

Consolidamento strutturale e reversibilità

Lorenzo Jurina

Politecnico di Milano
www.jurina.it

Premessa

Gli aggettivi “necessario, risolutivo, mirato, minimo, ottimale, leggero, rispettoso, compatibile, duraturo, distinguibile, gradevole, economico, reversibile” compaiono sempre più spesso nelle richieste che la committenza e gli organi di tutela avanzano in relazione ai progetti di consolidamento strutturale su edifici di interesse storico.

Riguardo all'ultimo termine, “reversibile”, credo che in stretto senso etimologico nessun intervento si possa definire tale. Anche dopo la rimozione dell'intervento l'edificio conserverà infatti, anche se in modo poco evidente, memoria e traccia di quanto fatto. (E, d'altra parte, è opportuno che sia così: si perderebbe altrimenti un documento materiale riguardante il bene e la sua storia.)

Ritengo opportuno tuttavia accettare e fare proprio nella prassi progettuale il concetto di reversibilità, almeno come aspirazione, riportandolo all'idea iperuranica di Platone quale “paradigma” che ispira l'artefice. Con questa accezione il “buon restauratore”, ossia l'artefice cui arte, tecnica e sensibilità permettono di interpretare l'idea, deve impegnarsi perché il proprio progetto tenda, quanto più possibile, all'ideale, accettando gli ineliminabili compromessi dettati dalla materia, dalla forma ma soprattutto dall'irrinunciabile volontà di garantire la sopravvivenza del bene.

L'intervento di consolidamento allora deve manifestarsi a chi lo vuole vedere ma deve rimanere in sottotono per chi privilegia l'immagine precedente; deve dichiararsi come contemporaneo ma non contrastare con la materia e con la tipologia dell'esistente, deve potersi rimuovere con la minima perdita di materiale, colore e tessitura originale. Un intervento di buon gusto, un intervento unico e singolare, come singolare è la struttura cui si affianca, ma che contemporaneamente sia poco costoso, sia facile da montare e smontare e di cui sia agevole la manutenzione.

Il “come” eseguire l'intervento diventa, allora, il quesito fondamentale per garantire l'irrepetibile originarietà del bene.

Geometria, materiali e carichi sono i parametri meccanici che caratterizzano l'edificio ed è su questi che si potrà intervenire con modifiche che coinvolgano vuoi la resistenza, vuoi la rigidità dell'insieme.

La tendenza più diffusa tra i progettisti è quella di proporre modifiche alla geometria o ai materiali, ma è facile verificare che molto spesso proposte di modifica ai carichi sarebbero più facili ed efficaci da realizzare. Convincere il committente della opportunità di collocare l'archivio di una biblioteca a piano terra invece che a primo piano oppure aggiungere nuovi carichi su una volta, in modo da risultare simmetrizzanti o antagonisti rispetto a quelli esistenti, o semplicemente meglio distribuiti, potrebbe essere la soluzione più corretta, oltre che la più economica.

Il fatto è che, sebbene il lavoro di gruppo sia una consuetudine diffusa negli interventi di restauro, spesso lo strutturista vi entra per ultimo, a scelte strategiche già fatte e a funzioni già definite e quindi, a malincuore, geometria e materiali restano i soli gradi di libertà su cui agire per ottenere un sufficiente incremento della sicurezza.

L'approccio richiesto ai progettisti strutturali è dunque quello di una *specificità* dell'intervento, il quale, in definitiva, va pensato adattandolo al singolo edificio con un atteggiamento che implica interdisciplinarietà, verifiche incrociate, scientificità nell'approccio ed una dose di creatività.

Nel seguito di questa breve nota intendo illustrare alcuni progetti di cui ho avuto modo di occuparmi (in particolare riferiti a murature verticali e a elementi voltati). Essi rappresentano una personale traduzione “nel mondo del reale” dell’idea di consolidamento strutturale, progettazione e reversibilità, cui mi ispiro con tutti i limiti ed i compromessi impliciti in ogni traduzione.

Interventi sulle murature verticali

I problemi statici che più frequentemente interessano le murature verticali si possono sintetizzare in pochi casi:

- eccesso di carico verticale, che può provocare una crisi per compressione
- eccesso di carico orizzontale perpendicolare al piano, che può provocare rotazioni e ribaltamenti per fuoriuscita della risultante dalla sezione di appoggio.
- eccesso di carico orizzontale nel piano della muratura, che può provocare rotture per taglio

In questo articolo ci occuperemo dei primi due aspetti tralasciando quello degli interventi di consolidamento in zona sismica.

Trattando di murature verticali, la modalità più semplice da proporre nello spirito dichiarato in premessa, è quella di avvicinare una nuova struttura verticale a quella esistente, in altre parole di utilizzare una struttura parallela, una sorta di puntello attivo.

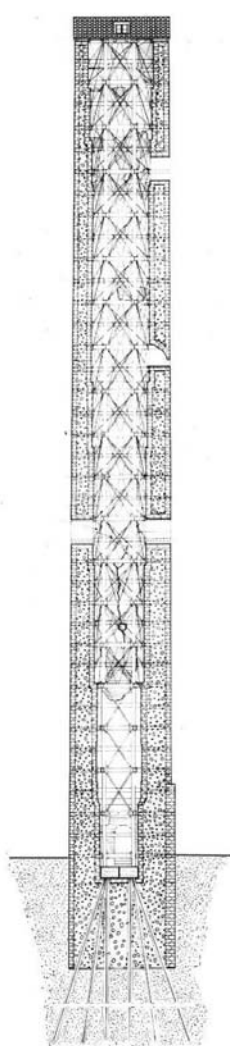


Figura 1 Torre di S. Dalmazio a Pavia: sezione verticale con la torre metallica interna.

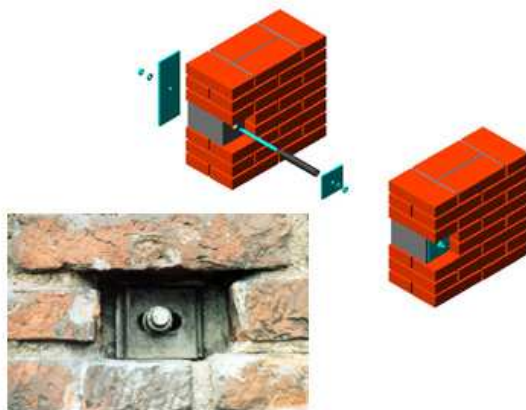


Figura 2 Confinamento della muratura tramite tiranti inseriti nelle buche pontae: schema e vista dall'esterno della piastra inox di ancoraggio. Figura 3 La “torre nella torre” vista dall'interno, particolare dei pendini e degli anelli perimetrali.



Emblematico in questo senso un intervento dei primi anni '90, il consolidamento strutturale della **Torre S. Dalmazio** di Pavia. La torre in muratura risale all'anno 1100 circa e durante le analisi condotte all'inizio del progetto presentava preoccupanti fenditure sui quattro lati, dovute ad una serie innumerevole di aperture e parziali chiusure ripetutamente praticate nelle pareti e ad una interazione di tipo termico con la adiacente chiesa costruita nel 1500. Data la particolare configurazione della torre si è scelto di costruire una struttura metallica perfettamente a vista e completamente rimovibile ma ubicata tutta all'interno, in modo da essere percepibile all'esterno solo attraverso alcuni segnali discreti. [1], [2]

Dentro al cavedio continuo è stata pertanto costruita una “**torre nella torre**” indipendente e staccata da quella in muratura e realizzata con elementi modulari bullonati in acciaio zincato a caldo, di dimensione in pianta 180x210 cm. La torre metallica interna è stata collegata a quella esterna in muratura mediante oltre 300 tiranti metallici (pendini), inclinati e posti in debole trazione. Si ottiene così un duplice risultato. Il primo è quello di collegare

monoliticamente, seppure senza contatto, le due torri separate per farle lavorare assieme a flessione e taglio, come una unica struttura composita. Il secondo risultato è quello di trasferire una percentuale del peso proprio della muratura sulla struttura metallica aggiunta, al fine di ridurre gli elevati tassi di lavoro presenti alla base.

Il progetto ha previsto anche di sfruttare la peculiare presenza delle “buche pontai” che, in numero di 12 ogni 105 cm, interessano le pareti della torre per tutta l’altezza. All’interno di queste buche passanti, e quindi senza praticare perforazioni addizionali, sono stati disposti dei “tiranti radiali attivi”, con la funzione di comprimere orizzontalmente la parete a sacco della torre, per creare un confinamento laterale favorevole nei confronti del carico limite della muratura.

La piastra esterna di contrasto del tirante appoggia su un riempimento della buca realizzato in malta idraulica (tenuto in sottosquadro di circa 15 cm) e pertanto non appare all’esterno della torre e non ne modifica in maniera rilevante l’aspetto. All’estremità interna i 12 tirantini radiali di ogni livello trovano contrasto su un anello metallico perimetrale che costituisce una sorta di catena passiva interna, in grado di ridare continuità meccanica alle pareti fessurate. Su questo anello si ancorano i “pendini” di collegamento tra la torre in acciaio e la torre in muratura.

Un dettaglio da non sottovalutare è l’aver utilizzato la nuova torre metallica come vano per un ascensore in grado di portare in sommità uomini e cose, favorendo così le opere di manutenzione programmata della struttura monumentale.

In sintesi, la soluzione adottata non si propone come un semplice intervento di protesi passiva o una struttura “paracadute”, ma mira ad una collaborazione attiva e globale tra due torri, una nuova ed una antica, affiancate e caratterizzate ciascuna dalla sua tecnologia, nel rispetto dei ruoli reciproci. La rimovibilità in questo caso è sintomo di rispetto completo per l’esistente, ma anche di proposta senza ipocrisie di quanto la tecnica moderna ha reso disponibile.

Il metodo è stato recentemente riproposto per il consolidamento della **Torre del Maino**, anch’essa a Pavia, i cui lavori sono iniziati nel gennaio 2002.

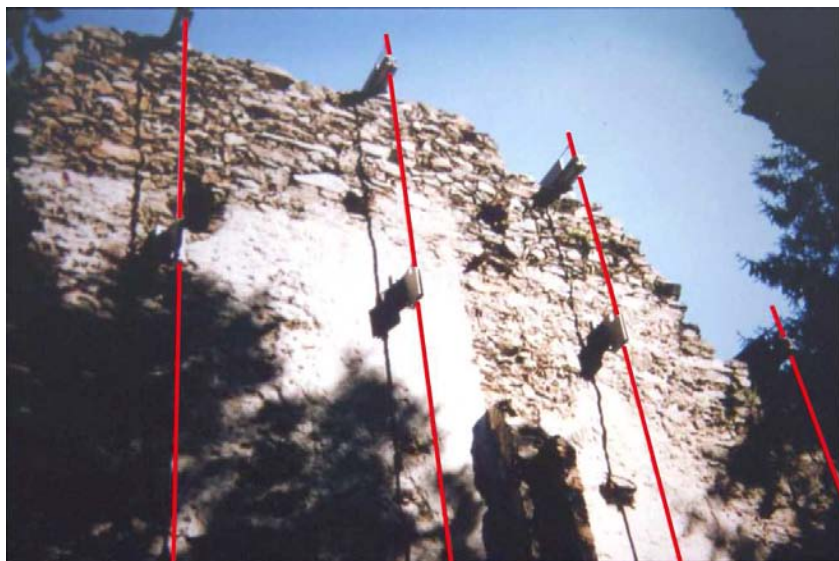


Figura 4 Stabilizzazione di una parete isolata con cavi esterni post tesi, a Forte Fuentes.



Figura 5 Dettaglio del collegamento a taglio realizzato tra cavo esterno e muratura.

Un secondo esempio di intervento su murature verticali è quello realizzato recentemente presso le rovine del **Forte di Fuentes** situate a Colico, all’estremità nord del lago di Como. [3]

Fin dal primo sopralluogo è risultato evidente che la parete nord-est del palazzo del Governatore presentava un forte rischio per i visitatori che transitavano nelle vicinanze. L’altezza di 10 metri circa della parete isolata, il suo ridotto spessore, inferiore ai 60 centimetri, la tessitura in pietre di dimensioni eterogenee e poco legate, la presenza di molte aperture e soprattutto la mancanza di elementi di controvento, ossia di pareti perpendicolari o di solai intermedi, erano tutti motivi di forte preoccupazione per la stabilità dell’elemento. La decisione progettuale di mantenere l’edificio allo stato di rudere implicava inoltre una drastica riduzione delle possibilità progettuali offerte dalla tecnologia del consolidamento.

Una opera di rimozione della vegetazione infestante effettuata sulla struttura pochi mesi prima ha fornito lo spunto progettuale. E' risultato evidente infatti che la parete si era mantenuta in piedi per tanti anni per merito soprattutto dell'edera che le era cresciuta attorno creando un fitto reticolo di fibre fortemente abbarbicate alle pietre, una sorta di "armatura" in legno, resistente a trazione, che aveva consentito di fare fronte ai forti venti della zona. Si è deciso così di realizzare una nuova struttura esterna parallela e collaborante con la parete in muratura, costituita da cavi verticali esterni in acciaio, post-tesati ed ancorati al suolo.

In altre parole una sorta di "**edera hi-tech**".

Si è indotto in questo modo un consistente incremento di azione assiale sulla sezione che, sommato al peso proprio della parete, le consente di resistere senza parzializzarsi alle sollecitazioni flessionali prodotte dal vento. La funzione dei cavi esterni era quella di fornire una armatura per sollecitazioni eccezionali. Per questa ragione occorreva disporli sui due lati, in modo da fare fronte ai venti provenienti sia da Nord che da Sud, occorreva disporli ad una certa distanza dalla parete, per incrementarne il momento di inerzia, ed occorreva fissarli in vari punti intermedi alla muratura, per assorbire gli sforzi di taglio.

Si è optato per l'uso di semplici distanziatori metallici posti ogni 200 centimetri circa, i quali, fissati alla muratura e resi solidali ai cavi in acciaio solo dopo il loro tensionamento, consentivano la corretta messa in opera del cavo e la trasmissione dello scorrimento.

Il dettaglio del connettore evidenzia la volontà di un intervento dichiarato e non mimetico, ma contemporaneamente funzionale, rimovibile, economico, riproducibile.

A terra i cavi sono stati bloccati mediante tirafondi metallici ancorati in profondità alle fondazioni. La coppia di cavi è stata riproposta per quattro volte su una estensione di circa 10 metri di parete in modo da ottenere una distribuzione uniforme di elementi resistenti, consentendo tuttavia una leggibilità completa della muratura e dei segni che il tempo vi ha impresso.

Mentre la soluzione con cavi verticali proposta per Forte Fuentes è prevista come permanente e consente una transitabilità completa nelle adiacenze della parete, in un altro caso, ancora oggetto di studio, relativo al consolidamento di una grande parete verticale isolata del **Castello di Trezzo d'Adda**, veniva richiesta una soluzione economica e provvisoria di messa in sicurezza dove ci si poteva consentire di occupare uno spazio maggiore nelle vicinanze dell'elemento murario.

Si è optato per un consolidamento particolarmente semplice, costituito da una doppia serie di "**stralli**" **diagonali** incrociati che controventano la parete sui due fronti.

La presenza di buche pontai che attraversano la parete anche in questo caso facilita la posa dei cavi ed il loro ancoraggio reversibile alla muratura.

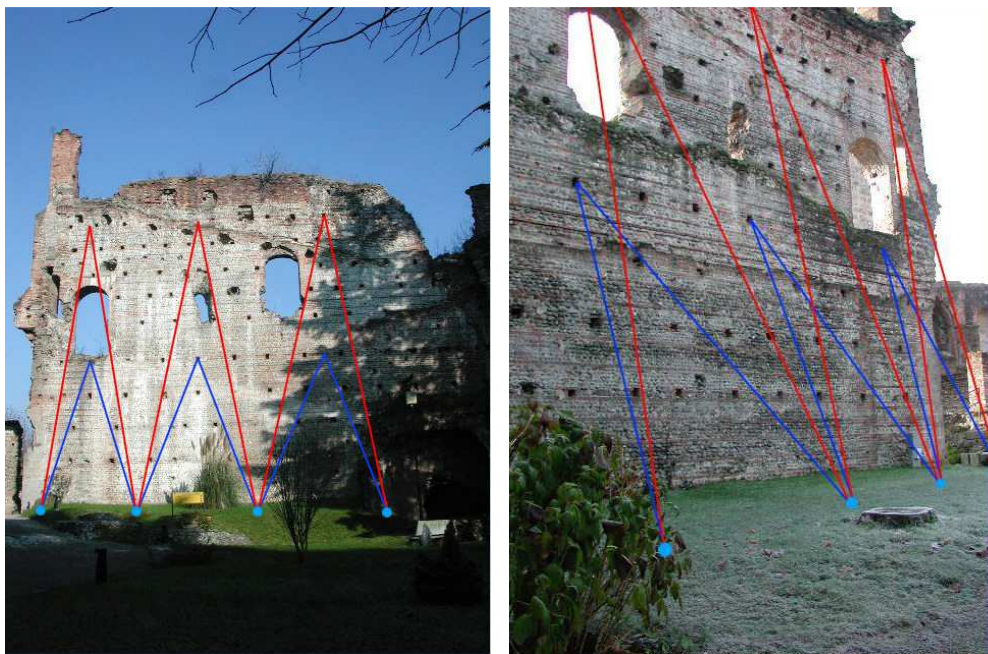


Figure 6 e 7 - Messa in sicurezza tramite cavi strallati di una alta parete verticale isolata del Castello di Trezzo d'Adda.

La soluzione sopra proposta, che usa cavi “strallati” di esiguo spessore resistenti a trazione, è sostanzialmente trasparente nel senso che consente di non perdere la visione di assieme del monumento.

Ricordiamo, per completezza, che nel passato la disponibilità di materiali capaci di lavorare soltanto a compressione aveva fatto propendere per la soluzione duale, ossia per l’uso di “puntelli” inclinati costituiti da contrafforti murari, o barbacani, come ad esempio **nell’oratorio di S.Biagio** a Rosate (MI) o a **Cascina Vione di Rozzano**.

Sono interventi anche questi che consentono una soluzione mirata del problema strutturale e, contemporaneamente, una sostanziale rimovibilità, in attesa di nuove soluzioni o nuovi materiali, o di più affidabili verifiche strutturali.



Figura 8 Contrafforte in muratura a contrasto delle spinte esercitate da una cupola spingente, Oratorio di S.Biagio a Rosate (MI)

Figura 9 – Contrafforti (o barbacani) a sostegno di pareti di cinta inclinate, Cascina Vione (MI)

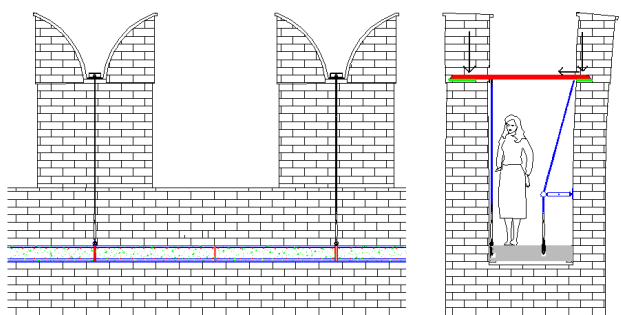


Figura 10 I portoni della Brà a Verona, con le merlature inclinate

Figura 11 Carichi eccentrici stabilizzanti applicati alle merlature dei Portoni della Brà a Verona, tramite una zavorra ed un bilancino appoggiato in sommità.

Un altro intervento, per certi versi analogo a quelli sopra descritti, è stato recentemente proposto, a livello di progetto, per il consolidamento strutturale delle merlature dei **portoni della Brà a Verona**, che hanno subito una evidente rotazione, più accentuata nella parte alta.

Le richieste della committenza erano che la muratura storica non doveva essere interessata da interventi invasivi e che l’attuale passaggio doveva restare praticabile per una futura fruizione

turistica. L'idea strutturale è stata allora quella di applicare alla muratura soltanto alcuni **carichi esterni stabilizzanti**, in grado di contrastare il momento instabilizzante conseguente all'inclinazione dei merli. In sostanza si propone semplicemente di appoggiare un bilancino tubolare in acciaio inox tra due merli contrapposti e di appendere una zavorra a quest'ultimo, con l'accortezza che i punti di appoggio siano eccentrici rispetto all'asse della merlatura dalla parte contraria rispetto all'inclinazione attuale.

Due tiranti inox collegano la zavorra al bilancino posto sopra ai merli. Un tirante corre parallelo alla muratura mentre l'altro procede parallelo alla muratura per un breve tratto e successivamente si inclina di 15° circa per ancorarsi in alto al bilancino. Il suo effetto è pertanto quello di una forza orizzontale più una forza verticale applicate alla parte alta del merlo inclinato, entrambe stabilizzanti.

I due trefoli sono dotati di un tenditore filettato, in modo che sia possibile regolare le quote della zavorra sottostante, costituita da una passerella transitabile in piastre prefabbricate di calcestruzzo appoggiate su due binari ad L, anch'essi in acciaio inox, il tutto senza alcun contatto con la muratura del portone.

L'intervento proposto, totalmente esterno, anche se non appariscente, e totalmente reversibile in quanto semplicemente "appoggiato" alla struttura esistente, non è influenzato dalle variazioni termiche, né da effetti viscosi o da rilassamento dei cavi in acciaio in quanto è vincolato isostaticamente in due soli punti, con l'accortezza di interporre uno spessore di materiale a basso attrito sotto ad uno degli appoggi per consentirgli la possibilità di allungarsi liberamente.

Ancora in tema di pareti murarie alte e soggette a rilevanti carichi verticali ed orizzontali, credo utile commentare l'intervento nel 1999 sullo storico edificio chiamato **Porta Nuova** di Pavia. [4]

L'intera struttura, in parte medioevale, aveva subito, nel corso degli anni, gravi danni anche di origine antropica ed il progetto di consolidamento ha previsto vari interventi tra cui l'inserimento di nuove catene a contrasto delle spinte orizzontali dei tre archi e il consolidamento della fondazione dello spigolo Nord-Ovest. L'intervento più caratterizzante è costituita tuttavia da una "**passerella strutturale**" posta a mezza altezza delle pareti, che costituisce una sorta di trave-telaio orizzontale aggiunta in corrispondenza della quota dell'antico soppalco, oggi non più esistente, e che è finalizzata al collegamento mutuo delle quattro pareti perimetrali e alla creazione di un vincolo intermedio in grado di limitare gli effetti della snellezza delle pareti.



Figura 12 Porta Nuova a Pavia, vista dall'esterno



Figura 13 La trave-passerella, a vincolo delle pareti verticali, realizzata a Porta Nuova, Pavia

La trave-passerella è realizzata in acciaio con un piano di calpestio in legno di forte spessore, resistente a taglio, ed è un elemento capace di soddisfare contemporaneamente a più esigenze. Staticamente assolve una importante funzione di ammassamento e di vincolo orizzontale alla

muratura mentre dal punto di vista funzionale consente la accessibilità e quindi la manutenzione dell' edificio ed il controllo dello stato di conservazione della copertura. Può, inoltre, divenire una sorta di torre scenica teatrale, sulla quale montare luci e manovrare fondali per rappresentazioni all'aperto. Da un punto di vista formale reintegra la memoria storica dei percorsi merlati sospesi, tipici della cinta muraria che attraversava Porta Nuova stessa.

E' insomma un elemento architettonico discreto, ma al contempo capace di "accorciare" visivamente il vuoto che internamente rende anomalo lo spazio della Porta, realizzando un passaggio aereo dal quale osservare la città da un punto di vista privilegiato. L'accessibilità alla passerella è garantita da una snella scala a chiocciola protetta e sostenuta da tiranti metallici ancorati ai gradini.

Un'altra tipologia di interventi che ritengo utile commentare è costituita dal consolidamento delle **ciminiere in muratura**, soprattutto di quelle che, perse le esigenze funzionali, si trovano oggi inserite in contesti urbani o museali. Si può constatare che queste opere murarie presentano una sorprendente sistematicità nelle fessurazioni, determinate, in massima parte, dalle sollecitazioni termiche cui per molti anni sono state sottoposte e che sono costituite da lesioni, anche passanti, con andamento verticale estese su buona parte dell'opera.

La modalità di consolidamento oggi più frequentemente adottata è la posa di anelli di cerchiatura esterni, a passo ravvicinato, messi in forza mediante bulloni e flangie di serraggio.

In alternativa al metodo tradizionale e' stata proposta recentemente [5], ed è in fase di attuazione a **Selargius (CA)**, una soluzione che prevede un "**cerchiaggio orizzontale interno**", invece che esterno, e che consente di ottenere vari interessanti vantaggi.

Innanzitutto l'intervento non è a vista dall'esterno, il che permette di mantenere praticamente inalterata l'immagine d'insieme della costruzione, inoltre non risulta esposto all'azione degli agenti atmosferici, è accessibile e manutenibile dal cavedio, senza l'ausilio di alcuna opera provvisoria e, da ultimo, presenta un notevole grado di reversibilità.

Questo cerchiaggio orizzontale interno prevede la posa in opera di cavi o di anelli in acciaio di forma circolare, disposti nel condotto all'interno del camino, secondo un'opportuna spaziatura e solidarizzati alla muratura mediante "barre radiali" ancorate alla muratura. L'anello metallico ha un diametro leggermente inferiore a quello del cavedio: ciò consente di mettere in trazione le barre radiali, mediante dadi che contrastano sull'anello, inducendo in quest'ultimo una trazione e, contemporaneamente, inducendo una compressione di analoga entità nella muratura.

Si riducono così, fino ad eliminarli, gli sforzi di trazione circonferenziale sulla muratura.

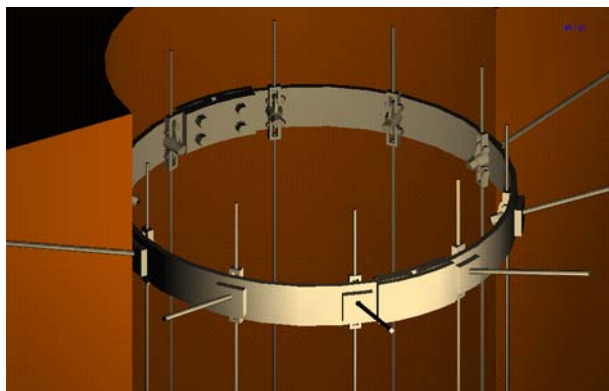


Figura 14 Consolidamento di ciminiera fessurata con anelli di cerchiatura interni al cavedio, barre radiali di ancoraggio ed eventuali tiranti verticali

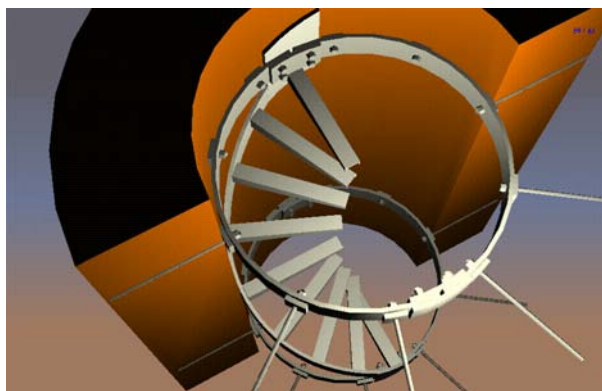


Figura 15. Dettagli della scala elicoidale, installata all'interno della ciminiera ed ancorata agli anelli di cerchiatura

La possibilità, inoltre, di collegare i diversi anelli cerchiati attraverso **tiranti metallici verticali** consente di applicare una precompressione verticale la cui eccentricità, agendo in modo opportuno sui diversi tiranti, può essere regolata in modo da compensare i fuori piombo presenti.

La ciminiera in questo caso mantiene la configurazione geometrica curva o inclinata che negli anni ha acquisito ma tutte le sue sezioni risultano soggette a sola compressione, o solo a una limitata componente flessionale. E' possibile, mediante modellazione matematica, determinare la

configurazione ottimale del sistema di “cerchiaggio interno” ricordando che la frequenza degli anelli va scelta in relazione alle discontinuità geometriche e alla posizione delle fessure, ma che in ogni caso l’interasse non deve superare il doppio dello spessore della muratura. Ogni anello cerchiante va fissato alla muratura mediante almeno 10 barre radiali equidistanti che devono essere inserite per la quasi totalità dello spessore murario ed essere solidarizzate con materiale di ancoraggio solo nella parte terminale, per una lunghezza pari ai due terzi dello spessore murario mentre il terzo interno va lasciato libero di scorrere.

Grazie alla modularità degli elementi utilizzati per l’intervento e nel caso in cui il diametro interno della ciminiera sia costante, è possibile installare una “scala elicoidale” dentro al camino ancorata agli anelli di cerchiatura, che permette una agevole risalita alla struttura per la necessaria manutenzione.

Le soluzioni usate per ottenere un incremento di resistenza a compressione della muratura mediante **cerchiatura esterna** sono comuni fin dal passato; basti pensare agli anelli in ferro, riscaldati prima della posa in opera e serrati con cunei, usati per confinare le colonne o i capitelli dei templi greci o romani. Soluzioni assolutamente analoghe, con l’uso di anelli forzati da bulloni, sono usati frequentemente al giorno d’oggi, con l’adozione sempre più diffusa dell’ acciaio inox per far fronte agli inevitabili problemi di durabilità.

Le foto allegate illustrano un antico anello di cerchiatura fortemente degradato (Figura 16), e soluzioni recenti, concettualmente analoghe, adottate da vari progettisti alla **Abbazia di Chiaravalle**, (Figura 17) alla Chiesa di **S.Pietro a Cornaredo** (Figura 18), e recentemente al **Palazzo Ducale di Mantova** (Figura 19).

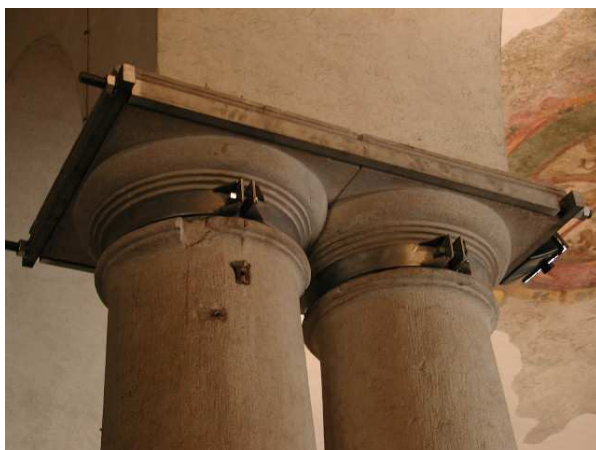


Figura 16 Anello di cerchiatura di colonna in pietra, fortemente degradato

Figura 17 Anello di cerchiatura di pilastri in muratura, Abbazia di Chiaravalle (MI), con flangia e bulloni

Figura 18 Fasce di cerchiatura di una colonna nel pronao, chiesa di S.Pietro a Cornaredo

Figura 19 Cerchiaggio inox di colonne binate e capitello al Palazzo Ducale di Mantova

Da un punto di vista puramente statico le soluzioni illustrate per il cerchiaggio delle colonne sono certamente adeguate ma la presenza delle flangie bullonate, così evidenti ed otticamente invasive, le relega al campo delle strutture provvisorie.

E' in corso di sperimentazione, presso il **Monastero di S. Clara** a Pavia, una nuova tecnica di elemento cerchiante reversibile privo degli antiestetici particolari di serraggio. Si tratta in sostanza di disporre un anello in acciaio inox attorno alla colonna, chiudendolo in opera con una saldatura, e di introdurre nell'intercapedine di qualche millimetro lasciata tra il metallo e la pietra una **malta espansiva** che si incarichi di allargare l'anello e che sia quindi in grado di creare un benefico stato di coazione con compressione radiale uniforme applicata alla colonna.

Anche senza flangie e bulloni l'effetto cerchiante rimane inalterato e la reversibilità è comunque assicurata dalla interposizione di uno strato di materiale isolante tra malta e pietra e dalla possibilità di segare l'anello metallico.

Una cerchiatura esterna "sui generis" ed un contemporaneo rinforzo a flessione è stato proposto per il consolidamento dei beccatelli fessurati del mastio del **castello di Montorio** (Verona).

Questi elementi costruttivi servivano originariamente da mensole di sostegno delle merlature difensive della torre e sono oggi in procinto di collassare a causa delle operazioni di demolizione violenta di queste sovrastrutture avvenute nel passato e della successiva azione disgregante della pioggia e soprattutto dei fulmini che hanno provocato lesioni diffuse, sia longitudinali che trasversali all'asse, con crollo dell'elemento in almeno quattro casi.

Scartata l'idea di sostituire gli elementi danneggiati e scartata anche la soluzione di una cucitura armata interna con barre metalliche, troppo rischiosa stanti le condizioni della pietra stratificata, si è optato per una soluzione esterna che comporta l'uso di un tirante disposto sopra al beccatello, una sorta di "briglia" che, collegata alla muratura, collabora a sopportare gli sforzi dovuti al momento flettente provocato dal peso dell'elemento.

La briglia ha una seconda funzione che è quella di "cerchiare" il blocco in pietra opponendosi, almeno parzialmente, alla apertura delle fessure longitudinali esistenti, contribuendo così a mantenere la monoliticità del blocco medesimo.

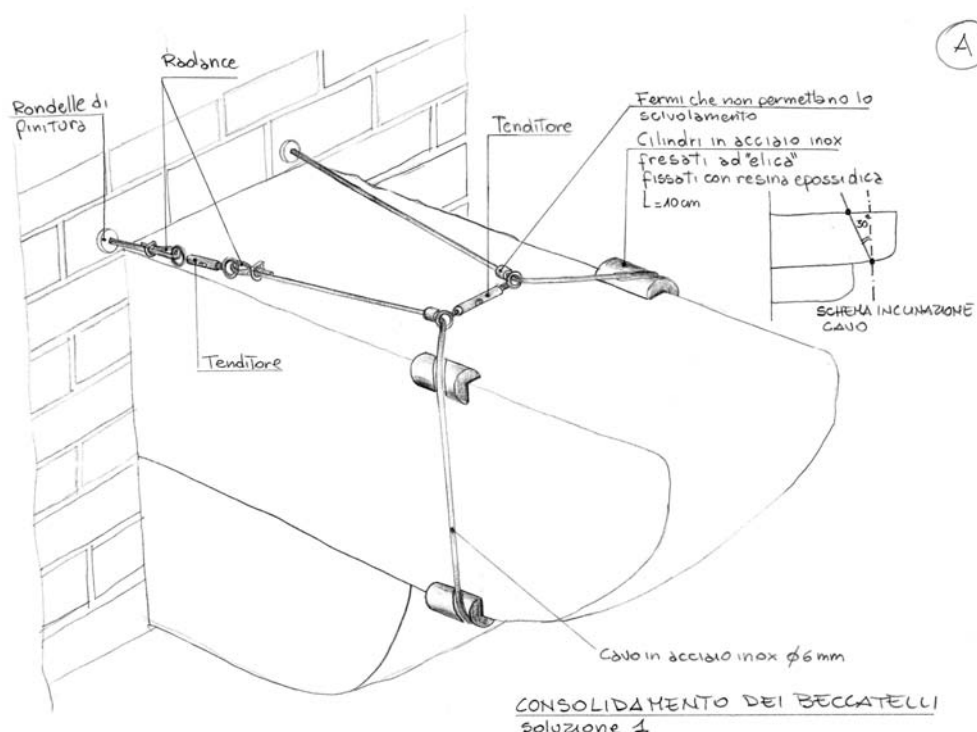


Figura 20 Briglia in cavo inox a sostegno e cerchiatura dei beccatelli in pietra del Castello di Montorio, a Verona

Interventi su archi e volte

Malgrado le apparenze, non esistono rilevanti diversità dal punto di vista statico tra le murature verticali e le murature che costituiscono elementi di orizzontamento, quali gli archi e le volte.

Entrambe infatti sono pensate per sopportare principalmente carichi assiali ma entrambe devono fare fronte a contemporanee e talora imprevedute azioni flessionali.

Avviene quindi che le patologie più ricorrenti sugli archi e le volte siano costituite da lesioni concentrate in poche sezioni, così da dare luogo a “cerniere” strutturali facilmente riconoscibili che, concatenandosi, generano un meccanismo di collasso. Talora la struttura si limita a scostamenti più o meno accentuati dalla forma originaria, con avvallamenti e depressioni, e il crollo non si raggiunge in quanto entrano in gioco nuovi elementi strutturali in grado di collaborare alla portata limite, quali ad esempio i rinfianchi quando non si comportano solo da zavorra ma svolgono funzioni di vincolo mutuo tra arco e parete perimetrale. Anche a queste situazioni di pre-collasso va tuttavia posto rimedio, nel tentativo di ottenere quella congruità tra forma d'asse dell'arco e curva delle pressioni, che rappresenta l'obiettivo progettuale da perseguire.

Molte tecniche sono state finora messe a punto nel tentativo di ridare sicurezza a questi elementi strutturali. L'uso di catene di contrasto alle imposte è da sempre lo strumento adottato quando non sia possibile operare con contrafforti o comunque con strutture esterne di contrasto.

Le catene tuttavia creano un ingombro che talora risulta inaccettabile (soprattutto nel caso di volte affrescate) e che costringe ad interventi eseguiti dall'alto.

La soluzione che ha preso piede in questi ultimi vent'anni, molto interessante anche se indiscutibilmente invasiva e difficilmente reversibile, è il getto di una cappa in cemento armato all'estradosso delle volte, previa la posa in opera di connettori metallici tra la vecchia e la nuova struttura. E' fuori dubbio che tale soluzione comporti un incremento della resistenza e della rigidità della volta ma va osservato che l'eccessivo peso del materiale aggiunto può provocare danni alle strutture verticali e comporta sempre un forte aumento delle masse in gioco, circostanza cui va posta attenzione soprattutto in zona sismica. L'intervento inoltre può provocare il passaggio di sali nella muratura sottostante o comunque creare impedimento alla traspirazione.

Recenti tecniche che fanno uso di materiali compositi (FRP) associati alla muratura stanno prendendo sempre più piede nel mondo del consolidamento strutturale, pur con tutti i limiti dell'essere interventi di tipo passivo e realizzati con materiali la cui durabilità deve ancora essere convalidata dall'esperienza.

Una recente soluzione alternativa è quella che ho chiamato “**arco armato**” [6].



Figura 21 “Arco armato”:
dettaglio dei cavi di armatura
estradosali

Gli archi e le volte costituiti da materiale resistente a compressione ma non a trazione raggiungono il collasso quando, all'incrementarsi dei carichi, si forma un numero di cerniere tale da dare luogo ad un meccanismo.

Si può constatare che in fase di collasso le cerniere si formano interessando in modo alternato le fibre di estradosso e quelle di intradosso dell'arco. Al formarsi della quarta cerniera l'arco crolla.

La soluzione è rappresentata allora dalla posa di cavi metallici, resistenti a trazione, in parallelo ad almeno una delle superfici dell'arco (quella di estradosso o quella di intradosso) così da impedire la formazione di cerniere da quel lato della struttura. Se invece di limitarsi ad un intervento passivo, il cavo viene posto in trazione (facendolo funzionare da tirante attivo) si ottiene una distribuzione di nuovi carichi applicati sull'arco in direzione radiale, che provocano una benefica compressione uniforme sull'arco stesso e, di conseguenza, una “centratura” della curva delle pressioni sull'asse baricentrico.

Per realizzare la “forzatura” tra la fune e la muratura (ossia una trazione nella fune ed una contemporanea compressione nell'arco) si fa ricorso a **semplici tenditori** all'estremità del cavo oppure a **cunei interposti** tra cavo e muratura lungo tutto lo sviluppo del cavo, dopo averlo ancorato alla muratura in prossimità della zona dell'imposta.

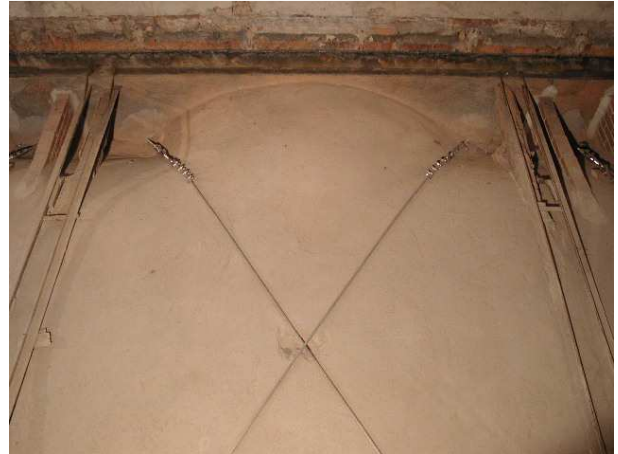


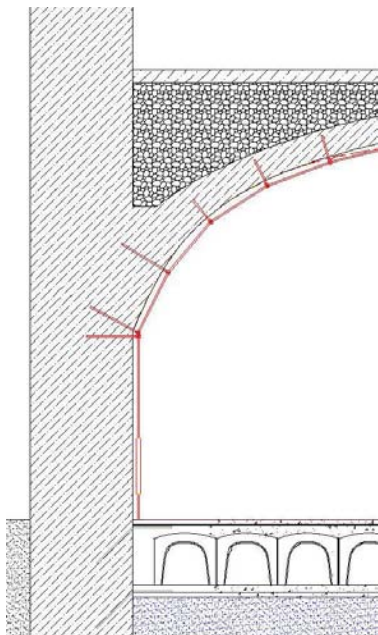
Figure 22 e 23 Intervento con “arco armato” a Casa Giacobbe, Magenta: volte consolidate con cavi messi in trazione mediante tenditori di estremità

Le figure da 22 a 25 illustrano due interventi attualmente in corso, ossia il consolidamento con la tecnica dell’arco armato, nel cantiere di **Casa Giacobbe**, a Magenta e in quello del **Monastero degli Olivetani** di Nerviano. (MI).

Nei due casi i cavi sono stati posti in trazione rispettivamente con tenditori e con cunei.



Figure 24 e 25 - Intervento con “arco armato” al Monastero degli Olivetani di Nerviano. (MI) : volte consolidate con cavi messi in trazione mediante cunei



Nel caso di strutture particolarmente deformate, la tecnica dell’arco armato consente anche di applicare carichi applicati in modo *non uniforme* sulla struttura in mattoni. E’ sufficiente infatti, con l’uso di cunei, forzare maggiormente l’arco proprio in quei punti ove sia presente un maggiore imbozzamento. Questo implica una *modifica dei carichi* applicati alla struttura, che vengono scelti in modo da adattarsi alla geometria esistente (anche se deformata).

In altre parole, invece di far sì che la geometria si adatti ai carichi presenti, si ribalta il procedimento, ossia si modificano i carichi in modo da adattarli alla geometria esistente, che viene così rispettata.

Figura 26 Nel consolidamento di volte con rinfianchi non rimovibili la tecnica dell’arco armato prevede l’uso di cavi ancorati all’intradosso mediante “golfari” con barre filettate accorciabili.

Sono evidenti le implicazioni favorevoli riguardo al tema della reversibilità di cui si sta trattando. Nel caso in cui sia impossibile operare dall'estradosso, a causa ad esempio di pavimenti non rimovibili, è possibile, in modo esattamente duale a quanto descritto, operare dall'intradosso, sia pure con qualche maggiore difficoltà tecnologica.

Un esempio in corso di realizzazione è quello presso la **Villa Borromeo** di Senago (MI) dove si prevede l'uso di cavi ancorati all'intradosso della volta mediante "golfari" con barre filettate accorciabili.

Analisi numeriche e prove sperimentali dimostrano che la tecnica proposta è in grado di incrementare notevolmente il carico di rottura degli archi e delle volte soprattutto quando il meccanismo di collasso sia di tipo flessionale [7]



Figura 27 Particolare della "graffetta" metallica estradossole di contrasto alla spinta della volta, utilizzata al Castello della Manta (CN)

La tecnica dell'arco armato svolge egregiamente il suo compito se l'arco è ben contrastato alle imposte da catene o da contrafforti. Capita tuttavia frequentemente il caso di volte spingenti debolmente contrastate, in cui non sia possibile porre in opera catene di contrasto.

A titolo di esempio si illustra la soluzione recentemente portata a termine per la volta a padiglione, splendidamente affrescata, del "corridoio delle grottesche" che si trova nel **Castello della Manta** (CN), di proprietà del FAI. La volta presenta una grave situazione di dissesto e di divaricazione dovuta alla spinta orizzontale della volta ribassata, priva di catene. Da notare il fatto che la volta è di sottotetto ed è priva di rinfianco. L'assenza di catene all'imposta della volta fa sì che i muri tendano ad allontanarsi tra loro creando una sorta di cerniera cilindrica in chiave. La parete che appare maggiormente soggetta alle forze trasmesse dalla volta è quella di minore spessore, che affaccia verso l'esterno del complesso, e che è meno vincolata da elementi di contorno. Un sopralluogo effettuato sull'estradosso ha rilevato che le catene lignee delle capriate di copertura sono parzialmente inglobate nella volta e che su di esse poggia una trave di epoca più recente che corre in senso longitudinale.

Tale trave è stata in passato collegata alla volta attraverso numerosi ganci metallici, nell'ingenuo tentativo di "sospenderla" dall'alto.

Tutte queste considerazioni hanno determinato la scelta di intervenire solo nella zona estradossole della volta. Per quanto riguarda la stabilità locale si è progettato di opporre un contrasto alle forze orizzontali mettendo in opera alcune "graffette metalliche" estradossole.

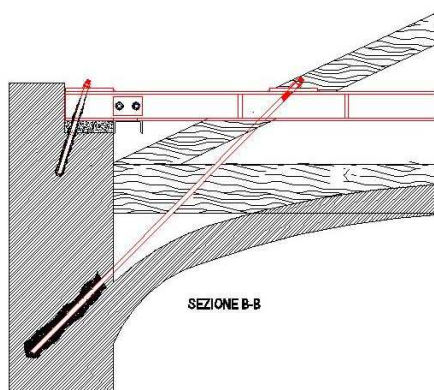


Figura 28 Particolare della "graffetta metallica estradossole di contrasto alla spinta della volta, utilizzata al Castello della Manta (CN)

La soluzione, già adottata nel 1997 a **Palazzo Cattaneo di Cremona** (Figura 29), ed a suo tempo proposta dal Breymann [8], consiste in una trave metallica orizzontale, composta da una coppia di UNP affiancate, disposta in senso trasversale al corridoio; da essa scendono due barre inclinate, inghisate nella muratura perimetrale in prossimità dell'imposta della volta e filettate all'estremità libera.

Tali barre, vincolate alla trave orizzontale, vengono successivamente tesate.

La muratura perimetrale viene così sollecitata da una forza con direzione diagonale, applicata in vicinanza dell'imposta della volta. La componente verticale è contrastata dal carico comunicato alla muratura dalla trave orizzontale. La componente orizzontale è invece deputata a contrastare la spinta divaricante generata dalla volta in muratura. In tal modo si ottiene un consistente effetto di confinamento operando esclusivamente dall'estradosso.

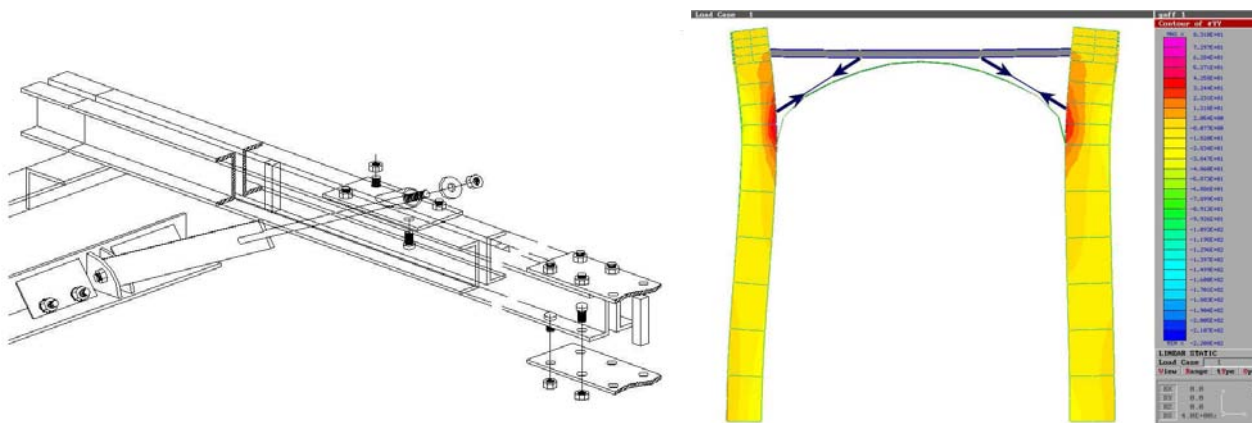


Figura 29 La “graffetta” metallica utilizzata a Palazzo Cattaneo, Cremona

Figura 30 Modello agli elementi finiti che illustra l'effetto di contenimento della “graffetta”

Soluzioni simili concettualmente (le cosiddette “catene estradosali”) venivano adottate in passato in molti edifici voltati ma la loro efficienza è fortemente ridotta dal fatto che l'elemento orizzontale non ha inerzia flessionale, essendo costituito da una semplice catena metallica di ridotta sezione. Quando gli elementi diagonali vengono tesati, la catena orizzontale si inflette e quindi perde la funzione di contrasto.

In taluni casi il contrasto della volta può essere ottenuto con soluzioni esterne, più agevoli.

Ad esempio nel consolidamento della grande volta dello scalone principale di **Palazzo Cattaneo** a Cremona la spinta orizzontale sulle imposte è stata eliminata mediante la posa di una “**trave-coltello**” disposta esternamente alla parete, all'altezza dell'imposta. La trave, di lunghezza superiore ai 10 metri, realizzata in conci metallici prefabbricati, è stata predisposta nel volume di sottotetto di un corridoio pensile, che fortunatamente esisteva a ridosso della parete. Tra la trave-coltello esterna e la muratura su cui spinge la volta sono state interposte numerose viti di grosso diametro che, forzate contro la parete, hanno fornito il contrasto orizzontale richiesto.



Figura 31 La trave "a coltello" che contrasta le spinte della volta

Anche questo intervento, tranne pochi fori realizzati all'estremità della trave per vincolarla alle estremità a due pareti perpendicolari a quella da consolidare, si può qualificare come facilmente reversibile.

Passando ora dalle volte alle **cupole** in muratura, è ben nota, ed è applicata fin dal passato, l'azione benefica esercitata dalle catene perimetrali esterne che, poste in opera alla quota di imposta durante la costruzione, contrastano le spinte centrifughe.

Negli interventi di consolidamento statico, realizzati a posteriori su strutture esistenti, risulta tuttavia spesso disagevole e talora impossibile realizzare tale soluzione, per ovvie difficoltà operative.

Una modalità semplice, che ho adottato recentemente al **Mausoleo Trivulzio** di Milano, ed inoltre con modalità adattate alle singole geometrie, nel **Santuario di Tresivio** (SO), e nella **chiesa di Marmashen** in Armenia, consente di risolvere il problema in modo sostanzialmente analogo a quanto poco sopra illustrato per la cerchiatura interna delle ciminiere oppure per l'arco armato, con cavo intradossale.

Si tratta in sostanza di disporre un **anello perimetrale**, realizzato con barre tonde o con cavo, alla base della cupola (in una posizione usualmente non in vista in quanto al di sopra dei fregio di base) e di collegarlo alla muratura in un numero limitato di punti con chiodature radiali. Successivamente l'anello viene messo in trazione, o accorciandolo direttamente mediante tenditori a vite, oppure accorciando le chiodature radiali. La soluzione è applicabile anche nel caso di cupole di forma poligonale, e non soltanto tonda, con l'accortezza di collegare l'anello di cerchiaggio e la muratura in corrispondenza dei vertici del poligono.

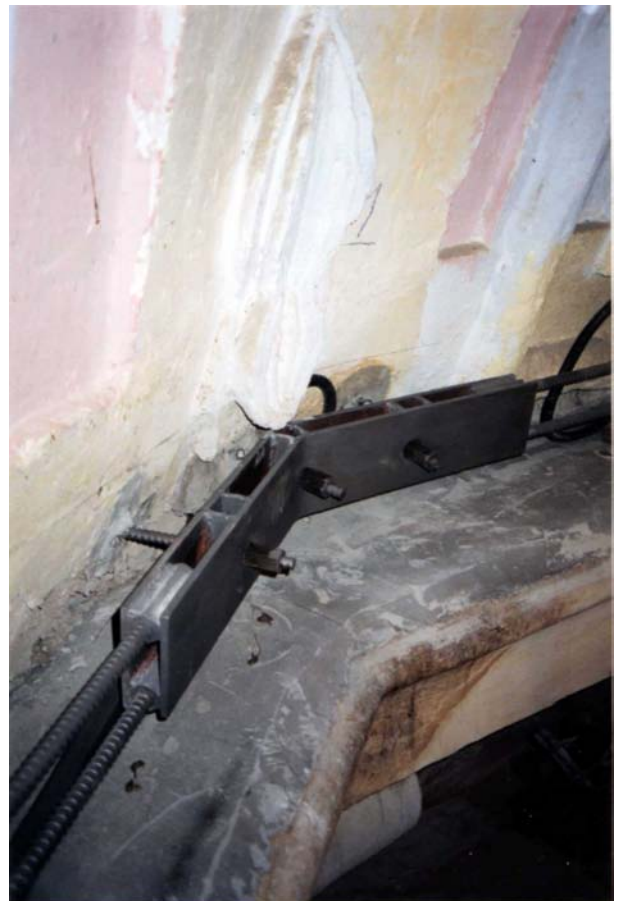
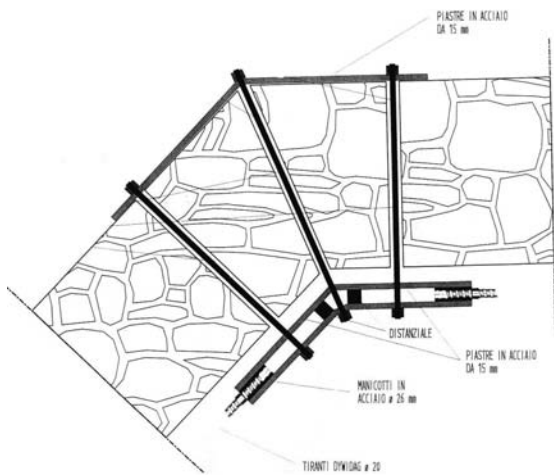


Figura 32 Cerchiatura interna di contenimento della cupola del Santuario di Tresivio (SO)

Figura 33 Cerchiatura interna di contenimento della cupola tonda della Chiesa di Marmashen in Armenia

Conclusioni

La decisione di consolidare un edificio storico mediante l'aggiunta di nuove strutture esterne non è quasi mai facile da prendere in quanto il confronto con l'esistente impone di risolvere prioritariamente il tema del rispetto e dell'accostamento architettonico tra stili ed epoche, accanto al problema sostanziale che ha originato l'intervento e che è tipicamente statico o funzionale. Più semplice sarebbe un intervento mimetico, quello che non si vede ma c'è, quello che funziona senza dare nell'occhio. Più semplice ma tale da costituire un inganno, se non altro all'intuizione statica dell'osservatore, e tale da rappresentare una negazione ingiustificata, un'abdicazione al ruolo di proposta che nuovi materiali o nuove concezioni strutturali hanno introdotto in questi decenni e che, sono diversi ma non meno nobili e degni di visibilità di quelli passati. Certo altro è manifestarsi discretamente all'osservatore che vuole vedere ed altro è sovrapporsi prepotentemente a quanto c'era prima. Io credo che una soluzione percorribile stia nella proposta di interventi che accompagnino l'esistente senza negarsi ma senza prevaricarlo, che dichiarino la specificità dei materiali utilizzati e la novità delle tecniche, in una alternanza che ne nobiliti le differenze e le complementarità. Con un occhio di riguardo alla durabilità dei nuovi materiali e con un ulteriore criterio in mente, quello della reversibilità, che lungi dal rappresentare una sudditanza tecnico-progettuale o un atteggiamento di scarso coraggio davanti all'esistente, aiuti il progettista, anzi meglio, aiuti il gruppo dei progettisti a pensare in termini di manutenzione programmata e di possibile verifica o di modifica futura delle strutture aggiunte.

Ho sperimentato dunque la reversibilità come un obiettivo possibile e come uno dei paradigmi e delle fonti di ispirazione del consolidamento strutturale, intendendola non come la scelta neutra di una semplice “struttura provvisoria”, pronta a essere demolita, né come un tentativo da cui poter comunque tornare indietro, ma piuttosto come un atteggiamento progettuale specificamente adottato e reso manifesto che consiste nell’ “avvicinarsi a” o meglio nel “mettersi a fianco di” , contrapposto alla prassi, frequente ma non per questo accettabile, dell’ “entrare in” oppure, peggio ancora, del “sostituirsi a”.

Bibliografia

- [1] Lorenzo Jurina, *Il consolidamento strutturale della torre San Dalmazio a Pavia*, C.T.A. Collegio dei Tecnici dell’Acciaio, Giornate Italiane della Costruzione in acciaio, Riva del Garda, 15-18 ottobre 1995
- [2] Lorenzo Jurina, *Il confinamento laterale delle pareti in muratura mediante tiranti inseriti nelle “buche pontate”*, Atti del Convegno Nazionale “La meccanica delle murature tra teoria e progetto, Messina, 18-20 settembre 1996
- [3] Pierfrancesco Canali, Lorenzo Jurina, Gianfranco Pertot, Gian Paolo Treccani, *Un documento del guasto come tecnica militare: lacune e progetto di conservazione al Forte Fuentes (Colico- LC)*, XIII Convegno internazionale scienza e beni culturali, Bressanone 1997
- [4] Lorenzo Jurina, *Interventi di “consolidamento esterno” delle murature*, L’Ediizia, aprile 2002
- [5] Lorenzo Jurina, Massimo Mazzoleni, *Un sistema di “cerchiatura interna” per il consolidamento di ciminiere in muratura*, 3°Coloquio Latinoamericano sobre Rescate y Preservación del Patrimonio Industrial, Santiago del Cile, Septiembre 2001
- [6] Lorenzo Jurina, *“L’arco armato”: una nuova tecnica di consolidamento di archi e volte in muratura con uso di tiranti metallici*, C.T.A. Collegio dei Tecnici dell’Acciaio, Giornate Italiane della Costruzione in acciaio, Ancona, ottobre 1997
- [7] Lorenzo Jurina, *Una tecnica di consolidamento attivo per archi e volte in muratura*, ASSISI 99, International workshop on Sesismic performance of built heritage in small historic centres, Assisi, 22-24 Aprile 1999
- [8] G.A. Breymann, *Trattato generale di costruzioni civili*, 1853