

VERIFICHE STATICHE ED INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO NEI PONTI IN MURATURA

Lorenzo Jurina
Politecnico di Milano
www.jurina.it

Introduzione

Un ponte (anzi "il" ponte) ha sempre l'ancestrale capacità di unire ciò che per natura è diviso, di colmare un vuoto, di tramutare lo spazio in luogo.

È l'ingegno umano che lo immagina, lo progetta ed infine lo realizza ma l'esperienza è sempre così straordinaria, sempre così "potente" che diventa talora, nella tradizione popolare, atto di ribellione nei confronti delle leggi di natura, che va giustificato con l'intervento di una figura soprannaturale, mitica od eroica, oppure con un sacrificio di fondazione, una vittima-custode che garantisca per l'eternità la stabilità della struttura (ad esempio può essere citato il "ponte del diavolo" sulla strada del Gottardo: una leggenda popolare vuole che il diavolo in persona ne fosse stato l'artefice. In cambio dell'opera prestata egli avrebbe chiesto l'anima del primo passante. Gli abitanti di Uri avrebbero allora spinto sul ponte un caprone facendosi così beffe del diavolo.)



Il ponte del diavolo sulla via del
S. Gottardo

Persino oggi, logorati dalla filosofia positivista e sicuri dei progressi tecnici e tecnologici, è difficile non restare ammirati davanti a tali opere.

Nonostante la perizia tecnica con cui furono eretti, però, può succedere che queste strutture non siano più in grado di garantire i requisiti minimi di sicurezza e stabilità necessari per affrontare il nuovo carico d'esercizio che sono chiamate a sopportare. Non va dimenticato che l'evoluzione avvenuta nelle modalità e nei mezzi di trasporto ha portato ad un aumento, sia dal punto di vista geometrico che da quello dei carichi, delle sollecitazioni.

Affrontare il progetto di consolidamento di questi elementi, allora, è un delicato esercizio di equilibrio tra la necessità di conservare la struttura come pregevole testimonianza storico-architettonica e l'esigenza di adeguare "punti strategici" dell'infrastruttura viaria.



Il ponte romano di Sogiano al Rubicone

Classificazione tipologica

Conoscere il manufatto, è ormai luogo comune, è assolutamente necessario per poter operare scientemente sullo stesso. Prendendo a prestito la metodologia di Linneo, i ponti possono essere classificati e suddivisi partendo dalle loro peculiarità geometriche e tipologiche. In particolare si può focalizzare l'attenzione sui materiali, sulle destinazioni, sulla tipologia e sulla forma.

Materiali:

- pietra
- legno
- muratura a sua volta distinguibile in:
 - muratura di pietra da taglio e conglomerato cementizio non armato
 - muratura di concio squadrato e posato a secco
 - muratura di mattone
- cemento armato
- ferro/metallici

Destinazione:

- pedonali o passerelle
- per strada ordinaria
- ponti canale
- ponti ferroviari
- ponti acquedotto ad un piano o a più piani
- ponti mobili nella parte centrale o nella parte laterale
- girevoli
- levatoi
- scorrevoli
- galleggianti
- traghetto
- pensili
- issabili
- militari

Tipologia:

- ad arco
 - ad arco a tutto sesto
 - ad arco ogivale o a sesto acuto o a schiena d'asino
 - ad arco ribassato (con la curva di intradosso data da un solo centro)
 - ad arco policentrico (con la curva di intradosso data da più centri)
 - a catenaria (con la curva di intradosso a variabile continua)
 - trapezoidale.
- a travata (semplicemente appoggiata, continua, a mensola, a telaio)
- sospesi
- sostenuti e strallati

Per quanto più specificatamente concerne i ponti in muratura si può far riferimento alla suddivisione sotto riportata:

Materiale:

muratura

- di pietra da taglio e conglomerato cementizio non armato
- di concio squadrato e posato a secco
- di mattone

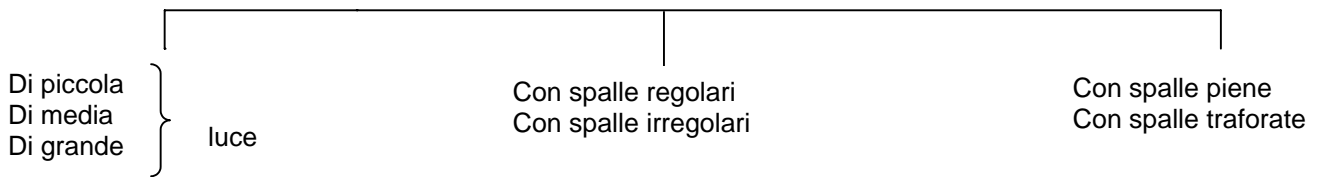
Destinazione:

- pedonali ad uso pubblico o privato
- carreggiabili o rotabili o ordinari ad uso pubblico o privato

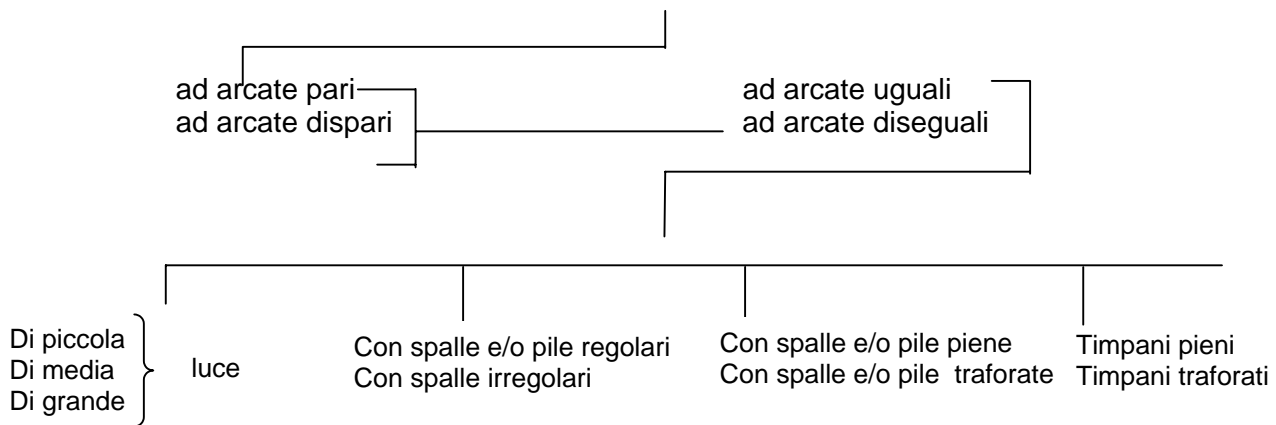
Tipologia:

- su terrapieno
- ad arco:

ad una arcata



a più arcate



Forma

- ad arco a tutto sesto
- ad arco ogivale o a sesto acuto o a schiena d'asino
- ad arco ribassato
- ad arco policentrico
- a catenaria

Caratteristiche rispetto alla sezione trasversale:

- a larghezza costante
- a larghezza variabile
- ad andamento rettilineo rispetto al fiume
- ad andamento rettilineo obliquo rispetto al fiume
- ad andamento curvilineo rispetto al fiume

Andamento del piano viario:

- a piano rettilineo
- a piano inclinato
- ad angolo piano o inclinato.

Tecniche di costruzione, messa in opera dei materiali e trattamento dei paramenti nei ponti storici in muratura.

Per affrontare la tematica della stabilità dei ponti è opportuno anzitutto illustrare le caratteristiche principali delle miscele e dei leganti più utilizzati e delle tecniche murarie in grande o in piccolo apparecchio che lo compongono.

Miscele che induriscono nel tempo

Tra le miscele plastiche presenti con gran frequenza nei ponti storici in muratura, senz'altro la malta e il "calcestruzzo", occupano una posizione di rilievo, perché la prima appare nei ponti come legante fra gli elementi lapidei (piccoli conci, blocchetti, scapoli, sassi, schegge) di ogni tipo di muratura in piccolo apparecchio oppure fra i mattoni dell'opera laterizia di mattoni cotti (*opus testaceum*), nonché come agglomerante dell'*opus caementicium*.

Il calcestruzzo, invece si trova pressoché sempre nello zoccolo delle fondazioni dirette o come gettata sulla testa delle palificate presenti per lo più nelle fondazioni indirette, nonché nel nucleo delle spalle, delle pile e delle sovrastrutture dei ponti. Altre miscele plastiche, come l'*opus signinum* o la terra battuta d'argilla con ghiaia o sassi o scapoli di pietra, oppure d'argilla mista ad erbe palustri, appaiono nei ponti piuttosto raramente.

Tecniche murarie in grande apparecchio

Si tratta, in genere, di tecniche a grandi massi o blocchi per lo più sbozzati in vario modo (*opus siliceum*) o in blocchi squadrati regolarizzati (*opus quadratum*) messi in opera generalmente a secco senza leganti. Nei ponti tali tecniche s'incontrano con grande frequenza tanto nelle sottostrutture (nelle fondazioni e, soprattutto, nei piedritti con impieghi sia nel rivestimento, sia in tutta la struttura), quanto nelle sovrastrutture in cui appaiono quasi sempre nel rivestimento delle facce a vista, assumendo il compito di casseforme di contenimento del nucleo per lo più in *opus caementicium* in una grande varietà di soluzioni.

Tecniche murarie in piccolo apparecchio

In questo raggruppamento vengono considerate tutte quelle tecniche murarie che prevedono l'impiego di materiale lapideo di piccola pezzatura, variamente lavorato o squadrato in piccoli conci, blocchetti, scapoli od altro. Tali tecniche costruttive presentano due caratteristiche principali:

1) i materiali lapidei generalmente non sono quasi mai messi in opera a secco, ma con interposizione di materia tra concio e concio o tra elementi lapidei contigui (impiegando per lo più malta e/o calcestruzzo piuttosto fino e di ottima qualità);

2) il trasporto e la messa in opera possono essere attuati anche con l'impiego della sola forza manuale di singole persone, senza bisogno di particolari *machinae tractoriae*; anche se non sono da escludere l'uso coadiuvante di alcune di esse.

Per quanto riguarda i ponti, le tecniche murarie in piccolo apparecchio riscontrate sono pressoché tutte quelle finora individuate nel mondo romano e a noi tramandate sotto il nome di *opus vittatum*, *opus incertum*, *opus quasi reticulatum*, *opus reticulatum*, ma difficilmente ciascuna di esse è esclusiva in un unico ponte, anche se riferita ai soli paramenti in vista: quasi sempre invece tali particolari tecniche si presentano sia in combinazione tra loro, sia in unione con il laterizio cotto, dando così vita al cosiddetto *opus mixtum*.



Ponte di Pont-Saint-Martin in Valle d'Aosta, nella porzione inferiore delle spalle i conci e i cunei sono in opera quadrata e le loro facce a vista mostrano un bugnato a superficie piana e ruvida con spigoli smussati.

Tecniche murarie con apparecchio sostituito di materiali artificiali specializzati per stampo:

L'opera laterizia è una tecnica muraria che impiega mattoni (o tegole) cotti in fornace e messi in opera sia interi (in particolare negli archi), sia spezzati. Difficilmente però l'opera laterizia viene impiegata congiuntamente sia nei paramenti sia nel nucleo delle murature: di solito essa costituisce il semplice rivestimento in vista di una struttura muraria il cui nucleo interno è in *opus caementicium*. La fortuna di tale tecnica in campo edilizio appare dovuta alla facile reperibilità della materia prima (argilla), alla straordinaria standardizzazione, meccanizzazione e razionalizzazione dei processi produttivi e di messa in opera, alla facilità di trasporto dei materiali fittili, nonché all'immediato controllo amministrativo, contabile e fiscale del prodotto stesso.

Di solito poi i mattoni al momento della posa in opera potevano essere utilizzati in vario modo: o venivano lasciati nella forma assunta in fornace (soprattutto negli archi); oppure venivano tagliati a metà; ovvero, molto più spesso, il taglio veniva operato lungo la diagonale (o lungo successive diagonali) sia con la piccozza sia con altri arnesi, lasciando poi in vista di solito il lato più lungo o comunque più curato e rifinito in vario modo.

Le principali tipologie di degrado

Come ben noto, nel restauro non è possibile generalizzare.

Ogni costruzione, per non dire ogni elemento, ha una sua propria storia ed un suo proprio comportamento. Ciò nondimeno è possibile stilare una sorta di "lista" dei difetti e dei degradi che con maggior frequenza possono affliggere i ponti in muratura.

Lesioni orizzontali:

Questo tipo di degrado si manifesta mediante lesioni ad andamento orizzontale che, normalmente, interessano i giunti di malta esistenti tra i mattoni o i blocchi di pietra. Esso può essere generato da cedimenti del terreno al di sotto delle fondazioni o da spinte orizzontali esercitate dal terreno stesso sulle strutture di contenimento.

Per capire se la causa che ha prodotto le lesioni sia ancora in essere è utile prevedere una fase di monitoraggio delle lesioni, accompagnata da indagini geognostiche (prove penetrometriche, carotaggi, ecc) al fine di conoscere le caratteristiche meccaniche del terreno di fondazione.



Nel caso di murature storiche o particolarmente degradate è utile eseguire prove che consentano di caratterizzare meccanicamente le strutture (ad esempio prove soniche per individuare omogeneità, degrado, parametri elastici, resistenza meccanica e stato fessurativo della muratura; prove con martinetti piatti, prova di estrazione con contrasto per accertare la resistenza meccanica).

Un intervento utile, al fine di contrastare il dissesto, può essere la realizzazione di sottofondazioni in muratura o c.a., palificate oppure jet-grouting. Anche la posa di tirantature orizzontali o inclinate può risultare utile. Altra operazione da effettuare è il riempimento delle fessure mediante iniezioni di malta antiritiro dotata di buona adesione alla muratura, ottima resistenza meccanica e alta resistenza agli agenti chimici in modo da evitare reazioni chimiche.

Lesioni verticali:

Il difetto si presenta come una lesione con andamento verticale, che usualmente interessa i giunti di malta interposti tra gli elementi costruttivi (mattoni o blocchi di pietra) e che talora separa in due gli elementi stessi che costituiscono il paramento murario.

Quando si presenta sugli archi evidenzia rotazioni relative tra i conci in muratura. Queste lesioni possono essere generate da spinte a monte delle strutture di contenimento o da cedimenti differenziali del terreno. Per pile o spalle molto alte il difetto può essere dovuto ad eccesso di carico verticale con schiacciamento della muratura e formazione di lesioni verticali che interessano in parte i giunti verticali di malta ed in parte i mattoni o le pietre. Per gli archi può essere indotto da spostamenti relativi, verticali od orizzontali, delle imposte che provocano un cinematismo con formazione di più cerniere.



Ottimi interventi per contrastare il dissesto possono essere la realizzazione di sottofondazioni in muratura o c.a. o palificate oppure jet-grouting, la posa di tirantature orizzontali o inclinate, il riempimento delle fessure mediante iniezioni di malta antiritiro dotata di buona adesione alla muratura, ottima resistenza meccanica e alta resistenza agli agenti chimici in modo da evitare reazioni indesiderate, l'aggiunta di cuciture metalliche all'interno della muratura, perpendicolari alla direzione delle lesioni.

Sugli archi vanno stabilizzate le spalle, con interventi sugli appoggi mediante sottofondazioni o pali, e va ripristinata la continuità dell'arco mediante nuovi elementi resistenti aggiunti, in acciaio o in cemento armato o, meglio, con cavi di contenimento post-tesati disposti all'estradosso.

Prima di intervenire, però, è necessario prevedere una campagna diagnostica. Per capire se la causa che ha prodotto le lesioni sia ancora in essere è utile prevedere una fase di monitoraggio delle lesioni, accompagnata da indagini geognostiche (prove penetrometriche, carotaggi, ecc) al fine di conoscere le caratteristiche meccaniche del terreno di fondazione. Anche in questo caso è utile eseguire prove che consentano di caratterizzare meccanicamente le strutture.

E' utile naturalmente una verifica statica con metodi numerici o grafici per determinare la resistenza ultima dell'arco.

Lesioni diagonali:

Il difetto si presenta come una lesione inclinata che segue a zig-zag i letti di malta orizzontali e verticali interposti tra i mattoni o il pietrame della muratura, oppure come una lesione sostanzialmente continua che passa attraverso ai mattoni stessi. Le cause possono essere ricercate nei cedimenti differenziali del terreno al livello delle fondazioni, da scalzamenti parziali alla base, o da spinte orizzontali provocate da eventi sismici. Anche le vibrazioni di lunga durata possono essere una causa all'origine di questo difetto.

Validi interventi possono essere: il riempimento strutturale delle fessure



mediante malta antiritiro dotata di buona adesione alla muratura e ottime resistenze meccaniche, l'utilizzo di cuciture armate perpendicolari alle lesioni; gli interventi di consolidamento della base con sottofondazioni, pali, micropali, iniezioni o jet-grouting.

Anche in questo caso, per capire se la causa che ha prodotto le lesioni sia ancora in essere è utile prevedere una fase di monitoraggio delle lesioni, accompagnata da indagini geognostiche e da prove di caratterizzare meccanica delle strutture, oltre alle normali verifiche statiche con metodi numerici o grafici.

Distacco del timpano:

Per timpano si intende la parte in muratura ai lati del ponte posta sopra all'elemento strutturale portante (arco) e che racchiude il materiale di riempimento.

Il difetto consiste nel distacco verticale o orizzontale di questa parte dalla struttura portante dell'arco.

Il difetto può essere provocato da movimenti differenziali a livello delle fondazioni oppure da sovraccarichi eccessivi e localizzati che inducono forti deformazioni nell'arco. Altra possibilità è rappresentata da forti spinte orizzontali indotte dalla azione del riempimento contro il timpano. Il difetto si presenta comunque in concomitanza di un collegamento insufficiente tra l'arco e il timpano.



Validi interventi possono essere: il riempimento strutturale delle fessure mediante malta antiritiro dotata di buona adesione alla muratura e ottime resistenze meccaniche; l'utilizzo di cuciture armate perpendicolari alle lesioni; interventi di consolidamento della base con sottofondazioni, pali, micropali, iniezioni o jet-grouting.

Umidità di risalita:

Si tratta di macchie di colore più o meno uniforme, le quali si manifestano in genere con un tono più scuro del tessuto murario. La loro forma è variabile e può dipendere dalla provenienza dell'umidità che le genera e dal grado di omogeneità del tessuto murario. Le murature miste, ad esempio, presentano macchie diverse a seconda dei diversi materiali di cui sono composte (pietra, laterizio, ecc).

Queste macchie si trovano, per la maggior parte dei casi, nella parte bassa della muratura e sono conseguenza della risalita capillare di umidità dal suolo. Inoltre può



accadere che anche la pioggia, se non raccolta ed allontanata in modo efficace, possa penetrare nelle murature e generare il degrado descritto.

La manifestazione di tale fenomeno dipende dalla posizione della muratura e dalla porosità del materiale: la diffusione dell'umidità per capillarità è infatti maggiore nei laterizi e in alcune pietre, tra le quali ad esempio le pietre tufacee, talvolta presenti nei paramenti misti.

Possibili interventi sono: Eliminazione di eventuali ristagni d'acqua mediante drenaggi, Realizzazioni di tagli chimici alla base delle murature, Realizzazione di intonaci macroporosi, Realizzazione di impermeabilizzazioni in corrispondenza delle fondazioni.

Va favorita in ogni modo la traspirazione della muratura, in particolare sono da evitarsi pellicole protettive che in genere ne impediscono la traspirazione, peggiorando la situazione.

Macchie da dilavamento:

Si tratta di macchie di colorazione diversa a seconda del materiale sul quale si formano; generalmente sono di colore scuro, ma si possono trovare alternate ad altre di colore biancastro, causate da depositi di calcare. La forma della macchia dipende dal percorso intrapreso dall'acqua sulla superficie del ponte; in genere tende ad allargarsi man mano che l'acqua scivola verso il basso lungo le superfici verticali.



Può manifestarsi in un punto preciso oppure su una superficie più ampia; in quest'ultimo caso il dilavamento diffuso genera una serie di striature

disomogenee sulla superficie o delle stalattiti calcaree. Le cause sono molteplici ma tutte legate al mancato o erraneo convogliamento delle acque meteoriche.

Alcuni fattori che possono provocare tale fenomeno sono: presenza di scarichi corti o rotti, o comunque che espellano l'acqua direttamente su parti strutturali, la difettosa tenuta dei giunti e la rottura della scossalina.

Poiché il difetto deriva dalla mancanza di sistemi adeguati di canalizzazione o impermeabilizzazione, è necessario integrarli o realizzarli, ove mancanti. Una volta eliminata la causa di degrado, si procede, alla pulizia delle superfici macchiate con idonei strumenti, a seconda della tipologia della macchia e della qualità del materiale, ed alla successiva stilatura dei giunti erosi.

In alcuni casi, per i materiali lapidei, si può procedere alla pulizia mediante idrosabbatura a pressione variabile, a seconda delle caratteristiche specifiche della pietra.

Porzione di muratura mancante:

Il difetto è determinato dalla mancanza o la rottura di mattoni o pietre che appartengono ad elementi strutturali, quali pile, spalle e archi.

Se le lacune si presentano in corrispondenza di lesioni, le cause sono riconducibili a tensioni o spostamenti che le hanno generate.

Mancanze o rotture localizzate possono derivare da:

urti; disfacimento della malta, causato da abrasioni e da cattiva qualità o a piene del fiume; lento



deterioramento dei materiali da costruzione, in primo luogo dovuto all'azione degli agenti atmosferici; presenza di vegetazione infestante che, associata all'umidità e al gelo, porta ad una disgregazione del tessuto murario.

Il ripristino delle parti mancanti, associato ad eventuali rinforzi o protezioni nelle parti di muratura particolarmente esposte alla corrente durante le piene è, solitamente, l'intervento più significativo da eseguire. L'eventuale vegetazione infestante va eliminata con l'aiuto di un prodotto biocida prima di procedere al ripristino della muratura.

L'adesione tra la porzione aggiunta e la parte originaria va favorita con la scelta di malte adeguate, meccanicamente resistenti e in grado di non innescare reazioni chimiche indesiderate. E' opportuno un collegamento meccanico tra le parti, realizzato con tecniche di cuci-scuci o con l'uso di connettori metallici, possibilmente in acciaio inox o comunque trattati contro la ossidazione.

In ponti di importanza storica è opportuno consentire la riconoscibilità della integrazione muraria mediante la adozione di un leggero sottosquadro o di finiture superficiali differenti tra i mattoni nuovi e quelli antichi.

Macchie di colore scuro:

Questo degrado è noto anche con il nome di "crosta nera". Si tratta di pellicole più o meno sottili, di colore scuro, di solito grigio-neri, che ricoprono le pietre.

Esse tendono a formarsi nelle zone più riparate dalla pioggia e dal vento.

Il problema correlato a questo fenomeno non è solo estetico: tale forma di degrado, infatti, costituisce una barriera alla fuoriuscita dell'umidità dalla muratura, concorrendo alla formazione di efflorescenze all'interfaccia tra pietra e crosta nera, con conseguente verificarsi di distacchi superficiali di materiale lapideo.

La formazione delle croste nere è strettamente legata ai fenomeni termoigrometrici: normalmente le pietre si raffreddano più velocemente dell'aria per cui l'aria calda ed umida tende a condensare sulle superfici lapidee. L'anidride solforosa presente nell'atmosfera genera un processo chimico che porta alla formazione di uno strato di gesso che, cristallizzando, genera la così detta crosta nera.

L'intervento più efficace è la rimozione meccanica o manuale della crosta nera, cui farà seguito una eventuale riconsolidazione dello strato più superficiale della pietra su cui la crosta si è formata.



Efflorescenze:

Le efflorescenze sono macchie biancastre, cristalline o amorfe, che si possono formare sulla superficie esterna della muratura, o all'interno dei materiali stessi (subefflorescenze).

Normalmente questo fenomeno si verifica nelle zone maggiormente esposte a sole e vento, dove la facilità di evaporazione dell'acqua è maggiore.

Le cause possono essere ricercate nell'acqua di risalita che, passando per capillarità nella muratura, porta in soluzione



solfati, carbonati e nitrati. Quando l'acqua raggiunge la superficie esterna della muratura evapora, depositando sulla superficie i cristalli salini.

Gli interventi consigliati sono: Eliminazione di eventuali ristagni d'acqua mediante drenaggi, Rimozione meccanica o manuale dei depositi, Realizzazioni di tagli chimici alla base delle murature, Realizzazione di intonaci macroporosi, Realizzazione di impermeabilizzazioni in corrispondenza delle fondazioni.

Patina biologica:

La patina biologica si presenta come uno strato sottile, morbido e omogeneo, aderente alla superficie e di evidente natura biologica, di colore variabile, per lo più verde. La patina biologica è costituita prevalentemente da microrganismi cui possono aderire polvere, terriccio, ecc.

In particolare è facile riscontrare la presenza di organismi e microrganismi biologici quali alghe, oltre a patine discontinue di colore variabile (verde, nero, grigio) e di spessore pari a pochi millimetri.

Le cause più frequenti sono da ricercare nella presenza di acqua o di umidità sulla muratura o di depositi humiferi.



Gli interventi consigliati sono: rimozione meccanica a mezzo di spatole e altri strumenti (pennelli a setole rigide), di plastica o di legno; applicazione a spruzzo manuale di un biocida. Trascorsi 15 giorni si procede ad un abbondante lavaggio, con acqua pulita a pressione moderata, della superficie trattata per eliminare ogni traccia di biocida. L'efficacia del biocida, il sistema di applicazione ed il livello di concentrazione della sostanza attiva vanno verificati a mezzo di campionature. È anche possibile applicare un intonaco deumidificante.

Polverizzazione:

Si tratta della distruzione e polverizzazione dei giunti di malta o dei materiali lapidei costituenti la muratura stessa.

Questo degrado è conseguente alla formazione di solfati sulla superficie della muratura, i quali sono solubili in acqua e quindi dilavabili.

Interventi consigliati sono: pulitura meccanica della superficie mediante spazzola morbida per asportare il materiale incoerente; lavaggio della muratura con la canna dell'acqua; ristilatura di giunti con malta dalle caratteristiche chimico – fisiche analoghe a quella esistente.



Eventuali interventi di scuci – cucì nelle zone di muratura maggiormente colpite da tale fenomeno di degrado.

Esfoliazione:

Questo degrado si manifesta attraverso il distacco di croste e di placche di spessore variabile da qualche millimetro a qualche centimetro; lo strato immediatamente sottostante la placca staccatasi spesso è ridotto in polvere.

Il distacco è preceduto da un leggero rigonfiamento del paramento. Si verifica normalmente nelle parti più umide della muratura.

Le cause sono da ricercarsi nell'anidride solforica, contenuta nell'aria che reagisce con l'acqua meteorica trasformandosi in acido solforico. Questo, a sua volta, reagisce con il carbonato di calcio che costituisce i materiali litici producendo gesso (solfato idrato di calcio).



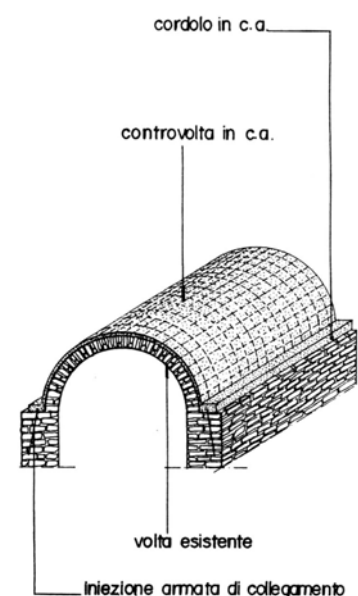
Per risanare il danno è possibile applicare un intonaco deumidificante da porsi in opera dopo aver eseguito le seguenti operazioni:

- Rimozione del vecchio intonaco per circa un metro di altezza oltre il segno del livello massimo raggiunto dall'umidità;
- spazzolatura della superficie, per asportazione del materiale incoerente rimasto;
- applicazione a spruzzo di un prodotto antisale, per trasformare i sali in composti insolubili e quindi non più trasportabili per capillarità dall'acqua;
- regolarizzazione delle cavità e delle irregolarità superficiali mediante malta additivata;
- preparazione di un sottofondo e applicazione, in una sola mano, dell'intonaco deumidificante;
- stesura di uno strato di finitura di qualche millimetro a base di calci idrauliche colorate con terre naturali.

Una modalità standard di intervento: la cappa in c.a. armata

L'intervento, frequentemente adottato in un passato anche recente ma a ragione criticato in quanto decisamente invasivo, consiste nel collegare la volta esistente ad una controvolta estradossale in calcestruzzo armato. Si viene a creare in questo modo una nuova struttura resistente che collabora con quella sottostante comportandosi come una nuova volta di spessore maggiorato. Queste due strutture, quella antica e quella nuova, vengono così a lavorare in parallelo, ma la differente rigidità della lastra in calcestruzzo armato la porta ad assumersi un percentuale maggiore del carico agente sulla struttura. L'estradosso della volta riesce, nella fase di parzializzazione della sezione, ad assorbire anche sforzi di trazione, grazie all'armatura metallica della cappa.

La prima operazione da eseguire dopo la puntellazione della struttura consiste nella rimozione dei rinfianchi, che, in alcuni casi, proseguono oltre la quota d'estradosso di chiave, al fine di una loro sostituzione con rinfianchi e frenelli, che svolgono la stessa funzione del materiale



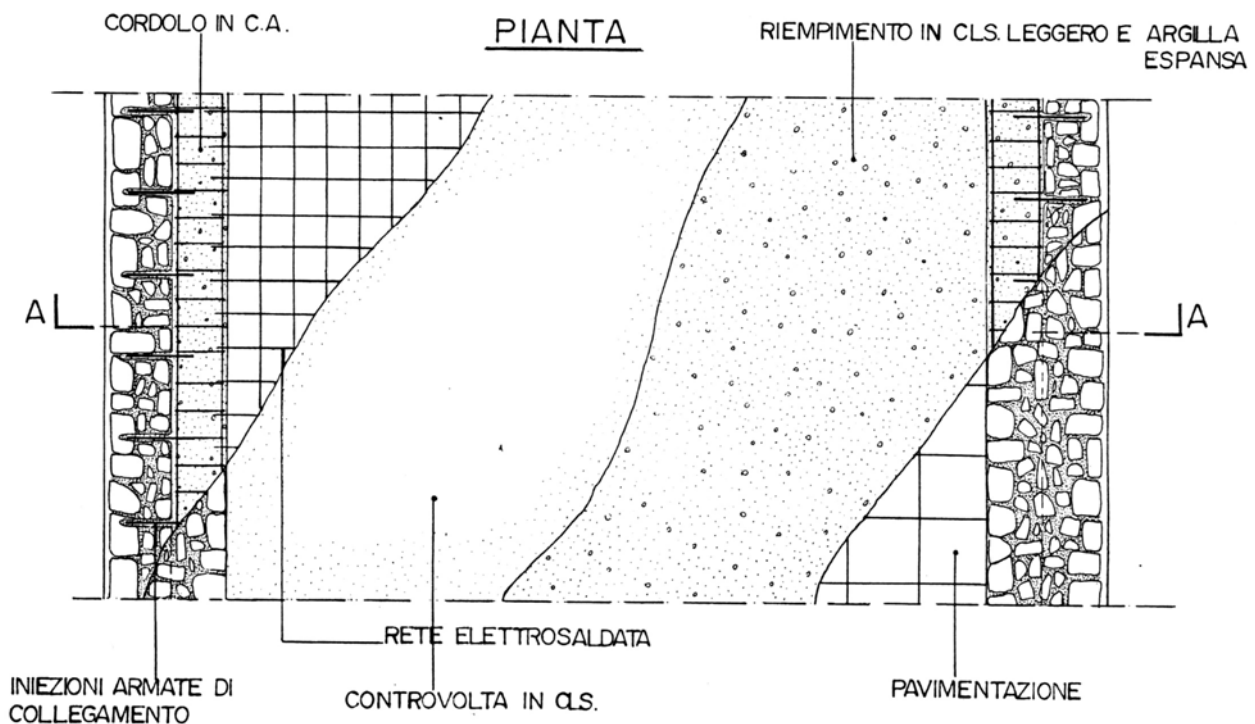
asportato, risultando al contempo più leggeri.

L'asportazione dei materiali di riempimento (rinfianchi), deve essere effettuata in modo uniforme, a destra e a sinistra, per tutto l'estradosso della volta. Questa operazione evita l'effetto negativo del carico eccentrico, che si verrebbe a generare con una asportazione asimmetrica del materiale. Avendo asportato tutti i materiali portati, si deve pulire perfettamente l'estradosso della volta, per poter procedere al suo consolidamento.

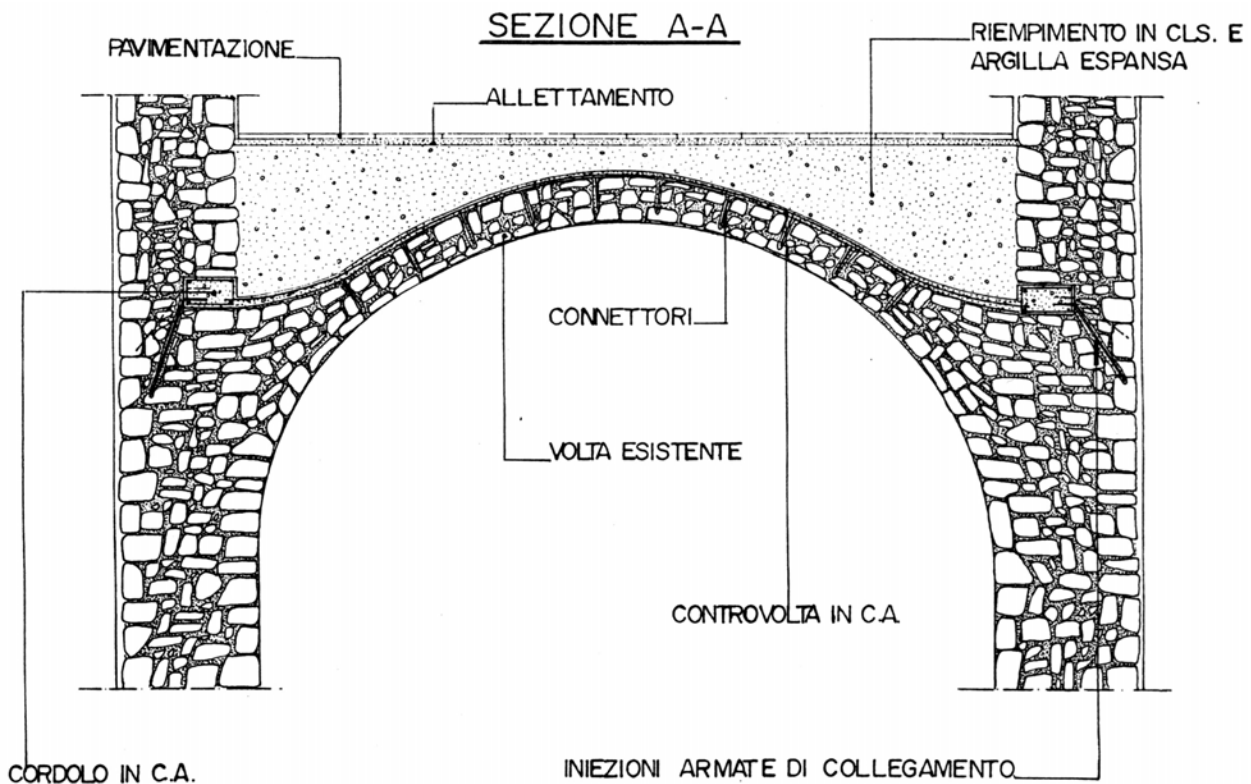
L'aderenza tra la soletta in calcestruzzo armato di consolidamento e la struttura sottostante può essere garantita da connettori metallici inghisati alla muratura o, più semplicemente, dalla scabrosità delle superfici di contatto.

La cappa di calcestruzzo armato è realizzata utilizzando come armatura metallica una rete elettrosaldata, meglio se inox oppure zincata, estesa su tutta la superficie estradosso della volta, avendo l'accortezza di aumentare lo spessore della gettata in corrispondenza delle imposte e di ben vincolare l'armatura alle spalle, realizzando così un collegamento con connettori alle murature perimetrali su cui si imposta la volta.

Successivamente al getto della soletta armata si procede a ripristinare i rinfianchi utilizzando preferibilmente un conglomerato non cementizio con inerti alleggeriti (tipo argilla espansa). Per migliorare la statica della volta si può procedere inoltre alla ricostruzione di un sistema di muretti (frenelli), normali alla generatrice della volta, che, oltre ad impedirne la possibilità di ampie deformazioni, possono anche costituire il sostegno di solai. La disposizione dei frenelli dipende dal tipo di volta e vi si collegano mediante monconi d'acciaio o chiodi emergenti dalla cappa estradosso in calcestruzzo.



Consolidamento con cappa in cemento armato. Pianta /rif.bibl 15/



Consolidamento con cappa in cemento armato. Sezione trasversale /rif.bibl. 15/

Una nuova soluzione per il consolidamento degli archi: “l’arco armato”

Gli interventi di consolidamento su archi e volte in muratura rappresentano un tema di difficile soluzione nel restauro degli edifici storici. Ciò è dovuto in parte alla progressiva perdita di conoscenza tecnica su questo argomento ed alla obiettiva difficoltà di operare nel rispetto delle preesistenze in contesti importanti e spesso vincolati.

La rinnovata sensibilità di questi ultimi anni per un approccio conservativo al restauro strutturale richiede ai progettisti nuove ed affidabili proposte di intervento e ciò ha ridestato un interesse per l’argomento che non è solo teorico. Gli eventi sismici, che ad intervalli purtroppo frequenti interessano il patrimonio edilizio storico, hanno evidenziato inoltre come interventi poco rigorosi del contesto possano portare ad un incremento della vulnerabilità, invece che ad una sua riduzione.

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

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

Molte sono le tecniche finora adottate nel consolidamento degli archi e volte: l’uso di catene di contrasto alle imposte, l’uso di rinfianchi posti alle reni, il getto di una cappa collaborante in cemento armato all’estradosso delle volte. L’esperienza tuttavia ha dimostrato che l’applicazione di queste tecniche di intervento, a fronte della loro efficacia in termini di sicurezza, molto spesso comporta implicazioni tali da alterare, o addirittura snaturare, la realtà strutturale e costruttiva dell’arco.

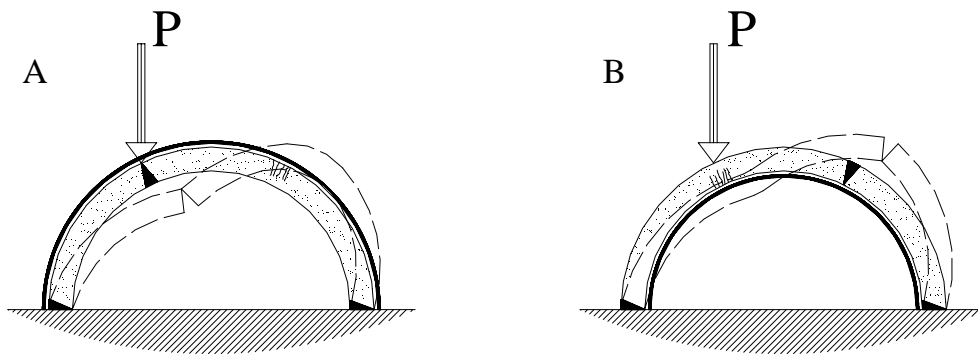
Non vanno trascurati inoltre i cosiddetti “effetti collaterali”:

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

E' necessario allora proporre e sperimentare sistemi alternativi, meno invasivi e capaci di adattarsi ai singoli casi. Negli anni passati l'autore ha proposto e sperimentato una tecnica originale, denominata "arco armato", che consente di consolidare archi e volte in muratura con un minimo apporto di nuovo materiale, e che comporta la semplice aggiunta di cavi metallici post-tesati posti in aderenza alla muratura. / rif. bibl. 1,2,6 /

L'obiettivo dell'intervento di consolidamento (analogo peraltro a quello che a suo tempo si era proposto il progettista originario) è quello di ottenere *la massima corrispondenza* tra forma d'asse dell'arco e curva delle pressioni, o per lo meno di ridurne l'eccentricità a valori minimi e comunque contenuti nello spessore strutturale. La tecnica proposta tende ad ottenere tale corrispondenza non mediante invasive modifiche apportate alla geometria ma mediante l'aggiunta di nuove forze che modificano quella già agenti e la loro distribuzione.

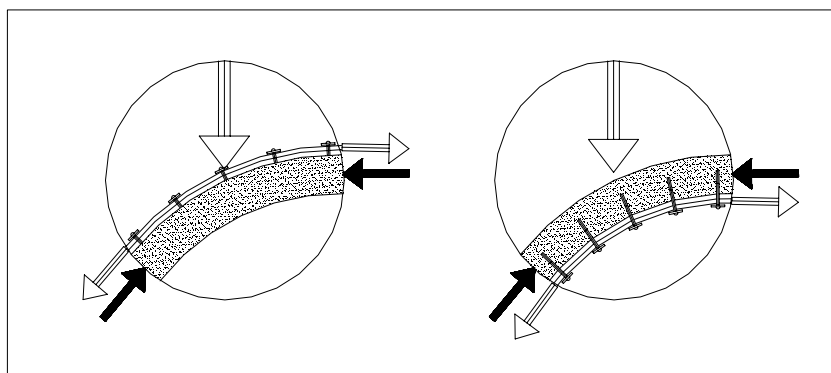
Se si fosse in grado, lungo lo sviluppo dell'arco, di impedire l'apertura di almeno una tra le due famiglie di cerniere (tutte quelle di estradosso oppure tutte quelle di intradosso) nella struttura non si potrebbero formare alcun meccanismo con cerniere alternate. La struttura, originariamente continua, potrebbe al massimo degradarsi ad "arco a tre cerniere", di cui due al piede ed una in campata, che staticamente è ancora efficiente.



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

Se invece di limitarsi ad un semplice accostamento tra muratura ed armature passive si adottano cavi posti in trazione (facendoli funzionare da "tiranti attivi") si ottiene una distribuzione di forze applicate sull'arco in direzione radiale, il che provoca una benefica compressione assiale e, di conseguenza, la centratura della curva delle pressioni.

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



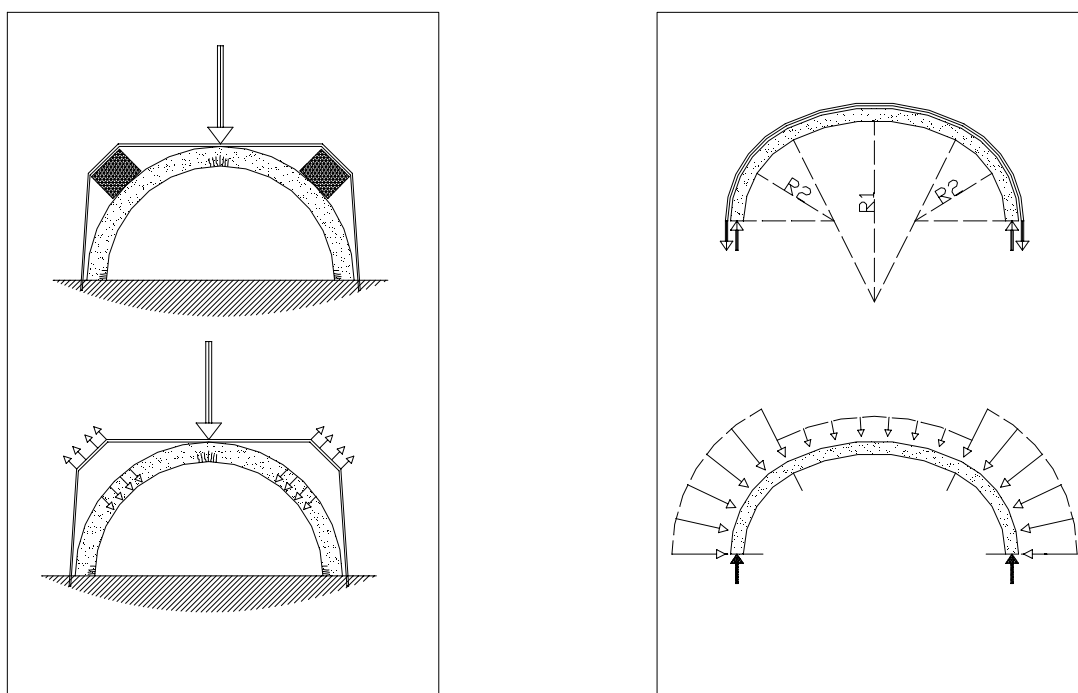
Dettaglio dell'interfaccia tra tirante e muratura.

(a sinistra) cavo estradossale con connettori in compressione (a destra) cavo intradossale con connettori in trazione

E' interessante notare ancora che nel caso di archi particolarmente deformati la tecnica attiva sopra proposta consente di applicare carichi distribuiti anche in modo non uniforme sulla struttura in mattoni.

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

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



(a sinistra) "Forzatura" localizzata tra arco e tirante di estradosso per opporsi a imbozzamenti locali.

(a destra) Si noti che le forze dipendono dal raggio di curvatura locale applicate dal cavo teso all'arco

Per l'efficienza dell'armatura con cavi metallici estradossali non si richiedono archi con geometria a tutto sesto. La tecnica descritta può essere utilizzata anche nel caso di archi notevolmente depressi in quanto in un cavo curvo, che sia teso in modo uniforme su tutta la lunghezza, l'entità delle forze radiali applicate è inversamente proporzionale al raggio di curvatura.

Il metodo dell'arco armato si propone in definitiva, anche in questo caso, di riportare la struttura ai preesistenti livelli di sicurezza senza necessariamente provvedere ad un ripristino o ad una

modifica della geometria originaria, ciò che soprattutto in presenza di superfici affrescate risulta inopportuno.

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

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

Il metodo dell'arco armato è stato sottoposto a prove sperimentali per controllarne la validità. In modo specifico si sono confrontati i carichi di collasso di archi semplici, di archi rinforzati con cappa in c.a. e di archi “armati” all'estradosso con cavi inox, tutti delle stesse caratteristiche geometriche e di materiale

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

Verifiche sperimentali della tecnica dell'arco armato

Allo scopo di validare il “metodo dell'arco armato” sono state eseguite due campagne sperimentali su archi a tutto sesto diversamente caricati.

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

- (1) arco semplice in muratura,
- (2) arco rinforzato con cappa superiore in c.a., senza connettori, ma con armatura saldata alla base,
- (3) arco rinforzato con cappa superiore in c.a., con connettori metallici tra arco e cappa,
- (4) arco armato con due cavi in acciaio posti in trazione, semplicemente appoggiati all'estradosso.

In figura seguente si illustrano i 12 archi approntati per la campagna sperimentale dove sono presenti modelli di arco semplice, modelli di arco con cappa in c.a e modelli di *arco armato*. Tutti i modelli sono stati assoggettati a carichi concentrati applicati sia a metà sia al quarto della luce mediante una semplice strumentazione costituita da un tirante metallico e da un martinetto idraulico. Il contrasto è fornito da una trave a doppio C, posta a supporto dell'arco ed in grado di assorbire le spinte orizzontali. Il carico è stato applicato con cicli ripetuti di carico e scarico, misurando gli spostamenti assoluti in 6 punti mediante comparatori centesimali fissati a terra.

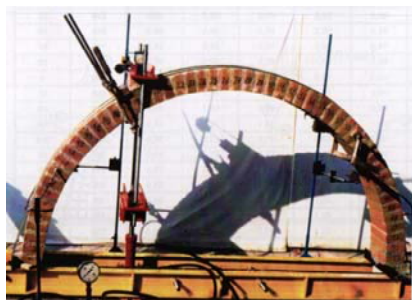


Arco armato: Modelli di archi in muratura predisposti per prove a scala reale

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

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

I connettori sono rappresentati da barre in acciaio Ø10, disposte una ogni 22 cm. L'armatura adottata nei modelli di tipo (4), vale a dire per l'arco armato, è costituita da due trefoli in acciaio zincato Ø12 mm, con resistenza a rottura 2500 daN ed allungamento a rottura 4%. La tesatura dei trefoli è stata ottenuta mediante regolazione con chiave dinamometrica alle estremità. Nella Tabella B si indica in (Nm) il valore della coppia di serraggio del dado di contrasto.



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

Per brevità e per riferirci in modo specifico al caso di archi soggetti a carichi asimmetrici, simili a quelli generati da sollecitazioni sismiche o dal transito di veicoli sui ponti, vengono illustrati solo una parte dei risultati ottenuti. Nella tabella seguente si riassumono i risultati di 5 prove, nelle quali il carico è stato applicato verticalmente ad ¼ della luce. Vengono indicati il valore del carico di collasso (in daN) e gli spostamenti (in cm) in corrispondenza dei 6 comparatori utilizzati, misurati per un carico pari all'85% del collasso.

Tabella

	P (daN)	Flex 1	Flex2	flex 3	flex 4	flex 5	flex 6
1- arco semplice	191	0,04	0,84	1,35	1,16	0,60	1,50
2- arco + cappa	3379	3,78	10,60	13,34	15,20	6,84	13,00
3- arco + cappa + conn.	2948	2,10	5,82	7,33	8,17	3,03	7,36
4- arco armato (60 Nm)	2559	5,18	20,22	19,70	23,10	10,50	16,73
5- arco armato (80 Nm)	2886	1,30	11,64	12,75	11,98	5,03	9,42

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

- 1- le tecniche dell'arco con cappa in c.a.(2 e 3) e dell'*arco armato* (4 e 5) portano a risposte nel carico di collasso nettamente superiori rispetto al caso di arco semplice (1),
- 2- La tecnica (2), con cappa in c.a. senza connettori e con armatura metallica saldata alla base, ha dato risultati migliori della tecnica (3), con connettori.
- 3- La tecnica dell'*arco armato*, ha dato risultati confrontabili con quelli ottenuti negli archi con cappa in c.a..Il principale elemento resistente è dunque l'armatura resistente a trazione. In entrambi i casi il collasso si è verificato per rottura dei mattoni compressi.
- 4- La risposta dell'*arco armato*, dipende in modo sostanziale dalla entità della tensione applicata al cavo estradossale, o intradossale,
- 5- La duttilità ottenuta con la tecnica dell'arco armato è notevole e superiore a quella con cappa in c.a.

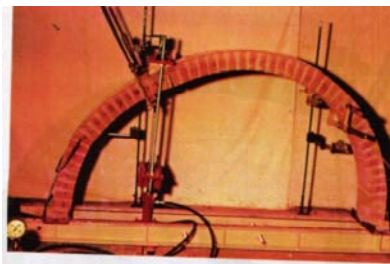


Fig. 9.237

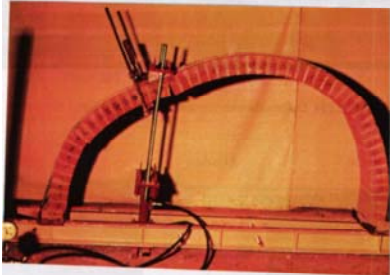
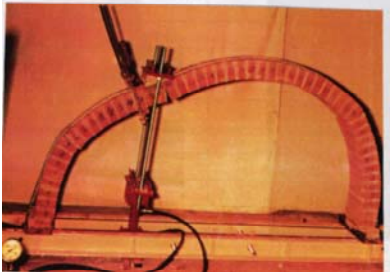


Fig. 9.238



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

Dalle prove sperimentali eseguite e dalle osservazioni formulate la tecnica dell'*arco armato* qui proposta appare decisamente promettente e di semplice utilizzo, con considerevoli incrementi di resistenza e di duttilità nei confronti dell'arco semplice e con risposte simili a quelle ottenute con la più tradizionale tecnica della cappa in c.a. La sua applicazione in zone caratterizzate da eventi sismici appare pertanto interessante, soprattutto tenendo in conto il trascurabile incremento delle masse in gioco

METODI DI CALCOLO

In commercio si trovano diversi software che permettono di analizzare strutture ad arco in muratura e strutture voltate che possono costituire una valida alternativa alle modellazioni numeriche con programmi ad elementi finiti.

Nei paragrafi seguenti si riportano alcuni esempi, in modo da evidenziarne le diverse opportunità di analisi che ognuno di essi permette.

Il programma ARCO

"ARCO" è un programma di analisi strutturale di archi in muratura e volte sviluppato dal prof. P.Gelfi dell'Università degli studi di Brescia. Il software si basa sui criteri di sicurezza derivanti dall'analisi delle strutture in muratura svolti dal prof. Heyman, utilizzando l'approccio statico nell'analisi limite della struttura.

Il programma "ARCO" attraverso un metodo iterativo individua, tra tutte le curve di pressione possibili, quella che minimizza lo spessore dell'arco fittizio, individuando, quindi, un fattore di sicurezza geometrico minimo.

Il criterio di sicurezza "geometrico", come definito da Heyman, è ricavato dal rapporto tra il vero

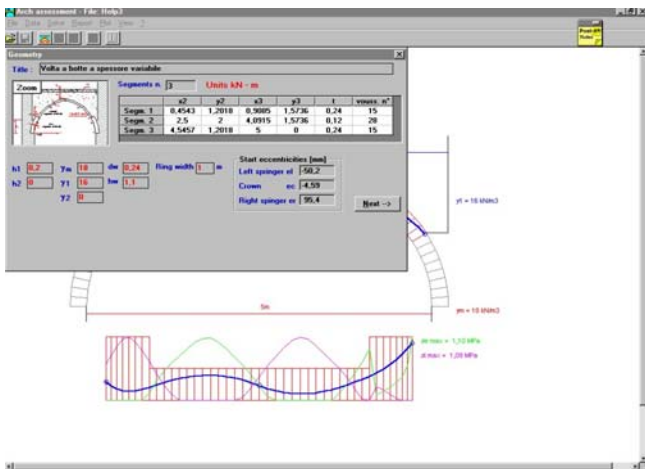
spessore dell'arco e quello di un ipotetico arco, interno al precedente, del minimo spessore necessario a contenere interamente la curva delle pressioni relative ai carichi esterni che insistono sull'arco.

Nel programma sono definibili:

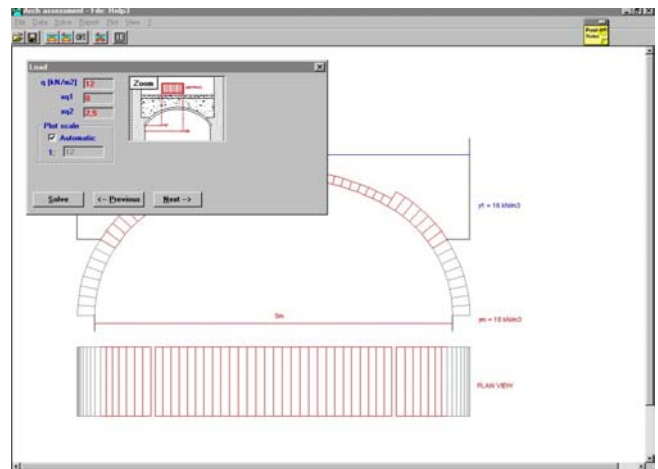
- geometria qualsiasi dell'arco;
- spessore variabile dei conci;
- carico distribuito asimmetrico;
- pressione passiva del rinfianco.

Come output si ottengono l'andamento della curva delle pressioni, gli andamenti degli sforzi normali all'intradosso e all'estradosso dell'arco e le spinte sulle imposte.

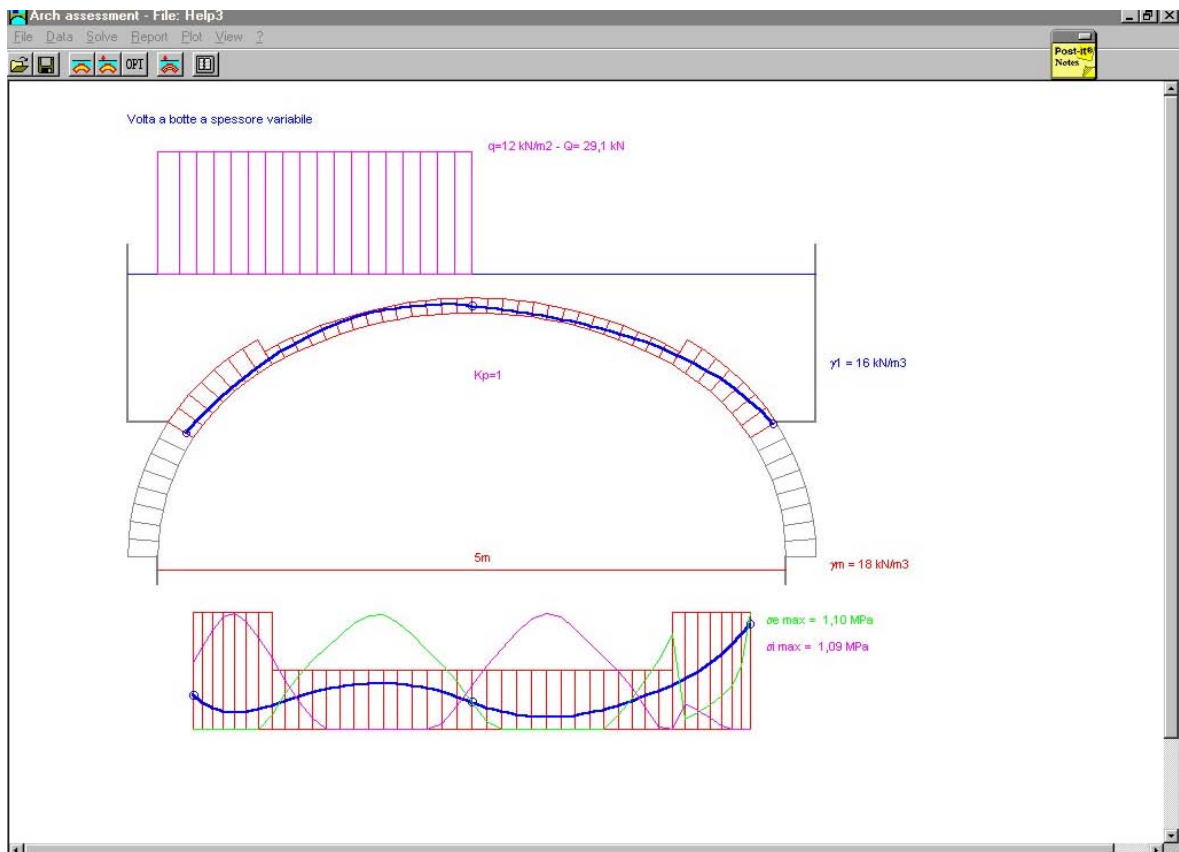
Il programma è caratterizzato dalla eventuale possibilità di analizzare la azione stabilizzante indotta dalla "spinta passiva" offerta dal rinfianco nei confronti delle spinte laterali.



introduzione della geometria



introduzione dei carichi



risultati delle elaborazioni

Report

Worst values

σ_e [MPa] 1,10 43

σ_i [MPa] 1,09 27

%comp 30,7 43

Reduce

Optimal eccentricities [mm]

Left springing e_l -50,2

Crown e_c -4,59

Right spring. e_r 95,4

Set as start values

Sect.	sig_e [MPa]	sig_i [MPa]	%comp
1	0	0,620	87,2
2	0	0,767	68,1
3	0	0,923	54,6
4	0	1,05	46,2
5	0	1,09	42,8
6	0	1,01	44,2
7	0	0,850	50,3
8	0,140	0,670	100,0
9	0,331	0,455	100,0
10	0,499	0,265	100,0
11	0,642	0,103	100,0
12	0,759	0	95,8
13	0,876	0	81,3
14	0,988	0	70,8
15	1,06	0	64,6

Reactions at springings

HI 39,69 Hr 26,77

VI 51,69 Vr 30,8

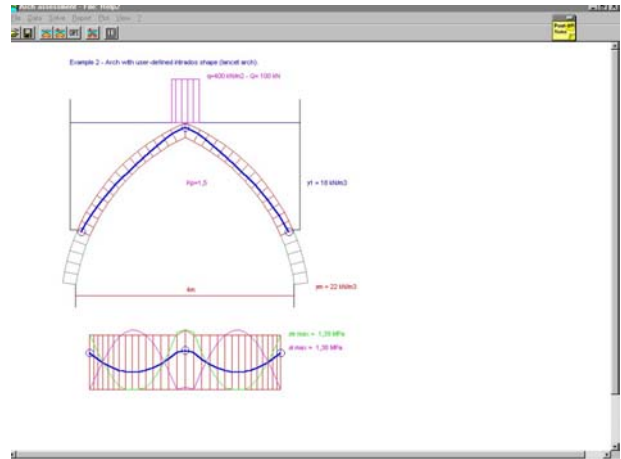
Tie thrust 39,69

Walls reactions

HI 0 Hr 12,92

MI 0 Mr 5,349

output numerico



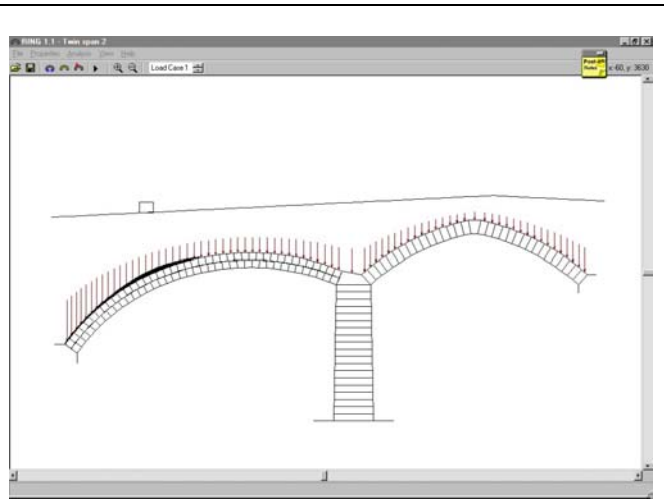
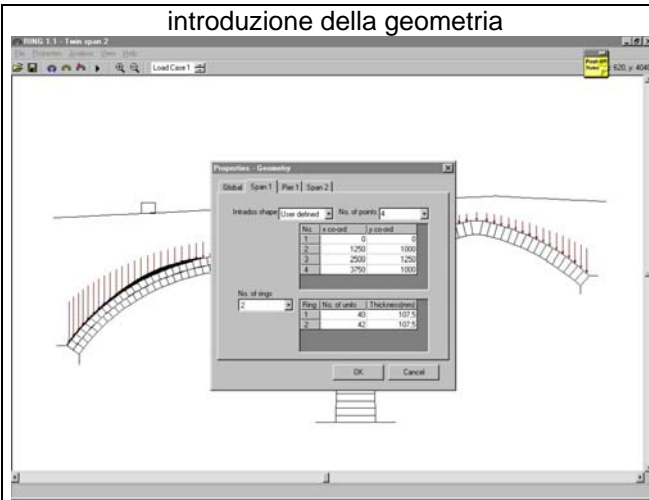
esempio di geometria più complessa

Il programma RING

“RING” è un programma di analisi strutturale studiato per ponti ad arco in muratura, anche con carichi viaggianti. Il software è stato sviluppato da Matthew Gilbert della Università di Sheffield e presenta le seguenti caratteristiche:

- geometrie con singola o multipla arcata;
- calcolo della curva delle pressioni e del cinematismo di rottura;
- carichi concentrati mobili e distribuiti;
- grafica del cinematismo di rottura.

introduzione della geometria



introduzione dei carichi

