta (fig. 24).

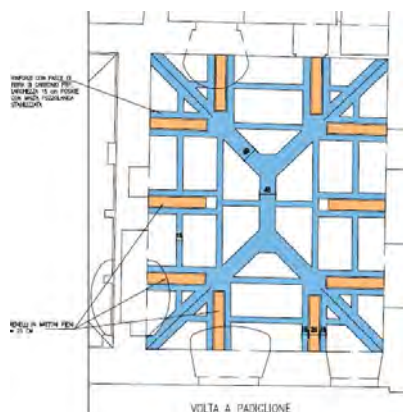


Fig. 24 - Rinforsamento estradossale di volta a botte.

Fig. 25 - Schema per i rinforsamenti di volta a padiglione.

Un aspetto a cui occorre prestare attenzione è costituito dalle problematiche dell'ancoraggio delle strisce di fibra, che risente dei fenomeni di decoesione all'estremità. Esso può essere migliorato utilizzando fiocchi di fibra incollati alle strisce e solidarizzati entro fori alle murature perimetrali: questa disposizione migliora anche il collegamento tra la volta e la struttura verticale.

Per volte di forma complessa, occorre collocare le fibre nelle posizioni in cui si generano le fessure all'estradosso: è quindi utile procedere preliminarmente ad analisi elastiche agli elementi finiti, per individuare le zone soggette a trazioni all'estradosso, su cui applicare le fibre. Per volte di tipo ricorrente (a padiglione, a crociera, ecc..) la tipologia di rinforsamento risulta anch'essa ricorrente (fig. 25).

I procedimenti finalizzati a **ridurre l'eccentricità della curva delle pressioni** sono sostanzialmente basati su un aumento del valore dello sforzo normale permanente centrato, in modo che risultino minimizzate le eccentricità indotte dal carico variabile.

La modalità tradizionale con cui questa finalità veniva perseguita era quella di aumentare il carico permanente: infatti, se le murature di imposta sono in grado di resistere alla spinta orizzontale, un elevato carico permanente, ben modulato rispetto alla forma della struttura voltata, produce un forte sforzo normale centrato che consente all'arco di resistere bene ai carichi variabili verticali.

La soluzione tradizionale ha l'inconveniente che la massa del carico permanente genera forti forze sismiche, che in definitiva vanificano il risultato che viene ricercato.

Una brillante soluzione a questo problema (L. Jurina, 1996) consiste nell'applicare una precompressione centrata all'arco mediante cavi di acciaio pretesi, che possono essere applicati sia all'estradosso che all'intradosso (fig. 26, fig. 27). Ovviamente la collocazione all'estradosso risulta più agevole, dato che i cavi vengono naturalmente



contrastati dall'arco, mentre quando essi sono all'intradosso è necessario che siano trattenuti da connettori radiali in grado di resistere agli sforzi di deviazione.



Fig. 26 e 27 - Rinforzo di volte ed archi con cavi pretesi disposti all'estradosso (a sinistra) o all'intradosso.

La coazione indotta dai cavi produce nell'arco uno sforzo normale perfettamente centrato, il cui valore può essere stabilito progettualmente in base alle necessità statiche, senza percettibile aumento della massa, e quindi senza che si incrementino le forze sismiche. L'effetto dei carichi variabili, di qualunque tipo, verrà quindi a sovrapporsi a questo stato favorevole di sforzo, in modo tale che la curva delle pressioni sia sempre interna alla sezione.

Poiché il procedimento comporta un aumento del valore di compressione nell'arco, occorre prestare attenzione alla sicurezza rispetto alla rottura per schiacciamento del lembo compresso: in effetti una rottura di questo tipo si è verificata durante le verifiche sperimentali del procedimento.

Alcune figure sono state tratte dalla letteratura scientifica in argomento, come di seguito indicato: fig. 2: E. Sacco, E. Benvenuto; fig. 10, 12 e 13: A. Marini, G. Plizzari; fig. 21, 22 e 23: P. Faccio; fig. 26 e 27: L. Jurina.