

*C.T.A. Collegio dei Tecnici dell'Acciaio*

**GIORNATE ITALIANE DELLA COSTRUZIONE IN ACCIAIO  
RIVA DEL GARDA 15-16-17-18 ottobre 1995**

**IL CONSOLIDAMENTO STRUTTURALE  
DELLA TORRE SAN DALMAZIO A PAVIA**

Lorenzo Jurina

Dipartimento di Ingegneria Strutturale - Politecnico di Milano

**SOMMARIO**

Il consolidamento degli edifici monumentali a torre presenta usualmente problemi rilevanti di ordine sia concettuale che realizzativo. Questa situazione è particolarmente frequente negli edifici a torre, dove le scelte progettuali sono particolarmente condizionate dalla specifica geometria del manufatto, oltre che dalle sue condizioni statiche.

Risulta pertanto evidente la necessità di individuare criteri e metodi di intervento generali che siano agevolmente adattabili ai singoli casi, in grado di aumentare la sicurezza globale della struttura sia in termini di resistenza che di duttilità.

Nell'articolo si illustrano alcune modalità non tradizionali di intervento di consolidamento, adottate nella torre san Dalmazio di Pavia, una torre medioevale in mattoni, gravemente fessurata.

L'intervento comporta tre fasi: una iniezione diffusa di legante nella muratura, senza praticare nuove perforazioni; il confinamento laterale della muratura, mediante tiranti radiali; il trasferimento parziale dei carichi verticali dalla torre in muratura ad una nuova torre interna in acciaio.

**ABSTRACT**

The consolidation of monumental buildings often involves complex problems both from practical and conceptual points of view. This is the case, in particular, of tall brick masonry towers where the static requirements and the morphological conditions of the monument strongly affect the design.

General criteria, easily applicable to the specific cases are needed the aim of which is to increase the global safety of the structure, mainly in terms of its resistance and ductility.

In the paper an apparently novel consolidation procedure is proposed for medieval towers, which was firstly applied in the strengthening of the San Dalmazio Tower, in Pavia, Italy.

The main steps of the procedure consists of: uniform grouting of the masonry without coring of the walls; lateral confinement of the masonry through radial tendons; partial transfer of vertical loads from the ancient external masonry tower to a new inner steel tower.

## 1. INTRODUZIONE

L'interesse strutturale per gli edifici di valore storico si è manifestato in questi ultimi anni con la realizzazione di numerosi e qualificati interventi di consolidamento di edifici in mattoni ed in pietra e con il proliferare di ricerche e convegni sul tema. Sempre più frequente risulta l'adozione di elementi in acciaio negli interventi di consolidamento a causa delle sue caratteristiche di leggerezza, di resistenza e di duttilità che lo rendono adatto all'utilizzo in spazi limitati ed in grado di affiancarsi alla struttura esistente incrementandone la resistenza a collasso senza snaturarne gli schemi strutturali. / 1 /



*Fig.1 - La torre come si presenta oggi, al termine degli interventi di consolidamento, senza alcun elemento esterno tranne la gabbia di Faraday, installata in sommità.*

## 2. LO STATO DI FATTO DELLA TORRE SAN DALMAZIO

La torre, ubicata nel quadrante Sud Est di Pavia, in via Luigi Porta, si presenta inserita nel complesso seicentesco del Monastero di San Dalmazio, di cui attualmente resta solo la chiesa trasformata in palestra ginnica. (Fig.1)

La torre, realizzata con scopi civili alla fine dell'XI secolo, presenta una altezza di oltre 41 metri e dimensioni alla base di 4,90x4,85 m. Le dimensioni esterne restano sostanzialmente invariate mentre la larghezza del cavedio interno aumenta con l'altezza: lo spessore dei muri realizzati con muratura a sacco di mattoni in laterizio diminuisce infatti da 1,55 m alla base a 0,70 m in sommità.

Un notevole impulso hanno avuto gli studi sul comportamento degli edifici alti in muratura ( in particolare torri e campanili / 2 /) a seguito anche del tragico ed imprevisto crollo della Torre Civica di Pavia verificatosi nel marzo del 1989. / 3 /

Accanto ai metodi di verifica elastica e non elastica della struttura con modelli numerici bi e tri-dimensionali, si sono sviluppate tecniche di diagnosi e di interpretazione della risposta dinamica degli edifici in grado di fornire informazioni sul danneggiamento globale della struttura stessa. / 4 /

Dal punto di vista sperimentale, prove di laboratorio condotte su murature medioevali hanno evidenziato che compressioni di esercizio apparentemente tollerabili, dell'ordine di 1,5-2,0 MPa, possono risultare già eccessive per murature a sacco, quando siano legate da malte di mediocri caratteristiche meccaniche. / 3 /

Questa situazione è stata rinvenuta in varie torri pavese generando un giustificato stato di allarme che ha condotto in primo luogo ad un esteso monitoraggio delle torri medesime e, successivamente, alla decisione di intervenire sulle tre giudicate maggiormente a rischio, la Torre Fraccaro / 5 /, la Torre del Maino e la Torre S.Dalmazio.

Per quanto riguarda quest'ultima, che appariva ampiamente fessurata sulle quattro pareti, il Comune di Pavia ha affidato al prof. P.Colombo, dell'Università di Padova, ed allo scrivente l'incarico della diagnosi e del progetto di consolidamento strutturale.

Ne è nata la proposta, apparentemente originale, di inserire una torre metallica attiva all'interno della San Dalmazio, realizzando così un trasferimento di carichi da torre a torre.

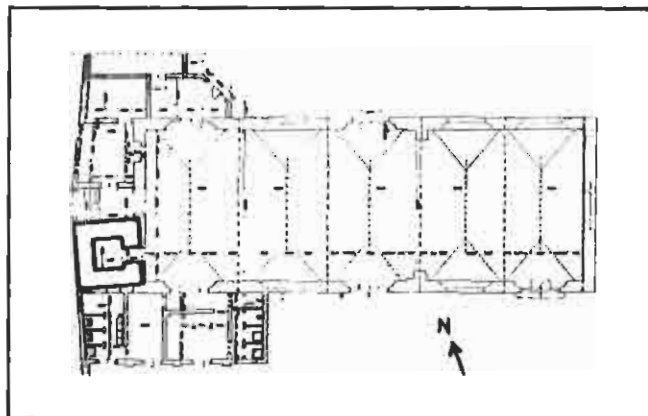
Nella pianta di (Fig.2) si illustra la posizione della torre che risulta leggermente ruotata rispetto all'asse della chiesa.

Le aperture sono disposte in modo irregolare lungo i lati: sul lato Ovest sono presenti attualmente quattro aperture, mentre due aperture interessano rispettivamente i lati Sud, Est e Nord.

Diverse altre aperture in breccia sono state praticate negli anni e successivamente tamponate.

La fondazione, costituita da un blocco in muratura a sacco di caratteristiche piuttosto scadenti e con vuoti consistenti, raggiunge quota -4,50 m e poggia su un terrazzamento formato da sabbie limose e limi argillosi interrotti da livelli argillosi di piccolo spessore. Nel complesso, dalle analisi in sito ed in laboratorio il terreno sotto alla torre risulta sufficientemente addensato, di bassa compressibilità e con buona resistenza a taglio.

Il blocco di fondazione è tuttavia molto vicino ad un condotto fognario romano in muratura, piuttosto dissestato ma ancora funzionante, che si spinge fino a 4 metri di profondità sul lato strada, ad Ovest della torre.



*Fig.2 - Pianta della Torre e della Chiesa di San Dalmazio*

La falda freatica si trova a circa 10 metri di profondità, ma è stata accertata a quota superiore la presenza di uno strato sabbioso limoso imbevuto di acqua proveniente dalla fognatura.

Tracce di percolazioni sono presenti anche all'interno del basamento della torre, fatto questo che ha destato non poca preoccupazione nella fase iniziale della diagnosi, accompagnato come era dalla evidenza di lacune nella muratura.

Il quadro fessurativo rilevato sulla muratura appare molto evidente: le principali lesioni si presentano con andamento verticale tra quota 8,00 e quota 17,00 m nelle pareti Est ed Ovest mentre hanno andamento inclinato tra quota 5,00 e quota 12,00 nelle pareti Nord e Sud.

L'interpretazione delle lesioni presenti verrà formulata dopo un breve resoconto delle vicende strutturali della torre.

### **3. I PRINCIPALI EVENTI STRUTTURALI DELLA TORRE**

I documenti più antichi che citano la torre risalgono al 1232, ma la costruzione della Torre medesima è certamente anteriore e può farsi risalire tra la fine dell'XI secolo e l'inizio del XII, contemporaneamente ad altre torri pavesi. / 6 /

Poco si sa fino al 1618, anno in cui accanto alla torre viene edificata l'attuale chiesa di S. Dalmazio da parte delle Sorelle dell'ordine di Sant'Agostino: un unico corpo rettangolare di 30 x 11 m, con volta a botte, diviso a

metà da una spessa parete a tutta altezza in una zona esterna aperta al pubblico ed una interna riservate alle monache.

La facciata Ovest della chiesa ingloba la Torre e contemporaneamente la porta di accesso alla medesima viene trasferita dal lato Ovest al lato Est. Le finestre sulle pareti della chiesa hanno ampiezza limitata.

Nel 1794, dopo la soppressione del Monastero, i locali della chiesa vengono adattati a scuderia: ciò comporta la demolizione della parete divisoria tra chiesa interna ed esterna e la apertura di due grandi finestre sui fronti dell'edificio.

Nei primi anni del 1800 vengono demoliti e ricostruiti alcuni locali adiacenti la chiesa.

In un documento del 1826 sul lato Nord la Torre risulta comunicante, mediante una nuova grande apertura, oggi tamponata, con un locale situato sopra l'atrio della chiesa.

Nel 1864 vengono effettuati ulteriori lavori in locali adiacenti la torre; tra gli altri viene demolita, e successivamente ricostruita, una parete addossata a Sud della torre.

Ancora sul lato Sud della torre viene praticata una apertura a scivolo di grandi dimensioni (2,20x 1,30 metri), per il carico e lo scarico del fieno dell'impresa foraggi.

Nel 1900 la chiesa viene adattata a palestra per attività ginniche: sui fronti Nord e Sud della chiesa vengono realizzate tre finestre ed una porta finestra, tutte di grandi dimensioni, per il collegamento con i campi sportivi all'aperto. Vengono inoltre demolite tutte le lesene di irrigidimento delle facciate longitudinali per migliorare la fruibilità dello spazio interno.

La volta a botte e la copertura, progressivamente private dei loro elementi irrigidenti, si appoggiano sempre più alla torre che ne costituisce un contrafforte.

In questa già precaria situazione viene costruito un locale spogliatoio in adiacenza alla torre a seguito del quale viene realizzata una nuova apertura in breccia nella parete Sud per accedere alla palestra... ed è la terza apertura praticata alla base della torre!

Tre lati infatti sono stati interessati da porte realizzate in periodi successivi, mentre su due lati (Sud e Nord) sono presenti varchi di oltre tre metri quadrati a quota 5 metri circa.

Ce ne sarebbe abbastanza per rinunciare ad ogni altro intervento, ma nel 1903 viene proposta la costruzione di un soppaleo all'interno della palestra a quota 10 m circa, così da realizzare una sala sopraelevata per pubbliche adunanze.

A quella quota, sulla parete Est della San Dalmazio, viene praticata una apertura in breccia per realizzare un piccolo locale interno alla torre, destinato a contenere "latrine et urinatorij".

Il progetto di modifica non viene portato a termine e, benchè manchino riscontri documentati, è possibile ipotizzare che la causa della repentina interruzione dei lavori sia riferibile alla formazione o all'allargamento delle lesioni oggi presenti sulle pareti Est ed Ovest, conseguenti ai successivi interventi praticati.

Dal 1974 al 1987 vengono realizzati lavori di ordinaria manutenzione sul tetto e sui soppalchi in legno della torre.

Nel 1989, immediatamente dopo il crollo della Torre Civica ed i primi accertamenti diagnostici, su sollecitazione della Commissione Tecnico-Scientifica del Ministero per il Coordinamento della Protezione Civile, presieduta dal prof.G.Macchi, il Comune di Pavia provvede tempestivamente a tamponare alcune delle aperture presenti sulle pareti.

La torre restava tuttavia in uno stato di precarietà e pertanto, dopo un approfondito esame delle alternative /7/ e le approvazioni da parte della Soprintendenza ai Beni Architettonici ed Ambientali e del Provveditorato alle Opere Pubbliche, agli inizi del 1994 si dà corso al progetto esecutivo.

I lavori vengono appaltati alla ditta STAR INTERNATIONAL, sotto la direzione tecnica dello scrivente e la direzione artistica dell'arch.F.Zaccheo. Oggi i lavori sono pressochè terminati e si prevede la riapertura della torre e della palestra nel settembre 1995.

#### 4. LE INDAGINI E LA DIAGNOSI

Le prime indagini eseguite sulla San Dalmazio, immediatamente dopo il crollo della Torre Civica, avevano la finalità di verificare le caratteristiche del terreno e del dado di fondazione.

Le indagini eseguite non hanno dato luogo ad allarmi dal punto di vista della sicurezza, malgrado le prove penetrometriche e le S.P.T. eseguite dalla ISMES prima e dalla RODIO poi abbiano fornito valori piuttosto ridotti di resistenza alla punta.

Più preoccupante è apparsa invece la situazione evidenziata dai carotaggi nel dado di fondazione dove si è constatata la presenza di numerose lacune e il percolamento dalla adiacente fognatura romana.

Tale situazione non si poteva evidentemente considerare accettabile e richiedeva sia un intervento di protezione mediante schermo di iniezioni tra la torre e la fognatura, sia un intervento di ripristino della continuità del materiale in fondazione, mediante iniezione di malte compatibili con la muratura esistente.

Entrambi questi interventi sono stati inclusi nel progetto di consolidamento.

Le prove sui mattoni e sulle malte sono state eseguite dal Laboratorio di Mineralogia e Petrografia applicata dell'Università di Pavia e dal Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano.

Sia le malte che i mattoni presentano caratteristiche chimico-fisiche praticamente assimilabili a quelle della Torre Civica, non per niente costruita nello stesso periodo, e sfortunatamente al limite della ammissibilità rispetto alle sollecitazioni di esercizio a compressione.

La misurazione delle tensioni in situ in tre posizioni della torre e la determinazione del modulo elastico della muratura è stata effettuata mediante la ormai collaudata tecnica dei martinetti piatti. I risultati ottenuti hanno consentito di determinare un valore medio del modulo elastico pari a 1500 MPa mentre non si dispone di valori sulla tensione di rottura a compressione semplice. La muratura si presenta molto simile a quella della Torre Civica e pertanto si può considerare attendibile un valore di 1,9 MPa.

Le prove sui paramenti esterni sono state realizzate in quota senza l'ausilio di ponteggi, imbragati a funi, con l'ausilio di esperti rocciatori.

Lo scrivente ha partecipato in prima persona alle prove calandosi dal tetto per una prima ricognizione ravvicinata della muratura e per il controllo, mediante percussione, degli eventuali distacchi del paramento murario esterno. Questa circostanza, fortunatamente, è stata rilevata solo in due zone piuttosto circoscritte, situate in sommità, le quali in passato erano state colpite da fulmini.

Il fatto è rilevante per le murature a sacco in quanto una potenziale modalità di innesco del crollo globale deriva dall'instabilità locale dei paramenti esterni, che usualmente hanno lo spessore di una testa e sono talora poco ammorsati alla muratura interna.

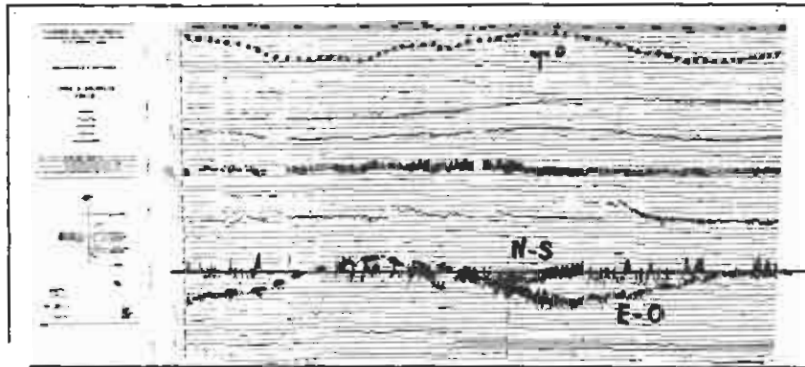


Fig.3 - Risultati parziali del monitoraggio sulla San Dalmazio

La muratura della San Dalmazio alle varie quote non presenta marcate discontinuità, come è stato riscontrato nei tre carotaggi eseguiti per verificare le caratteristiche dei materiali costituenti la struttura.

I carotaggi sono stati realizzati a secco per non solubilizzare eventuali sali presenti ed hanno rivelato, mediante sonde televisive, una muratura con presenza di malta in gran quantità, di ciottoli e di frammenti di mattone, interessata da frequenti cavità, da lacune e da microfessure.

Le apparecchiature per il monitoraggio della San Dalmazio, installate nel 1989 dall'ISMES contemporaneamente ad altre torri pavese, hanno fornito informazioni davvero preziose per la diagnosi della struttura.

La strumentazione consiste in un pendolo verticale che interessa tutta l'altezza della torre ed è letto alla base da un telecoordinometro, oltre a due inclinometri S-N ed E-O, quattro fessurimetri, due termometri ed un piezometro. I risultati ottenuti vengono riassunti nei diagrammi di ( Fig.3 ).

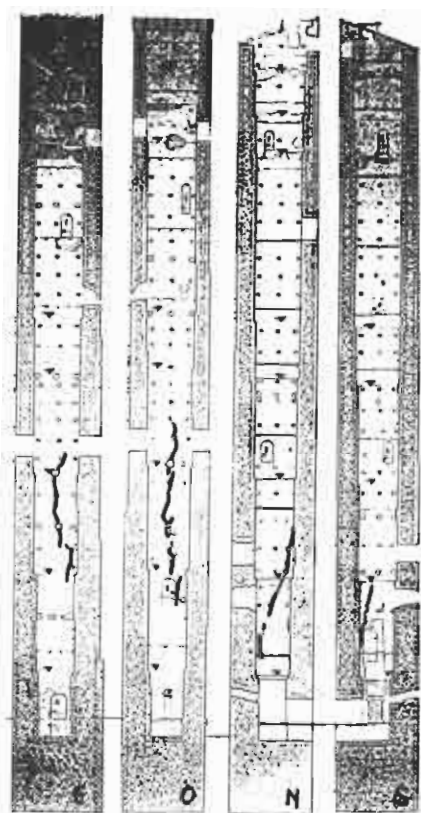


Fig.4 - Il quadro fessurativo rilevato sulle quattro pareti. E-O-N-S rispettivamente, da sinistra a destra

Dalla ( Fig. 4 ) si osserva che la fessura sulla parete Est inizia all'incirca alla base della nicchia scavata nel 1903 a quota 10m per mettere in comunicazione la torre ed il previsto soppalco della palestra.

La fessura, di spessore medio 10 mm, è passante e prosegue fino a quota 16 m propagandosi in direzione verticale attraverso alcune discontinuità del tessuto murario.

A testimoniare l'importanza attribuita dai progettisti al monitoraggio, sottolineo che tutta la strumentazione è stata mantenuta in funzione durante lo svolgimento dei lavori, nonostante le inevitabili difficoltà create al cantiere.

Tra i risultati principali si è constatata la scarsa influenza della variazione del livello di falda ed, all'opposto, la grande influenza della temperatura, soprattutto di quella stagionale.

Un dato a prima vista sorprendente era la forte differenza in termini di spostamenti della torre tra la direzione S-N e quella E-O, la quale seconda risultava circa cinque volte superiore alla prima.

La causa è stata attribuita alla spinta in direzione longitudinale (Est-Ovest) esercitata dalla volta in muratura della adiacente chiesa, a seguito delle escursioni termiche stagionali: d'estate infatti la torre viene spinta verso l'esterno, d'inverno ritorna in una posizione più verticale.

Il progetto esecutivo ha previsto di rimuovere, almeno parzialmente, la continuità tra la volta a botte e la torre, sconnettendo le due strutture mediante l'uso di una sega a nastro diamantato.

I risultati del monitoraggio, che contiamo possa proseguire almeno per un altro paio di anni, forniranno indicazioni sulla efficacia dell'intervento.

Data la allarmante presenza di fessurazioni su tutti e quattro i lati della torre (situazione questa che contraddistingue la San Dalmazio rispetto alle altre torri pavese) le prove e le misurazioni sopra descritte sono state precedute da un accurato rilievo della geometria della torre, che include naturalmente il quadro fessurativo.

La fessura sulla parete **Ovest** si presenta con un andamento verticale sostanzialmente analogo alla precedente, benché più frastagliato. Di spessore massimo 11mm, la fessura è passante e si estende fino a quota 17m, inglobando le due finestre che interessano questa facciata.

Le fessure sui lati **Nord e Sud** si dipartono anch'esse da aperture praticate nelle pareti a quota più bassa. Entrambe sono passanti, di spessore massimo 8 mm, e con andamento inclinato.

Dal punto di vista diagnostico la presenza delle due lunghe fessure verticali sulle pareti Est ed Ovest e delle fessure inclinate sulle pareti Nord e Sud, in una fascia intermedia della torre, risulta piuttosto inconsueta e di non immediata comprensione.

Riassumiamo tuttavia gli eventi strutturali più salienti:

- La chiesa viene addossata alla torre e due strutture spingenti ( la volta a botte ed il tetto costituito da puntoni privi di catena ) trovano appoggio sullo spigolo Sud-Est della torre.
- Viene demolito l'edificio che, a Sud, costituiva contrafforte per lo spigolo caricato.
- Vengono aperti numerosi ed estesi varchi in breccia nelle pareti della torre, dando luogo al potenziale innescò di fessure.
- Viene sistematicamente diminuita la rigidità delle pareti longitudinali della chiesa, a causa dalla apertura di ampie finestre sulle pareti, della rimozione delle lesene di irrigidimento e della demolizione della parete divisoria tra chiesa interna ed esterna.

In conclusione la torre è stata chiamata sempre più a far da presidio nei confronti di spinte orizzontali originate da una sfavorevole interazione con la struttura adiacente che spinge in direzione E-O per effetto della temperatura estiva, e che spinge in direzione N-S a causa dalla volta e della copertura carenti di adeguati contrasti.

Il quadro fessurativo globale è coerente con queste osservazioni e comporta, come conseguenza, che la torre non possa essere considerata monolitica nel suo comportamento resistente.

Una valutazione delle sollecitazioni sulla struttura, soggetta al peso proprio, al vento e alle azioni orizzontali sopra descritte ed interessata da tutte le aperture praticate nel tempo, porta a compressioni massime di circa 1,6 MPa ed a deboli trazioni localizzate alla base.

Tali valori risultano evidentemente eccessivi per la sicurezza della struttura ed hanno richiesto la definizione di interventi in grado di rimuovere le cause di sollecitazione ed inoltre tali da conferire nuovamente monoliticità alla struttura lesionata.

## 5. IL PROGETTO DI CONSOLIDAMENTO

Ogni progetto di consolidamento deve tenere conto della singolarità del caso in esame e, nei limiti del possibile, deve risultare poco invasivo e reversibile.

La torre San Dalmazio presenta tre caratteristiche geometriche particolari che hanno orientato le scelte progettuali:

- a) la presenza di aperture e di lesioni sui quattro lati,
- b) la presenza di un cavedio per tutta l'altezza della torre,
- c) la presenza di "buche pontate" passanti attraverso le pareti, in numero di 12 ogni 105 cm di sviluppo in altezza della torre.

Queste ultime sono tipiche degli edifici medioevali in muratura e venivano usate per alloggiare le mensole di supporto dei piani di lavoro, durante la costruzione oppure la manutenzione della struttura.

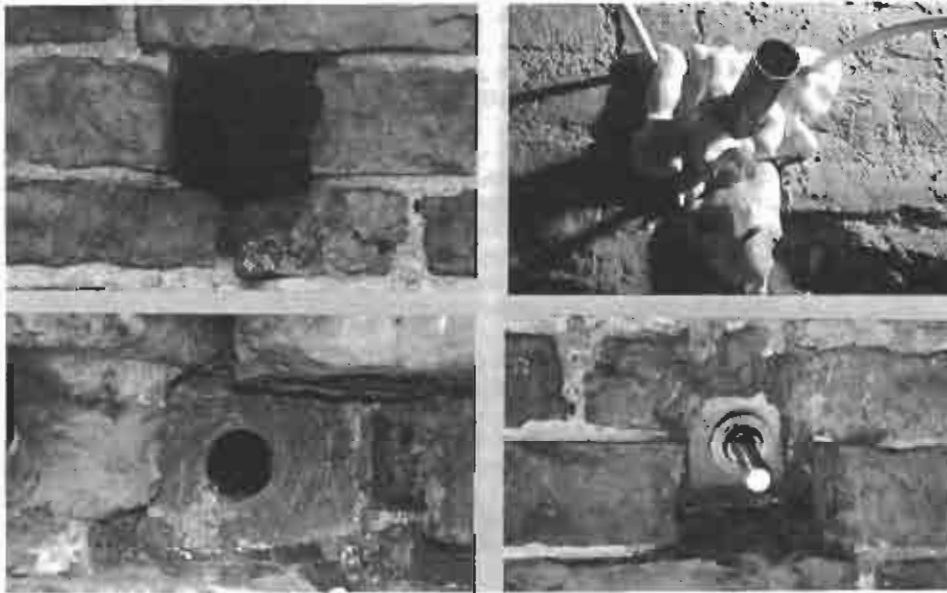
Il progetto di consolidamento proposto per la torre San Dalmazio prevede interventi che sfruttano le circostanze sopra ricordate e che si riferiscono a tutti e tre i parametri che caratterizzano ogni struttura, vale a dire i materiali, la geometria ed i carichi.

Relativamente ai materiali, la muratura si è rivelata di scarsa resistenza e caratterizzata da fessure e da lacune interne. Pertanto un intervento di iniezione diffusa, che utilizzi leganti compatibili con le malte ed i mattoni esistenti, avrebbe consentito di ottenere un miglioramento sostanziale.

La presenza delle buche pontaiè ha permesso di realizzare con estrema semplicità questa operazione senza praticare nuovi fori nelle pareti, ma limitandoci a sigillare accuratamente i giunti di malta e le fessure dei paramenti esterni, ed a tamponare provvisoriamente le buche pontaiè alle due estremità mediante una schiuma poliuretanicà facilmente rimovibile. (Fig. 5)

Con l'adozione di alcuni accorgimenti su cui torneremo in seguito ed effettuate le prove di compatibilità chimica tra i materiali, sono state pertanto riempite tutte le buche pontaiè, cominciando da quelle inferiori, con malta idraulica tipo Rurewall BI a ritiro compensato, caratterizzata da buona resistenza (12 MPa) ma limitato modulo elastico (circa 8000 MPa).

Mediamente si è osservato un assorbimento di 45 litri di miscela per ogni buca pontaiè, ossia un volume superiore al doppio di quello della buca stessa, il che comporta un adeguato riempimento delle lacune interne ed un arricchimento delle malte esistenti.



*Fig.5 - L'intervento sulle buche pontaiè. Si nota il riempimento con malta, il foro lasciato per introdurre il tirante, il piano di appoggio della piastra di contrasto e l'elemento di contrasto in acciaio INOX*

Riguardo agli interventi sulla geometria della torre, vanno fatte alcune osservazioni.

- La prima è che il parziale riempimento delle buche pontaiè ha uniformato l'area della sezione trasversale della torre, incrementando del 12% circa quella delle sezioni più ridotte.
- La seconda è che la sigillatura delle lesioni passanti modifica lo schema geometrico della struttura, riportandolo a quello precedente di struttura monolitica in materiale resistente a compressione.
- La terza osservazione è che in corrispondenza di ciascuna delle buche pontaiè è possibile disporre un anello interno (un "girello"), costituito da quattro profili UNP200 tra loro imbullonati, al fine di aggiungere dei vincoli interni alla struttura, rendendola così capace di resistere anche a sollecitazioni di trazione in direzione perimetrale.



La solidarizzazione del girello alla torre si ottiene mediante 12 tiranti orizzontali di diametro 18 mm, in acciaio inox AISI 316, inseriti all'interno delle buche pontae e successivamente posti in trazione ad un carico di 5000 daN. Durante il riempimento delle buche pontae infatti si è lasciato all'interno del getto un tubo passante in PVC, di diametro 42 mm, attraverso cui è possibile inserire il tirante.

Nel riempimento delle buche pontae si è adottato un secondo accorgimento: la parte più esterna, per gli ultimi 15 cm, non è stata riempita ma alla estremità del getto si è realizzata una superficie piana, mediante una cassetta provvisoria predisposta nella buca, perpendicolarmente al suo asse.

Su questa superficie piana appoggia una piastra in acciaio inox AISI 316, di dimensioni approssimate 10x15cm, su cui a sua volta si intesta il tirante inox. (Fig. 5)

La piastra ( che in questo modo risulta praticamente non percepibile dall'esterno!) contrasta sulla malta di intasamento della buca, la quale malta a sua volta è solidale alla muratura.

E' evidente che una piastra posta in opera 10-15 cm all'interno della muratura risulta meno efficace di una posta all'esterno della parete. L'intervento realizzato tuttavia è talmente diffuso ( un tirante ogni metro quadrato circa) che si è ritenuto sufficiente a confinare la muratura, conservando contemporaneamente integro l'aspetto esterno delle facciate, scandito ancora dal ritmo delle buche pontae.

All'interno di questo paragrafo dedicato agli interventi sulla geometria va sottolineato che i tiranti che passano attraverso le buche pontae hanno lo scopo di vincolare orizzontalmente i vari strati di cui è composta la muratura, e quindi costituiscono un nuovo vincolo geometrico.

Va aggiunto tuttavia che la trazione imposta ai tiranti ha altre due importanti funzioni.

- La prima è di creare uno stato di compressione triassiale nella muratura (mediante un confinamento orizzontale attivo) aumentando così la tensione verticale di compressione a collasso e la duttilità della muratura.

- La seconda, su cui torneremo, è di vincolare il girello alla muratura in modo diffuso, impedendo, per attrito, ogni movimento tra le due superfici a contatto.

Come si osserva, siamo arrivati alla terza modalità di intervento, quella che si riferisce ad eventuali modifiche da apportare ai carichi agenti sulla struttura.

La torre è palesemente soggetta a forze verticali ( il peso proprio) ed orizzontali ( vento, spinte esercitate dalle strutture adiacenti ).

Per quanto riguarda queste ultime, il progetto di consolidamento ne ha previsto la eliminazione, vuoi con l'aggiunta di due nuove catene per contrastare la spinta della volta, vuoi con l'intervento di un "taglio" trasversale tra i due corpi.

Per quanto riguarda invece il vento e la gravità sembra esserci poco da fare, ma sono proprio queste due cause a creare le forti compressioni alla base, fonti di preoccupazione per la sicurezza.

Non potendo eliminare le cause prime, se ne possono per lo meno ridurre le conseguenze effettuando un trasferimento parziale dei carichi ad un'altra struttura e diminuendo così le tensioni verticali alla base.

Si tratta insomma di inserire nel cavedio, fortunatamente libero da ingombri, una nuova struttura (una torre metallica) per effettuare un trasferimento parziale di carico, "da torre a torre".

Nel cavedio continuo, di dimensione minima 180x190cm, è stato installato un traliccio in acciaio Fe360 ed Fe430 composto da segmenti di sezione standard (HE200A, HE200B, UNP200) zincati a caldo e collegati in opera mediante bulloni, realizzato dalla COMES. (Fig. 6 )

Per la costruzione dei quattro fronti del traliccio vengono utilizzati elementi parzialmente assemblati. L'ingombro massimo in altezza è di 210 cm, sia per consentire l'accesso dalla minuscola porta a piano terra, sia per assecondare, con una struttura modulare, l'interasse di 105 cm pressochè costante tra le buche pontae.



*Fig.6 - Porzione inferiore del traliccio in acciaio, preassemblato in officina*

La messa in opera della torre metallica è stata realizzata senza alcuna interazione con la torre in muratura, in quanto tra la prima e la seconda esiste una intercapedine che si va allargando con l'altezza. Solo quando la torre metallica è terminata viene realizzato il collegamento tra le due strutture, mediante un elevato numero di barre inclinate ("pendini") in acciaio C40 zincato a caldo, di diametro 16 mm. Queste collegano i nodi del traliccio ai girelli solidali alla muratura e mediante un elemento tenditore vengono successivamente messe in trazione realizzando così il parziale trasferimento di carichi. ( Fig. 7 )

I pendini che, inclinati con varie giaciture, occupano l'intercapedine tra il traliccio e la muratura vengono tesati in più passate in modo da garantire che ciascuno di essi trasmetta una preassegnata quota di carico ( in media 400 daN) dalla torre esterna in muratura alla torre interna in acciaio.

Il carico globale che si intende trasferire dalla torre esterna a quella interna è pari al 12% del peso dell'intera muratura, ossia 120 tonnellate circa.

I girelli non possono scivolare rispetto alla muratura in quanto, come si accennava, sono vincolati ad essa per attrito dai tiranti che attraversano le buche pontate.

Alla data di presentazione di questo lavoro non è ancora stato completato il posizionamento e la tesatura dei pendini, che costituisce l'ultima fase dei lavori di consolidamento, e che è stata affidata alla SICEM.



*Fig.7 - Tiranti inclinati per il trasferimento dei carichi, inseriti nell'intercapedine tra la torre in muratura e la torre metallica*

Va osservato che prima di iniziare il posizionamento dei pendini sono stati installati 8 estensimetri elettrici disposti sulle quattro gambe della torre metallica.

Ciò consente di effettuare il monitoraggio in continuo della quotaparte di carico trasferito dalla torre esterna a quella interna, sia durante le fasi di tesatura, sia in seguito durante la normale vita del monumento. Il sistema di controllo messo in atto consente non solo di verificare ma anche, se necessario, di calibrare a piacimento l'entità dei carichi da trasferire e di modificarla eventualmente in tempi successivi, dopo aver ottenuto dati significativi sul comportamento globale della struttura.



*Fig. 8 - Il modello ad elementi finiti*

A completamento degli interventi di tipo strutturale è stata effettuata la pulizia, la sigillatura, il consolidamento e la impermeabilizzazione dei paramenti murari oltre alla messa in opera di una gabbia di Faraday, a protezione dai fulmini. La adiacente palestra e soprattutto la volta a botte ed il tetto sono state interessate da interventi di manutenzione.

A conclusione degli aspetti progettuali, va fatta menzione del modello agli elementi finiti utilizzato per la verifica della situazione originaria e della ipotesi di consolidamento mediante struttura mista acciaio-muratura. Il modello, predisposto in collaborazione con l'ing. G. Galloni, è piuttosto semplice ed opera in campo elastico lineare: elementi trave e asta simulano il traliccio, elementi piastra di spessore variabile simulano la muratura. Nel modello sono state introdotte le principali discontinuità rappresentate dalle aperture e dalle lesioni passanti, per la valutazione della sicurezza della struttura prima e dopo l'introduzione dei rinforzi. ( Fig.8 )

La duttilità globale della struttura mista acciaio-muratura risulta evidentemente superiore a quella della situazione precedente ed inoltre va osservato che le diagonali di controvento del traliccio costituiscono un utile presidio nei confronti dei carichi orizzontali quali vento o sisma.

All'interno della torre metallica resta uno spazio totalmente libero, di dimensioni 120x140 cm. Questo spazio è stato utilizzato per l'alloggiamento di un montacarichi in acciaio con sollevamento a cremagliera che si è rivelata un piano di lavoro estremamente utile sia in fase di montaggio che in fase di posizionamento e tesatura dei pendini. La piattaforma verrà mantenuta a lavori ultimati per consentire una agevole risalita per la manutenzione o per eventuali visite.

Nell'intercapedine tra le torri, in sommità, è stato costruito uno stretto ballatoio e sui quattro lati della torre sono state praticate una serie di piccole aperture ("canocchiali") per consentire la visione delle altre torri di Pavia, in una sorta di amichevole rimando.

Per completare la descrizione degli interventi di consolidamento strutturale va aggiunto che la torre in acciaio poggia su una piastra di fondazione in c.a. alta 40 cm, separata dalla muratura mediante una guaina bituminosa. Nella piastra a sua volta si intestano 12 micropali in acciaio, tipo TUBFIX, di diametro 75 mm che attraversano il dado di fondazione in muratura e si spingono fino a quota -12 m, scaricando in profondità i carichi trasmessi dalle gambe della torre metallica.

I micropali sono di tipo valvolato e ciò, dopo i necessari esami di compatibilità, ha consentito di iniettare nel dado di fondazione una miscela di legante cementizio a grana estremamente fine, denominato CEMILL, con l'obiettivo di colmare le lacune esistenti nella muratura.

Il modello è stato utilizzato anche per simulare l'effetto di variazioni termiche differenziali tra muratura e torre in acciaio, ciò che avrebbe potuto dare luogo ad inconvenienti nel comportamento globale della struttura mista. Stante la consistente differenza delle masse in gioco tra le due torri, la pur rilevante diversità del coefficiente di dilatazione termica tra i due materiali porta a variazioni dello stato tensionale che sono del tutto accettabili, rispetto ad una situazione termicamente in equilibrio.

Il modello ha consentito inoltre di identificare l'entità della spinta orizzontale E-O esercitata dalla struttura adiacente a causa delle deformazioni termiche contrastate dalla presenza della torre muraria. Tale forza andava infatti inserita come condizione di carico nelle successive verifiche di sicurezza.

Era noto, dal monitoraggio, lo spostamento massimo in sommità della torre alle diverse temperature stagionali ed è stato pertanto possibile ricavare quella forza che, applicata a metà circa della torre, fosse in grado di produrre proprio quello spostamento.

Il modello da ultimo, benchè sia molto semplice, consentirà di interpretare i risultati delle prove di caratterizzazione dinamica della torre. In sede di collaudo in corso d'opera sono state infatti misurate, da parte del prof. G.M. Calvi, le frequenze proprie della torre in muratura e le prove verranno successivamente ripetute sulla struttura mista acciaio-muratura per valutarne le differenze.

Il metodo della individuazione delle frequenze e degli smorzamenti modali di una struttura costituisce, da qualche anno, uno strumento estremamente valido per il controllo nel tempo della integrità statica globale di edifici monumentali ed è parso opportuno applicarlo anche nella San Dalmazio, in un caso che sembrava interessante per il non trascurabile apporto offerto dall'inserimento della nuova torre metallica.

## 6. I PROBLEMI DELLA REALIZZAZIONE

Il progetto esecutivo prevedeva una prima operazione di consolidamento diffuso del dado di fondazione mediante cuciture armate passive, realizzate con barre inox di lunghezza 4-5 metri.

L'intervento è stato sospeso dopo le prime due barre in quanto risultava estremamente difficile la perforazione dall'esterno a causa dei ciottoli presenti nella muratura con malta poco consistente. Questi infatti venivano solo parzialmente perforati e cominciavano a ruotare assieme alla sonda, realizzando una sorta di fresa.

La iniezione del dado di fondazione è stata realizzata allora approfittando della esecuzione dei 12 micropali di fondazione, opportunamente valvolati, che richiedendo un diverso utensile ed un foro di maggiori dimensioni, non presentavano il problema precedente.

Anche in questa operazione tuttavia, malgrado le specifiche di capitolato fossero molto severe e prevedessero una lavorazione a secco con apparecchiatura a sola rotazione, una percentuale inferiore al 3% della perforazione stessa ha dovuto essere realizzata con rotopercolazione.

Il monitoraggio in corso sulla struttura ci ha confermato sulla mancanza di conseguenze delle modeste vibrazioni indotte.

Le difficoltà incontrate nella perforazione hanno fatto tuttavia riflettere sui problemi che si sarebbero presentati nella struttura in elevazione se si fosse dato corso ad una diversa ipotesi di consolidamento strutturale che, avanzata in sede di progetto di massima, prevedeva la realizzazione di un reticolo di iniezioni armate passive, diffuso in altezza sulle quattro facciate della torre.

Una seconda difficoltà è nata quando si è trattato di predisporre le buche pontai per l'inserimento dei tiranti passanti. Il progetto prevedeva l'utilizzo di tubi rettangolari in acciaio inox resi solidali alle pareti della buca pontai mediante iniezioni di resina epossidica caricata.

Sull'estremità di questi tubi, di lunghezza 50 cm, si sarebbero appoggiate le piastre di contrasto dei tiranti, anche in questa soluzione quasi invisibili dall'esterno. In sede di esecuzione è apparsa evidente la estrema disomogeneità dimensionale delle buche e, contemporaneamente, la abbondanza dei vuoti nella muratura che avrebbe comportato l'uso di quantità eccessive di resina.

Si è optato allora per la già descritta soluzione con uso di malta idraulica a riempimento parziale delle buche con risultati estremamente interessanti in termini di facilità di esecuzione, di bonifica diffusa della muratura e

di contenimento dei costi, che dovevano globalmente risultare contenuti nell'importo massimo globale di 1300 milioni di lire, comprensivo delle opere di finitura e della manutenzione della palestra.

Unico problema degno di menzione è stato la necessità di un controllo assiduo dei paramenti murari durante le operazioni di iniezione in quanto, anche in zone non fessurate, si è osservata la fuoriuscita di miscela a distanza fino ad un paio di metri dal punto di inserimento, a conferma della presenza di cavità comunicanti nella muratura.

Solo nella zona inferiore della torre si sono dovuti praticare dei carotaggi di diametro 42 mm in quanto l'assenza di buche pontaiè non consentiva altre modalità di inserimento dei tiranti. Per la sigillatura si è utilizzata una miscela a base di resina epossidica caricata, denominata STARCEMENT 7.

Per quanto riguarda la torre metallica, la parziale prefabbricazione delle fiancate ha portato ad un buon contenimento dei tempi di costruzione. Non è stato usato in questa fase il montacarichi interno, come previsto, privilegiando invece la movimentazione di elementi assemblati delle dimensioni massime consentite dalla stretta e bassa porta di accesso alla torre.

La torre metallica è stata posta in opera dopo la predisposizione delle buche pontaiè ma prima della posa in opera dei girelli perimetrali, per questioni contingenti di produzione degli elementi in acciaio. Questo fatto si è rivelato fonte di difficoltà operative non trascurabili per le successive fasi di posa in opera.

A questo va aggiunto che, malgrado la già realizzata iniezione delle murature e la sigillatura delle lesioni, la posa immediata dei girelli avrebbe consentito una più tempestiva messa in sicurezza della torre, riducendo il transitorio.

Nessuna difficoltà ha presentato il posizionamento e la successiva tesatura mediante chiave dinamometrica dei tiranti passanti nelle buche pontaiè.

Su due tiranti sono state effettuate prove per valutare l'eventuale scorrimento della malta di riempimento delle buche pontaiè rispetto alla muratura.

I risultati sono stati decisamente confortanti, anche per carichi superiori ai 5000 daN di progetto.

Tra le barre in acciaio inox ed i girelli in acciaio zincato a caldo è stato interposto un sottile strato di separazione, realizzato in ertalon, per prevenire potenziali problemi di innesco di corrosione per contatto tra i due diversi materiali.

Va osservato tuttavia che l'ambiente all'interno della torre è sufficientemente protetto, e ci si è sforzati di conservare condizioni termo-igrometriche all'interno della torre simili a quelle presenti in precedenza. A questo proposito anche nel riempimento delle buche pontaiè si è prevista una soluzione che consente un seppur limitato passaggio locale di aria.

Il posizionamento dei pendini di trasferimento dei carichi ha riservato invece non poche difficoltà.

Anzitutto la torre metallica, a causa delle dimensioni del cavedio, non è centrata rispetto alle pareti e questo ha comportato la predisposizione di tiranti di diversa lunghezza.

In secondo luogo i tiranti si intersecano tra loro e questo dà luogo a difficoltà di posa in opera per evitare interferenze nella successiva operazione di tesatura.

In terzo luogo, in fase di progetto si è deciso di predisporre accanto ai pendini "portanti," ossia quelli destinati a trasferire carico verticale dalla muratura al traliccio, un analogo numero di pendini "stabilizzanti", con inclinazione inversa ai precedenti, destinati a rendere bilatero il collegamento tra la torre esterna e quella interna, così da renderle monolitiche sotto sollecitazioni di flessione indotte da forze orizzontali.

Il risultato strutturalmente è stato raggiunto ma il prezzo pagato è un infittimento forse eccessivo dei tiranti nella zona di intercapedine. In circostanze analoghe, dove l'intercapedine venisse a risultare particolarmente ridotta, la serie dei pendini stabilizzanti potrebbe essere evitata o ridotta.

Le operazioni di tesatura sono in fase di esecuzione ed è risultata evidente la necessità di procedere in più passate, in quanto il tiro applicato ai tiranti successivi modifica parzialmente quello applicato ai precedenti.

Di grande aiuto si sta rivelando la strumentazione applicata recentemente sulle gambe del traliccio che fornisce una informazione di tipo integrale sulla risultante dei carichi applicati alla torre.

Molto utili ed apprezzati dalle maestranze sono stati sia il montacarichi interno che un ponteggio mobile posizionato esternamente sulla parete Ovest.

## 7. CONCLUSIONI

Il progetto di consolidamento della Torre San Dalmazio a Pavia ha offerto la possibilità di esaminare sistematicamente varie modalità di intervento su edifici monumentali di grande altezza in precarie condizioni statiche, restando all'interno dei limiti imposti dal rispetto dovuto alla struttura e di quelli legati alle particolari condizioni statiche ed alla specifica geometria del manufatto.

Ne è nata una soluzione composita e per alcuni versi non tradizionale, dove l'intervento ha portato ad operare sulla geometria, sui materiali ed anche sui carichi agenti sulla struttura.

Il riempimento delle buche pontae con una iniezione diffusa delle murature, il confinamento laterale delle pareti mediante tiranti passanti, il trasferimento parziale di carichi ad una struttura parallela costituita da una torre metallica attiva interna al cavedio hanno consentito di far ritornare la torre ad un soddisfacente livello di sicurezza.

Le difficoltà incontrate hanno evidenziato come sia difficile riuscire a prevedere tutte le particolari situazioni che caratterizzano la struttura e come pertanto risulti indispensabile disporre di metodologie di intervento sufficientemente generali in grado di adattarsi ai singoli casi.

La soluzione presentata, frutto di applicazione ad un caso particolare, è risultata adeguata agli obiettivi proposti e pare suscettibile di ulteriori adattamenti rivolti a migliorare le caratteristiche di resistenza, duttilità e monoliticità di torri medioevali in presenza di buche pontae e di cavedio continuo.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- / 1 / - AAVV, "Rassegna di interventi di ristrutturazione in acciaio", Siderservizi, 1987
- / 2 / - Heymann J., "Leaning towers", *Meccanica*, Vol.27, n.3, 1992
- / 3 / - Binda L., Gatti G., Mangano G., Poggi C., Sacchi Landriani G., "La Torre Civica di Pavia, indagine sui materiali e sulle strutture", *L'Edilizia*, n.11, 1990
- / 4 / - Macchi G., Pavese A., "Identificazione dinamica di strutture monumentali", Seminario AICAP-Sperimentazione su strutture, Venezia 1993
- / 5 / - Guzzoni G., "Giulio Ballio: il consolidamento della Torre Fraccaro a Pavia", *L'Edilizia*, n.10, 1991
- / 6 / - Fisichella D., Ponti G., "La torre San Dalmazio a Pavia: indagini strutturali e tecnologia di consolidamento", Tesi di laurea, Fac. di Architettura, Politecnico di Milano, marzo 1991
- / 7 / - Jurina L., "La torre San Dalmazio a Pavia: storia di un progetto", Corso CIAS su Diagnosi e consolidamento delle strutture murarie, Milano, 1992

## RINGRAZIAMENTI

Fondamentale per l'esito dell'intervento è risultata la collaborazione che si è cordialmente instaurata con i responsabili delle varie attività e soprattutto con il geom. Inveraldi, l'ing. Gosio, il sig. Gritti, l'ing. Pogliani, il geom. Pasta, con l'ing. Galloni, con il DL artistico arch. Zaccheo e con l'ing. Vaccina, responsabile dell'Ufficio Tecnico del Comune di Pavia, che desidero ringraziare.