

LA TECNICA DELLA “TORRE NELLA TORRE”: DUE CASI A PAVIA

Lorenzo Jurina¹, Ferdinando Zaccheo²

¹ Politecnico di Milano- dip. ABC, lorenzo.jurina@polimi.it

² Architetto libero professionista, arch.zaccheo@libero.it

ABSTRACT

In the Middle Ages, Pavia was characterized by the presence of several masonry towers, hence the name of "city of one hundred towers". Some of them are still existing in the historic center, while many others failed or were demolished in the past centuries. Since 1989, when the collapse of the Civic Tower occurred, the municipality of Pavia started a huge program of analysis and verifications for all the survived towers, in order to evaluate their residual resistance and to prevent further collapses. Many monitoring and diagnostic campaigns were conducted by ISMES in the Nineties, to determine the mechanical properties of the masonry and the actual state of stress. Results showed poor characteristics of masonry, composed by two brick layers and a thick un-coherent inner core, and high levels of stresses. Structural evidences required some consolidation interventions for three towers (San Dalmazio, Maino and Fraccaro). In this memory two similar interventions realized by the authors on the tower of San Dalmazio and Maino are presented. The consolidation solution is called "tower in tower", and consists in the insertion of a steel truss tower inside the masonry one, connected to the perimeter walls through more than 300 steel stays. Such elements are able to transfer part of the self weight of the masonry to the inner steel truss, reducing the compressive stresses at the base. A relevant strength contribution of the steel tower is offered even in presence of horizontal loads such as wind and earthquake, as demonstrated by a FE numerical Model. Another interesting consolidation solution is here shown, that applies some new steel diatones inside the existing “scaffolding holes”, incrementing the tri-axial compressive strength and the ductility of the masonry.

Parole chiave/Key-words:

Masonry towers, structural consolidation, monitoring, numerical modeling.

Introduzione

Pavia è una delle molte città italiane chiamata anche “città dalle cento torri” per la presenza di numerosi edifici alti che ne caratterizzavano la skyline; oggi poche di queste torri sono conservate, parecchie sono in parte demolite o conglobate in edifici più recenti. Alcune torri sono pervenute ad oggi pressoché integre come le tre torri di Piazza Leonardo da Vinci e le due di via Luigi Porta.

La ricerca storica fa risalire la loro edificazione intorno al secolo XI; la loro origine probabilmente non è legata a motivazioni di carattere prettamente difensivo: ciò sarebbe incoerente sia con la loro ubicazione centrale nell’ambiente urbano, ben all’interno delle antiche mura cittadine, sia con le loro caratteristiche geometriche (molto alte e snelle, prive di un basamento fortificato) e quindi poco attrezzate per l’uso militare.

Le torri pavese ad oggi conservate presentano numerose somiglianze.

Tra queste, la struttura tronco piramidale, caratterizzata da poche e irregolari aperture e il vuoto della canna interna che tende ad aumentare verso l’alto, dualmente alla riduzione dello spessore delle murature. Il paramento esterno è caratterizzato per tutta l’altezza dal ritmo regolare delle *buche pontai*e, con scansione ritmica di tre per ogni lato, a passo costante. Le buche pontai testimoniano il procedimento costruttivo adottato per l’edificazione di strutture in muratura caratterizzate da un’altezza considerevole. La realizzazione avveniva per fasi successive, con la sovrapposizione di strati di muratura di altezza compresa tra 90 e 110 cm; a presa avvenuta, nelle buche pontai (ricavate in precedenza, durante la realizzazione delle pareti) potevano trovare alloggio le mensole lignee sulle quali veniva poggiata un’impalcatura con funzione di ponteggio mobile, utilizzata per la realizzazione dello strato successivo.



Figura 1 - Estratto della pianta in alzato di Pavia del 1599

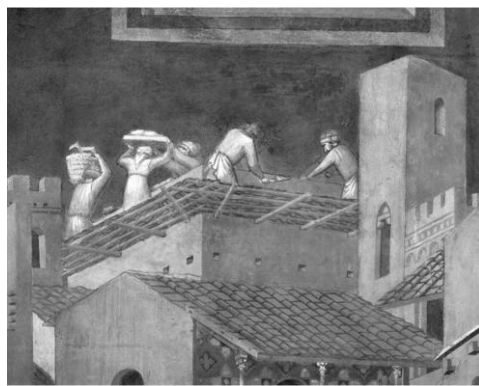


Figura 2 – Dettaglio da “Effetti del Buon Governo in città”, 1338-1339, Sala della Pace, Palazzo Pubblico, Siena

La struttura muraria è realizzata “a sacco” con due paramenti di mattoni e il riempimento è composto da ciottoli, embrici e mattoni spezzati legati da abbondante malta di calce. I mattoni esterni presentano dimensioni medie di 25 x 8 x 14 cm, sono molto duri e cotti ad alta temperatura. Sembra siano stati appositamente preparati per le torri in quanto non se ne riscontrano di simili in altri tipi di edifici. La disposizione dei mattoni in cotto è a strati paralleli; sugli spigoli, per garantire un buon ammorsamento dei muri, sono spesso impiegati mattoni più larghi e più spessi, di forma pressoché quadrata. Le fondamenta, infine, costituite anch'esse da spesse murature a sacco di profondità variabile, oltre che in corrispondenza dei muri, si prolungano anche sotto il vuoto interno sino ad occupare l'intera superficie.

A seguito del crollo della torre Civica di Pavia, avvenuto repentinamente il 17 marzo 1989, iniziarono gli studi per comprenderne le cause dell'evento i quali evidenziarono che le sollecitazioni in essere nella muratura erano prossime ad una situazione di collasso, seppur in presenza di valori assoluti non elevati. [1 e 2]

Le scarse caratteristiche meccaniche della muratura a sacco, aggravate da un prolungato degrado del materiale, hanno condotto al crollo sotto sollecitazioni nell'ordine di 1,5-1,8 N/mm².

Venne intrapreso, quindi, un percorso di conoscenza sulle torri cittadine, attraverso un'intensa campagna di monitoraggi ed indagini, affidati all'ISMES, al fine di stabilire il grado di sicurezza statica e lo stato generale di conservazione di questi edifici storici.



*Figura 3 - Torre San Dalmazio,
vista del fronte meridionale*



Figura 4 - Torre del Maino

La prima torre su cui si operò a Pavia fu la Torre Fraccaro, il cui consolidamento di estrema urgenza fu affidato al prof. Giulio Ballio e fu ultimato in soli tre mesi.

Negli anni immediatamente successivi, la **torre San Dalmazio** risultò anch'essa necessitare di un intervento di messa in sicurezza, sia a causa delle condizioni al limite del collasso dovute ai carichi sulla muratura, sia a causa del consistente quadro fessurativo, con lesioni passanti accompagnate da molte lacune nelle murature e nel dado di fondazione.

Subito a seguire, anche nella **torre del Maino** si palesò un marcato degrado delle murature, caratterizzato per lo più da micro fessurazioni alla base, dovuto alle differenti caratteristiche fisiche del paramento in mattoni e del riempimento in conglomerato.

L'intervento, chiamato "torre nella torre", proposto e realizzato da uno degli autori per la torre san Dalmazio, è stato poi applicato anche alla torre del Maino, grazie alle caratteristiche delle due torri, simili per geometria e materiali.

Il consolidamento aveva tre obiettivi fondamentali :

1. ripristinare la continuità della muratura, venuta a mancare con la formazione di fessure e la presenza di lacune sul paramento e sul basamento;
2. migliorare la resistenza a compressione della muratura (e dell'intera torre), caratterizzata da un basso modulo elastico e da un ridotto carico di rottura;
3. ridurre il carico gravante sulla torre in muratura.

Sulla base di queste esigenze sono stati proposti altrettanti dettagli progettuali che sono confluiti in un unico sistema di consolidamento, in grado di migliorare globalmente il comportamento delle torri.

Contenimento mediante barre passanti nelle "buche pontaiè"

La torre San Dalmazio, come molte torri coeve, venne realizzata, per tutta la sua altezza, con l'ausilio di *buche pontaiè*, disposte radialmente rispetto all'asse centrale e poste su livelli orizzontali. La presenza di questi pertugi su tutto lo sviluppo delle facciate e la loro scansione pressoché regolare (circa 1 ogni 1,75 m² di facciata esterna), ha evitato ulteriori bucatore per il posizionamento di *diatoni*, vale a dire tiranti trasversali in barra d'acciaio, utili a ristabilire il collegamento tra i tre strati che compongono l'apparato murario, ovvero i due paramenti esterni in mattoni e il riempimento interno. [3]

L'applicazione di una post-tensione alle barre trasversali (5000 daN) determina uno stato di compressione triassiale sulla muratura, aumentando il limite di collasso a compressione nonché la duttilità.

L'applicazione tradizionale dei tiranti ha implicato frequentemente l'uso di piastre esterne di contrasto, che tuttavia, possono alterare fortemente l'aspetto dei prospetti in muratura, come nel caso della Torre Fraccaro. [Figura 5 e 6]



Figura 5 – Torre del Maino(sx) e Torre Fraccaro (dx) a PaviaErrore. L'origine riferimento non è stata trovata.



Figura 6 – Dettaglio delle piastre di contrasto alla torre Fraccaro

Per il consolidamento delle due torri di Pavia, oggetto della presente memoria, abbiamo optato per una soluzione meno impattante, che lascia i prospetti esterni quasi inalterati. Le piastre di contrasto sono state infatti posizionate *in arretrato* rispetto al filo di facciata, così che, parzialmente occultate all'interno delle buche pontaaie, sono visibili da un osservatore esterno solo ponendo molta attenzione. Per garantire il contrasto tra le piastre e la muratura è stato realizzato il riempimento delle buche pontaaie con una malta idraulica microfine a ritiro compensato, mantenendo l'arretramento di 10 cm rispetto al filo esterno.

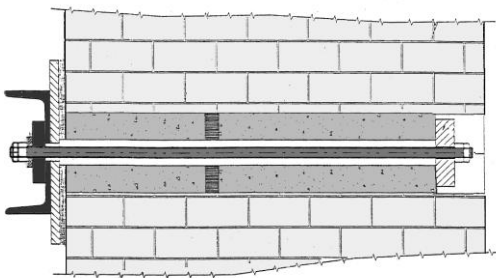


Figura 7 - Tiranti radiali inseriti all'interno delle buche pontaaie Errore. L'origine riferimento non è



Figura 8 - Piastra di contrasto all'interno di una buca pontaaia

stata trovata.

Nella scelta delle caratteristiche della malta sono state richieste :

- una elevata resistenza meccanica, per poter sostenere la forte compressione puntuale conseguente alla tesatura dei diatoni metallici;
- un basso modulo elastico, pari a quello della muratura della torre, in modo da ottenere l'effettivo e completo trasferimento delle azioni alla parete circostante.

Durante le fasi di riempimento delle buche pontae si è osservato un assorbimento di circa 45 litri di miscela per ogni buca, ovvero un volume pari al doppio della buca stessa. Ciò significa che una parte del materiale iniettato è stato assorbito dalla muratura circostante per intasare i vuoti presenti, il che costituisce un ulteriore vantaggio nel miglioramento delle caratteristiche meccaniche e di omogeneità della muratura.

I tiranti infine hanno un ulteriore scopo: essi servono per collegare la muratura ai cosiddetti *girelli* metallici, la cui funzione è illustrata nel paragrafo successivo.

“I Girelli”

La distribuzione pressoché regolare delle buche pontae, e quindi anche quella dei tiranti trasversali, disposti a livelli orizzontali, ha suggerito l'adozione di un ulteriore sistema di consolidamento.



Figura 9 - Girello metallico interno alla torre San Dalmazio



Figura 10 - Girelli metallici interni alla torre del Maino e giunto “a festoni”

Le estremità interne dei tiranti sono state collegate, per ciascun livello, da un profilo metallico UPN che corre sul perimetro interno della torre, e sul quale insistono le piastre di contrasto. Ne risulta la presenza di una serie di anelli

metallici, denominati “*girelli*”, paralleli tra loro, con frequenza pari a quella delle buche puntaie, che danno origine ad un sistema diffuso di cerchiatura interna della torre. Le buche puntaie della San Dalmazio erano più regolari di quelle del Maino. In quest’ultima si è dovuto progettare un giunto speciale, “*a festoni*”, posto ai quattro spigoli del girello, capace di compensare le differenze di quota dei diatoni. Il ruolo dei girelli è quindi quello di contrastare la dilatazione trasversale della torre e la riapertura delle lunghe fessure verticali che caratterizzavano le pareti. Di conseguenza, la presenza dei *diatoni* e dei *girelli*, post-tensionati, induce una benefica cerchiatura tridimensionale nella muratura e quindi ne incrementa la resistenza ultima a compressione. Va anticipato inoltre che il trasferimento di carico tra i quattro profili UPN e la muratura contro cui essi appoggiano (uno per lato, collegati tra loro con giunzioni bullonate regolabili) è garantito dall’attrito che si genera grazie al tensionamento dei tiranti inseriti nelle buche puntaie. L’attrito impedisce lo scorrimento relativo in direzione verticale tra le superfici a contatto.

La “torre nella torre”

Utilizzando il cavedio vuoto della canna della torre, completamente sgombero, è stato posizionato un traliccio metallico continuo (*una torre nella torre*) realizzato in profilati d’acciaio di produzione standard, con sezioni HE e UNP, zincati a caldo e assemblati in opera mediante bullonature. [4]

La torre metallica interna è stata realizzata in blocchi di lunghezza ridotta (max 2 metri), per garantire il passaggio di tutti gli elementi metallici attraverso la piccola porta d’ingresso.

In fase di esecuzione, la torre metallica è stata montata senza alcuna interferenza con la torre muraria in quanto tra di esse si è lasciata una intercapedine che si amplia, progressivamente verso l’alto, dovuto alla rastremazione delle pareti in muratura.

Una volta ultimata la torre metallica, si è proceduto al collegamento mediante pendinature, tra la torre in acciaio interna e la torre in muratura circostante.

Il collegamento è reso possibile dall’inserimento di circa 300 tiranti (*pendini*) realizzati in barre d’acciaio zincato con estremità filettate, che partono dai nodi delle torre reticolare, fino ad ancorarsi ai girelli di cerchiatura orizzontali.

I pendini di collegamento sono posizionati con andamento sub-verticale, variamente inclinati, e sono contenuti all’interno dello spazio tra il traliccio metallico e la muratura. Ultimato il loro posizionamento è stato possibile calibrarne la tesatura, effettuata mediante molteplici cicli a causa dell’iperstaticità del sistema, così che ciascuna barra trasferisca una pre-assegnata quota del peso dalla muratura al traliccio metallico.

Il carico trasferito al traliccio interno metallico è pari al 15% del peso dell’intera torre storica, riducendo così i valori massimi delle tensioni a compressione nella muratura, con beneficio per la sicurezza della torre.

Le tensioni alla base del traliccio metallico sono stati tenute sotto controllo mediante un monitoraggio realizzato con strain-gauges, sia durante la fase di tesatura dei pendini (per verificare il progressivo trasferimento dei carichi), sia nei mesi successivi, per il normale controllo in esercizio della struttura.



Figura 11 - Torre San Dalmazio

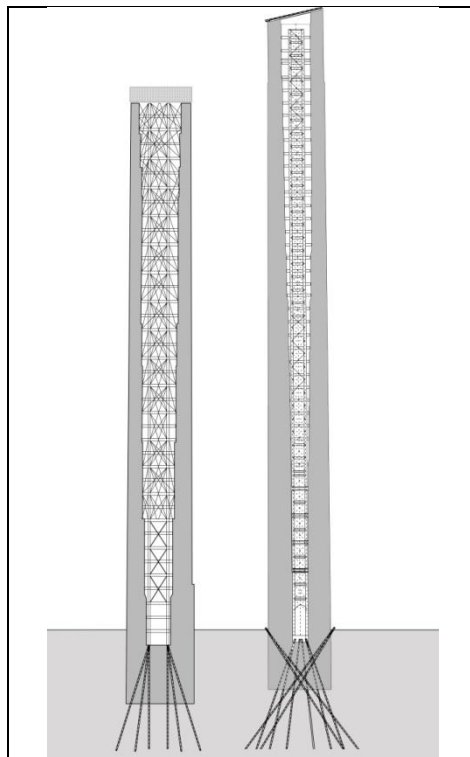


Figura 12 – Progetto di torre San Dalmazio (sx) e della Torre del Maino (dx)

La San Dalmazio presentava un cavedio più ampio e pertanto la torre metallica inserita ha dimensioni esterne 200x200 cm contro i 120x120 cm della Torre del Maino, dove il cavedio alla base era molto più angusto.

Ciò ha reso possibile l'installazione di un elevatore che consente di raggiungere facilmente ogni punto interno all'edificio, favorendo la accessibilità. Tale opportunità si è rivelata di primaria importanza, in quanto consente di effettuare un monitoraggio dello stato di salute delle murature, e, qualora lo si ritenesse opportuno, anche di regolare, modificandolo, l'intervento di consolidamento (tramite la tesatura dei pendini che vincolano la torre metallica alla torre muraria). La piattaforma elevatrice è stata utilizzata, durante le fasi lavorative, come piano di lavoro spostabile e, a lavori finiti, come mezzo di risalita per la manutenzione e per le visite periodiche di controllo.

Nella Torre del Maino invece, oltre alla minore ampiezza del cavedio, la presenza di ingombranti ed inamovibili diaframmi metallici (figura 9), inseriti in contemporanea all'intervento sulla Torre Fraccaro, non hanno consentito l'installazione dell'ascensore.

La validazione numerica

In entrambe le torri, la nuova struttura interna in acciaio contrasta gli sforzi orizzontali taglienti dovuti al vento e al sisma e favorisce la formazione di sezioni reagenti di tipo misto: si passa da una sezione di sola muratura non resistente a trazione, ad una sezione mista di muratura e acciaio, più resistente e più duttile.

Recentemente [5] è stata effettuata una modellazione numerica della torre San Dalmazio, al fine di verificare l'efficacia del sistema di consolidamento, sia nei confronti dell'azione verticale, sia in termini di miglioramento sismico.

Nella modellazione ad elementi finiti sono state simulate tre condizioni di esercizio.

- Condizione **originaria**, al 1200, ossia la torre in muratura, priva di fessure;
- Condizione **fessurata**, al 1993 (prima dell'inizio dei lavori);
- Situazione **consolidata**, con il riempimento delle buche pontate e l'inserimento dei diatoni, l'installazione dei girelli di cerchiatura ed il collegamento con pendini tra la torre muraria e la torre in acciaio.

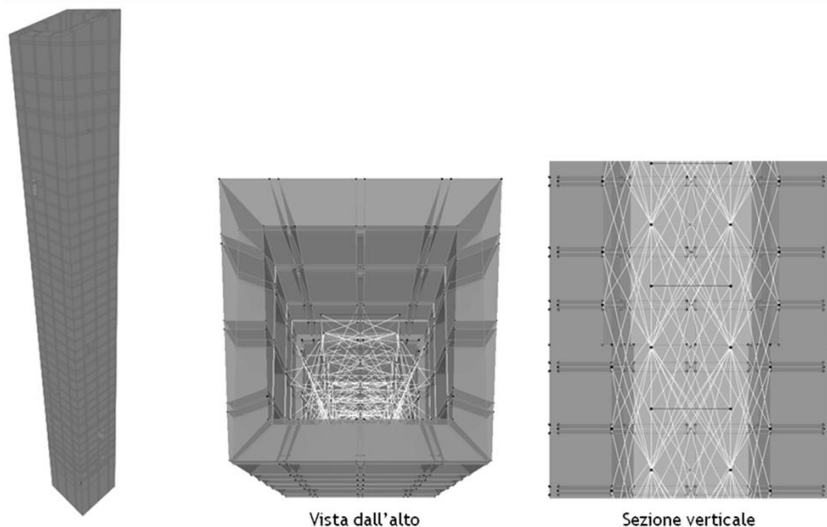


Figura 13 – Modello FEM della torre San Dalmazio con traliccio interno e pendini inclinati

Un primo modello numerico ha previsto analisi di tipo elastico lineare, utili per l'individuazione del comportamento dinamico globale della torre e per la valutazione degli stati tensionali nella muratura, compresi gli effetti di

confinamento dei diatoni inseriti nelle buche puntaie e delle variazioni termiche. Per la valutazione della resistenza globale a collasso è stato invece adottato un modello che tiene conto della non-linearità meccanica dei materiali.

Dalle analisi numeriche è emerso come il collegamento della torre muraria con la torre metallica abbia comportato una diminuzione pari al 12% delle sollecitazioni verticali di compressione gravanti sulla muratura ed un aumento del carico orizzontale globale di collasso pari a circa il 35%.

Il confinamento trasversale indotto nella muratura grazie al post-tensionamento dei tiranti metallici inseriti all'interno delle buche puntaie ha portato ad un notevole miglioramento della duttilità, facendo stimare un incremento del 40% della deformazione ultima di rottura rispetto alla situazione originaria non confinata.

I modelli FEM hanno inoltre confermato che la presenza di sollecitazioni termiche (variazioni di temperatura estive o invernali) non pregiudica la funzionalità e l'efficacia dell'intervento di consolidamento, il quale mantiene in ogni condizione i benefici indotti sulle condizioni statiche e sismiche della torre muraria.

Riferimenti bibliografici:

- [1] 1990: Binda L., Gatti g., Mangano G., Poggi C., Sacchi Landriani G., "La torre civica di Pavia: indagini sui materiali e sulla struttura", Edilizia, n.11.
- [2] 1990: G.M. Calvi, M.J.N. Priestley, Post collapse analyses of a medieval masonry tower, in: D. Abrams (Ed.), 5th North American Masonry Conference, Univ. of Illinois, Urbana - Champaign, Illinois.
- [3] 1996: Jurina L., Il confinamento laterale delle pareti in muratura mediante tiranti inseriti nelle buche puntaie, Conv. Naz. "La meccanica delle murature tra teoria e progetto", Messina
- [4] 1995: Jurina L., Il consolidamento strutturale della Torre S. Dalmazio a Pavia, XV Convegno Nazionale CTA, Riva del Garda, 1995
- [5] Marelli N., Il consolidamento strutturale della torre di San Dalmazio a Pavia, Tesi di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, rel. Lorenzo Jurina, A.A. 2009-2010, Politecnico di Milano.