

POLITECNICO DI MILANO



Scuola di Ingegneria Edile - Architettura
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

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

**Valutazione dell'efficacia dell'intervento in relazione
ai requisiti di resistenza al sisma**

Relatore: Prof. Ing. L. Jurina

Tesi di Laurea di

Nicola MARELLI Matr. 736205

Anno Accademico 2009-2010

Le virtù resistenti delle strutture che costruiamo dipendono dalla loro forma; è attraverso la loro forma che sono stabili e non a causa di un cieco accumulo di materiali.

Dal punto di vista intellettuale, non c'è nulla di più nobile ed elegante di questo: resistenza attraverso la forma.

Eladio Dieste

The Engineer's Contribution
to Contemporary Architecture

Indice

Prefazione	IX
Sommario	XI
Abstract	XII
Contenuto dei capitoli.....	XIII
Capitolo 1 La torre di San Dalmazio a Pavia	1
1.1. Le torri di Pavia.....	1
1.2. La torre di San Dalmazio: ubicazione e notizie storiche.....	5
1.2.1. Cronologia dei più importanti eventi con influenza strutturale	8
Capitolo 2 Tecniche di consolidamento di torri in muratura – esempi progettuali.....	13
2.1. Il Campanile dei Canonici della Basilica di Sant’Ambrogio a Milano	13
2.2. Il campanile della chiesa di San Martino a Burano.....	17
2.3. Il campanile della cattedrale di San Michele Arcangelo ad Albenga	20
2.4. La Torre Civica a Ravenna	22
2.5. La torre Fraccaro a Pavia.....	26
Capitolo 3 L’intervento di consolidamento strutturale sulla torre di San Dalmazio	30
3.1. Rilievo e diagnosi del dissesto statico.....	30
3.1.1. Indagini per la valutazione delle condizioni statiche della torre San Dalmazio..	30
3.1.2. La diagnosi del dissesto riscontrato.....	33

3.2.	L'intervento di consolidamento strutturale	35
3.2.1.	Il progetto preliminare	35
3.2.2.	Il progetto definitivo: l'intervento della "torre nella torre"	36
Capitolo 4 La modellazione agli elementi finiti.....		51
4.1.	Il modello globale della torre.....	51
4.1.1.	La muratura.....	53
4.1.2.	I tiranti e i giarelli	63
4.1.3.	Il traliccio.....	66
4.1.4.	Gli stralli.....	67
4.1.5.	I vincoli laterali.....	69
4.1.6.	L'interazione col terreno	70
4.2.	Il modello locale della muratura	72
Capitolo 5 Calcolo delle azioni sollecitanti		76
5.1.	Valutazione del carico indotto dal vento	76
5.1.1.	Velocità di riferimento	77
5.1.2.	Pressione cinetica di picco.....	78
5.1.3.	Azioni aerodinamiche di picco.....	83
5.1.4.	Azioni statiche equivalenti	87
5.2.	Valutazione dell'azione sismica	92
5.2.1.	Individuazione degli spettri di risposta	92

5.2.2.	Analisi modale con spettro di risposta	96
5.2.3.	Approccio agli spostamenti	98
5.3.	Valutazione delle azioni termiche	105
Capitolo 6 Verifiche della struttura		109
6.1.	Verifiche	109
6.2.	Verifiche al carico da vento	113
6.3.	Verifiche ai carichi termici	118
6.4.	Combinazioni vento - carico termico.....	135
6.5.	Verifiche alle azioni sismiche	139
6.5.1.	Verifiche a collasso	149
Capitolo 7 Analisi parametrica dell'intervento di consolidamento.....		160
7.1.	Effetti locali dell'inserimento dei tiranti radiali nelle buche pontaiè	160
7.2.	Effetti globali dell'intervento di consolidamento	198
7.2.1.	Peso proprio	198
7.2.2.	Proprietà dinamiche	200
7.2.3.	Variante progettuale	213
Conclusioni.....		218
Bibliografia		223
Indice delle figure		225
Indice dei grafici		230

Indice delle tabelle234

Prefazione

Nel marzo 1989, improvvisamente e inaspettatamente, la Torre Civica di Pavia, dopo quasi un millennio dalla posa della prima pietra – e vari interventi che ne hanno modificato l’assetto strutturale nel corso dei secoli – crolla. Quattro persone perdono la vita.

Nell’agenda pubblica diviene priorità fondamentale la verifica dello stato di salute delle numerose torri cittadine, tutte pressoché coeve alla Torre Civica, e che con essa hanno in comune i materiali e le tecniche costruttive adottate per la realizzazione.

Ha così inizio una vasta opera di controllo e monitoraggio, che porta all’identificazione di tre torri in cui il dissesto statico riscontrato – e la sua evoluzione nel periodo oggetto di osservazione – consiglia il rapido intervento di messa in sicurezza. Tra queste vi è la torre di San Dalmazio.

Il progetto di consolidamento strutturale della torre di San Dalmazio viene affidato congiuntamente al Prof. Ing. P. Colombo di Padova e al Prof. Ing. L. Jurina di Milano, che, alla luce delle rilevazioni effettuate nel primo anno di monitoraggio del fabbricato – siamo nel 1990 – elaborano un progetto preliminare di massima, che prevede un esteso utilizzo della comprovata tecnica delle iniezioni armate. In sede di progettazione esecutiva, tuttavia, in seguito anche alla migliore formulazione da parte della Soprintendenza dei requisiti di reversibilità e rimovibilità dell’intervento, emerge l’idea di un approccio innovativo al problema del consolidamento, che si concretizza nella proposta di realizzare nel cavedio interno della torre muraria una torre metallica, alla quale trasferire una parte dei carichi verticali (1992). Nel dicembre 1993 hanno inizio i lavori, che si protrarranno per quasi due anni, fino alla riconsegna della torre alla città nel settembre 1995.

Il dimensionamento dell’intervento si è basato sui risultati ottenuti da analisi condotte su di un

modello agli elementi finiti semplificato, che trascura taluni fattori di complessità presenti nella struttura reale.

Lo scopo primario della presente tesi è pertanto la validazione dell'intervento di consolidamento realizzato sulla torre di San Dalmazio, attraverso la definizione di un nuovo modello agli elementi finiti, di complessità superiore rispetto a quello adottato in sede di dimensionamento, con il quale valutare anche il comportamento al sisma della struttura (dato che questo tipo di sollecitazione non era stato preso in esame nella fase di progetto, coerentemente con le norme allora in vigore). Si vogliono dunque sfruttare le possibilità offerte dalla capacità di calcolo degli elaboratori odierni e dalle rinnovate conoscenze in ambito sismico, al fine di ottenere una più accurata verifica delle condizioni strutturali della torre di San Dalmazio.

Ulteriore obiettivo è la migliore comprensione degli effetti indotti sul fabbricato dai lavori di consolidamento, e quindi la formulazione di proposte concrete atte a correggere e migliorare le prestazioni degli interventi realizzati nella torre di San Dalmazio, ovvero l'elaborazione di soluzioni alternative a quelle adottate in grado di ottimizzare i risultati.

Sommario

La torre di San Dalmazio di Pavia, costruita nel XI secolo, è stata oggetto di lavori di consolidamento strutturale nei primi anni '90, in seguito ad indagini che ne avevano palesato la precarietà statica. L'intervento di messa in sicurezza ha previsto l'introduzione, all'interno della torre muraria, di una torre metallica a struttura reticolare, collegata alla costruzione esistente tramite una fitta rete di stralli post-tesi in acciaio. Le originarie buche pontaaie, presenti in maniera diffusa nelle quattro pareti della torre, sono state invece utilizzate per inserire tiranti post-tesi in acciaio, collegati reciprocamente da profili metallici disposti sul perimetro interno della torre in modo da realizzare un sistema di cerchiatura della compagine muraria invisibile dall'esterno. Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la valutazione dell'efficacia degli interventi adottati per il consolidamento della torre di San Dalmazio; particolare attenzione è stata riservata alla qualificazione della risposta dell'edificio alle sollecitazioni orizzontali generate dal vento e dal sisma. A tale scopo sono stati realizzati due modelli agli elementi finiti: un primo modello, che riproduce la torre nella sua intera geometria, ed un secondo che si riferisce invece ad una porzione ridotta di compagine muraria. Su di essi sono state condotte analisi di tipo elastico lineare, utili per la qualificazione del comportamento dinamico globale della torre e per la quantificazione degli stati tensionali presenti nei diversi casi di sollecitazione. Per la valutazione della resistenza globale di collasso è stato invece adottato un modello semplificato, nel quale si considerano le nonlinearità meccaniche dei materiali. I risultati delle analisi hanno confermato come l'opera di consolidamento portata a termine sulla torre di San Dalmazio ne abbia sensibilmente incrementato la sicurezza: la caratteristica fragilità della muratura è stata difatti contenuta grazie al confinamento dato dai tiranti inseriti nelle buche pontaaie, mentre la collaborazione con la torre metallica ha portato ad un notevole aumento della resistenza globale di collasso ai carichi orizzontali.

Abstract

The San Dalmazio tower of Pavia, built in the XI century, was restored in the early 90s because investigations had revealed its static instability. The strengthening intervention consisted in the introduction of a truss iron tower within the masonry tower, connected by a network of post-tensioned steel stays. The original scaffolding holes, that are widely present in the four sides of the tower, were used to place post-tensioned steel rods, linked together by steel channels arranged on the inner perimeter of the tower in order to establish a hooping system of the wall not visible from the outside. The main objective of this thesis has been the assessment of the actions taken to restore the San Dalmazio tower; particular attention was paid to the evaluation of the response of the building subjected to wind and earthquake excitations. For this purpose two finite element models were developed: the first one reproduces the tower in its entire geometry, while the second one refers to a small portion of masonry structure. The models have been used to conduct linear-elastic analysis, which were useful for the characterization of the overall dynamic behaviour of the tower and for the quantification of the stress states produced by the different load cases. To evaluate the global collapse strength was adopted a simplified model where are taken into account the nonlinear mechanical properties of materials. The analysis's results confirmed that the restoration of the San Dalmazio tower has significantly increased its safety level: masonry's weakness was in fact limited by the confinement given by the rods inserted in the scaffolding holes, while the collaboration with the inner steel tower has lead to a significant increase in the collapse resistance against horizontal loads.

Contenuto dei capitoli

Capitolo 1

La torre di San Dalmazio a Pavia

Il progetto e l'esecuzione di interventi di carattere strutturale su di un fabbricato esistente, specie se pluricentenario e di interesse storico, ha come premessa fondamentale ed imprescindibile lo studio e l'analisi della sua storia, delle vicende che lo hanno riguardato e che necessariamente ne hanno influenzato lo stato attuale. La conoscenza della vita dell'edificio è utile per avere informazioni sui materiali e le tecniche adottate in fase di costruzione, e per individuare particolari eventi che possono aver modificato l'assetto strutturale originario, oppure indotto sollecitazioni temporanee o continue in alcuni elementi. In questo capitolo è pertanto presentato dapprima un inquadramento storico generale della Torre di San Dalmazio e degli edifici pavesi che ne condividono l'epoca di costruzione e le caratteristiche tipologiche fondamentali; quindi è tracciata una storia particolareggiata di tutti gli eventi con influenza strutturale (quali ad esempio l'apertura di brecce nella compagine muraria, la realizzazione di particolari interventi sugli edifici addossati alla torre,...), utili al fine dell'individuazione della corretta diagnosi dei dissesti presenti.

Capitolo 2

Tecniche di consolidamento di torri in muratura – esempi progettuali

Prima di procedere con la descrizione e l'analisi dei lavori di consolidamento strutturale messi in atto sulla Torre di San Dalmazio, si illustrano alcuni casi esemplificativi di intervento su strutture analoghe a quella in esame, al fine di presentare lo “stato dell'arte” nel consolidamento di strutture snelle

in muratura. Vengono pertanto descritte le strategie strutturali e le tecniche operative adottate per la messa in sicurezza di cinque fabbricati, torri in muratura di altezza e proporzioni simili alla San Dalmazio, i quali presentavano un dissesto statico riconducibile a quello presente sulla torre pavese. Le cinque torri sono il Campanile dei Canonici delle basilica di Sant’Ambrogio a Milano, il campanile della chiesa di San Martino a Burano, il campanile della cattedrale di San Michele ad Albenga, la Torre Civica di Ravenna e la vicina Torre Fraccaro di Pavia. Il loro studio consente di comprendere al meglio le scelte progettuali adottate sulla San Dalmazio.

Capitolo 3

L’intervento di consolidamento strutturale

Nel luglio 1989 ha avuto inizio l’opera di monitoraggio della torre di San Dalmazio, che ha portato nel dicembre 1993 all’avvio dei lavori di messa in sicurezza del fabbricato, conclusi nel settembre 1995. In questo capitolo sono presentate le informazioni fondamentali riguardanti la fase di rilievo del dissesto statico presente nella torre, di monitoraggio dei parametri critici e di diagnosi delle problematiche riscontrate. È quindi illustrato il processo ideativo che ha portato, da un primo progetto preliminare che prevedeva un intervento di carattere ordinario, al progetto esecutivo, caratterizzato da un approccio innovativo al problema del consolidamento di torri murarie, la cui caratteristica principale è la quasi completa reversibilità e rimovibilità dell’intervento, associata alla totale conservazione dell’aspetto estetico originario. Le operazioni di consolidamento prevedono l’iniezione diffusa di legante nell’apparato murario, l’installazione di un sistema di cerchiatura con tiranti radiali atto a realizzare il confinamento laterale della parete in muratura, il parziale trasferimento dei carichi verticali – tramite una fitta rete di stralli – ad una torre in acciaio eretta all’interno dell’esistente muraria.

Capitolo 4

La modellazione agli elementi finiti

Ai fini dello studio del comportamento generale della torre di San Dalmazio – soggetta ai carichi da

peso proprio, vento, sisma e variazioni termiche – e per la valutazione degli effetti indotti dalle operazioni di consolidamento strutturale in termini di stati tensionali locali, sono stati realizzati due modelli agli elementi finiti: un primo modello, che riproduce la torre nella sua intera geometria (modello globale), ed un secondo che si riferisce invece a una porzione ridotta di compagine muraria (modello locale). Il modello globale è utile per l'analisi della risposta e la verifica della resistenza della torre sottoposta alle sollecitazioni che le competono, nelle configurazioni antecedente e posteriore al consolidamento; quello locale viene invece utilizzato per lo studio del confinamento indotto sul materiale muratura dal sistema di cerchiatura progettato e messo in opera. La definizione e la calibrazione dei parametri caratteristici dei modelli si è basata sui dati forniti dalle rilevazioni geometriche e dalle prove sperimentali condotte sulla torre.

Capitolo 5

Calcolo delle azioni sollecitanti

La torre in esame deve essere verificata, oltre che ai carichi legati al peso proprio, alle sollecitazioni indotte dal vento, da eventuali fenomeni sismici e dalle variazioni termiche giornaliere e stagionali. L'analisi della struttura soggetta alle azioni di vento e sisma è stata condotta calcolando, in entrambi i casi, un carico statico equivalente orizzontale di entità tale da indurre nei componenti il medesimo stato tensionale di picco provocato dall'applicazione delle sollecitazioni reali in regime dinamico. La definizione delle azioni statiche è stata condotta tenendo conto della dinamica del sistema: per i carichi da vento sono state rispettate le indicazioni presenti nelle relative istruzioni CNR, mentre per le azioni sismiche si è utilizzato il metodo dell'analisi modale con spettro di risposta. In particolare, per la valutazione del fattore di struttura dell'edificio, è stato adottato un procedimento innovativo basato sull'approccio agli spostamenti. Per quanto riguarda invece le sollecitazioni termiche, si ricorda come l'intervento di consolidamento si fondi sul sostegno e la collaborazione di componenti metallici con le strutture murarie esistenti, in un assetto strutturale altamente iperstatico. Di conseguenza in presenza di variazioni di temperatura – omogenee o differenziali – i differenti coefficienti di dilatazione termica dei materiali inducono necessariamente coazioni interne nella struttura, le cui entità devono essere

oggetto di verifica. Le sollecitazioni termiche cui risulta soggetta la struttura sono state valutate in base ai dati climatici del luogo di costruzione e alle proprietà termiche statiche e dinamiche della parete in muratura.

Capitolo 6

Verifiche della struttura

Le verifiche strutturali del fabbricato sono state condotte tramite analisi statiche lineari di modelli agli elementi finiti che riproducono la struttura reale. Hanno riguardato gli stati tensionali presenti nella muratura e negli elementi metallici introdotti con l'opera di messa in sicurezza del fabbricato – stralli e traliccio metallico – riferiti alla torre nelle situazioni originaria (immediatamente successiva alla costruzione), fessurata (antecedente ai lavori di messa in sicurezza) e consolidata (condizioni attuali), per le diverse condizioni di carico indagate e quantificate al capitolo precedente. Ulteriore variante di analisi è stata la possibilità di considerare o meno l'apporto irrigidente fornito dagli edifici addossati alla torre. In conclusione di capitolo viene proposta una verifica a collasso, condotta secondo un approccio semplificato al problema strutturale; tale verifica consente di valutare la resistenza ultima della torre nelle condizioni antecedenti e posteriori all'intervento di consolidamento, considerando le non linearità nelle proprietà meccaniche dei materiali costituenti.

Capitolo 7

Analisi parametrica dell'intervento di consolidamento

Tra gli obiettivi dell'intervento di cerchiatura diffusa operato sulla torre di San Dalmazio, vi era l'induzione nella muratura di uno stato di tensione triassiale che consentisse di avere un miglioramento in termini di resistenza e deformazione ultima nel materiale. Con l'ausilio di analisi elastiche lineari, condotte sul modello locale agli elementi finiti, sono stati rilevati gli stati di sforzo provocati dal sistema di confinamento realmente adottato nel consolidamento della torre, e da soluzioni analoghe caratterizzate da diversi valori dei parametri che definiscono l'intervento (caratteristiche geometriche o

proprietà meccaniche dei materiali); a partire dai dati sugli stati tensionali indotti nella muratura è stato quindi valutato l'effetto sulle proprietà meccaniche dei materiali, nei diversi casi esaminati. Alla luce dei risultati ottenuti sono quindi state elaborate una proposta per il miglioramento dell'intervento esistente e una proposta di soluzione alternativa a quella realizzata.

Sono stati quindi esaminati gli effetti delle opere di consolidamento sul comportamento globale della torre, tramite il confronto di dati sperimentali di tipo dinamico con i risultati delle analisi condotte sui modelli agli elementi finiti, e l'analisi della variazione delle proprietà dinamiche della struttura per le diverse fasi del consolidamento e con differenti condizioni al contorno. È stata infine studiata l'ipotesi di una variante progettuale che dimezza il numero di stralli necessari per il collegamento di torre muraria e traliccio metallico interno.

Capitolo 1

La torre di San Dalmazio a Pavia

1.1. Le torri di Pavia¹

L'origine enigmatica del complesso turrato della città di Pavia ha sempre stimolato la curiosità degli studiosi; un tempo copiosissime, ancora oggi le torri pavese si presentano in gran numero anche se in parte demolite o conglobate con edifici più recenti. Sono pervenute ad oggi pressoché integre le torri di Piazza Leonardo da Vinci (Università, Maino e torre dell'orologio) quelle di via Luigi Porta (Belcredi e San Dalmazio) e Torre Lucchini in Piazza Borromeo. Le vicende storiche fanno risalire la loro edificazione intorno al secolo XI, mentre la dislocazione urbanistica e la struttura edilizia, indicano chiaramente che non sono assimilabili alla tipologia dei torrioni difensivi realizzati nel medioevo. Le torri di Pavia, infatti sono collocate all'interno delle tre cerchie di mura succedutesi tra l'anno di fondazione della città (89 a.C.) ed il XII secolo; inoltre, per la loro altezza e relativa esilità, per la mancanza di un basamento fortificato e per la scarsa dotazione di attrezzature interne, escludono usi e funzioni militari, anche se non è possibile escludere a priori una destinazione a difesa interna delle varie famiglie locali.

Lo storico pavese Giovanni Vaccari ha giustamente osservato che le torri di Piazza Leonardo da Vinci, per esempio, venivano utilizzate principalmente per l'osservazione verso Nord in quanto è l'unica direzione in cui le campagne sono allo stesso livello della città e di conseguenza

¹ Ampi stralci del presente paragrafo sono stati tratti da [16].

necessitavano di punti di osservazione molto alti.

Per lo stesso scopo veniva presumibilmente utilizzata anche la Torre Lucchini in Piazza Borromeo che è rivolta verso il fiume e le campagne a Sud, in quanto come le suddette si colloca in maniera sghemba rispetto al regolare tracciato viario romano, consentendo più la direzione di osservazione voluta, che una funzione prettamente militare e difensiva.

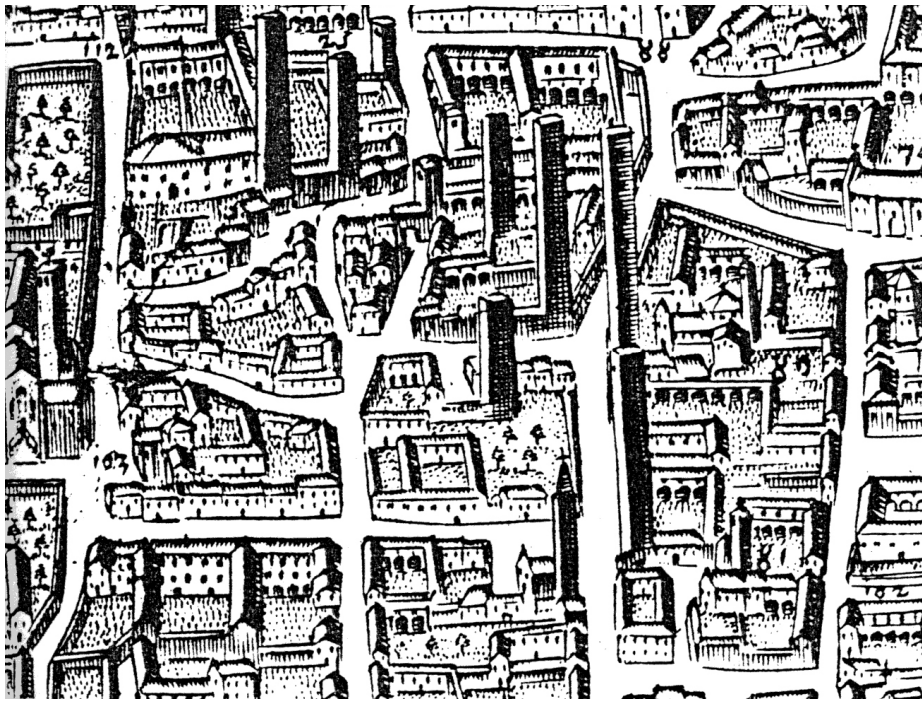


Figura 1 Estratto della pianta in alzato di Pavia del 1599 con il monastero di San Dalmazio (81) [16]

Le torri civili giunte sino ad oggi pressoché integre, che, come abbiamo potuto constatare, ragioni storiche e costruttive fanno presumere per una loro datazione a cavallo tra l'XI ed il XII secolo, presentano numerose somiglianze reciproche, quali la snellezza, la presenza di rare e contenute aperture e la terminazione della cimasa in modo tronco; inoltre testimoniano una sapienza stilistica e costruttiva notevole, riscontrabile nella regolarità delle buche pontae (ad accentuazione del senso ottico di verticalità) e nella tessitura della muratura in cotto di corsi di mattoni e strati di calce molto regolari.

Il paramento esterno delle torri di un bel color rosso scuro è caratterizzato per tutta la loro altezza dal ritmo regolare dei fori di fabbrica (o buche pontae), disposti simmetricamente in file di tre ogni lato. Alla base il paramento in cotto appoggia, in alcuni esempi, su blocchi di pietra

di rinforzo per una maggiore solidità della base al fine anche di impedire il facile deterioramento dovuto all'umidità di risalita e ad eventuali urti nelle parti esposte al transito dei carriaggi.

La presenza dei fori di fabbrica, oltre a conferire ritmi e timbri di chiaroscuro ai prospetti, permette una minima illuminazione all'interno della canna anche agli interpiani privi di vere e proprie aperture. Le buche pontai testimoniano inoltre l'ingegnoso procedimento costruttivo adottato per l'edificazione di tali strutture, caratterizzate da un'altezza considerevole. La realizzazione avveniva per fasi successive, con la sovrapposizione di stadi di murature con altezza variabile tra 90 e 110 cm; a presa avvenuta, nei fori pontai sapientemente ricavati durante la realizzazione delle pareti potevano trovare alloggio travi lignee sulle quali veniva poggiata un'impalcatura con funzione di ponteggio mobile, utilizzata per la realizzazione dello strato successivo.



Figura 2 A. Lorenzetti, "Effetti del Buon Governo" - Palazzo pubblico di Siena (particolare)

Le aperture sono in genere di due tipi: strettissime a feritoia con strombatura crescente verso l'interno, quelle nella parte inferiore, sufficientemente larghe e con archi circolari le altre (peraltro in numero assai limitato). Tra quest'ultime, è anche possibile un'ulteriore differenziazione tra quelle la cui altezza dei piedritti equivale al raggio dell'arco, riportando fedelmente il carattere lombardo primitivo, e quelle la cui altezza dei piedritti misura invece il

doppio del raggio dell'arco, le quali si armonizzano meglio con la forma slanciata della torre segnando inoltre un periodo più avanzato di questa architettura con preludio al gotico primitivo.

L'accesso alle torri di più antica costruzione avveniva al primo piano (attraverso aperture molto simili alle finestre sopra descritte) in quanto nel basamento pieno era impossibile creare delle aperture. Anche per motivi di difesa, l'ingresso era collocato a diversi metri dal suolo; solo successivamente gli ingressi vennero situati a piano terreno sempre in comunicazione con le case d'abitazione dei proprietari.

Internamente, le superfici si presentano a mattoni a vista con fori di fabbrica passanti le spesse murature; inoltre l'assottigliamento delle mura verso l'alto permette il progressivo allargamento ai piani superiori della superficie di calpestio. La struttura è costituita da muratura "a sacco" con due paramenti di mattoni esterni e riempimento realizzato con materiali di risulta come ciottoli, embrici e mattoni spezzati legati da abbondante malta di calce. I mattoni presentano dimensioni medie di 25 x 8 x 14 cm, sono molto resistenti e cotti ad alta temperatura, ed in alcuni casi 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; inoltre 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 protraggono anche sotto il vuoto interno sino ad occupare l'intera superficie.

1.2. La torre di San Dalmazio: ubicazione e notizie storiche²

La torre di San Dalmazio è ubicata nel quadrante Sud-Est della città di Pavia, in via Luigi Porta, all'altezza della chiesa di S. Filippo e S. Giacomo, di fronte all'attuale via Mantovani. La via Luigi Porta, oltre a delimitare ad ovest l'isolato comprendente la Torre, collega la piazza del Municipio con l'attuale corso Garibaldi, che era il limite meridionale della prima cerchia delle mura di fondazione romana. Sono presenti nelle adiacenze della Torre di San Dalmazio, lungo via Luigi Porta, la Torre Belcredi, ubicata sull'angolo del vicolo San Colombano, la Torre della Mostiola, riscontrabile sulle piante storiche ed attualmente abbassata al livello delle case circostanti.

La torre di San Dalmazio è una struttura tronco-piramidale cava di altezza 40,15 m con dimensioni alla base di 4,90 x 4,85 m. La larghezza interna cresce con l'altezza, a causa della diminuzione dello spessore dei muri (da 1,65 m a 0,70 m in sommità), i quali presentano complessivamente otto riseghe a distanza variabile: fino a quota 20,80 m esse distano circa 5-6 m l'una dall'altra, mentre dopo tale quota risultano molto irregolari. La copertura della torre è ad un'unica falda inclinata da Est verso Ovest di circa 30°. Le aperture sono disposte in modo irregolare lungo i quattro lati, e quasi tutte sono spostate rispetto alla linea mediana della torre.

L'ingresso, di dimensioni 0,87 x 1,53 m (anch'esso con arco circolare come le finestre), è situato sul lato Est a quota + 0,90 m dal piano di campagna: si accede alla torre dall'interno della ex chiesa di S. Dalmazio, ora utilizzata come palestra ginnica, la cui copertura a due pioventi poggia in parte sul lato orientale della torre alla quota di 17 m circa.

È difficile dalla documentazione esistente fornire una datazione precisa della Torre di San Dalmazio. Fonti storiche attribuiscono la costruzione di torri con ingresso alla base e vuoto interno che cominciava a livello del suolo probabilmente nel XIII secolo, in quanto, nei secoli precedenti, l'ingresso veniva collocato a parecchi metri di altezza dal livello della strada, perché le robuste murature di mattoni e pietra non permettevano nessun tipo di apertura.

² Ampii stralci del presente paragrafo sono stati tratti da [16].



Figura 3 Torre di San Dalmazio, vista del fronte meridionale [19]

Vi è poi un ulteriore elemento che suggerisce una simile datazione di massima, ovvero la forma delle finestre, che fornisce preziose indicazioni riguardo allo stile architettonico della torre. Le aperture finestrate della San Dalmazio presentano infatti piedritti che misurano il doppio del raggio dell'arco che le cinge, mentre tipicamente nelle torri edificate nei secoli precedenti si riscontra una piena fedeltà al carattere lombardo di costruire archi alti quanto i piedritti.

Successivamente la torre venne inglobata all'interno di un importante complesso monastico, dedicato a San Dalmazio, vescovo martire di Pavia, che raggiunse la sua massima estensione nel XVII secolo. Una serie di pesanti manomissioni che vanno dalla occlusione di antiche luci e apertura di nuove, ai disordinati rimaneggiamenti della copertura e alla adozione di nuovi accessi, rendono oggi arduo il riconoscimento dell'impianto originario. Il perimetro del

monastero per tre lati seguiva il percorso delle strade, mentre lungo quello settentrionale confinava con la fabbrica del convento di Santa Mostiola che, articolato a sua volta in una serie di edifici, cortili, portici, rustici, si estendeva sino al vicioletto che limitava a meridione l'isolato. La vita del monastero si interruppe nel 1783, anno della sua soppressione.

Grazie ad uno schizzo schematico del XVIII secolo abbiamo sufficienti indicazioni per ricostruire nel dettaglio il complesso impianto del monastero di San Dalmazio. La grande mole settecentesca della chiesa, preceduta da un breve atrio che sulla sinistra dava accesso, con un percorso coperto, ad un ampio chiostro porticato su tre lati, costituiva l'elemento cardine attorno al quale, con disposizione ruotata, i tre spazi aperti dei cortili organizzavano distributivamente tutto il complesso. Il chiostro aveva però un ingresso più diretto (ed inoltre di uso più consueto che non il precedente), aperto sul vicolo di San Dalmazio in corrispondenza di una sporgenza del muro perimetrale. Un terzo ingresso, ancora su via Luigi Porta, allora Contrada della Mostiola, dava accesso ad un cortile su cui si affacciavano delle costruzioni rustiche.



Figura 4 Planimetria del monastero di San Dalmazio in Pavia del 1790 (Archivio di Stato di Milano) e veduta aerea dello stato attuale

Tra i due monasteri sorgeva ad oriente una costruzione privata (indicata nei documenti come Casa Malaspina e poi come Casa Valerio), disposta tutt'attorno ad un cortile quadrato, la quale, nonostante le modificazioni, è riconoscibile in quella che oggi sorge nello stesso luogo.

1.2.1. Cronologia dei più importanti eventi con influenza strutturale

Si presenta ora una cronologia dei più importanti eventi documentati riguardanti la vita del complesso di San Dalmazio, con particolare attenzione agli interventi che hanno portato a ripercussioni di ordine strutturale.

ANNO 1232

Anno di datazione del documento più antico in cui si cita la vecchia chiesa esistente, sorta nel luogo di un precedente tempio pagano dedicato a Mercurio e Apollo.

ANNO 1618

Costruzione dell'attuale chiesa da parte delle Sorelle dell'ordine di San Agostino insediatesi nel 1274. La chiesa consiste in un rettangolo che misura 30 x 11 m ed è alta 18 m.

ANNO 1785

La situazione si mantiene inalterata fino alla soppressione del monastero. La chiesa è divisa in due parti diseguali (chiesa interna e chiesa esterna), da una parete trasversale. Nella chiesa esterna, oltre all'ingresso ai fedeli ad Ovest su via Porta, di fronte alla via Mantovani, vi è una apertura sul lato Sud di fianco al muro divisorio suddetto che dava alla sagrestia, e nell'angolo Sud-Ovest l'accesso alla torre. Il muro di cinta del complesso monastico verso la via Porta è leggermente arretrato rispetto alla torre; la metà a Sud della facciata Ovest della chiesa poggia contro la torre, inglobandola.

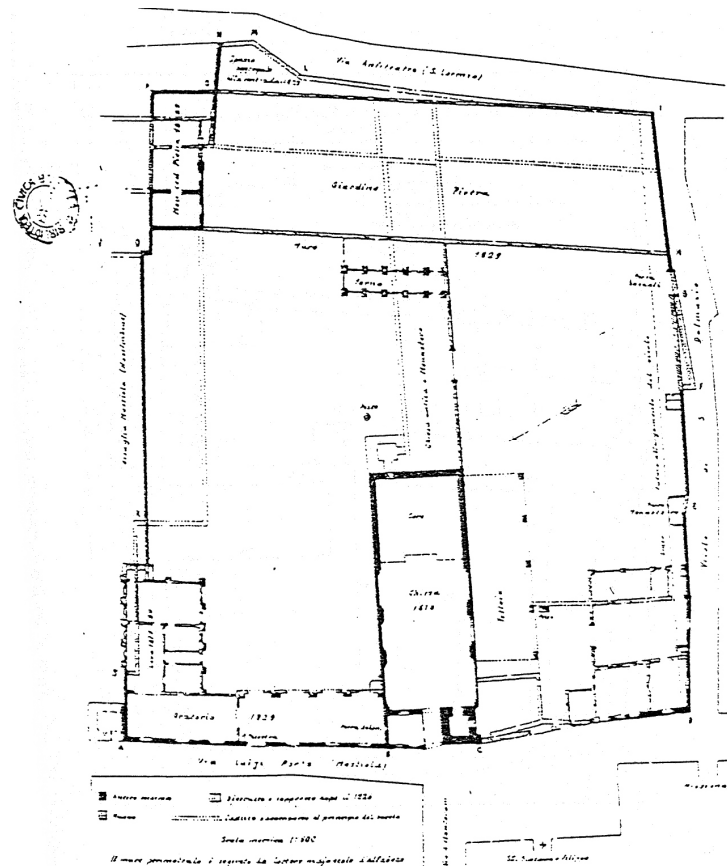


Figura 5 Pianta del monastero di San Dalmazio dopo la soppressione del 1785 - Musei Civici di Pavia

ANNO 1790

Planimetria schematica del soppresso monastero di San Dalmazio, pressoché identica alla precedente. Nella zona a Sud adiacente alla chiesa interna, viene creata una grande stanza ad uso rustico sul luogo della precedente sagrestia e dei vari locali vicini (Figura 4).

ANNO 1794

Descrizione dello stato di fatto della chiesa di San Dalmazio e adattamento dei locali a scuderia. Vengono realizzate due grandi finestre sui lati corti della chiesa, 5 piccole finestre nella parte alta dei lati lunghi di cui l'ultima sul lato Nord in corrispondenza alla zona di un vecchio campanile; viene inoltre demolito il muro divisorio tra coro e chiesa lasciando l'arco di contenimento.

ANNO 1800 circa

Costruzione sul lato Sud di un casotto tra il muro di cinta e la chiesa.

ANNO 1819

Progetto dell'Ing. Carlo Reale per la trasformazione della chiesa in pubblico macello. Nel progetto compaiono su i due lati lunghi della chiesa, 5 finestroni sottostanti alle suddette 5 finestrelle quadrate. Si prevede la costruzione di un fabbricato più basso tutto intorno alla chiesa a forma rettangolare, in modo che la inglobasse; i tetti di copertura a falda unica poggiano sui muri perimetrali della chiesa all'altezza delle finestrelle quadrate superiori.

ANNO 1826

Sono state demolite in buona parte le stanze adiacenti la chiesa. Viene aperto un passaggio al secondo piano della torre per la comunicazione con un locale situato sopra l'atrio della chiesa.

ANNO 1839-45

Viene realizzato un oratorio per la ricreazione festiva, nella parte Nord della chiesa, a cura dell'Ing. Stefano Cavalli su richiesta del Vescovo Tosi. La parte adiacente alla chiesa viene porticata per gli esercizi ginnici al coperto.

ANNO 1850

Disegno di Pavesi con le modifiche avvenute precedentemente.

Dopo il 1826 è stato demolito il casotto adiacente alla parte Sud-Ovest ed il muro di cinta a Sud per allinearli alla torre, creando un ingresso a metà della via Porta.

ANNO 1864

Apertura a Sud tra il secondo e il terzo pilastro di un finestrone di dimensioni 3,6 x 2,6 m, con spessore 0,3 m, per mettere in comunicazione la chiesa con un magazzino foraggi adiacente.

ANNO 1867

Lavori di adattamento a palestra coperta dei locali dell'ex portico prospicienti via Porta (a Nord della chiesa). Apertura di un grande portone a Sud, a lato di quello costruito nel 1864, per facilitare l'ingresso dei cavalli che prima avveniva dal lato Ovest.

ANNO 1869

Creazione di una scuola di equitazione e costruzione di nuove scuderie a Sud della chiesa, di cui alcune addossate alla torre, in seguito adattate a magazzino per la conservazione dell'avena con demolizione parziale, a Sud, della torre per l'esecuzione di uno scivolo. Costruzione di una tettoia in adiacenza a Sud della chiesa, per il carico e lo scarico del fieno dell'impresa foraggi.

ANNO 1874

Lavori di miglioria del locale della cavalleria, tra cui il rifacimento del tetto.

ANNO 1875 - 80

Ricostruzione con ampliamento dei locali adiacenti all'oratorio, degli uffici del servizio di leva. Lavori di adattamento a palestra coperta dei locali dell'ex portico prospiciente via Porta (a Nord della chiesa).

ANNO 1900

Progetto di adattamento della chiesa a palestra a cura degli Ingegneri Rocchini e Rossi. Demolizione dei muri retrostanti gli altari per la realizzazione di tre grandi finestre ed un portone per il collegamento con l'attuale campo di basket all'aperto. Demolizione parziale delle lesene con notevole diminuzione della rigidità delle pareti. Costruzione di un locale spogliatoio a Sud ed esecuzione di un'apertura a Sud per l'accesso agli spogliatoi.

ANNO 1903

Progetto per la costruzione di un soppalco all'interno della chiesa, con impianto di risalita esterno adiacente all'angolo Nord-Ovest. Apertura a strappo della torre per realizzare latrine e

orinatoi al piano del previsto soppalco. Il progetto non viene portato a termine per probabili lesioni e crepe verticali nella torre; in questa circostanza viene posizionato un puntone provvisorio di presidio alloggiato in una nicchia scavata malamente nella parete Sud.

ANNO 1974

Sistemazione degli spogliatoi comunicanti con la torre con chiusura dell'apertura Sud.

ANNO 1987

Rifacimento del tetto e degli intonaci della chiesa e dei locali adiacenti.

ANNO 1989

Tamponamenti di aperture ai piani inferiori ed interventi scuci-cuci nelle murature.

ANNO 1994-1995

Intervento di consolidamento strutturale della torre e della chiesa adiacente, a cura del Prof. Ing. Colombo e del Prof. Ing. Jurina, sotto la Direzione Lavori di quest'ultimo.

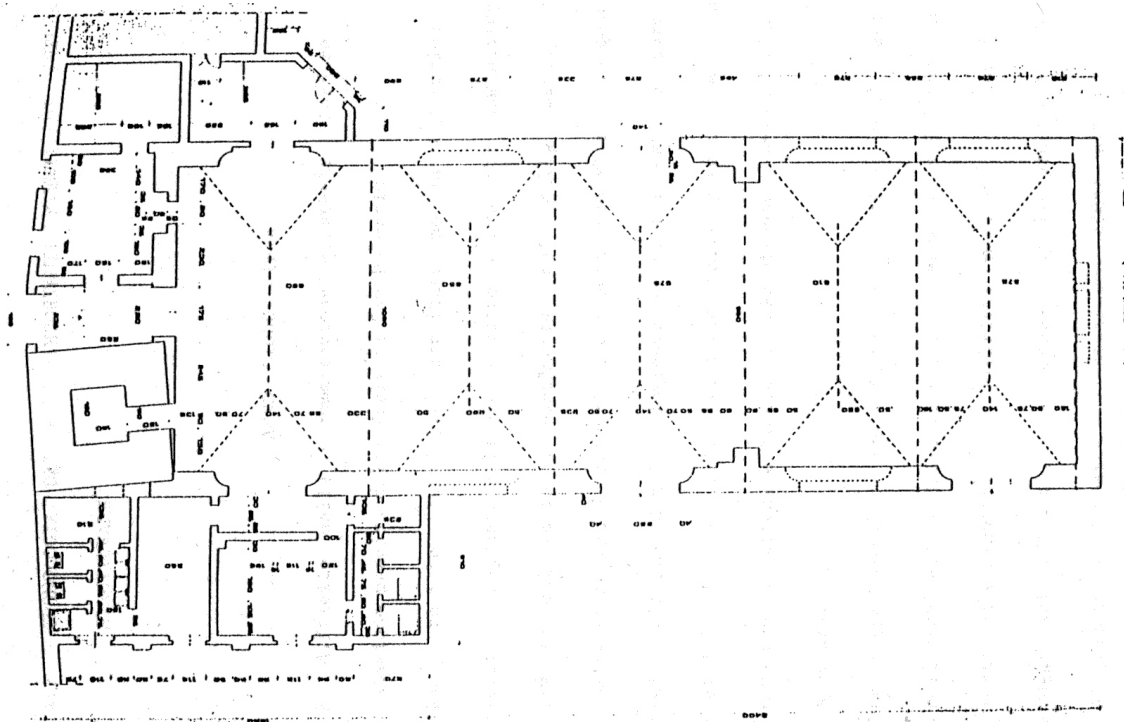


Figura 6 Pianta della torre e della chiesa (ora palestra) di San Dalmazio [16]

Capitolo 2

Tecniche di consolidamento di torri in muratura – esempi progettuali

2.1. Il Campanile dei Canonici della Basilica di Sant’Ambrogio a Milano

Caratteristiche generali della struttura

Il Campanile dei Canonici sorge a lato della basilica di Sant’Ambrogio, sul fianco sinistro; è generalmente considerato come l’ultimo atto del programma costruttivo del complesso romanico, e lo si fa risalire al XII secolo. In origine la sua struttura constava di 4 piani, evidenziati dalle archeggiature del paramento esterno, e raggiungeva un’altezza complessiva di circa 30 *m*, pari all’attuale altezza dell’altro campanile della basilica. In seguito nel 1889, su progetto dell’arch. Landriani, venne realizzato un sopralzo di due piani; oggi l’altezza complessiva del campanile è di 43,6 *m* dal piano del cortile esterno.

La struttura ha sezione quadrata, di lato pari a circa 8,3 *m*, e spessore murario variabile da 1,5 a 1,65 *m*.



Figura 7 Campanile dei Canonici (basilica di Sant'Ambrogio) a Milano

Fino all'altezza di 7,5 – 8 m le pareti sono realizzate in pietra; alle quote superiori, fino all'altezza di circa 30 m corrispondente al manufatto medievale, le pietre rimangono limitate agli angoli e la restante muratura è realizzata a sacco, con due cortine esterne in mattoni pieni riempite con materiali eterogenei malamente cementati. Il sopralzo ottocentesco, che costituisce gli ultimi due piani, è invece realizzato in muratura piena.

Le fondazioni originarie erano in muratura di grossi ciottoli malamente connessi con malta terrosa, ai quali nel corso del restauro ottocentesco furono aggiunti alcuni masselli in pietra, dalla dubbia efficacia complessiva.

Dissesto riscontrato

Negli anni '20 si procedette alla demolizione dei fabbricati che nei secoli erano stati costruiti a

ridosso della basilica di Sant'Ambrogio. Tali lavori misero in luce le condizioni della muratura alla base del Campanile dei Canonici, che mostrava evidenti lesioni verticali, ad indicare uno stato tensionale della muratura prossimo al limite di collasso. Le rilevazioni successive fecero constatare che la torre aveva uno strapiombo verso Nord di 23 *cm*, e le indagini geotecniche palesarono la pessima condizione delle fondazioni e del terreno. Si diede quindi immediatamente avvio ai lavori di messa in sicurezza della struttura.

Intervento di consolidamento strutturale

L'intervento di consolidamento definitivo, progettato del prof. ing. A. Danusso e realizzato in due momenti successivi dal 1929 al 1939, si è articolato su tre fronti:

- Migliorare la situazione in fondazione;
- Ridurre i carichi sollecitanti la muratura;
- Incrementare le proprietà meccaniche della muratura a sacco, che aveva manifestato una struttura incoerente e di scarsa consistenza.

Il consolidamento fondale venne effettuato tramite la realizzazione di una sottofondazione a platea in calcestruzzo armato, che ha consentito di raggiungere strati di terreno più consistenti situati a circa 7 *m* di profondità ed ha ampliato la base d'appoggio dagli originari 70 *m*² a circa 115 *m*². La zona muraria soprastante la sottofondazione venne poi circondata con un anello esterno in c.a., di spessore variabile da 1 a 1,5 *m*, collegato ad un sistema di contrasto interno tramite travi doppio T in acciaio che attraversano la compagine muraria: si realizzò così un sistema cerchiante della muratura, atto ad impedirne le deformazioni laterali.

La platea sopra descritta risultò necessaria anche per il notevole incremento di carico dovuto alla costruzione, all'interno della canna muraria del campanile, di una nuova struttura a telaio in c.a., deputata a gravarsi di una parte dei carichi verticali della muratura. Tale struttura è costituita da 12 pilastri, di cui 8 perimetrali addossati alla muratura esistente e 4 interni, incastrati alla base nella piastra di sottofondazione. Il collegamento reciproco tra i pilastri è dato da travi inclinate che sostengono una rampa di scale che conduce alla cella campanaria sommitale; in corrispondenza degli elementi perimetrali, le travi si prolungano a mensola all'interno di cavità

praticate appositamente nella compagine muraria, realizzando così la collaborazione tra torre antica e telaio in calcestruzzo armato, calcolato per sostenere una notevole percentuale del peso proprio della torre. La rigidità delle mensole è garantita anche dai pilastri interni, i quali sono stati progettati per lavorare a trazione come tiranti d'ancoraggio. Particolare cura fu dedicata allo studio del procedimento esecutivo della struttura in c.a., in modo che gli inevitabili fenomeni di ritiro del calcestruzzo non portassero a pericolosi stati di coazione nella muratura.

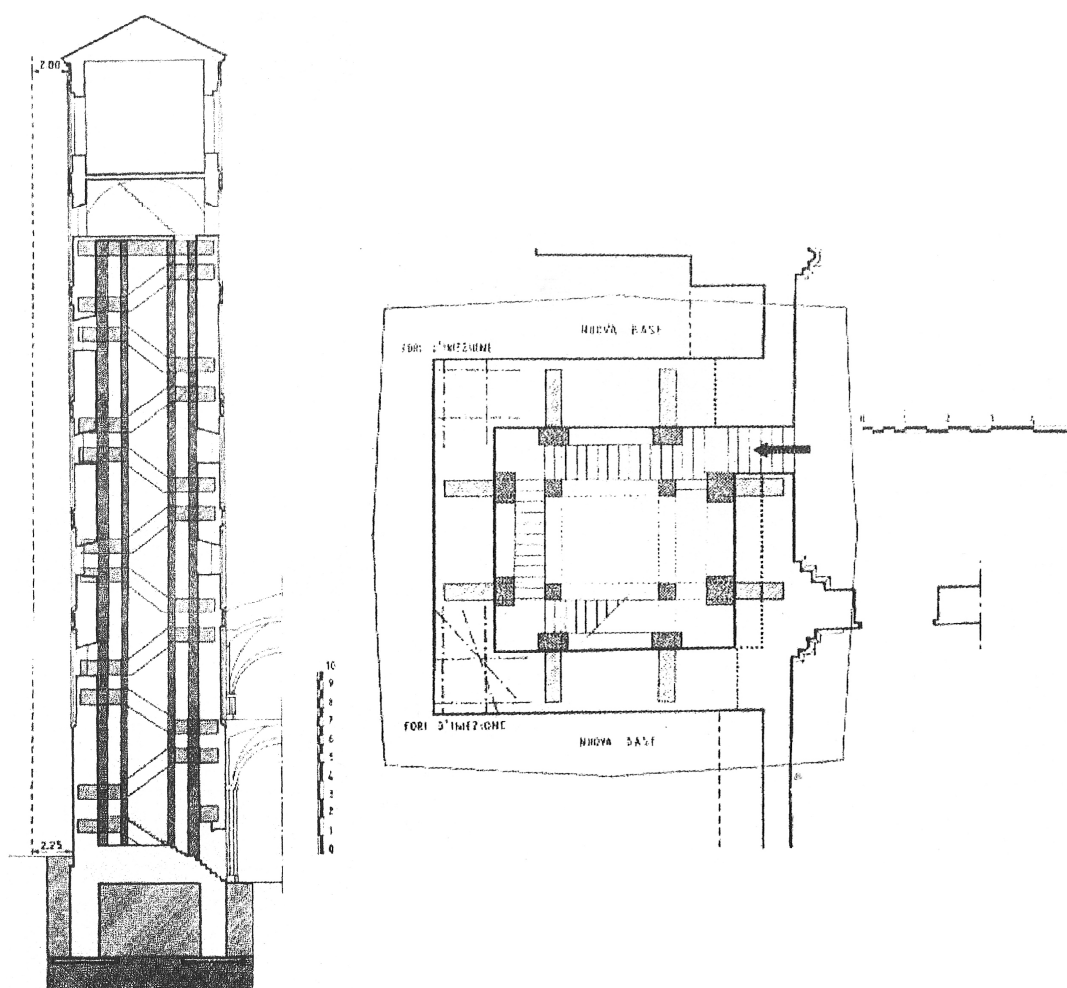


Figura 8 Campanile di Sant'Ambrogio: sezione e pianta del telaio interno in c.a. [3]

L'ultima fase dell'intervento di consolidamento, volta ad incrementare le proprietà meccaniche della muratura, venne condotta tramite un'opera di cementazione della compagine muraria; dapprima si procedette tramite colatura di latte di cemento molto liquido, per poi proseguire con iniezioni a pressione di malta cementizia, che offrivano maggiori garanzie sull'efficacia dell'intervento. In corrispondenza degli angoli nella zona di base della torre si realizzarono

inoltre delle cuciture armate, attuando una pionieristica applicazione della tecnica del reticolo cementato.

2.2. Il campanile della chiesa di San Martino a Burano

Caratteristiche generali della struttura

A fianco della chiesa di San Martino a Burano (Venezia), si erge un campanile cinquecentesco, che negli anni '60 è stato oggetto di un intervento di consolidamento strutturale. La struttura è realizzata in muratura, ha sezione quadrata di dimensioni $7,5\text{ m} \times 7,5\text{ m}$ ed è alta 53 m . In sommità presenta una cella campanaria (a circa 30 m di quota) ed una cuspide piramidale.



Figura 9 Campanile della chiesa di San Martino a Burano (VE)

Dissesto riscontrato

Il campanile di San Martino mostra ancora oggi una visibile inclinazione. Da osservazioni e rilievi effettuati è risultato che durante la costruzione del campanile si verificarono i primi cedimenti in fondazione (imputabili alle basse proprietà meccaniche del terreno), per cui già in corso d'opera vennero approntati tentativi per porre rimedio a tale situazione.

Nel 1964, anno d'inizio dei restauri, la torre aveva raggiunto uno strapiombo sul lato Est di entità preoccupante. Ad esso si accompagnavano segnali preoccupanti di cedimento strutturale: in particolare nella fascia sottopendenza si erano verificati fenomeni di schiacciamento, evidenziati da espulsioni e scheggiature dei mattoni, mentre il lato opposto presentava lesioni orizzontali localizzate, ad indicare la presenza di sforzi di trazione.

Intervento di consolidamento strutturale

Il progetto di consolidamento rispose ai seguenti requisiti:

- Arrestare il cedimento delle fondazioni;
- Incrementare la resistenza ultima delle zone compresse della muratura;
- Rendere le zone potenzialmente tese idonee al trasferimento di sforzi di trazione.

Il primo obiettivo venne conseguito tramite la costituzione di un ampio bulbo di fondazione, realizzato con un reticolo di micropali solidarizzati alla base della torre, di lunghezza 25 m. Tale intervento consentì innanzitutto di collegare la struttura con strati di terreno aventi caratteristiche meccaniche superiori rispetto a quelle dei livelli superficiali. Al fine di incrementarne l'efficacia, i pali furono inoltre sottoposti, prima del loro collegamento con il masso fondale della torre, a presollecitazioni impresse con l'utilizzo di martinetti idraulici: in particolare i pali localizzati sul lato sottopendenza vennero caricati a compressione, mentre quelli sul lato opposto a trazione, in modo da esplicitare al meglio la propria funzione. Il reticolo di pali ha poi un'ultima funzione, legata al notevole apporto di massa ad esso associato: riporta il baricentro del sistema globale della torre in posizione centrale rispetto alla sezione di base ed a una quota inferiore, con conseguente vantaggio in termini di resistenza alle azioni orizzontali.

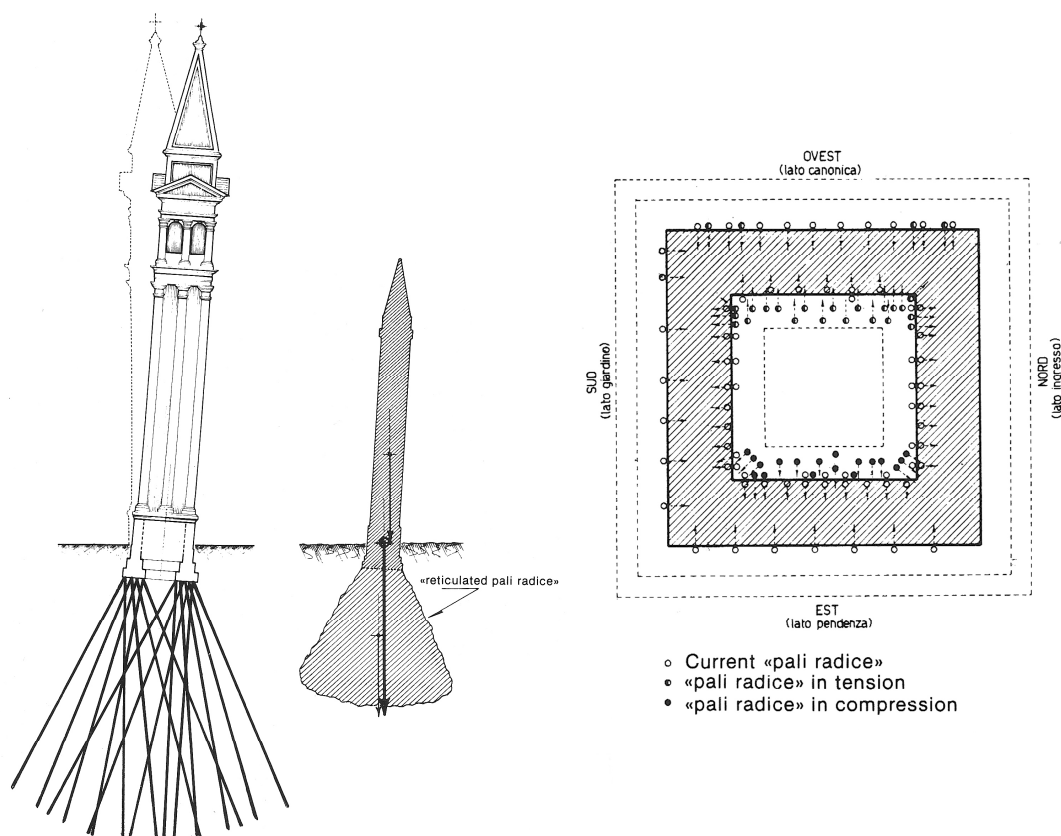


Figura 10 Campanile di San Martino: reticolo di pali “Radice” in fondazione [10]

Per migliorare le proprietà meccaniche della muratura si ricorse invece alla tecnica del “reticolo cementato”: tale intervento prevede la perforazione della compagine muraria, l’inserimento di barre d’acciaio e la cementazione tramite iniezione di malta cementizia. Lo schema distributivo delle perforazioni armate è mostrato in Figura 11; il posizionamento delle barre è stato studiato in funzione delle sollecitazioni agenti nei diversi punti. In particolare l’intervento sul fronte Ovest ha lo scopo di conferire resistenza a trazione alla parete, e per questo motivo ha comportato l’inserimento di un notevole quantitativo di armature; le perforazioni nella facciata Est (disposte a 45° nelle 3 dimensioni, con un infittimento nella zona di base) hanno invece lo scopo di aumentare la resistenza ultima della muratura, contrastandone la dilatazione trasversale; nei fronti Nord e Sud invece l’effetto dell’inclinazione del campanile si manifesta con sollecitazioni taglianti, per cui le armature diagonali consentono di migliorare la risposta della parete.

In corrispondenza della base e della cella campanaria vennero inoltre previsti inserimenti di

barre con andamento orizzontale, a garantire il collegamento reciproco tra le quattro pareti.

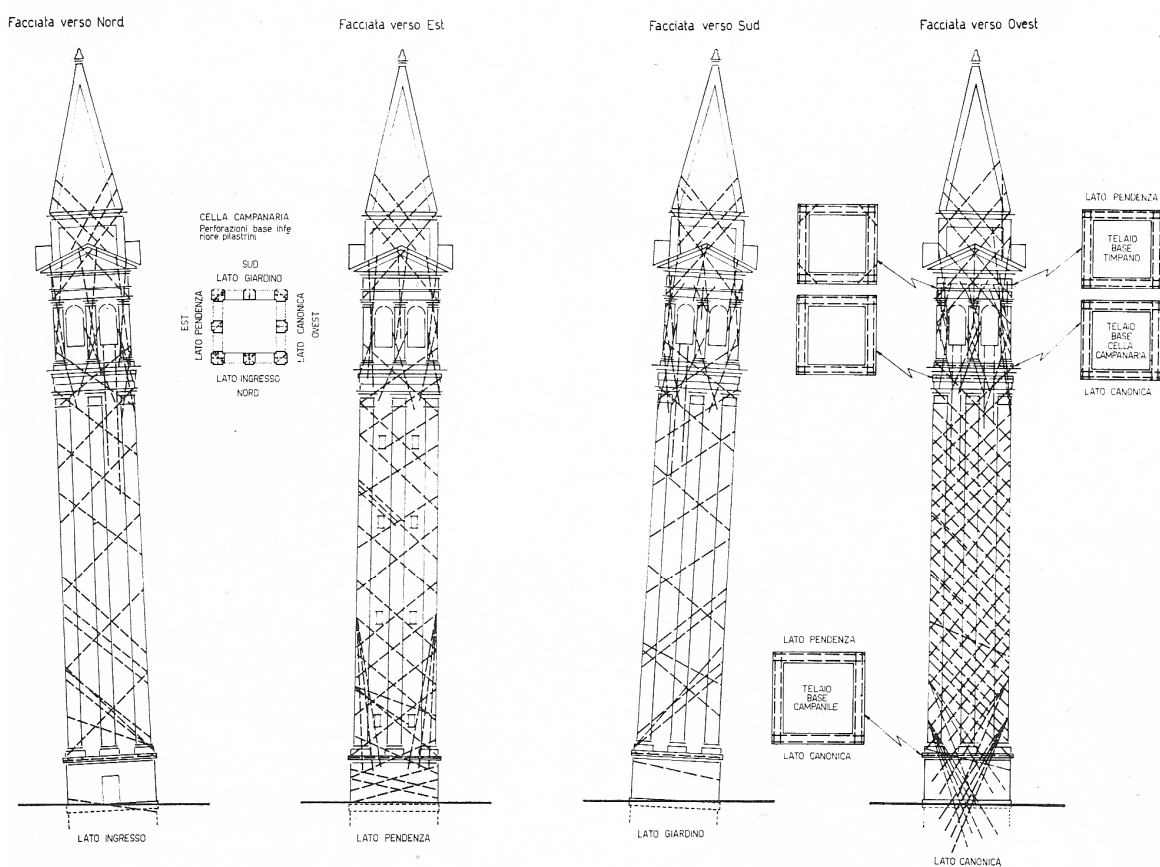


Figura 11 Campanile di San Martino: distribuzione delle perforazioni armate [10]

2.3. Il campanile della cattedrale di San Michele Arcangelo ad Albenga

Caratteristiche generali della struttura

Il campanile della cattedrale di Albenga, dedicata a San Michele Arcangelo, fu eretto verso la fine del XIV secolo sulla base del precedente campanile romanico. Presenta una pianta quadrata, di lato circa pari a 4,5 m, è alto circa 40 m ed è realizzato in muratura.



Figura 12 Campanile della cattedrale di San Michele ad Albenga (sulla destra; a fianco le torri civili)

Dissesto riscontrato

Il quadro fessurativo del campanile evidenziava delle lesioni verticali in mezzeria delle quattro facciate, a collegare le aperture presenti sui diversi livelli. Il meccanismo di collasso identificato dalle lesioni si presentava quindi in modo chiaro, e consisteva nel distacco e nel ribaltamento verso l'esterno dei quattro angoli della sezione muraria. Le aperture presenti al centro delle pareti creano infatti delle zone deboli, nelle quali l'insorgere delle fessure è facilitato. Vennero identificate due cause principali del dissesto:

- La spinta provocata dalla cuspide sommitale del campanile, che presenta una componente orizzontale che tende ad “aprire” la sezione della canna muraria;
- Le vibrazioni indotte sulle murature da parte delle campane.

Intervento di consolidamento strutturale

L'intervento di consolidamento, realizzato negli anni '60 su progetto dell'ing. R. De Maestri consistette nella realizzazione di un cordolo in calcestruzzo armato alla base della cuspide, dimensionato in modo da far fronte alle spinte provenienti dalla copertura. Il ripristino della continuità delle pareti del fabbricato venne invece affidato a quattro catene, posizionate tra i 20

e i 35 m di quota, e realizzate sempre in c.a. Particolarità di queste cerchiature interne, è il sistema di collegamento con la muratura, che utilizza le preesistenti buche puntaie: all'interno di esse (dopo un'opportuna opera di allargamento e regolarizzazione dei fori stessi) vennero inseriti dei tirantini in c.a., in grado di garantire l'adesione con l'elemento cerchiante interno.

Per migliorare il comportamento delle pareti murarie alle vibrazioni, all'altezza della cella campanaria venne introdotta una struttura in tubolari metallici in grado di ripartire sulle due catene in c.a. superiori il carico generato dal moto delle campane, che risulta quindi maggiormente distribuito.

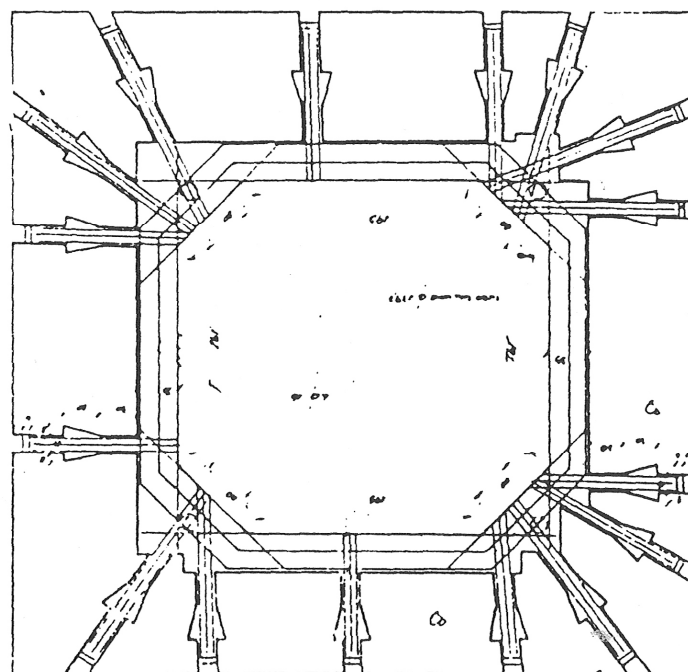


Figura 13 Campanile di San Michele: cerchiatura interna in c.a. con tirantini nelle buche puntaie [13]

2.4. La Torre Civica a Ravenna

Caratteristiche generali della struttura

La Torre Civica di Ravenna è una struttura in muratura a sezione quadrata, di lato variabile dai 6,7 m di base ai 6,15 m sommitali e di altezza pari a circa 38 m. L'ultimazione della sua

costruzione risale al XI-XII secolo; è però noto che i lavori iniziarono parecchi secoli prima (forse nell'VIII secolo) e furono a lungo sospesi a causa del manifestarsi di cedimenti in fondazione. La compagine muraria è –per quanto concerne la tecnica costruttiva – uniforme per tutta lo sviluppo in altezza, con una struttura a sacco costituita da due paramenti in mattoni pieni e riempimento in frammenti di laterizio legati debolmente con malta di modesta resistenza meccanica e di scarsa consistenza in acqua (la qualità del riempimento migliora nella parte superiore della torre). Lo spessore della muratura invece varia con la quota, dai 2 m di base agli 0,5 m in sommità.



Figura 14 Torre Civica di Ravenna (fine XIX secolo e oggi)

La fondazione, costituita da un masso murario di dimensioni in pianta lievemente superiori alla base della torre, raggiunge una profondità di circa 5 m, poggiandosi su di un terreno dalle scarse caratteristiche meccaniche (strati più consistenti si trovano a 8 – 10 m di profondità).

Dissesto riscontrato

Il notevole strapiombo della torre in direzione Nord-Ovest, evidente anche ad occhio nudo, è da sempre oggetto di attenzione. La più antica rilevazione nota risale al 1906, ed indicava 214 cm;

nel 1993, anno in cui si decise di intervenire con i primi lavori di consolidamento, lo strapiombo aveva raggiunto i 236 *cm*. L'evoluzione del dissesto convinse il Comune di Ravenna ad affidare al prof. ing. A. Chiarugi l'incarico di effettuare indagini più approfondite riguardo alle condizioni delle murature e alle caratteristiche del terreno, che ne palesarono le problematiche sopra descritte (cavità e scarse proprietà meccaniche).

Intervento di consolidamento strutturale

In seguito ai preoccupanti risultati delle indagini condotte nel 1993, il prof. Chiarugi approntò immediatamente un primo provvedimento di messa in sicurezza della struttura tramite la cerchiatura della zona di base della torre (primi 10 *m* circa). L'intervento venne realizzato con un sistema di graticci in profilati in acciaio, serrati contro le facciate esterne della torre mediante barre di collegamento pretese passanti all'interno della compagine muraria. Gli elementi di contrasto interni alla canna muraria non insistono direttamente sul paramento in mattoni, ma su di una fodera di calcestruzzo armato, di spessore 15 *cm*, con funzione di redistribuzione delle pressioni.

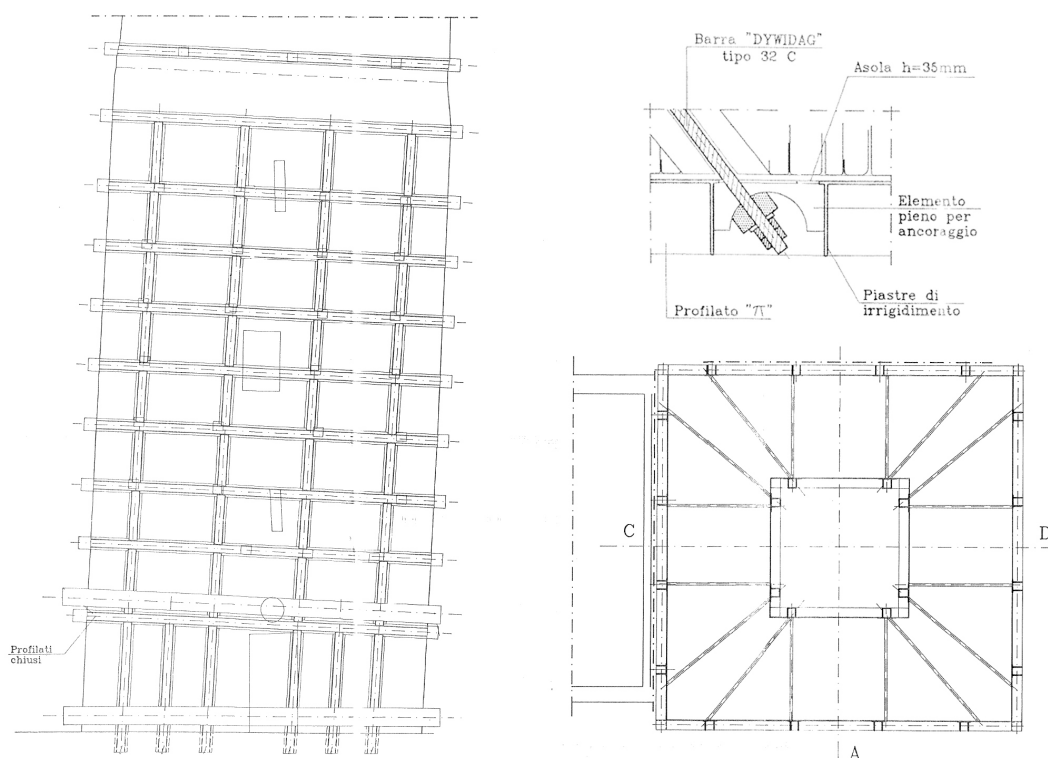


Figura 15 Messa in sicurezza della Torre Civica a Ravenna: prospetto, pianta e particolare [2]

Si procedette inoltre al consolidamento del masso fondale, tramite iniezioni di malta: si registrarono tuttavia assorbimenti circa pari ai volumi delle perforazioni, ad indicare il mancato trattamento della muratura circostante.

I lavori del 1993-1994, data la scarsa efficacia dell'intervento in fondazione, non ebbero alcun effetto sull'evoluzione dello strapiombo della torre, il cui monitoraggio mostrò una progressione a velocità costante dello spostamento sommitale.

Data la persistenza della precarietà statica del fabbricato, nel 1999 il prof. Chiarugi propose di smontare temporaneamente i 10 m sommitali della torre, con l'impegno del rimontaggio a seguito di ulteriori interventi di consolidamento. La rimozione della parte sommitale della torre venne effettuata l'anno successivo.



Figura 16 Torre Fraccaro a Pavia - aspetto attuale

2.5. La torre Fraccaro a Pavia

Caratteristiche generali della struttura

La torre Fraccaro si trova a Pavia, ed è analoga alla torre di San Dalmazio sia per epoca costruttiva sia per caratteristiche geometriche e tipologiche. La struttura si configura infatti come una canna in muratura, di spessore degradante al salire in quota, avente pareti costituite da un conglomerato di materiale sciolto cementato da malta di calce aerea, rivestito ai bordi da un doppio filare di mattoni da 12 *cm* di spessore.

Dissesto riscontrato

In seguito al crollo della Torre Civica di Pavia (1989), la Commissione Tecnico Scientifica incaricata di valutare lo stato di sicurezza dei monumenti cittadini effettuò dei rilievi sulla torre Fraccaro, dai quali emerse una condizione di fuori piombo che raggiungeva i 30 *cm* in sommità: valutata tale situazione come pericolosa per la sicurezza, l'area circostante la torre venne dichiarata inagibile. Si diede immediatamente inizio ai lavori di messa in sicurezza, affidati al progettista Prof. Ing. G. Ballio, per i quali si pose un limite temporale alquanto ristretto, non superiore ai 90 giorni, dettato dalla necessità di ripristinare al più presto la piena funzionalità delle zone circostanti la torre, che erano state sgomberate ed interdette al pubblico.

Intervento di consolidamento strutturale

La necessità di operare un intervento in tempi molto ridotti, e la scarsa conoscenza delle proprietà e delle condizioni statiche effettive della struttura (indagini più approfondite vennero effettuate a lavori di consolidamento già avviati), portarono ad optare per un intervento “a secco”, di veloce realizzazione, e completamente rimovibile, in vista di un eventuale intervento futuro basato su di una conoscenza più approfondita del fabbricato.

Le indagini precedentemente condotte su frammenti della Torre Civica avevano evidenziato notevoli deformazioni anelastiche del materiale per carichi intorno al 70 – 80% del limite di rottura. Data l'analogia tra le due torri, in riferimento ai materiali ed alle tecniche costruttive

adottate, si pose come obiettivo dell'intervento sulla Fraccaro il contrasto di tali dilatazioni anelastiche, al fine di incrementare la resistenza globale a collasso del fabbricato. Il contenimento della muratura consente infatti di operare una redistribuzione degli sforzi che, scongiurando la rottura fragile locale del materiale, impedisce l'innescarsi di un meccanismo globale di collasso a catena.

È stato quindi approntato un sistema di cerchiatura formato da diaframmi in metallo posizionati al centro della torre, che impediscono il rigonfiamento verso l'interno delle pareti e che consentono l'ancoraggio di una serie di barre radiali che attraversano le buche portaie e terminano in piastre esterne, quest'ultime aventi funzione di impedire la dilatazione verso l'esterno della muratura.

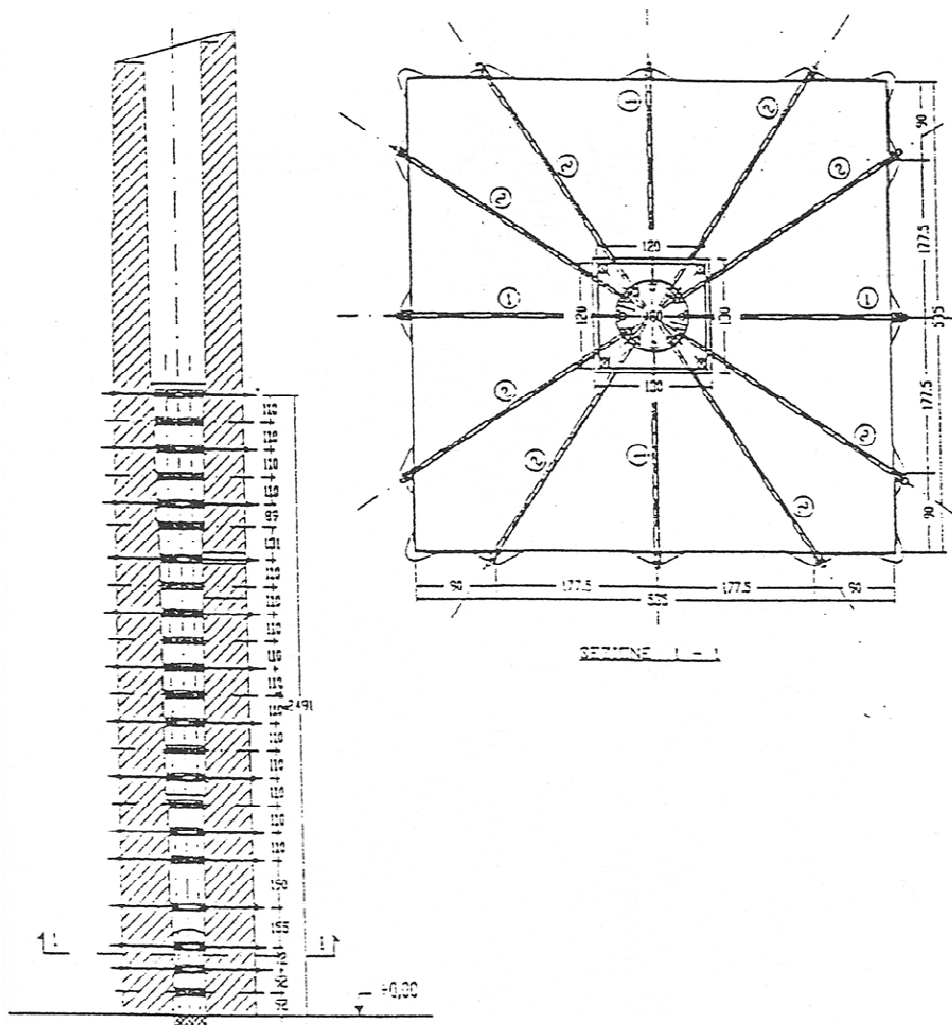


Figura 17 Torre Fraccaro: sezioni verticale ed orizzontale dell'intervento [16]

Gli elementi del progetto sono essenzialmente due:

- i diaframmi in acciaio disposti orizzontalmente all'interno della torre, ad un passo pari a quello delle buche puntaie (circa 1,10 m);
- il sistema di incatenamento a passo doppio rispetto ai diaframmi, costituito da barre in acciaio inox che attraversano le buche puntaie e da piastre di contrasto che insistono sul paramento esterno della muratura.

Si rivelò come particolarmente critico lo studio nel dettaglio dei diaframmi metallici, che avevano la necessità di conformarsi alla muratura, caratterizzata da notevoli irregolarità. Nella realizzazione dei diaframmi si dovettero dunque prevedere ampie tolleranze per una corretta messa in opera degli elementi, con capacità di adattamento a tutti i dislivelli ed i difetti di inclinazione delle buche puntaie, garantendo al tempo stesso la perfetta linearità del tirante e l'uniforme distribuzione delle pressioni sulle piastre esterne di contrasto.

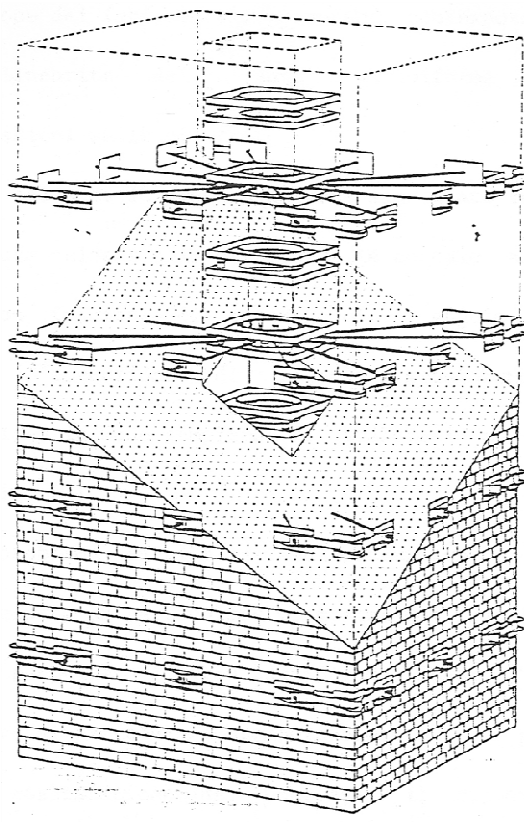


Figura 18 Torre Fraccaro: assonometria dell'intervento di consolidamento [16]

Anche il montaggio degli elementi strutturali ha richiesto specifici accorgimenti: i diaframmi metallici, realizzati in officina come blocchi unitari, dovevano essere calati nella torre dall'alto in quanto la sezione interna delle murature è maggiore alla base e si restringe procedendo verso l'alto.