

I tiranti metallici nel consolidamento degli edifici monumentali

Lorenzo Jurina
Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Strutturale

Sommario

Nel campo della edilizia monumentale l'uso di rinforzi in metallo negli interventi di consolidamento strutturale è una pratica diffusa da secoli: recenti esempi mostrano che esiste ancora spazio per nuove sperimentazioni.

L'articolo presenta alcuni interventi di consolidamento, di cui l'autore si è occupato, attraverso i quali si illustra l'uso non tradizionale di tiranti metallici attivi e passivi.

Abstract

Since many centuries reinforcing steel bars are used in the consolidation of monuments but recent examples show that new routes can be opened due to new materials and technology.

Eight consolidation cases of masonry historical buildings, attended to by the author, are here described to illustrate non traditional applications of active and passive cables.

Lorenzo Jurina

Introduzione

L'adozione di soluzioni miste acciaio-muratura e acciaio-legno viene sempre più accettata da parte dei responsabili del restauro delle strutture, anche se con qualche resistenza soprattutto nel caso di monumenti.

I vantaggi dell'acciaio sono infatti evidenti (ridotto ingombro unito a costi contenuti, grande resistenza, elevata duttilità, immediata riconoscibilità e reversibilità dell'intervento) ma viene contemporaneamente paventata una presunta incompatibilità dei due materiali soprattutto in termini di diversa rigidità, oltre ad una minore durabilità dell'acciaio.

Non si può dimenticare che un uso improprio del materiale acciaio, soprattutto se poco protetto, ha portato a fenomeni gravissimi di ossidazione con aumento di volume e rottura del materiale circostante, oppure a colature e macchie irreversibili sulle superfici esterne.

Va riconosciuto tuttavia che le sue caratteristiche di resistenza meccanica lo propongono come una soluzione di grande validità quando venga accoppiato a materiali, come la muratura, poco resistenti a trazione.

Dal medioevo in poi l'impiego di catene e cerchiature si è diffuso come soluzione privilegiata per assorbire gli sforzi di trazione generalmente prodotti dalla componente orizzontale delle forze, o per migliorare collegamenti difettosi, oppure per ripristinare collegamenti mancanti.

Esempi famosi di utilizzo di catene in ferro si possono fare risalire al rafforzamento delle grandi cupole rinascimentali o agli incatenamenti di archi e volte a spinta non eliminata, in alternativa all'uso di contrafforti o di archi rampanti.

Allo scopo di esemplificare alcune applicazioni più recenti e poco usuali di elementi di rinforzo in acciaio, vengono illustrate nel seguito alcune realizzazioni in cui il tirante gioca un ruolo di primo piano.

Vengono presentati alcuni esempi di cui l'autore si è occupato in ambito italiano, ed in particolare: (1) *il Palazzo della Ragione a Milano*, (2) *il Palazzo Ducale di Mantova*, (3) *la Torre San Dalmazio di Pavia*, (4) *il Palazzo Cattaneo di Cremona*, (5) *il Palazzo Olevano di Pavia*, (6) *il Castello Visconteo di Pavia*, (7) *il Palazzo dell'Anagrafe di Voghera*, (8) *la cripta del Sacromonte di Varese*.

I- Il Palazzo della Ragione di Milano ed il "reticolo armato"

Si tratta di un edificio in muratura del 1232, sopralzato nel 1770 da Maria Teresa d'Austria, di dimensioni in pianta 18x50 m e altezza 22 m, costituito da un unico grande volume isolato dagli edifici circostanti.

La presenza di un quadro fessurativo preoccupante e la realizzazione di una linea sotterranea della metropolitana avevano fatto nascere la proposta di abbattere l'elevazione teresiana, per motivi di sicurezza. Nel 1978-80, invece, sono stati portati a termine una serie di lavori di consolidamento delle pareti di facciata e della copertura che hanno consentito la conservazione integrale dell'edificio.

Una preventiva diagnosi, mediante una procedura di cosiddetta "identificazione parametrica" appoggiata ad un modello agli elementi finiti, ha consentito di determinare la più probabile distribuzione di cedimenti dei pilastri partendo dal rilievo e dalla interpretazione a ritroso del quadro fessurativo. / 1,2 /

I cedimenti così individuati sono stati aggiunti come distorsioni imposte alle altre azioni sollecitanti, in modo da valutare lo stato tensionale e, di conseguenza, i coefficienti di sicurezza locali. E' stata poi controllata la validità dei risultati con prove di martinetto piatto / 3 / , una prova in sito non distruttiva, oggi molto diffusa, che su questo edificio è stata sperimentata per la prima volta nel mondo del restauro monumentale.

Lorenzo Jurina

Successivamente, dopo vari tentativi rivolti a rendere minimo l'apporto dei nuovi elementi, è stata adottata una distribuzione di barre metalliche passive, con andamento radiale, realizzate a partire dall'intradosso degli archi del loggiato, in grado di realizzare un "reticolo armato", all'interno della muratura.

I tiranti sono sufficientemente lunghi da intersecarsi tra loro realizzando una sorta di struttura intralacciata, a maglie quadrangolari, che potremmo definire "a pantografo". La collaborazione con la muratura contenuta nelle maglie impedisce la chiusura dei quadrilateri: la muratura agisce infatti come una sorta di puntone tra i vertici delle maglie dando luogo ad un funzionamento a traliccio isostatico, costituito da maglie non più quadrangolari ma triangolari.

Tale struttura reticolare mista in muratura e acciaio, contenuta all'interno delle pareti, è capace di limitare ulteriori cedimenti dei vincoli, dovuti sia a variazioni del livello di falda, sia alle vibrazioni da traffico.

Altri incatenamenti passivi sono stati aggiunti in corrispondenza dei quattro spigoli, con lo scopo di rendere monolitiche le quattro pareti della scatola muraria perimetrale.

L'ancoraggio delle barre passive è stato realizzato con resina epossidica caricata con quarzo. Si è stimato infatti che la buona qualità e l'elevato spessore delle pareti in muratura piena potesse proteggere a sufficienza la resina dagli attacchi dei raggi ultravioletti.

Un incatenamento attivo è stato predisposto nella risega alla quota di spicco del sopralzo teresiano, con funzione di cerchiatura globale.

Le barre, esterne, sono state realizzate in diversi segmenti indipendenti ma collegati, ciascuno protetto all'interno di una guaina lubrificata, per possibili ritorsature.

Per fare fronte a spinte da vento o sisma sulle facciate più lunghe del Palazzo era opportuno inoltre poter disporre di un diaframma rigido a livello del tetto, con funzione di controvento, in grado di trasferire parte dei carichi sulle due pareti più corte.

Per conseguire questo risultato si sono sfruttate le capriate lignee già presenti, disponendo tra capriata e capriata due tiranti metallici incrociati che hanno trasformato la copertura in una trave reticolare mista (acciaio-legno) di grande rigidità nel piano orizzontale ed in grado di offrire un vincolo superiore alle pareti perimetrali.

I tiranti incrociati sono stati ancorati ad una trave perimetrale zincata, in profilo C220, ubicata nel sottotetto tra la volta di copertura e l'appoggio delle capriate.

Tutti questi tiranti, realizzati in trefolo prestirato zincato, sono stati sottoposti a pre-trazione in modo da renderli immediatamente attivi.

Col senno di poi si possono avanzare almeno due critiche all'intervento così come è stato condotto a termine: la prima è che non si sono utilizzati tiranti in acciaio inox e la seconda è che l'intervento di reticolo armato all'interno delle pareti non presenta quei caratteri di reversibilità che la prassi degli ultimi anni con frequenza sta consigliando.

Particolarmente fruttuoso si è rivelato invece lo sforzo rivolto a rendere minima la quantità di materiale metallico utilizzato, mediante la simulazione numerica di diverse soluzioni di rinforzo e la introduzione di attendibili cedimenti di fondazione.

2- Il Palazzo Ducale di Mantova ed i "controventi a K"

Il problema si presentava simile per forma e per età all'edificio di Milano sopra descritto. Anche qui il monumento risale agli inizi del 1200 quando è stato realizzato un ampliamento del corpo originario.

Nella parte superiore è presente un grande salone le cui due pareti più lunghe presentano oggi uno strapiombo di oltre 50 cm, con andamento geometrico molto simile.

Lorenzo Jurina

Sui due lati lunghi del salone sono presenti bifore sfalsate e, tranne poche tracce di affreschi, le murature sono in mattoni faccia a vista, coperte da un tetto in capriate lignee a vista.

La causa del degrado strutturale si è potuta ricondurre ad un fenomeno, piuttosto inconsueto, di instabilità flessionale della parete di facciata dovuta ad un evidente cedimento delle fondazioni, appoggiate su uno strato di torba molto deformabile. La parete di facciata ha trascinato nel suo movimento la parete opposta, mediante il collegamento operato dalle capriate.

All'interno della grande sala superiore, all'inizio del 1900 sono state realizzate tre grandi pareti trasversali, con funzione di contrafforte, legate con tiranti alle pareti di facciata.

L'obiettivo progettuale, proposto nel 1988 dalla proprietà, prevedeva una completa demolizione delle pareti divisorie, con lo scopo di ridare agibilità all'intero salone, conservando tuttavia gli strapiombi delle facciate.

Il progetto di consolidamento strutturale, approvato dagli organi di controllo, ha previsto pertanto la eliminazione delle tre pareti trasversali e la loro sostituzione con dei controventi spaziali a forma di K, realizzati con tiranti in acciaio inox.

La soluzione proposta bene si adatta alla semplicità dei mattoni interni a vista ed al severo alternarsi delle bifore sfalsate, ritmando il volume con esili fili metallici che rispettano le spaziature presenti e creano un movimento all'interno del lunghissimo salone.

I controventi a K funzionano naturalmente solo se le capriate lignee sono in grado di collegare efficacemente le due pareti dei fronti principali e di trasmettere tra una e l'altra delle forze di verso opposto al loro strapiombo.

E' giocoforza allora prevedere un ulteriore intervento mediante tiranti metallici che interessano le capriate in legno e che, in numero di quattro per ogni capriata, partono dal vertice per collegarsi alle capriate adiacenti, al di sotto dei due monaci laterali, ai terzi della catena.

Scopo di questo intervento è duplice: anzitutto ridurre la lunghezza di libera inflessione delle catene in legno chiamate a funzionare a compressione, seppur per un carico limitato, e, secondariamente, aumentare la iperstaticità del tetto facendo sì che ogni capriata in caso di necessità si possa appoggiare alle due adiacenti, evitando così problemi di collasso localizzato.

Il progetto che prevede in definitiva una soluzione mista acciaio-legno-muratura, è stato approvato ma attende ancora un finanziamento per la realizzazione.

L'intervento progettuale proposto risulta tutto in vista e gioca sul contrasto tra una soluzione di tipo volutamente moderno, quasi provocatoria nel gusto e nei materiali, con un ambiente circostante piuttosto severo nei materiali e nei colori.

3- La torre San Dalmazio a Pavia e "la torre nella torre"

Nel primo esempio illustrato si è adottata una soluzione in cui i tiranti metallici scompaiono all'interno della muratura; nel secondo esempio si è proposto un uso dell'acciaio volutamente messo in evidenza.

Nel terzo caso, la Torre San Dalmazio a Pavia, si è recentemente / 4,5 / portata a termine una soluzione ancora diversa: una struttura metallica perfettamente a vista e completamente rimovibile ma ubicata tutta all'interno della torre, in modo da non essere visibile all'esterno se non attraverso alcuni segnali discreti che la rendono percepibile. In altre parole "una torre nella torre".

In questa struttura, che risale all'anno 1100 circa, erano presenti fenditure notevoli e preoccupanti sui quattro lati, dovute soprattutto ad una serie innumerevole di aperture e parziali chiusure ripetutamente praticate nelle pareti ed alla interazione con le strutture di una vicina chiesa costruita nel 1500.

La soluzione proposta ha previsto anzitutto lo sfruttamento delle buche pontate che, in numero di 12 ogni 105 cm, interessano le pareti della torre per tutta l'altezza.

Lorenzo Jurina

All'interno di queste buche, e quindi senza praticare perforazioni addizionali, sono stati disposti dei tirantini attivi in acciaio inox, 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.

I tiranti sono stati inseriti in una guaina che ha consentito la successiva tesatura, dopo aver riempito con malta idraulica la buca puntaia stessa fino a 15 cm dalla superficie esterna. La piastra più esterna di contrasto del tirante batte su tale riempimento e pertanto non appare all'esterno della torre e non ne modifica in maniera drastica l'aspetto, come talora succede con soluzioni che prevedono piastre esterne, più efficienti ma formalmente più invasive.

All'interno della torre i 12 tirantini di ogni livello trovano contrasto su un anello metallico perimetrale che costituisce una sorta di catena passiva interna.

All'interno è stata poi costruita una "torre nella torre" con elementi modulari disposti verticalmente in acciaio zincato a caldo, di dimensione 180x210cm.

Da ultimo la torre metallica interna è stata collegata a quella esterna in muratura mediante circa 600 tirantini metallici, inclinati e posti in debole trazione.

Si ottiene così un duplice risultato: quello di collegare monoliticamente le due torri, per farle lavorare assieme a flessione e taglio, e 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.

Solo gli elementi a contatto con l'ambiente esterno sono in acciaio inox mentre per gli altri elementi si è scelta la più economica zincatura a caldo.

Un dettaglio importante è l'aver sfruttato la torre metallica come vano per un ascensore interno in grado di portare in sommità uomini e cose, favorendo così le operazioni di manutenzione programmata della struttura monumentale.

La soluzione adottata non si propone pertanto 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 tecnologia attuale ha reso disponibile.

4- Il Palazzo Cattaneo di Cremona e la "catena estradossale"

Il palazzo presenta una gran varietà di problemi statici, ma desidero soffermarmi su uno in particolare, affrontato alla fine del 1994: il problema di alcune volte a botte che presentavano evidenti sofferenze a causa del divaricamento dei muri di imposta sotto le spinte orizzontali.

La soluzione più efficiente e più frequentemente adottata in passato è quella della aggiunta di catene all'intradosso, all'altezza delle reni.

Una tale scelta avrebbe però pregiudicato notevolmente il godimento degli affreschi presenti sulle volte.

Altrettanto frequentemente adottata, in tempi più recenti, la scelta (efficace ma certamente non reversibile) di una cappa di calcestruzzo con rete elettrosaldata, gettata all'estradosso, con l'utilizzo di pioli metallici per collegare tra loro i due strati.

La soluzione adottata a Palazzo Cattaneo prevede una diversa alternativa, ovvero l'adozione di una particolare "catena estradossale". Si tratta semplicemente di posizionare nel sottotetto alcune coppie di travi metalliche C200 tra loro parallele, da cui scendono due tirantini inclinati che vanno ad ancorarsi nelle pareti di imposta, a livello delle reni dell'arco, contrastandole orizzontalmente. / 6 /

Le travi metalliche sono in grado di resistere flessionalmente ai carichi esercitati dai due tirantini, senza peraltro gravare sulla volta sottostante, come succedeva invece con le usuali, e staticamente infelici, catene estradossate dove anche l'elemento orizzontale era costituito da un semplice tirante.

Lorenzo Jurina

La soluzione progettuale qui descritta non è originale, si trova infatti descritta nel noto testo del Breymann / 7 /, ma va riscoperta per la sua estrema utilità e rispetto delle preesistenze.

Le travi metalliche, accostate a distanza di 2,5 m, hanno consentito tra l'altro di realizzare un pavimento calpestabile di sottotetto.

L'uso di tirantini in acciaio filettati ha consentito una buona flessibilità dimensionale, capace di fare fronte alle inevitabili imperfezioni geometriche che in cantiere costituiscono la norma, ed ha consentito inoltre di regolare in modo puntuale i tiri applicati alle imposte della volta.

Per valutare con facilità e con strumentazione da cantiere la trazione indotta nei tirantini e di conseguenza il contrasto laterale offerto agli archi, a controllo dei risultati ottenuti con una chiave dinamometrica, si è provveduto anche alla misura della inflessione verticale delle travi di contrasto.

Il metodo che qui si presenta come bidimensionale può naturalmente essere esteso al caso di volte tridimensionali, a padiglione oppure a crociera, predisponendo un graticcio superiore di travi in grado di fornire contrasto a cavi inclinati rivolti verso i quattro lati di imposta della volta.

5- Il Palazzo dell'Anagrafe di Voghera e "l'arco armato"

Si tratta di un palazzo del 1700 in cui una grande volta a sesto ribassato a piano terreno ha manifestato un cedimento di oltre 15cm a causa della demolizione di un sottostante muro di tamponamento su cui evidentemente la volta si era nel tempo appoggiata.

La sala coperta dalla volta presenta dimensioni di 7x15 m ed ai due piani superiori sono presenti sale di dimensione analoga, divise da tramezzi in mattoni pieni.

Il Palazzo è adibito ad Ufficio Anagrafe e, benché puntellato, risulta aperto al pubblico.

Il progetto di consolidamento, in fase di ultimazione, prevede una soluzione apparentemente originale, denominata per semplicità "arco armato", in grado di ridurre al minimo i tempi di intervento e di operare dall'intradosso della volta stessa. / 8 /

La soluzione, anticipata in / 9 / per un diverso contesto, prende le mosse da una semplice constatazione: il meccanismo di collasso degli archi e delle volte evidenzia sempre la formazione di un numero di cerniere pari almeno a quattro, che manifestano una apertura "alternata" delle fibre di estradosso e di quelle di intradosso.

Se si fosse in grado di impedire almeno una tra le due famiglie di cerniere (quelle che implicano fessure delle fibre superiori oppure di quelle inferiori) la struttura non potrebbe diventare ipostatica e quindi non arriverebbe a collasso per cinematiso.

La soluzione proposta pertanto consiste nell'apporre all'estradosso dell'arco o della volta una serie di tiranti pretesati o di fascie resistenti a trazione, in grado di impedire la formazione delle fessure di estradosso.

Una tale operazione implica evidentemente la rimozione totale o parziale del materiale di riempimento e risulta quindi particolarmente vantaggiosa nel caso di assenza di tale materiale come nel caso di archi o volte di copertura.

Nel caso esaminato del Palazzo di Voghera il progetto prevede una soluzione duale, vale a dire la predisposizione di una serie di tiranti inox posizionati all'intradosso della volta e fissati alla muratura mediante tasselli in acciaio.

In tal modo sono le fessure di intradosso a non potersi formare e l'effetto ottenuto è analogo.

Al fine di valutare la validità della soluzione proposta si sono effettuate una serie di prove su modelli in legno a scala ridotta / 10 / e sono in corso prove su modelli in muratura, a scala più grande.

I risultati finora ottenuti sono molto incoraggianti e vengono descritti in dettaglio in / 8 /.

Con il modello di arco in legno di luce 60 cm e spessore 5 cm, l'uso di un semplice tirante disposto all'estradosso, di resistenza a trazione pari a soli 0,86 daN, ha portato a carichi di collasso molto

Lorenzo Jurina

elevati e compresi tra 5 e 10 volte quelli ottenuti in assenza del tirante, a seconda della posizione del carico accidentale.

La soluzione con tirante intradossale, nelle medesime prove, è risultata meno efficiente ma tuttavia significativa, ed ha comportato un incremento del carico di collasso tra le 3 e le 6 volte.

Obiettivo della nuova soluzione proposta (denominata "arco armato") è pertanto l'uso di tiranti metallici di estradosso o di intradosso rispetto ai quali la volta in muratura può essere contrastata in direzione perpendicolare alla generatrice, mediante elementi distanziatori opportunamente interposti (i quali lavorano a compressione nel caso di tiranti estradossali e lavorano a trazione nel caso di tiranti intradossali).

Per validare la soluzione, a fianco di analisi numeriche e di prove in scala ridotta, sono in corso prove di carico su modelli di arco in mattoni di luce 200 cm che simulano una porzione della volta.

6- Il Palazzo Olevano di Pavia e "lo stendibiancheria"

Questa realizzazione, terminata nel 1995, riguarda il rinforzo di un solaio di Palazzo Olevano, un edificio seicentesco di Pavia, attualmente adibito a scuola media superiore. Il solaio aveva già subito un rifacimento agli inizi del secolo con una classica soluzione in travi metalliche e laterizi forati, sagomati ad arco.

Fenomeni locali di sfondamento di alcune piastrelle hanno imposto una verifica del solaio che è risultato troppo poco resistente e soprattutto troppo flessibile per gli usi cui attualmente era destinato.

Nell'esempio precedente delle volte di palazzo Cattaneo, la soluzione più ovvia appariva quella di un intervento dall'intradosso, ma come illustrato si è rivelato più conveniente un intervento dall'estradosso.

Qui la proposta più ovvia appariva quella di aggiungere al di sopra del solaio esistente una cappa collaborante, resistente a compressione, da far lavorare in parallelo con i da travetti in acciaio.

La necessità di conservare il pavimento, dettata da ragioni prevalentemente economiche, ha fatto invece propendere per un intervento diverso. Si è aggiunta così al di sotto del solaio una sorta di struttura reticolare spaziale collaborante, in grado di sgravarlo parzialmente dai carichi e da farlo funzionare non più solo a flessione, ma a presso-flessione.

La soluzione adottata molto semplicemente si compone di tiranti che scendono dalle estremità delle travi (i-1) ed (i+1) per convergere verso un puntone metallico solidale con la trave i-esima.

Dopo aver saldato le estremità dei tiranti alle travi metalliche è sufficiente allungare il puntone, telescopico, per mettere in trazione le barre e quindi sgravare parzialmente il solaio. I cavi, totalmente a vista, si intrecciano tra loro creando un interessante effetto tridimensionale, che lo fa assomigliare, come lo definiscono con simpatia gli studenti del liceo, ad uno "stendibiancheria".

La soluzione proposta si è rivelata particolarmente vantaggiosa da un punto di vista economico e sufficientemente gradevole tanto che non è stata realizzata la controsoffittatura, inizialmente ipotizzata.

7- Il Castello Visconteo di Pavia ed il "tirante ottagonale"

Il grande edificio del 1500 costruito a Pavia dalla famiglia Visconti presenta oggi, dopo molte vicissitudini, tre lati residui e due torri di spigolo, elementi peraltro ripetutamente restaurati e modificati.

Agli inizi del '900 la Torre su Sud-Ovest presentava un notevole degrado, con fessurazione e depressioni significative della grande volta a vela del primo piano.

Nel 1925, su progetto dell'Annoni, è stato completamente rimosso il materiale di rifianco e di pavimento lasciando alla volta il solo compito di sopportare il proprio peso proprio.

Lorenzo Jurina

Al di sopra della volta è stato realizzato un solaio in c.a., irrigidito da travi di nervatura incrociate ogni 200 cm circa, allo scopo di reggere i carichi accidentali.

Per maggior prudenza (così almeno sembrava!) la volta in muratura è stata appesa al solaio in c.a. mediante venti barre metalliche, di lunghezza variabile tra 300 e 1500 mm e diametro 30 mm.

Dopo molti anni di solaio lasciato al rustico, solo nel 1995 si è proceduto ad una pavimentazione definitiva con piastrelle in gres e abbondante sottofondo cementizio.

Pochi mesi dopo il pavimento si è sollevato repentinamente staccandosi dal sottofondo e fessurandosi in modo diffuso. Evidentemente era intervenuto un fenomeno di cedimento viscoso del solaio in c.a. sottoposto a carichi permanenti di notevole entità che, abbassandosi, aveva chiamato ad una funzione strutturale il pavimento stesso, sottoponendolo ad un inaccettabile carico di punta nel suo piano.

A riprova di questa ipotesi, una ispezione nel vano compreso tra la volta ed il solaio rivelava che una parte dei 20 tirantini metallici verticali "di sicurezza" (quelli più lunghi) si erano anch'essi instabilizzati per carico di punta ed una parte del peso del solaio in c.a. gravava ora sulla volta.

La prima operazione è stata quella di modificare il vincolo superiore dei tirantini, trasformandolo da "cerniera" a "carrello monolatero", consentendo loro così di lavorare solo a trazione e non a compressione.

La seconda operazione ha comportato la realizzazione di una struttura di contrasto in tiranti di acciaio inox inserita nello spazio libero tra volta e solaio.

Il problema da superare era rappresentato dall'esiguo spazio di soli 27 cm esistente in chiave tra la volta ed il solaio, che non consentiva di introdurre strutture di sufficiente altezza strutturale.

Si è proposta pertanto una soluzione in grado di aggirare, nel vero senso della parola, l'ostacolo.

In altre parole un tirante a forma di "anello ottagonale" di diametro 500 cm circa, in barre di acciaio inox, posto concentricamente alla volta ma ad una quota inferiore alla chiave, verso cui convergono otto tiranti inclinati provenienti dai bordi superiori del solaio in c.a.

Dai vertici dell'anello ottagonale sorgono poi otto puntoni verticali telescopici, sempre in acciaio inox, che trovano contrasto superiormente sul solaio in c.a.

Una adeguata regolazione delle spinte applicati dai puntoni telescopici ha consentito di trasferire il 70% del peso permanente del solaio alla nuova struttura in acciaio, lasciando al più rigido solaio in c.a. il compito di assorbire i carichi accidentali di breve durata.

La struttura così realizzata non è a vista ma una botola predisposta nel nuovo pavimento, realizzato non più con piastrelle ma con leggere e flessibili tavole di rovere, consente una facile ispezionabilità.

8- La Cripta del Santuario del Sacromonte a Varese e "la rete strutturale"

Un problema che ha alcuni punti in comune col precedente si è presentato recentemente nel progetto di consolidamento della cripta del Sacromonte di Varese.

L'attuale santuario è stato costruito nel 1600 sui resti di una preesistente chiesa, di cui è sopravvissuto il solo chiostro ipogeo che risale all'anno 1000.

Si tratta di un prezioso locale di 6x6 metri, con un lato arrotondato, finemente affrescato e coperto da nove volte a crociera di piccole dimensioni, poggianti su quattro esili pilastri centrali in pietra.

Il primo altare in legno realizzato sopra al chiostro, è stato sostituito nel 1700 da un imponente altare in marmo, di peso approssimativo pari a 70 tonnellate.

Il rinforzo dei pilastri centrali con un incamiciamento in muratura non è stato sufficiente a limitare i danni alla cripta e negli anni '30 si sono poste in opera due travi in acciaio, sostenute da sei tozzi pilastri in muratura che, pur salvaguardando la staticità delle volte, deturpano la cripta e ne impediscono una visione d'insieme.

Lorenzo Jurina

L'obiettivo progettuale proposto è quello di rimuovere le travi ed i pilastri, senza tuttavia pregiudicare la sicurezza delle volte e del soprastante altare.

Nessuna nuova struttura può naturalmente essere alloggiata nella cripta e nemmeno apparire a vista all'interno del soprastante santuario: resta pertanto solo il ridottissimo spazio, di 60 cm circa, disponibile tra la base dell'altare e l'intradosso delle volte della cripta.

Ovviamente qualunque sia la scelta delle strutture di rinforzo, queste non possono comportare alcuno spostamento né alcuna manomissione dell'altare.

Si è proposta allora una prima soluzione che consiste nel realizzare una "rete strutturale" in cavi inox post-tesati al di sotto dell'altare. In altre parole si realizza anzitutto attorno all'altare un anello di contrasto in cemento armato, di forma circolare, al di sotto del pavimento, con un diametro di 7 metri, tale da fuoriuscire dai confini della cripta.

Si eseguono successivamente delle iniezioni di consolidamento dell'intercapedine tra cripta e altare ed in questo spazio, con un utensile a rotazione a testa orientabile, controllato con rilevatori magnetici, si realizzano delle perforazioni di piccolo diametro (70 mm) ad andamento parabolico, con una monta di 40-50 cm.

Nelle gallerie così ottenute si introducono cavi in acciaio inox, protetti da una guaina, che vengono poi tesati, trovando contrasto sull'anello in c.a.

Questa soluzione, benché tecnicamente realizzabile, comporta un uso delle attrezzature di scavo secondo modalità che non sono mai state sperimentate in precedenza e si è preferito allora analizzare una soluzione alternativa che mantenesse tuttavia le stesse caratteristiche, vale a dire (1) l'utilizzo della sola fascia di terreno tra altare e cripta, (2) la esecuzione per piccoli cantieri ripetuti, in modo da poter monitorare i risultati via via raggiunti, e da ultimo (3) la possibilità di un intervento di tipo attivo, ossia capace di effettuare un trasferimento di carico tra la vecchia e la nuova struttura di supporto, prima delle demolizioni dei pilastri in muratura.

Dopo un consolidamento del terreno mediante iniezioni di malta idraulica, si è prevista allora la realizzazione di dieci perforazioni orizzontali di diametro 300 mm in ciascuna delle quali viene poi introdotto un tubo in acciaio inox di lunghezza 6 metri, diametro 273 mm e spessore 7 mm, diviso in tre spezzoni giuntati.

Dopo la posa di ogni tubo, questo viene solidarizzato al terreno circostante mediante iniezioni di riempimento dell'intercapedine.

Si realizzano poi due travi di appoggio in c.a., esterne al perimetro della sottostante cripta, in cui vengono inglobate le estremità dei tubi.

Durante la posa, all'interno di ognuno dei tubi da 273 mm vengono disposti due trefoli prestirati in acciaio zincato ad alta resistenza che sono sagomati in forma parabolica.

Al termine della posa in opera di tutti i tubi si procede alla tesatura progressiva dei trefoli, sotto monitoraggio continuo, contrastando sulle estremità dei tubi stessi.

I trefoli sono dimensionati per inflettere moderatamente verso l'alto i tubi in modo da fare assumere loro, al termine dell'operazione, l'intero peso dell'altare, scaricando così i sottostanti pilastri.

L'operazione di tesatura dei trefoli viene terminata alle prime avvisaglie di sollevamento globale dell'altare e solo a questo punto è possibile la rimozione delle precedenti strutture di sostegno.

Notiamo che il dispositivo descritto consente periodiche ritesature dei cavi, suscettibili di rilassamento.

Tutte le operazioni descritte, stante la delicatezza dell'intervento, vanno eseguite con estrema lentezza ed in controllo continuo di spostamenti.

Conclusioni

Gli esempi descritti, pur nella loro sinteticità, mostrano le possibilità e la grande flessibilità di uso degli elementi leggeri in acciaio, ed in particolare dei tiranti, nelle applicazioni del consolidamento strutturale.

Sono state presentate soluzioni con elementi a scomparsa, oppure totalmente a vista o parzialmente a vista; soluzioni passive, oppure soluzioni attive o soluzioni parzialmente attive; soluzioni in acciaio normale, oppure zincato a caldo o in acciaio inox, a secondo del grado di rischio che il loro utilizzo prospettava.

Molte sono le soluzioni rese possibili dall'apporto di materiali ed elementi strutturali leggeri ma va sottolineato che, tra tutte le possibili, la soluzione va ricercata in quella che riconosce la assoluta singolarità ed irripetibilità dell'opera monumentale. Questa priorità deve spingere il professionista ed il ricercatore alla individuazione di una scelta progettuale, ossia di un compromesso culturale, tecnico ed economico, capace di sfruttare nel modo migliore le risorse tecnologiche, gli strumenti di previsione e controllo ed i materiali disponibili, nel tentativo di consegnare al futuro, in condizioni dignitose, l'opera che gli è stata affidata.

Bibliografia

- 1 Jurina L., Bonaldi P., Rossi P.P., Indagini sperimentali e numeriche sui dissesti del Palazzo della Ragione di Milano, XIV Cong. Naz. Geotecnica, Firenze, 1980
- 2 Jurina L., The strengthening of Palazzo della Ragione in Milan, Structural Engineering, 22, 1994
- 3 Jurina L., Alcuni recenti sviluppi nella tecnica dei martinetti piatti, Conv. La meccanica delle murature tra teoria e progetto, Messina, 1996
- 4 Jurina L., Il consolidamento strutturale della Torre S.Dalmazio a Pavia, XV Conv.Naz. CTA, Riva del Garda, 1995
- 5 Jurina L., Il confinamento laterale delle pareti in muratura mediante tiranti inseriti nelle buche pontate, Conv. La meccanica delle murature tra teoria e progetto, Messina, 1996
- 6 Jurina L., Consolidacion estatica de edificios monumentales por medio de tirantes metalicos, III Congr. Int. Rehabilitacion, Granada, 1996
- 7 Breyman G.A., Trattato generale di costruzioni civili, Vallardi Ed., 1880
- 8 Jurina L., I tiranti metallici nel consolidamento degli edifici monumentali, Convegno CTA, Ancona, 1997
- 9 Bassani P., Bortolotto S., Jurina L., Sganzerla S., Dalla semplicità alla complessità: la diagnosi archeologica e il progetto di conservazione. Il caso di S.Giovanni Battista a Casciago (VA), Convegno di Scienza e Beni Culturali XII, Bressanone, 1996
- 10 Fumagalli C., Le catene nella progettazione e nel consolidamento strutturale di archi e volte, Tesi di laurea, Fac. di Architettura, Politecnico di Milano, relatore L.Jurina, 1996