

## Capitolo 3

# L'intervento di consolidamento strutturale sulla torre di San Dalmazio

### 3.1. Rilievo e diagnosi del dissesto statico

#### 3.1.1. Indagini per la valutazione delle condizioni statiche della torre di San Dalmazio

Il rilievo dello stato patologico di degrado della torre ha riguardato i seguenti punti:

##### Condizioni globali del fabbricato

- Fuori piombo delle strutture;
- Interferenze e danni provocati dall'interazione con strutture edilizie estranee appoggiate alle pareti del monumento;

##### Stato delle fondazioni

- Eventuali cedimenti delle fondazioni;
- Interferenze e danni prodotti nel sottosuolo alle fondazioni dal passaggio di canalizzazioni non a tenuta;

### Condizioni delle pareti in muratura

- Fessurazioni principali delle murature;
- Eventuali distacchi fra le diverse parti delle murature;
- Degradazione delle murature o dei rivestimenti in mattoni per cause meccaniche, fisiche o chimico-fisiche;

Il primo livello di indagine si riferisce dunque al **comportamento globale della struttura**. La misura ed il controllo dell'inclinazione della torre sono stati effettuati tramite l'installazione di due sistemi di rilevazione dei movimenti della struttura:

- Un telecoordinometro, che consente di quantificare gli spostamenti della sommità della torre rispetto alla base; lo strumento misura, a tempi stabiliti, le variazioni di posizione di un filo a piombo che percorre l'intera altezza della torre, dal punto di attacco in sommità fino alla postazione di misura a quota terreno;
- Un inclinometro biassiale, posizionato sulla parete Nord, in grado di misurare le rotazioni Nord-Sud ed Est-Ovest che si hanno nel punto di installazione.

L'analisi combinata dei dati forniti da questi strumenti nell'arco di circa 4 anni di monitoraggio continuato (1990-1993) ha consentito di quantificare gli spostamenti della torre, nelle sue componenti cicliche (legate ad un comportamento fisiologico giornaliero e stagionale) e progressive (imputabili invece ad una situazione di patologia), ed inoltre di valutare la quota parte di spostamento sommitale imputabile ad una rotazione alla base, conseguenza di un cedimento fondazionale differenziale. È dunque risultato un andamento degli spostamenti stabile nel corso degli anni, caratterizzato in particolare in direzione Est-Ovest da andamenti ciclici giornalieri e stagionali; l'inclinometro non ha evidenziato alcun comportamento patologico a livello di fondazioni.

Per valutare la situazione in **fondazione** sono state inoltre eseguiti sondaggi e prove penetrometriche di vario tipo sul terreno e perforazioni attraverso il masso di fondazione.

Le perforazioni eseguite hanno accertato che il masso di fondazione si spinge fino a 4,5 m circa

di profondità sotto il piano stradale, e che la muratura di fondazione è scadente e con vuoti non trascurabili. Il masso di fondazione sul lato strada è molto vicino al condotto fognario romano, che si spinge fino a circa 4 m di profondità e ha una muratura piuttosto sconnessa.

I sondaggi e le prove penetrometriche hanno indicato che il terreno di fondazione fino oltre 20 m di profondità è formato da sabbie limose e limi sabbiosi talvolta interrotti da livelli argillosi di relativamente piccolo spessore. La falda freatica si trova a circa 10 m di profondità; è stata già accertata la presenza tra 5 e 10 m di profondità di uno strato di terreno sabbioso limoso imbevuto di acqua proveniente dalla fognatura.

Nel complesso, per quanto riguarda il terreno di fondazione, si è in presenza di terreno sabbioso-limoso abbastanza addensato, con bassa compressibilità e con resistenza al taglio sufficientemente elevata. Si è potuto pertanto ritenere che la situazione fondazionale nei riguardi del terreno fosse tranquilla, tenuto conto anche che le tensioni trasmesse dalla torre al terreno agivano da molto tempo e che gli interventi di consolidamento non avrebbero dato luogo ad aumenti sensibili di tensioni.

La presenza della fognatura adiacente e la dispersione d'acqua ad essa collegata avevano destato invece maggiori preoccupazioni, in quanto potevano aver riflessi negativi sia sulla muratura che sul terreno di fondazione. Un punto fermo dell'intervento di consolidamento è risultato dunque l'adozione di misure di protezione nei confronti del possibile dilavamento originato dalle perdite dell'acquedotto.

La valutazione dello stato delle **pareti in muratura** ha riguardato innanzitutto la definizione del quadro fessurativo. Il rilievo indicava che:

- Le principali lesioni si presentavano nelle pareti Est e Ovest tra quota 8 e 17 m, con andamento verticale, ed interessavano la zona centrale della parete, inglobando le finestre esistenti, tra cui alcune tamponate. Dette lesioni si mostravano come passanti;
- Altre lesioni si presentavano nelle pareti Nord e Sud, tra i 5 e i 12 m, in prossimità degli spigoli con la parete Est e con andamento obliquo; entrambe avevano origine in aperture già tamponate.

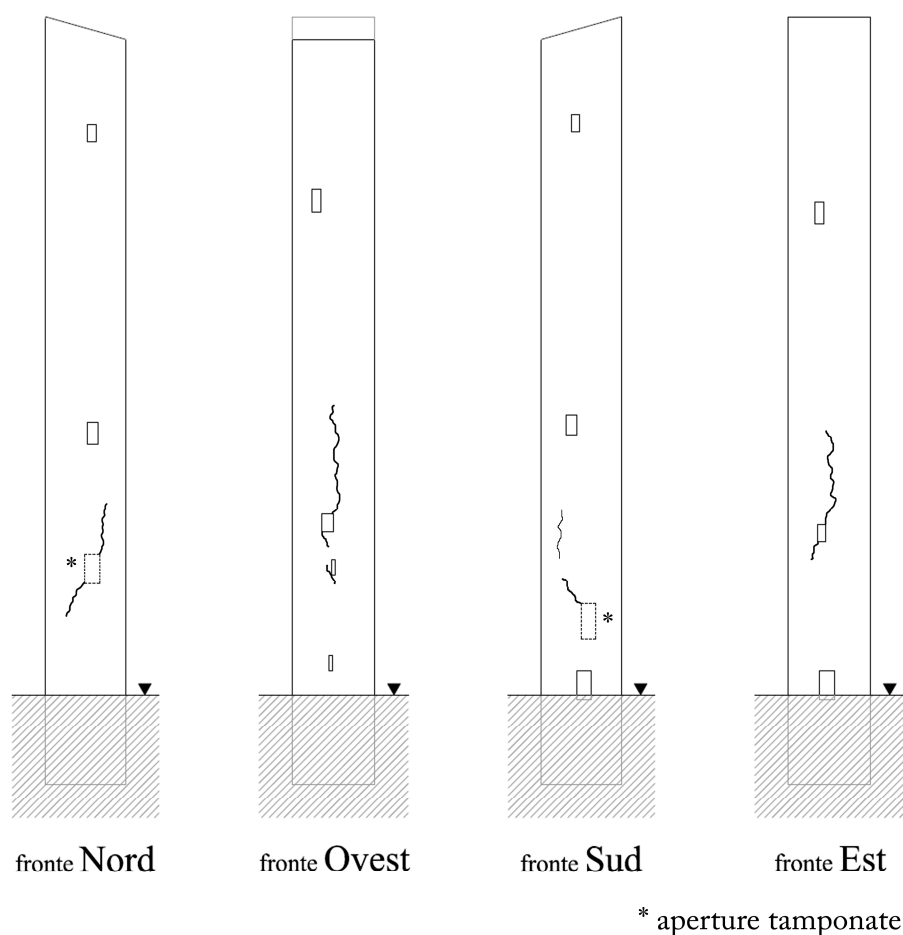


Figura 19 Quadro fessurativo della torre

Oltre alle lesioni, sulla parete Ovest in prossimità dell'ultima finestra si manifestava un vero e proprio distacco del paramento murario dalla retrostante muratura del sacco interno, dando luogo ad una fessura di circa 20 mm, leggibile in corrispondenza della finestra ma che interessava l'intera parete per un'altezza di circa 4 m.

Inoltre, in prossimità delle buche pontai, molti dei mattoni che costituiscono da voltino alle buche erano spezzati e lesionati con una proporzione di due voltini rotti su tre esaminati.

### 3.1.2. La diagnosi del dissesto riscontrato

Prima di procedere con la definizione dell'intervento di consolidamento, è stato dunque indispensabile individuare quelle cause strutturali (spesso rappresentate da distorsioni imposte) che, agendo sulla torre in concomitanza con il peso proprio ed il vento, avevano dato origine al

quadro fessurativo riscontrato sulle quattro facciate.

La presenza delle lunghe fessure verticali sulle pareti Est ed Ovest e delle fessure inclinate sulle pareti Nord e Sud nella zona compresa fra 8 e 18 metri dal piano strada, appariva inconsueta e non facilmente decifrabile, in particolare per il fatto che le due fessure inclinate sulle pareti Nord e Sud avevano andamento opposto. È utile dunque ripercorrere gli eventi strutturali più salienti intervenuti nel tempo:

- La Chiesa viene addossata alla torre (1618) e la volta di copertura, oltre al tetto costituito da due puntoni, trova contrasto sul lato Est e sullo spigolo Sud-Est della torre;
- Vengono rimosse le pareti dell'edificio adiacente la torre che, a Sud, ne costituivano un contrafforte (1869);
- Vengono aperti varchi in breccia nelle pareti della torre, dando luogo al possibile innesco di crepe:
  - a quota 4 m nella parete Sud, per il carico dei foraggi (1869)
  - a quota 0 m sempre nella parete Sud, per l'accesso agli spogliatoi della palestra (1900)
  - a quota 10 m nella parete Ovest, per l'accesso al previsto (ma non realizzato) salone superiore sopalcato (1903);
- Viene notevolmente diminuita la rigidità delle pareti della chiesa (che diventano così meno capaci di resistere alla spinta delle volte e della copertura) con vari interventi: rimozione del divisorio tra coro e chiesa esterna (1804), apertura di ampie porte e finestre nelle pareti laterali della chiesa ed in facciata (1900), demolizione parziale delle lesene di rinforzo delle pareti (1900).

Tutte le lesioni presenti risultavano compatibili con sollecitazioni applicate alla torre all'altezza della copertura della chiesa, evidenziando così una interazione fra le due strutture. Si identificano dunque due distinte azioni:

- Una spinta in direzione Nord-Sud esercitata dalla volta e dalla copertura della chiesa, entrambe spingenti, in quanto mancanti di catena di contrasto in prossimità della torre.

Questa spinta ha causato le lesioni verticali di trazione che appaiono sulle pareti Est ed Ovest;

- Una spinta in direzione Est-Ovest esercitata dai 34 m di estensione della chiesa, addossata alla torre, a causa delle variazioni termiche stagionali. Quest'ultima causa induce azioni interne di taglio e momento torcente sulla torre e, di conseguenza, rotture inclinate per trazione della muratura sulle pareti Nord e Sud, giustificando l'opposta inclinazione delle lesioni.

## **3.2. L'intervento di consolidamento strutturale**

### **3.2.1. Il progetto preliminare**

In seguito alle osservazioni riportate al paragrafo precedente, venne elaborato dal Prof. Ing. L. Jurina e dal Prof. Ing. P. Colombo un progetto preliminare di consolidamento strutturale della torre di San Dalmazio, che prevedeva i seguenti interventi:

- Realizzazione di uno schermo di iniezioni tra la torre e la fognatura, al fine di proteggere le fondazioni dai liquidi da essa dispersi;
- Iniezioni di miscele a base di legante idraulico nella muratura;
- Cerchiatura della torre mediante l'utilizzo di barre in acciaio inox inserite nella muratura, secondo la tecnica delle iniezioni armate, con diverse angolazioni (parallele alle pareti, inclinate a 45° e anche perpendicolari alle pareti) per soddisfare molteplici obiettivi: rinforzare gli ammorsamenti d'angolo, ripristinare la continuità in corrispondenza delle lesioni, aumentare la duttilità della muratura, creare un sistema a traliccio per la resistenza ai carichi orizzontali, indurre uno stato di tensione triassiale sotto carico;
- Ripristino delle catene e costituzione di una soletta armata all'estradosso della volta della chiesa, al fine di eliminare le spinte laterali scaricate sulla torre;

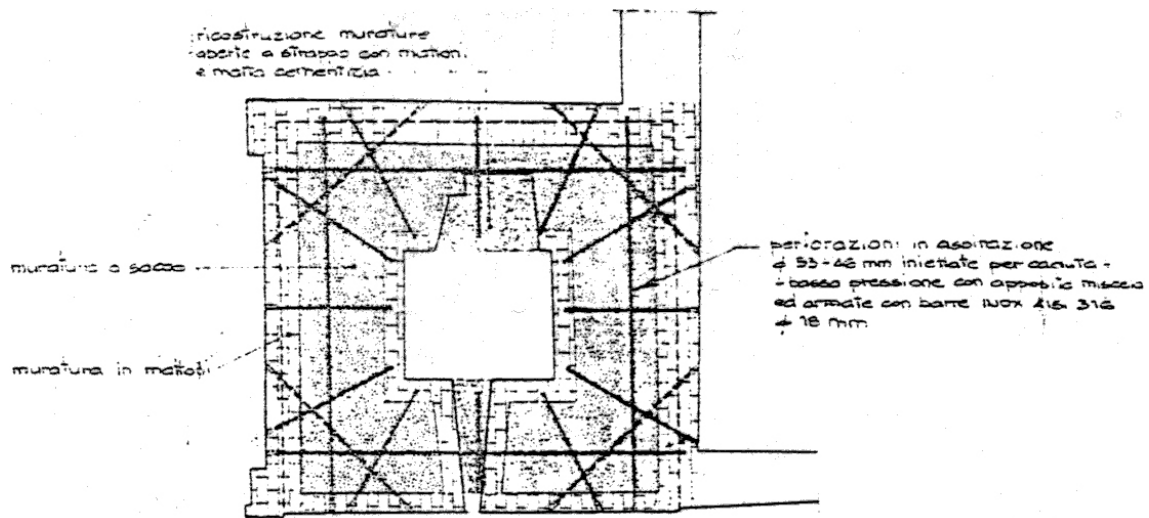


Figura 20 Progetto preliminare di consolidamento: sezione orizzontale della torre a quota 1.00 m [8]

### 3.2.2. Il progetto definitivo: l'intervento della “torre nella torre”

Successivamente in sede di progettazione esecutiva (attuata dal prof. ing. L. Jurina), pur non essendo emersi fatti nuovi che abbiano modificato in modo sostanziale il quadro diagnostico di massima, a seguito di colloqui con gli organi di tutela del Ministero dei Beni Culturali si scelse di abbandonare la tecnica delle iniezioni armate in favore di un intervento meno invasivo e con caratteristiche di completa rimovibilità, oltre che in grado di sgravare parzialmente dal suo carico verticale la muratura alla base della torre, che dalle analisi condotte risultava particolarmente sollecitata.

Preso dunque atto del notevole impegno strutturale della muratura, venne definito un intervento volto a:

- ripristinare la continuità della muratura in corrispondenza delle lesioni e delle lacune, tramite iniezioni di malta a base idraulica e, ove necessario, ricostruzione del paramento murario;
- realizzare un effetto di contenimento orizzontale della muratura mediante barre orizzontali (in numero di 12 ogni 105 cm circa) passanti attraverso le buche pontai e successivamente poste in tensione;
- realizzare un sistema di cerchiatura della torre dall'interno, tramite la posa di “girelli”

- metallici collegati alle estremità interne delle barre di contenimento;
- trasferire parte del carico verticale trasmesso alla base ad un'altra torre – realizzata in acciaio e posta all'interno di quella in muratura – mediante stralli inclinati di collegamento tra la torre metallica e quella in muratura posti in coazione (tecnica chiamata “torre nella torre”).

Per quanto riguarda invece la protezione dai liquidi fuoriuscenti dalla fognatura romana e l'interazione della torre con la chiesa ad essa addossata, si confermarono in linea di massima gli interventi previsti in fase preliminare di progetto (schermo di iniezioni tra torre e muratura ed eliminazione delle spinte orizzontali provenienti dalla chiesa con catene e soletta armata).

### **Contenimento mediante barre passanti**

La torre di San Dalmazio, come molte torri coeve, presenta la fortunata circostanza di un numero elevato di piccoli fori con andamento radiale su piani orizzontali, che costituiscono le *buche pontaiie*, ossia alloggiamenti per i supporti dei piani di lavoro, da usare sia durante la costruzione che durante le eventuali manutenzioni. Tale circostanza venne sfruttata nel progetto di consolidamento per l'agevole posa di elementi passanti di contenimento, ovvero barre metalliche poste in trazione, in grado di indurre uno stato di tensione triassiale nella muratura.

Questa strategia era già stata adottata nel consolidamento del campanile della chiesa di San Michele di Albenga (illustrato al paragrafo 2.3) e successivamente per la messa a sicurezza della vicina torre Fraccaro (paragrafo 2.5), nella quale il progettista – il Prof. Ing. G. Ballio – ha previsto che il trasferimento delle azioni tra tiranti in acciaio e muratura avvenga tramite piastre metalliche esterne di contrasto, che inevitabilmente risultano ben visibili dall'esterno. Nel caso della torre di San Dalmazio si è invece optato per una soluzione che non andasse a compromettere l'aspetto del fabbricato, lasciando i prospetti esterni pressoché inalterati.

L'intervento infatti prevedeva l'arretramento delle piastre di contrasto esterne rispetto al filo di facciata, ed il loro occultamento all'interno delle buche pontaiie, con il risultato che diventano pressoché invisibili da parte di un osservatore esterno. Per far sì che la piastra fosse effettivamente solidarizzata al paramento esterno in mattoni, una prima ipotesi era stata quella



di posizionare all'interno delle buche (in posizione lievemente arretrata rispetto alla facciata esterna) dei tubolari metallici, da collegare alla muratura con resina epossidica: i tubolari avrebbero così offerto la battuta di contrasto richiesta dal tirante. Tale ipotesi si rivelò alla prova dei fatti impraticabile per via delle notevoli differenze dimensionali delle varie buche, che avrebbero richiesto la predisposizione di più tipologie di tubolari, oltre che dell'irregolarità delle buche stesse, che avrebbe portato a considerevoli difficoltà operative di posa e ad un eccessivo impiego di resina.

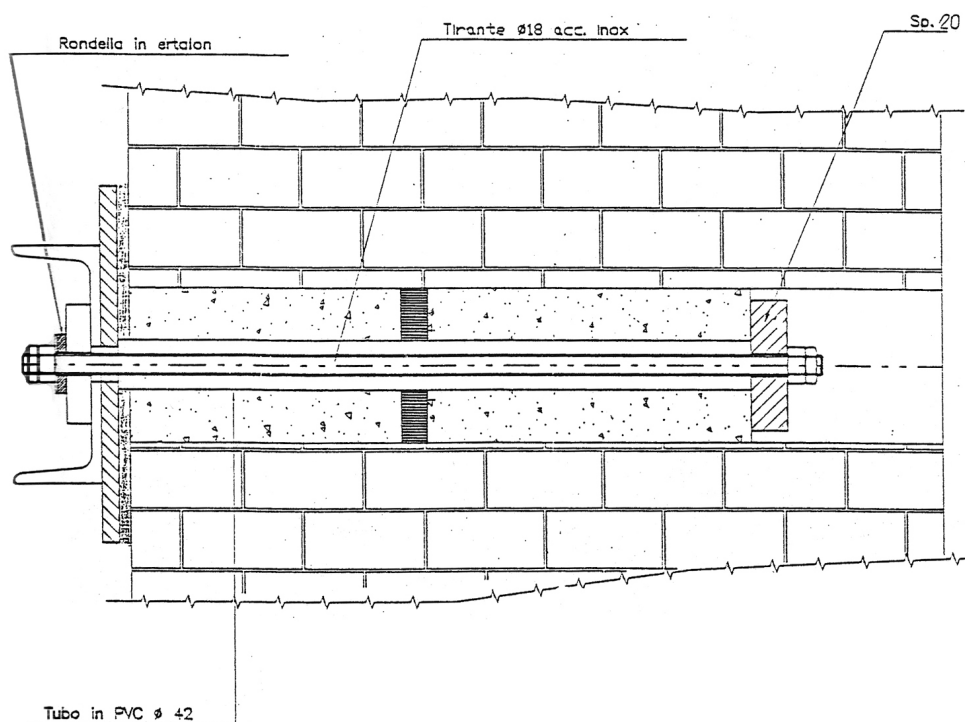


Figura 21 Tirantature radiali eseguite all'interno delle buche puntaie [9]

Si scelse dunque di garantire il contrasto alla piastra esterna tramite il riempimento delle buche puntaie con una malta idraulica a ritiro compensato, mantenendo sempre l'arretramento di 12 cm rispetto al filo esterno con un'opportuna cassetatura. Per la definizione della malta vennero effettuate le opportune verifiche di compatibilità chimico-fisica con la muratura, mentre per quanto riguarda le sue proprietà meccaniche si dovette operare un compromesso tra due esigenze:

- Buona resistenza meccanica, per poter sostenere l'azione di compressione data dalla tesatura del tirante metallico;

- Basso modulo elastico, in modo da ottenere un effettivo trasferimento delle azioni alla muratura circostante.

Infine si reputò soddisfacente l'utilizzo di una malta (*Rurewall B1* della Ruredil) con resistenza ultima a compressione  $f_c = 12 \text{ MPa}$  e modulo elastico  $E = 8 \text{ GPa}$ .

Mediamente si è osservato un assorbimento di circa 45 litri di miscela per ogni buca puntaia, ovvero un volume superiore al doppio della buca stessa: un ulteriore vantaggio di questo tipo di intervento è dunque il miglioramento delle caratteristiche meccaniche e dell'omogeneità della muratura, grazie al parziale riempimento delle lacune interne con iniezioni di legante.



Figura 22 Piastra esterna di contrasto all'interno di una buca puntaia [19]

Le buche puntaie sono numerose e tutte passanti; solo nella parte inferiore della torre l'assenza delle buche ha imposto di praticare alcune perforazioni nella muratura, per consentire l'inserimento dei tiranti in acciaio inossidabile.

Gli obiettivi conseguiti con questo intervento sono dunque molteplici:

- Solidarizzazione dei tre strati che vanno a comporre l'apparato murario, ovvero i due paramenti in mattoni e il riempimento in conglomerato cementizio, tramite l'imposizione di vincoli diffusi (circa 1 ogni  $1,75 \text{ m}^2$  di facciata esterna);
- Determinazione di uno stato di compressione triassiale mediante tesatura dei tiranti: la muratura vede quindi crescere il proprio limite di compressione a collasso e la propria

duttilità;

- Miglioramento delle proprietà meccaniche della muratura e diminuzione dei difetti locali (fessurazioni e lacune), per via della diffusione della miscela idraulica;
- Collegamento della muratura con i girelli metallici, la cui funzione è illustrata nel paragrafo successivo.

### **Cerchiatura del complesso strutturale**

Si è visto come ogni 1,05 m circa in altezza siano presenti 12 buche puntaie nella muratura. Le estremità interne dei tiranti inseriti nelle buche sono collegate tra loro da un profilo UPN 200 che corre sul perimetro interno della torre, e sul quale insistono le piastre di contrasto. Ne risultano una serie di “girelli” metallici, con frequenza pari a quella delle buche puntaie, che danno luogo ad un sistema diffuso di cerchiatura della torre dal suo interno. Il collegamento tra profili UPN, collegati tra loro con giunzioni bullonate regolabili, e muratura è garantito dall'attrito che si genera grazie al tensionamento dei tiranti, che impedisce lo scorrimento relativo sulla superficie di contatto.



**Figura 23 Girello metallico interno alla torre muraria [19]**

Il ruolo dei girelli è quindi quello di contrastare la dilatazione trasversale della torre, e di conseguenza di incrementarne la resistenza ultima a compressione.

### **Riduzione delle tensioni verticali sulla muratura**

All'interno della torre di San Dalmazio è presente una cavità continua, dal masso di fondazione sino alla copertura, di dimensione minima pari a circa 180x190 cm e che si allarga salendo in quota. Tale spazio è stato sfruttato per il posizionamento di un traliccio metallico realizzato con segmenti di sezioni standard ad H e C, zincati a caldo, e collegati in opera mediante bulloni. L'obiettivo è stato quello di far collaborare tale struttura con la torre muraria, in modo tale da gravarla di una quota parte del peso proprio della muratura pari a circa il 12%. Per questo è stata messa in opera una fitta rete di stralli (barre  $\phi 16$  in acciaio C40 zincato), ciascuno dotato di un proprio tenditore, che collegano il traliccio ai girelli metallici.

Per la costruzione della torre metallica, sono stati dapprima realizzati in officina dei portali, con connessioni saldate, di lunghezza massima pari a 210 cm<sup>3</sup>, il che ha permesso una facile accessibilità attraverso la porta di collegamento tra la torre e la adiacente chiesa. I collegamenti in opera sono invece tutti di tipo bullonato.

A traliccio completato, tra di esso e la torre in muratura si è creato un cavedio che si allarga salendo in quota, per via della riduzione dello spessore dell'apparato murario. In questo spazio sono stati collocati gli stralli di collegamento tra le due strutture, fino a quel momento indipendenti tra loro. Gli stralli si dipartono dai nodi principali del traliccio metallico, per collegarsi, seguendo differenti inclinazioni, con i girelli solidali alla muratura: dapprima sono state posizionate tutte le barre, dopodiché si è proceduto al loro tensionamento, operazione che, a causa dell'elevato grado di iperstaticità dell'assetto strutturale, ha richiesto più passaggi. Il controllo della quota parte di carico trasferito alla torre metallica è avvenuto grazie al posizionamento di 8 estensimetri elettrici, disposti sulle 4 gambe del traliccio.

Sono stati previsti 2 ordini di stralli:

---

<sup>3</sup> Ovvero il doppio del modulo definito della distanza media tra le buche pontae.

- Stralli *portanti*, diretti verso il basso, cui è stata imposta una post-tensione pari a 5 kN;
- Stralli *stabilizzanti*, diretti verso l'alto, cui è stata invece imposta una post-tensione pari a 2 kN.

Se ci si fosse limitati a considerare i soli carichi verticali (peso proprio), sarebbe stato sufficiente posare gli stralli portanti, che sono quelli deputati al trasferimento dei carichi tra le due strutture, e per di più con un tensionamento minore. Tuttavia si è ritenuto che questo tipo di intervento potesse avere un benefico effetto sulla torre anche per quanto riguarda la risposta alle azioni orizzontali, originate dal vento o dal sisma<sup>4</sup>.

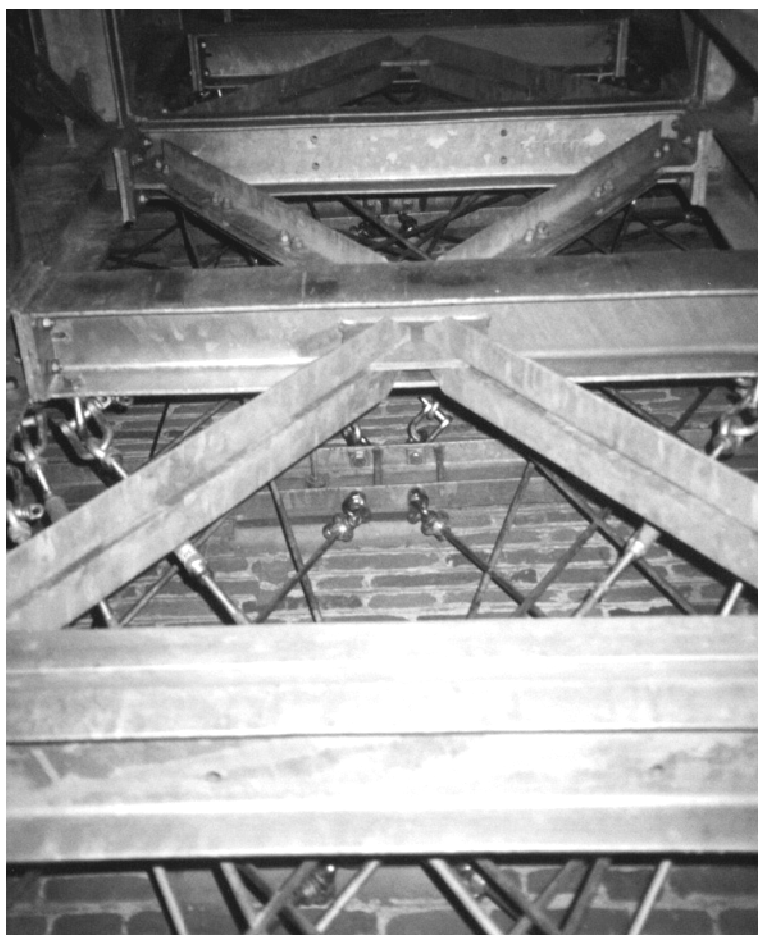


Figura 24 Traliccio metallico e stralli di collegamento con la muratura [19]

---

<sup>4</sup> Le azioni date dall'interazione con gli edifici circostanti – volte spingenti, dilatazioni termiche,... – sono state eliminate all'origine.

La collaborazione tra le due torri (quella in muratura e quella in acciaio) è dunque ottenuta realizzando un sistema di collegamento a struttura reticolare, nel quale gli stralli stabilizzanti, diretti verso l'alto, assumono un ruolo fondamentale per evitare lo scorrimento reciproco in direzione verticale ( $z$ ). Anch'essi vengono tesi (seppur in modo minore rispetto a quelli portanti), nonostante quest'operazione sia svantaggiosa a riguardo del trasferimento dei carichi verticali verso la torre in acciaio. La tesatura a 2 kN è del resto necessaria, poiché il funzionamento del sistema reticolare porterebbe ad avere alcune bielle compresse, ma gli stralli non sono assolutamente in grado di resistere a compressione per via della loro notevole snellezza, che li porterebbe immediatamente ad instabilizzarsi. Il tensionamento serve dunque per scongiurare che gli stralli possano andare in compressione, e compromettere così il funzionamento del sistema.

Un'ulteriore caratteristica degli stralli è il loro andamento in pianta, nel piano  $xy$ . Le barre sono difatti disposte in modo incrociato, per lo stesso motivo per cui sono presenti stralli verso l'alto. Difatti, per scongiurare uno scorrimento reciproco tra le due torri secondo  $x$  o  $y$ , occorre anche qui formare un assetto reticolare, che si può ottenere incrociando gli stralli. In caso contrario infatti – ovvero qualora gli stralli fossero posati in assetto non incrociato – in presenza di sollecitazioni torsionali le due torri concentriche risulterebbero indipendenti tra loro, dato che nessun elemento sarebbe in grado di imporre loro la medesima rotazione attorno all'asse  $z$ .



Figura 25 Disposizione dei raggi in una ruota di bicicletta

Si potrebbe a tal proposito fare un parallelo con ciò che avviene nelle ruote delle biciclette, dove il collegamento e la solidarizzazione del mozzo interno e del cerchio esterno è affidato ad un sistema di raggi, elementi snelli che lavorano a trazione e che sono in grado di trasferire le azioni torsionali in quanto disposti con andamento incrociato (Figura 25: si nota come i raggi si innestino nel mozzo con direzione tangente al perimetro).

All'interno del traliccio metallico si è ricavato uno spazio totalmente libero, di dimensioni 160x160 cm circa in pianta, che è stato utilizzato per l'alloggiamento di una piattaforma sollevante, adoperata sia durante le fasi di lavoro come piano di lavoro spostabile e ascensore di cantiere sia, a lavori ultimati, come mezzo di risalita al servizio di manutenzione.

L'intervento ha comportato anche l'esecuzione di fondazioni adeguate a sostegno del traliccio metallico: è stata realizzata una piastra di ripartizione interna alla torre, in cemento armato e alta 40 cm, separata dalla muratura da una guaina bituminosa per garantirne l'asportabilità. La piastra poggia su 12 micropali di fondazione in acciaio (tipo TUBFIX) che attraversano il dado in muratura e si intestano nel sottosuolo fino a quota -12 m. Le iniezioni di miscela associate all'esecuzione dei micropali sono volte a consolidare il dado di fondazione, colmandone i vuoti presenti.

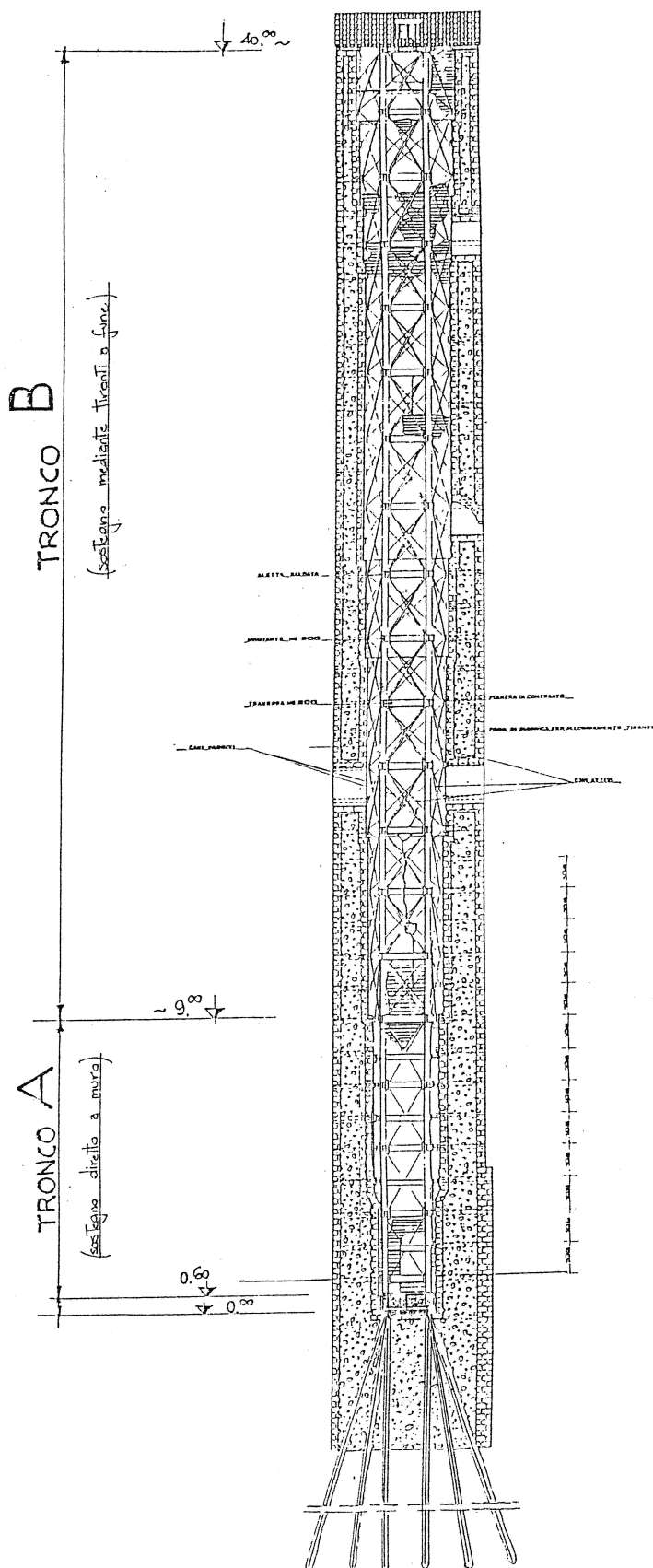
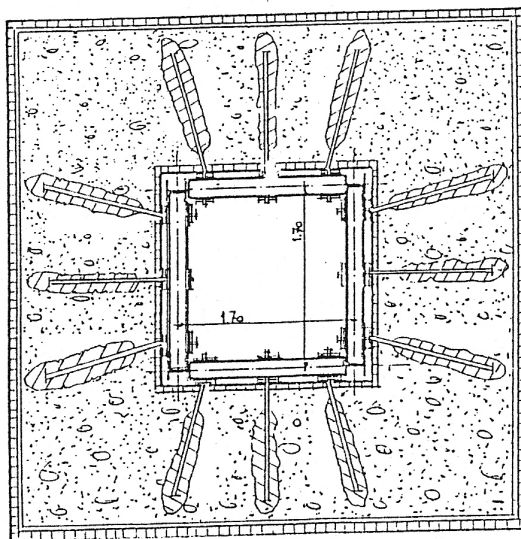
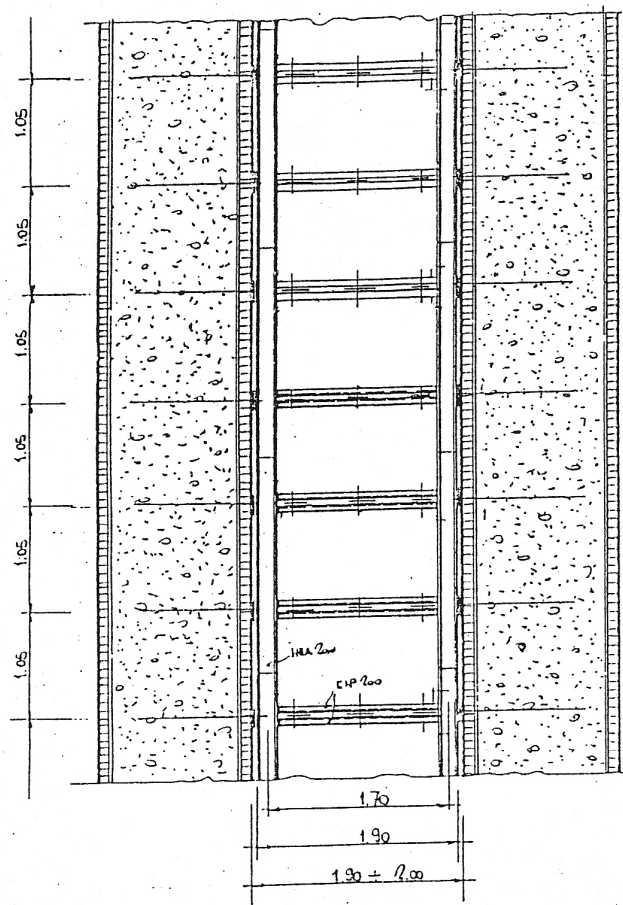


Figura 26 Progetto di consolidamento San Dalmazio: sezione verticale traliccio [9]



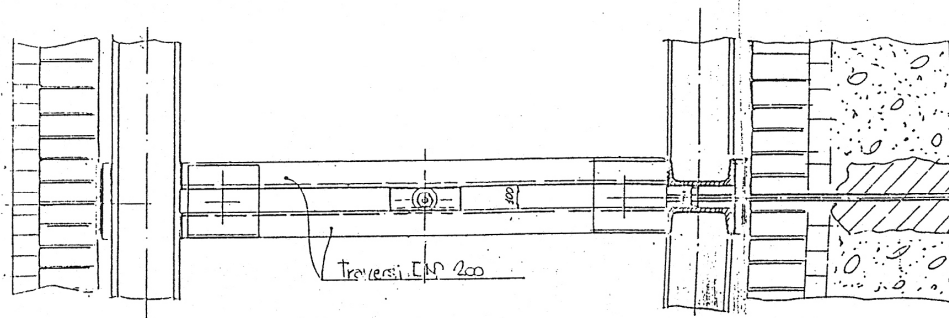
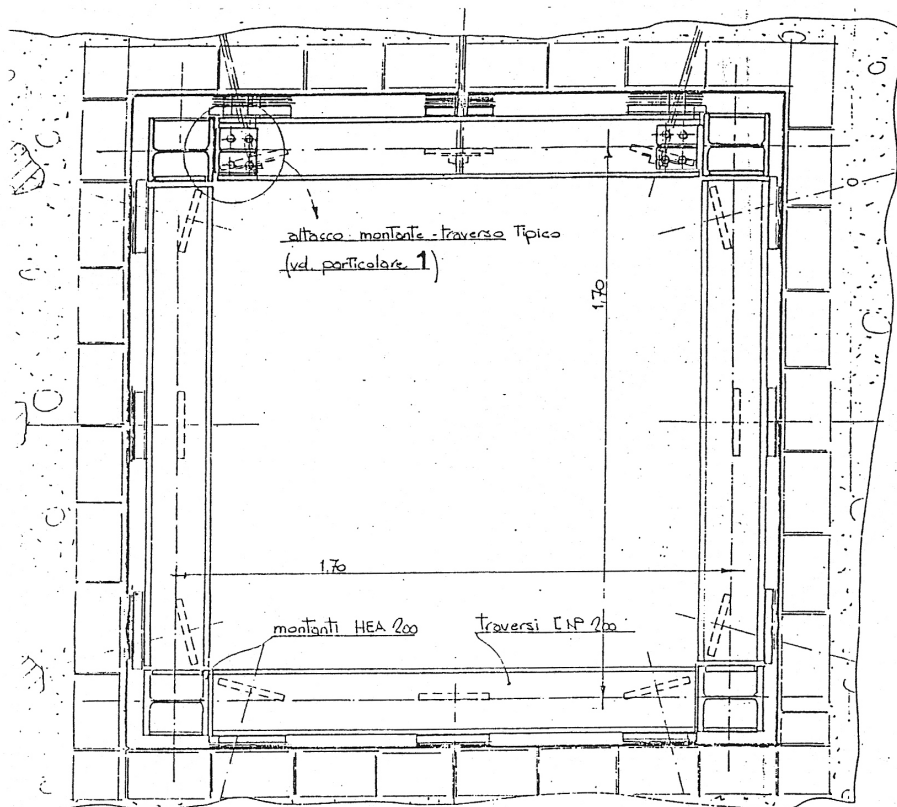
SEZIONE



PIANTA

Figura 27 Progetto di consolidamento San Dalmazio: tronco A, sezioni verticale ed orizzontale [9]

P I A N T A



S E Z I O N E

Figura 28 Progetto di consolidamento San Dalmazio: tronco A, dettagli [9]

SEZIONE

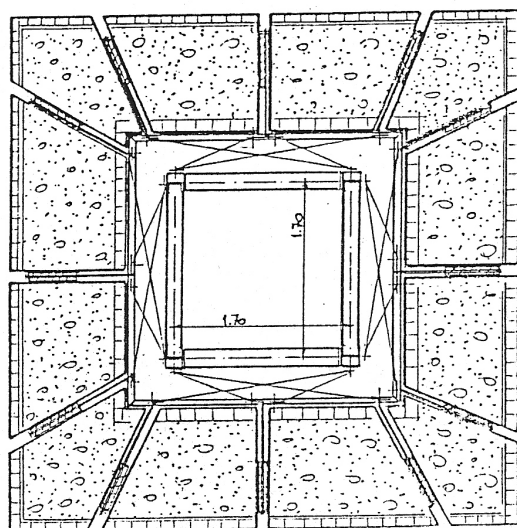
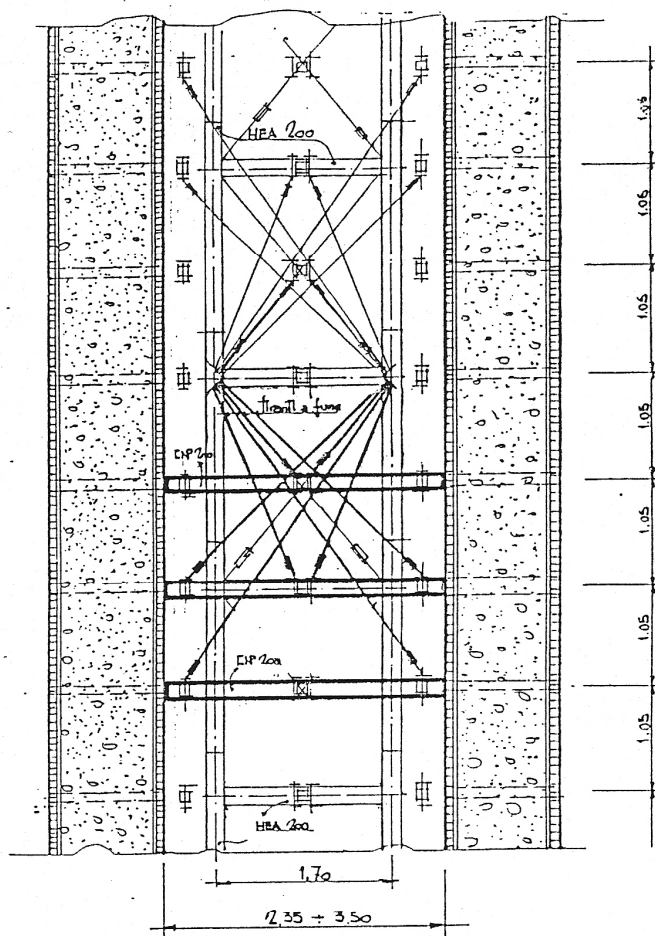
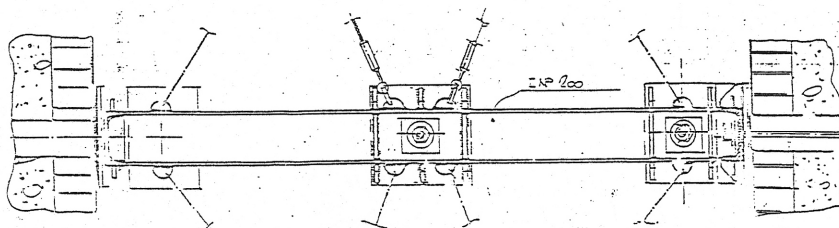
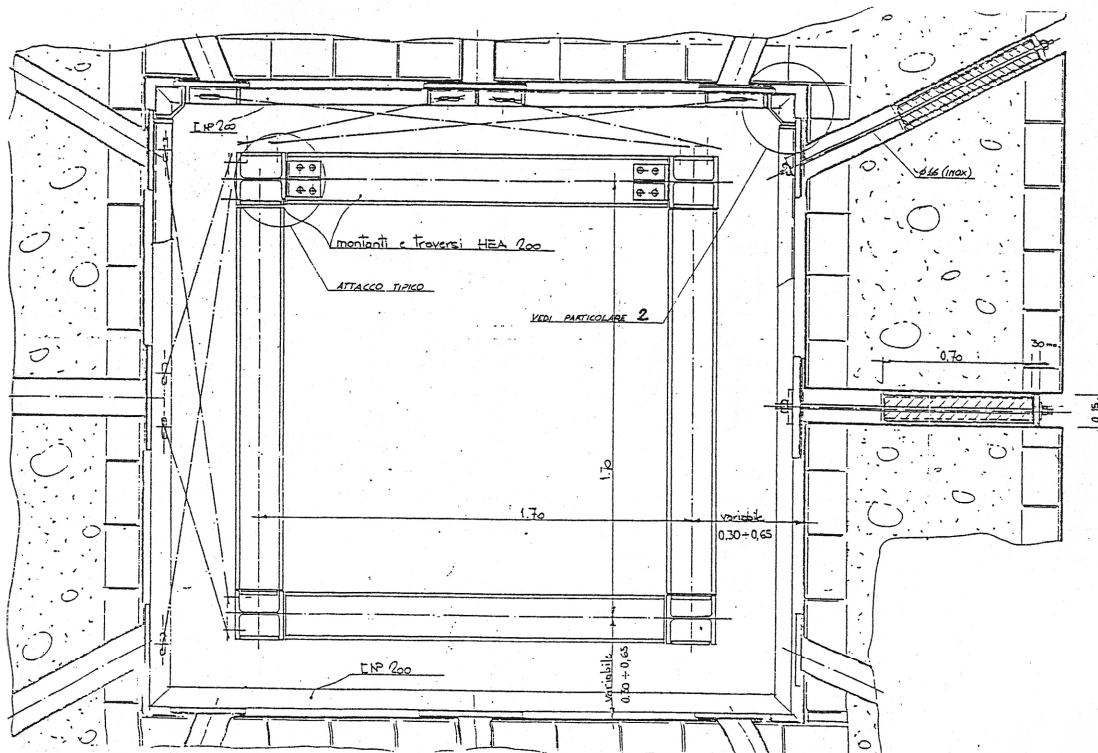


Figura 29 Progetto di consolidamento San Dalmazio: tronco B, sezioni verticale ed orizzontale [9]

PIANTA



SEZIONE

Figura 30 Progetto di consolidamento San Dalmazio: tronco B, dettagli [9]

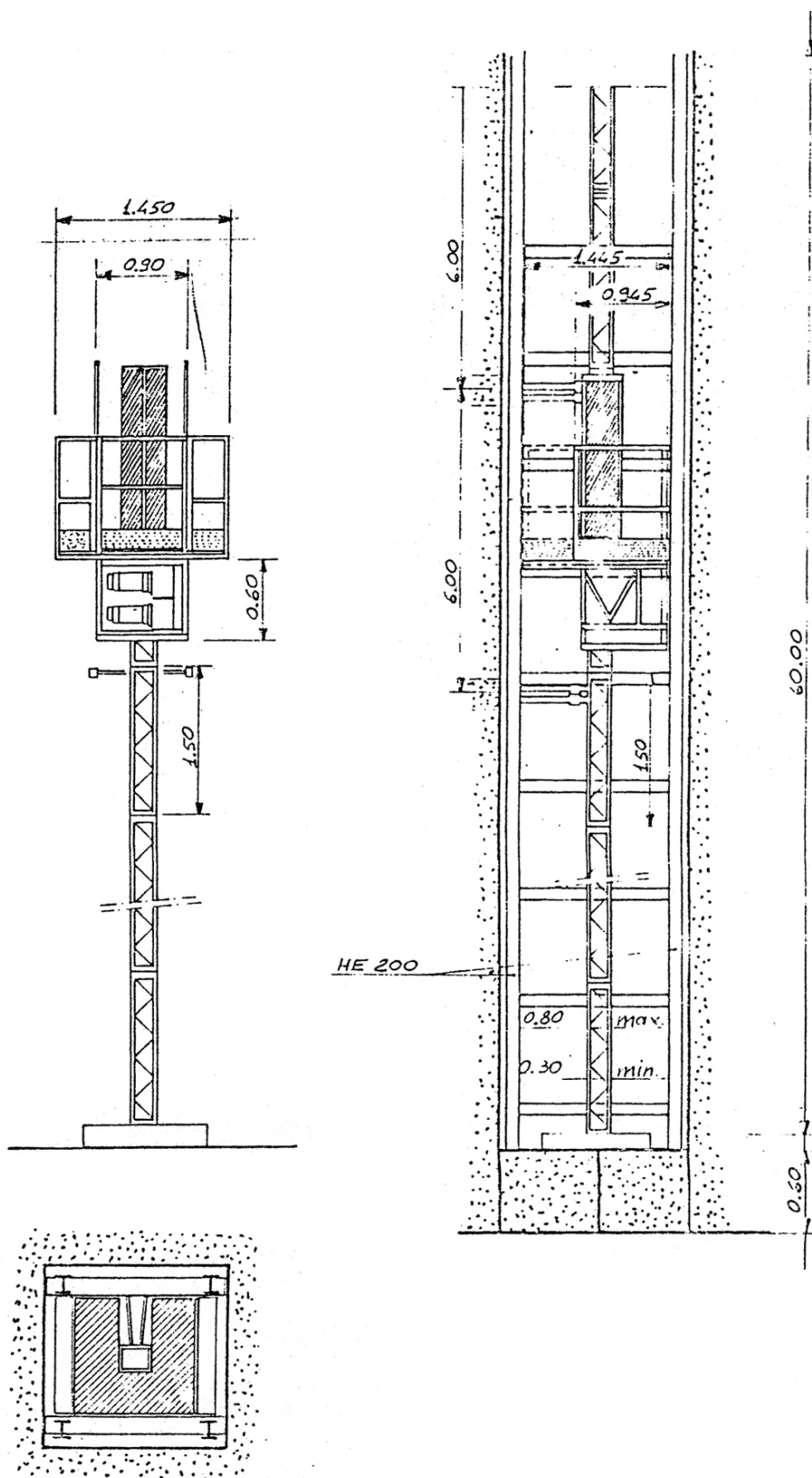


Figura 31 Progetto di consolidamento San Dalmazio: ascensore monocolonna su base fissa da inserire all'interno del traliccio [9]