

INTERVENTI DI “CONSOLIDAMENTO ESTERNO” SULLE MURATURE

Lorenzo Jurina

Politecnico di Milano

Premessa

Chi deve progettare il consolidamento strutturale in un intervento di restauro conservativo sa bene che l'organo di tutela e, sempre più frequentemente, anche la committenza si aspetta un intervento “ad hoc”, definito come: *“necessario, risolutivo, ottimale, minimo, leggero, rispettoso, duraturo, riconoscibile, rimovibile, gradevole, economico...”* e via dicendo. Insomma un intervento che si manifesti a chi lo vuole vedere, ma che rimanga in sottotono per chi privilegia l'immagine precedente; un intervento che si dichiari come contemporaneo ma che non contrasti con la materia e con la tipologia dell'esistente. 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 soprattutto da mantenere.

Dimostrare la “necessità dell'intervento”, è sovente l'aspetto più arduo del lavoro perché richiede una conoscenza approfondita della fabbrica che non si limiti al rilievo delle geometrie o alle patologie di degrado materico ma che deve includere lo studio della struttura quale oggi è e quale era all'epoca della costruzione e lo studio delle sue residue capacità, tenendo in conto anche di tutti quei contributi, talora anche “non strutturali” all'origine, che possano aumentare la sicurezza d'insieme.

Non più facile è definire il “come eseguire” l'intervento conservando il bene nella sua irripetibile originalità.

Geometria, materiali e carichi sono i parametri meccanici che caratterizzano l'edificio ed è su questi che si può 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 essere antagonisti rispetto a quelli esistenti, o semplicemente meglio distribuiti, potrebbe essere la soluzione più corretta e più economica.

Al progettista strutturale è richiesta dunque una *specificità* dell'intervento, che, in definitiva, va pensato adattandolo al singolo edificio. È un approccio non semplice, che implica verifiche incrociate, scientificità nell'approccio ed una dose di creatività.

Nel seguito di questa breve nota tratterò in particolare di murature verticali e di elementi voltati, commentando alcuni esempi in cui l'intervento è consistito prevalentemente nell'**aggiunta** di strutture nuove, esterne ed attive, ossia di strutture che restano a vista, per chi vuole vederle, e che sono collaboranti con l'esistente fin dalla fase iniziale della posa in opera.

Interventi sulle murature verticali

I problemi statici più frequenti delle 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
- eccesso di carico orizzontale parallelo alla muratura che produce rotture a taglio

In questo articolo ci occuperemo solo dei primi due aspetti.

In termini sintetici, nel caso delle murature verticali la modalità più semplice da proporre nello spirito dichiarato in premessa, è quella di accostare una nuova struttura a quella esistente, in altre parole di utilizzare una struttura parallela, attiva.

Emblematico in questo senso il consolidamento della **Torre S. Dalmazio** di Pavia. La torre in muratura risale al 1100 circa e nel 1990 presentava preoccupanti fenditure sui quattro lati, dovute ad una serie di aperture e parziali chiusure ripetutamente praticate nelle pareti e ad un'interazione di tipo termico con l'adiacente chiesa costruita nel 1500. Data la peculiare geometria cava della torre si è optato per 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 in acciaio, una **“torre nella torre”**, successivamente collegata a quella esterna mediante tiranti metallici. 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 quota parte del peso proprio della muratura sulla struttura metallica aggiunta, al fine di ridurre gli elevati tassi di lavoro presenti alla base.

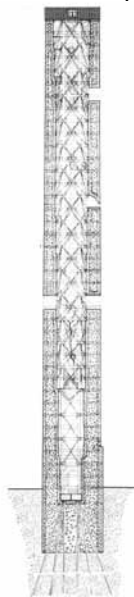


Figura 1

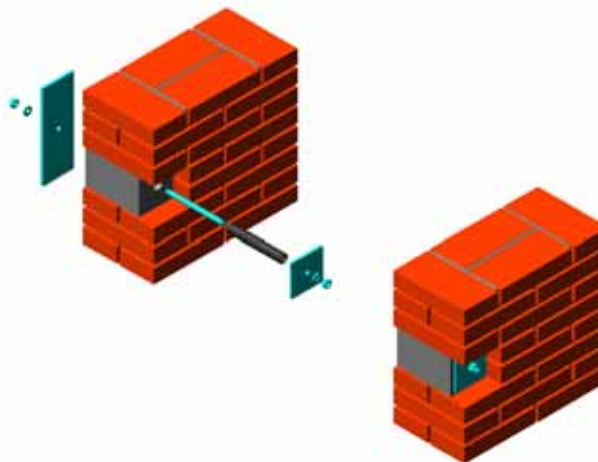


Figura 2

Figura 1. Torre di S. Dalmazio a Pavia. La torre in acciaio è collegata a quella in muratura mediante pendini metallici inclinati e posti in debole trazione.

Figura 2. Il progetto sfrutta la peculiare presenza delle "buche pontai" che interessano la torre per tutta l'altezza. Le buche, passanti, sono state usate per disporre "tiranti radiali attivi", con la funzione di comprimere la parete della torre, creando un confinamento laterale favorevole che aumenta il carico limite della muratura. La piastra esterna del tirante appoggia su un riempimento realizzato in malta idraulica, tenuto in sottocampo di circa 15 cm, così da non modificare l'aspetto della torre. All'interno i 12 tirantini radiali di ogni livello contrastano su un anello perimetrale, in grado di ridare continuità meccanica alle pareti fessurate. Su questo si intestano i "pendini" di collegamento tra la torre in acciaio e quella in muratura.

Un dettaglio da non sottovalutare è l'aver potuto sfruttare la nuova torre metallica come vano per un ascensore favorendo così le opere di manutenzione programmata della struttura monumentale. 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.



Figura 3. La "torre metallica" interna, particolare dei pendini

Un secondo esempio di intervento su murature verticali è quello realizzato recentemente presso le rovine del **Forte di Fuentes** situate a Colico. [3] L'altezza di 10 metri circa della parete nord-est del palazzo del Governatore, il suo ridotto spessore, la tessitura in pietre di dimensioni eterogenee e poco legate, la presenza di molte aperture e la mancanza di elementi di controvento, 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. Un'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 resistere 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**".



Figura 4 Consolidamento con cavi esterni post compressi verticali realizzato a Forte Fuentes



Figura 5 Dettaglio del collegamento realizzato tra il cavo e la muratura

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. I cavi sono stati disposti sui due lati, in modo da fare fronte ai venti provenienti sia da Nord che da Sud, ad una certa distanza dalla parete, per incrementarne il momento di inerzia, e fissati in vari punti intermedi alla muratura, per assorbire gli sforzi di taglio.

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

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.

Un intervento simile, provvisorio, è stato previsto per consolidare un'alta parete a rischio del **castello di Trezzo d'Adda**.



*Figg. 6, 7 Intervento di messa in sicurezza provvisoria di una parete del **Castello di Trezzo d'Adda**. Si è optato per un consolidamento costituito da una doppia serie di "stralli" diagonali incrociati che controventano la parete sui due fronti. La presenza di buche puntaie passanti anche in questo caso facilita la posa reversibile dei cavi.*

Ancora in tema di pareti murarie alte e soggette a rilevanti carichi verticali ed orizzontali, mi pare utile commentare quanto ultimato nel 1999 alla medioevale **Porta Nuova di Pavia**.

L'intera struttura aveva subito, nel corso degli anni, gravi danni 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 costituito tuttavia da una "**passerella strutturale**" posta a mezza altezza delle pareti, una sorta di trave orizzontale in corrispondenza della quota dell'antico soppalco, oggi non più esistente, e finalizzata ad ammorsare le quattro pareti perimetrali e a creare di un vincolo intermedio in grado di limitare gli effetti della snellezza delle pareti.



Figura 8 La trave-passerella di Porta Nuova a Pavia, realizzata in acciaio con un piano di calpestio in legno di forte spessore, è un elemento capace di ammorsare tra loro le pareti perimetrali e di vincolarle orizzontalmente

E' un elemento architettonico discreto, capace di "accorciare" visivamente il vuoto che internamente rende anomalo lo spazio della Porta. Formalmente reintegra la memoria storica dei percorsi merlati sospesi, tipici

della cinta muraria pavese. L'accessibilità alla passerella è garantita da una scala a chiocciola molto snella, sostenuta da tiranti metallici ancorati ai gradini.

Un altro esempio di consolidamento "esterno" che desidero commentare è costituito dal consolidamento delle **ciminiere in muratura**, soprattutto di quelle che, perse le esigenze funzionali, sono 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 usualmente 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 [4] una soluzione che prevede un **cerchiaggio interno** e che consente di ottenere interessanti vantaggi: innanzi tutto l'intervento non è visibile esternamente, non risulta esposto all'azione degli agenti atmosferici, è accessibile e manutenibile dal cavedio, senza l'ausilio di opere provvisoriale e presenta un notevole grado di reversibilità.

Questo "confinamento" orizzontale interno prevede la posa in opera di cavi o di **anelli in acciaio** circolari, disposti all'interno del camino, secondo un'opportuna spaziatura e solidarizzati alla muratura mediante "barre radiali". Gli anelli devono rimanere staccati dal paramento murario: ciò consente di mettere in trazione le barre radiali, mediante dadi che contrastano sull'anello. Inducendo in quest'ultimo una trazione si ottiene una compressione di analoga entità nella muratura. Si possono eliminare così gli sforzi di trazione circonferenziale sulla muratura.

La possibilità, ulteriore, di connettere i diversi anelli cerchianti attraverso **tiranti verticali** consente di applicare una precompressione verticale la cui eccentricità può essere regolata in modo da compensare i fuori piombo presenti. La ciminiera mantiene la configurazione geometrica che negli anni ha acquisito ma tutte le sue sezioni risultano soggette a sola compressione, o a una limitata componente flessionale. La frequenza degli anelli cerchianti 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. Grazie alla modularità degli anelli cerchianti è possibile installare una scala elicoidale dentro al camino, ancorata agli anelli medesimi, che permette una agevole risalita alla struttura per la necessaria manutenzione.

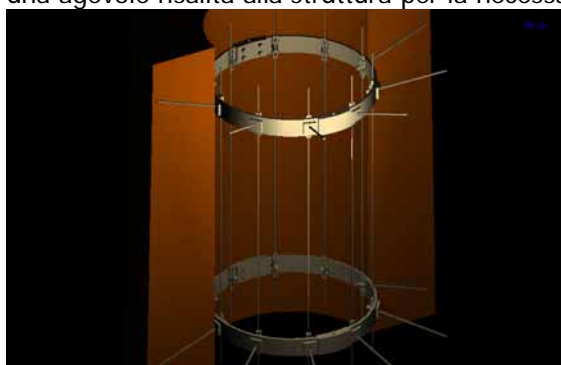


Figura 9 Consolidamento di ciminiera fessurate costituita da anelli di cerchiatura, barre radiali di ancoraggio ed eventuali tiranti verticali



Figura 10. Dettaglio della scala elicoidale installata all'interno della ciminiera ed ancorata agli anelli di cerchiatura

Interventi su archi e volte

Le patologie più frequenti sugli archi e le volte sono costituite per lo più 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 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 che non sono solo **zavorra** ma hanno funzioni di **vincolo** mutuo tra arco e parete perimetrale. Non sempre è possibile l'utilizzo delle catene per contrastare le forze orizzontali, ed è necessario intervenire dall'alto.

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

Una soluzione alternativa è quella che ho chiamato “**arco armato**” [5], [6].

Si tratta in sostanza dalla posa di **cavi metallici** 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.

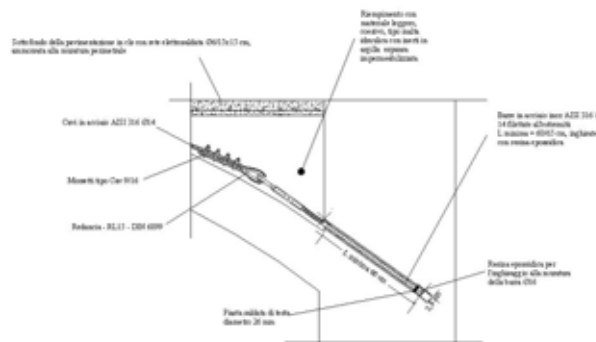


Figura 11. L'“arco armato”: dettaglio del cavo di armatura estradosso

Per realizzare un'adeguata “forzatura” tra la fune e la muratura (ossia una trazione nella fune ed una contemporanea compressione nell'arco) si fa ricorso a **tenditori** posti alle due estremità del cavo oppure a **cunei interposti** tra cavo e muratura lungo tutto lo sviluppo del cavo, ancorato alle pareti in prossimità dell'imposta.



Figura 12 Casa Jacobbe, a Magenta: archi armati, tesi mediante tenditori di estremità



Figura 13 Monastero degli Olivetani di Nerviano. (MI) : archi armati tesi mediante cunei

Nel caso di archi deformati, questa tecnica consente di applicare carichi in modo *non uniforme* sulla struttura in mattoni. E' sufficiente infatti, con l'uso di cunei, forzare maggiormente la fune e 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.

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

E' possibile, in modo esattamente duale a quanto descritto, operare dall'intradosso invece che dall'estradosso, anche se con maggiori difficoltà tecnologiche.

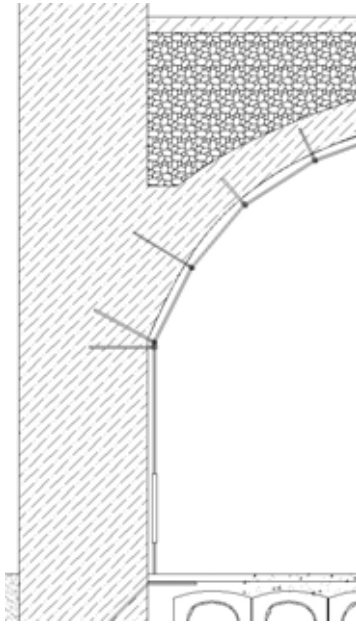


Figura 14 Consolidamento di volte mediante arco armato costituito da cavi intradossali ancorati con "golfari" e barre filettate accorciabili.

Analisi numeriche e prove sperimentali dimostrano che questa tecnica 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 /6/

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 in cui non è 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 divaricazione, con formazione di una cerniera cilindrica in chiave, dovuta alla spinta della volta ribassata, priva di catene.



Figura 15. La grande volta affrescata della "Corridoio delle Grottesche" al Castello della Manta (CN)

Si è scelto pertanto di intervenire solo nella zona estradossale della volta ed il contrasto delle spinte è stato realizzato con elementi metallici chiamati "**graffette**".

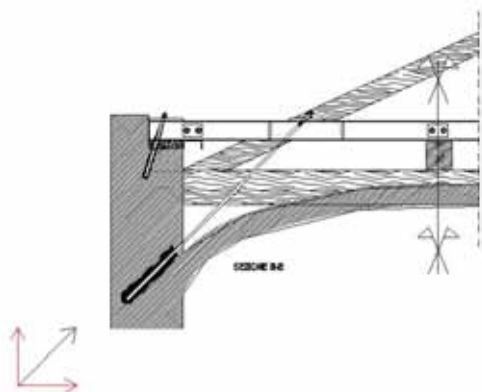


Figura 16. Particolari di progetto della graffetta

Figura 17. Particolare della "graffetta" metallica di contrasto alla spinta della volta

La soluzione, a suo tempo proposta dal Breymann [7] consiste in una trave orizzontale, composta da due UPN affiancate, trasversali al corridoio; da essa scendono due barre inclinate, inghisate nella muratura perimetrale in prossimità dell'imposta della volta e filettate all'estremità libera per collegarle alla trave e successivamente tesarle con dadi di contrasto.

La muratura perimetrale viene così sottoposta ad una forza diagonale, in vicinanza dell'imposta della volta. La componente verticale è contrastata dalla reazione vincolare dalla trave. La componente orizzontale è invece deputata a contrastare la spinta generata dalla volta. In tal modo si ottiene un consistente effetto di confinamento operando esclusivamente dall'estradosso.

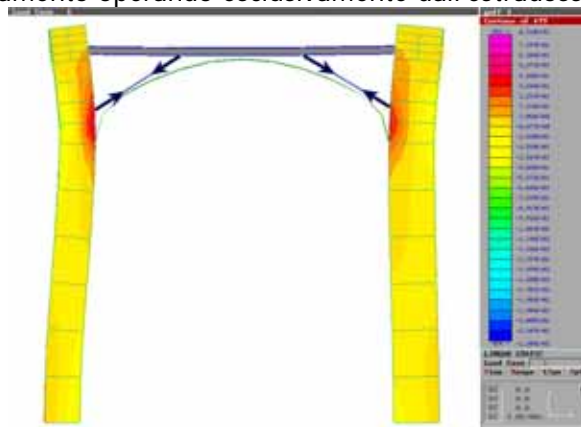


Figura 18. Modello agli elementi finiti che illustra l'effetto di contenimento della "graffetta"

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.

Per fare fronte ad un problema di stabilità globale del "corridoio delle grottesche", lungo tutta l'estensione dei muri perimetrali, su entrambi i lati, è stato fissato un profilo UPN, corrente, al quale si collegano le travi delle "graffette" sopra descritte, ottenendo dei campi approssimativamente quadrati. Ciascuno di questi campi è stato controventato con un tirante diagonale, realizzato con trefolo zincato. L'insieme costituisce una sorta di **"trave reticolare attiva"** disposta in orizzontale sopra alla volta con la funzione di controventare la parete sollecitata dalla spinta delle volte. Tendendo i tiranti di controvento si impone una coazione che inflette la trave (e quindi la parete), opponendosi alle fessurazioni in atto. Non si pretende naturalmente di ottenere il recupero del fuoripiombo sviluppatosi negli anni, ma solo di realizzare un intervento che operi in controtendenza, congelando la situazione nella attuale geometria.

Passando dalle volte alle **cupole** in muratura, è nota l'azione benefica esercitata dalle catene perimetrali esterne che, poste in opera durante la costruzione, contrastano le spinte centrifughe all'imposta.

Una modalità semplice, adottata recentemente al **Mausoleo Trivulzio** di Milano, mi ha consentito di risolvere il problema dall'interno. E' stato disposto un anello perimetrale, in barre tonde, alla base della cupola (in una posizione non a vista in quanto al disopra dei fregio di base), collegato alla muratura in un numero limitato di punti con chiodature radiali. Successivamente l'anello è stato messo in trazione, in parte accorciandolo mediante tenditori, in parte accorciando le chiodature radiali. La soluzione è applicabile anche a di cupole di forma poligonale, con l'accortezza di collegare anello e muratura in corrispondenza dei vertici del poligono.

Conclusioni

La decisione di consolidare l'edificio storico mediante l'aggiunta di nuove strutture esterne non è semplice da prendere in quanto il confronto con l'esistente impone di risolvere per primo il tema dell'accostamento architettonico tra stili ed epoche, accanto al problema che ha originato l'intervento, tipicamente statico o funzionale. Più semplice sarebbe un intervento mimetico, che funziona senza dare nell'occhio. Più semplice ma tale da costituire un inganno all'intuizione statica dell'osservatore, e tale da rappresentare una un'abdicazione al ruolo di proposta che nuovi materiali o nuove concezioni strutturali hanno introdotto in questi decenni e che, per ciò stesso, sono diversi ma non meno degni di visibilità di quelli passati. Certo altro è manifestarsi discretamente ed altro è sovrapporsi prepotentemente a quanto c'era prima. Io credo possibile, con questi limiti, realizzare interventi che accompagnino l'esistente senza negarsi ma senza prevarcarlo, che dichiarino la specificità dei materiali utilizzati e la novità delle tecniche, con un occhio di riguardo alla durabilità dei materiali e con un criterio in mente, quello della reversibilità, che lungi dal rappresentare una sudditanza tecnico-progettuale o uno scarso coraggio davanti al già fatto, aiuti il progettista a pensare in termini di manutenzione programmata.

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 Per tot, Gian Paolo Treccani, Un documento del guasto come tecnica militare: lacune e progetto di conservazione al Forte Fuentes (Colico- LC)
- [4] Lorenzo Jurina, Massimo Mazzoleni, *Un sistema di "cerchiatura interna" per il consolidamento di ciminiere in muratura*, Terzer Colloquio Latinoamericano sobre Rescate y Preservación del Patrimonio Industrial, Santiago del Cile, 13-16 Septiembre 2001
- [5] 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
- [6] 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
- [7] G.A. Breymann, Trattato generale di costruzioni civili, 1853

DIDASCALIE

Figura 1. Torre di S. Dalmazio a Pavia. La torre in acciaio è collegata a quella in muratura mediante pendini metallici inclinati e posti in debole trazione.

Figura 2. Il progetto sfrutta la peculiare presenza delle "buche puntaie" che interessano la torre per tutta l'altezza. Le buche, passanti, sono state usate per disporre "tiranti radiali attivi", con la funzione di comprimere la parete della torre, creando un confinamento laterale favorevole che aumenta il carico limite della muratura. La piastra esterna del tirante appoggia su un riempimento realizzato in malta idraulica, tenuto in sottosquadro di circa 15 cm, così da modificare l'aspetto della torre. All'interno i 12 tirantini radiali di ogni livello contrastano su un anello perimetrale, in grado di ridare continuità meccanica alle pareti fessurate. Su questo si intestano i "pendini" di collegamento tra la torre in acciaio e quella in muratura.

Figura 3. La "torre metallica" interna, particolare dei pendini

Figura 4 Consolidamento con cavi esterni post compressi verticali realizzato a Forte Fuentes

Figura 5 Dettaglio del collegamento realizzato tra il cavo e la muratura

Figg. 6, 7 Concettualmente simile a quanto descritto per Forte Fuentes è la messa in sicurezza provvisoria di una grande parete verticale isolata del **Castello di Trezzo d'Adda**. Qui veniva richiesta una soluzione economica con la possibilità di occupare un ampio spazio nelle vicinanze della parete. Si è optato per un consolidamento costituito da una doppia serie di "stralli" diagonali incrociati che controventano la parete sui due fronti. La presenza di buche puntaie passanti anche in questo caso facilita la posa reversibile dei cavi.

Figura 8 La trave-passerella di Porta Nuova a Pavia è realizzata in acciaio con un piano di calpestio in legno di forte spessore ed è un elemento capace di ammorsare tra loro le pareti perimetrali e di vincolarle orizzontalmente

Figura 9 Dettaglio della cerchiatura interna di ciminiera costituita da barre radiali di ancoraggio e da tiranti verticali

Figura 10. Dettagli della scala elicoidale, installata all'interno di una ciminiera ed ancorata agli anelli di cerchiatura

Figura 11. L'"arco armato": dettaglio delle armature estradossale

Figura 12 Casa Giacobbe, a Magenta: archi armati, tesati mediante tenditori di estremità

Figura 13 Monastero degli Olivetani di Nerviano. (MI) : archi armati tesati mediante cunei

Figura 14 Nel restauro di volte con rinfianchi non rimovibili si è previsto l'uso di cavi ancorati all'intradosso mediante "golfari" con barre filettate accorciabili.

Figura 15. La grande volta affrescata della "Corridoio delle Grottesche" al Castello della Manta (CN)

Figura 16. Particolare della "graffetta" metallica estradossale di contrasto alla spinta della volta

Figura 17. Particolari di progetto della graffetta

Figura 18 L'analisi