

## **Il recupero della Torre pendente di Pisa**

Ufficio Tecnico -Trevi Spa

La stabilizzazione della Torre di Pisa è compiuta da tempo; nel giorno di San Ranieri (16 giugno) del 2001 il monumento è stato riconsegnato alla comunità. Il 31 dicembre dello stesso anno si è sciolto il Comitato internazionale che – in oltre 10 anni di studi, ricerche e interventi – ha ottenuto questo risultato.

Gli studi condotti dal Comitato, la graduale e laboriosa comprensione dei mali della Torre, la concezione e la definizione degli interventi provvisori e definitivi di stabilizzazione e infine la loro attuazione hanno ripetutamente formato oggetto di attenzione da parte dei media e sono stati trattati in numerosi articoli scientifici pubblicati in varie sedi specialistiche.

Meno nota, ma certo non meno ricca e interessante, né meno importante, è stata l'attività di progettazione esecutiva e realizzazione materiale degli interventi concepiti dal Comitato, svolta con impegno, passione e grande maestria dal Consorzio Progetto Torre di Pisa, costituito dalle Società Trevi, Rodio, Italsonda, Ismes e Bonifica.

Questo capitolo vuole essere un resoconto, principalmente per immagini, dei lavori eseguiti nel Campo dei Miracoli fra il 1990 e il 2001.

### **Struttura della Torre**

La costruzione della Torre, da parte dell'architetto e scultore Bonanno Pisano, cominciò nell'agosto del 1173.

I lavori proseguirono sino a circa un quarto del quarto ordine, raggiunto nel 1178 e furono qui sospesi per essere ripresi nel 1272 da parte di Giovanni di Simone.

Nel 1278, al raggiungimento dell'ultimo ordine, il settimo, i lavori furono nuovamente sospesi.

Solamente nel 1360, Tommaso di Andrea Pisano cominciò l'opera di completamento della cella campanaria, che terminò nel 1370 con la posa in opera delle campane.

La Torre è costituita da un corpo cilindrico circondato da loggiati con archi e colonne. La struttura è suddivisa in otto segmenti, denominati "ordini".

Il monumento è alto 58,4 dal piano delle fondazioni e si alza dal piano del terreno per 55 metri.

Il corpo centrale è un cilindro cavo realizzato con due paramenti, esterno e interno. L'intercapedine è riempita con muratura a sacco: blocchi di mattoni e pietre irregolari, cementati con calce.

Il paramento esterno è in marmo di San Giuliano; quello interno è dello stesso marmo sino al terzo livello.

Più sopra è realizzato con calcare più leggero.

Il diametro della Torre è di 15,54 metri. L'anello di fondazione ha un diametro esterno di 19,6 metri, il foro centrale è di 4,5 metri. Il peso totale è stimato in 142 MN (14.500 ton). Nel 1993 la pendenza era di 5,5°; il corrispondente valore di eccentricità sul piano della fondazione era di 2,3 metri.

### **Stratigrafia del sottosuolo**

Il sottosuolo della Piazza dei Miracoli è caratterizzato da un deposito lagunare geologicamente recente; la stratigrafia è:

livello A, di circa 10 metri, caratterizzato da alternanze di limi, argille e sabbie; un livello di sabbie medio-fini, di spessore pari a circa 2 metri, si trova al contatto con le argille del livello sottostante;

livello B, sino a circa 40 metri dalla superficie, denominato "Pancone" e costituito da argille soffici e medie (da leggermente sovra-consolidate a normal-consolidate), argille dure (argille intermedie) e infine sabbie, argille dure (argille inferiori) normal-consolidate;

livello C, sino a una profondità di almeno 70 metri, costituito da sabbie.

La superficie di separazione tra le sabbie superiori e il "Pancone" giace su di un piano orizzontale con una differenza di pochi centimetri, a eccezione della depressione al di sotto della Torre, con una differenza di quota di circa 2,2 metri. Questa è la deformazione causata dal peso della Torre.

### **Inclinazione della Torre nel tempo**

La curvatura dell'asse della Torre, nel piano di massima inclinazione, è più che evidente. I costruttori

apportarono questa curvatura durante la costruzione del Monumento, riportando il centro dei conci superiori verso il centro della fondazione.

All'inizio della costruzione la Torre si inclinò verso nord, sino a raggiungere una inclinazione massima di circa  $0,2^\circ$  nel 1272, quando ripresero i lavori dopo la prima lunga sosta. Nel 1278, quando si raggiunse la settima cornice, l'inclinazione era di circa  $0,6^\circ$  verso sud.

Durante i novant'anni della seconda interruzione dei lavori l'inclinazione crebbe sino a  $1,6^\circ$ , quando la cella campanaria venne eretta.

L'inclinazione del 1817 fu rilevata da due architetti inglesi, Cresy e Taylor: l'inclinazione a quell'epoca era di circa  $5^\circ$ . L'incremento di inclinazione successivo al 1817 fu principalmente dovuto allo scavo del Catino, nel 1838.

A partire dal 1911, l'inclinazione della Torre fu periodicamente controllata a mezzo di misure topografiche, installando punti di livellazione, un inclinometro a pendolo e un livello a bolla. Queste misure mostravano come il graduale aumento di inclinazione verso la direzione nord-sud fosse accompagnata da una serie di movimenti ciclici di piccola ampiezza: deformazioni giornaliere dovute alla diversa insolazione del corpo di fabbrica, cicli stagionali dovuti al variare della quota della falda freatica ecc.

L'inclinazione dal 1911 crebbe costantemente e uniformemente, con due significative accelerazioni: nel 1935, a seguito di una campagna di iniezioni condotte nella fondazione per interrompere filtrazioni di acqua nel Catino.

### **Studi e conclusioni del Comitato internazionale**

La situazione continuò a peggiorare fino a quando, nel 1990, poco dopo che la piazza era stata annoverata fra i Patrimoni dell'Umanità dall'UNESCO, fu istituito un Comitato internazionale per la Salvaguardia della Torre di Pisa, presieduto dall'ingegnere geotecnico Michele Jamiolkowski, docente del Politecnico di Torino.

Il Comitato, composto da progettisti geotecnici e strutturali, specialisti di materiali lapidei, restauratori e storici, arrivò alla conclusione che:

- le caratteristiche fisico-meccaniche della Torre e del suo sottosuolo erano ormai sufficientemente conosciute;
- l'analisi dei movimenti della Torre, risultanti dal monitoraggio strumentale condotto a partire dai primi anni del 1900, aveva condotto a un'approfondita comprensione del suo comportamento;
- la Torre era affetta da un fenomeno di instabilità dell'equilibrio (leaning instability), connesso all'insufficiente rigidità (e non all'insufficiente resistenza) dei terreni di fondazione; una conclusione alla quale conducevano sia l'interpretazione dei movimenti della Torre, sia i risultati di analisi teoriche e sperimentali;
- era difficilmente quantificabile il margine di sicurezza che la Torre possedeva nei primi anni Novanta rispetto a un collasso per ribaltamento, ma tutte le analisi svolte indicavano che era assai ridotto; il rischio di ribaltamento era quindi molto elevato;
- la struttura in elevazione era soggetta in alcuni punti a uno stato tensionale molto elevato; ciò poneva in essere il rischio di una rottura locale di tipo fragile – tenendo conto anche dello stato di degrado delle murature – che avrebbe potuto innescare un collasso della Torre senza alcun segno premonitore;
- la quantità di tempo disponibile per intervenire era molto ridotta; inoltre, il progressivo aggravarsi della situazione rendeva ogni intervento sempre più difficile con il trascorrere del tempo.

Il rischio era quindi fondamentalmente doppio: il primo legato allo stato tensionale in determinate aree del paramento murario, che avrebbe potuto causare improvvisi collassi dovuti alla rottura della muratura; il secondo al possibile ribaltamento dell'intero Monumento dovuto al cedimento del terreno al di sotto della fondazione.

## Strategie d'intervento

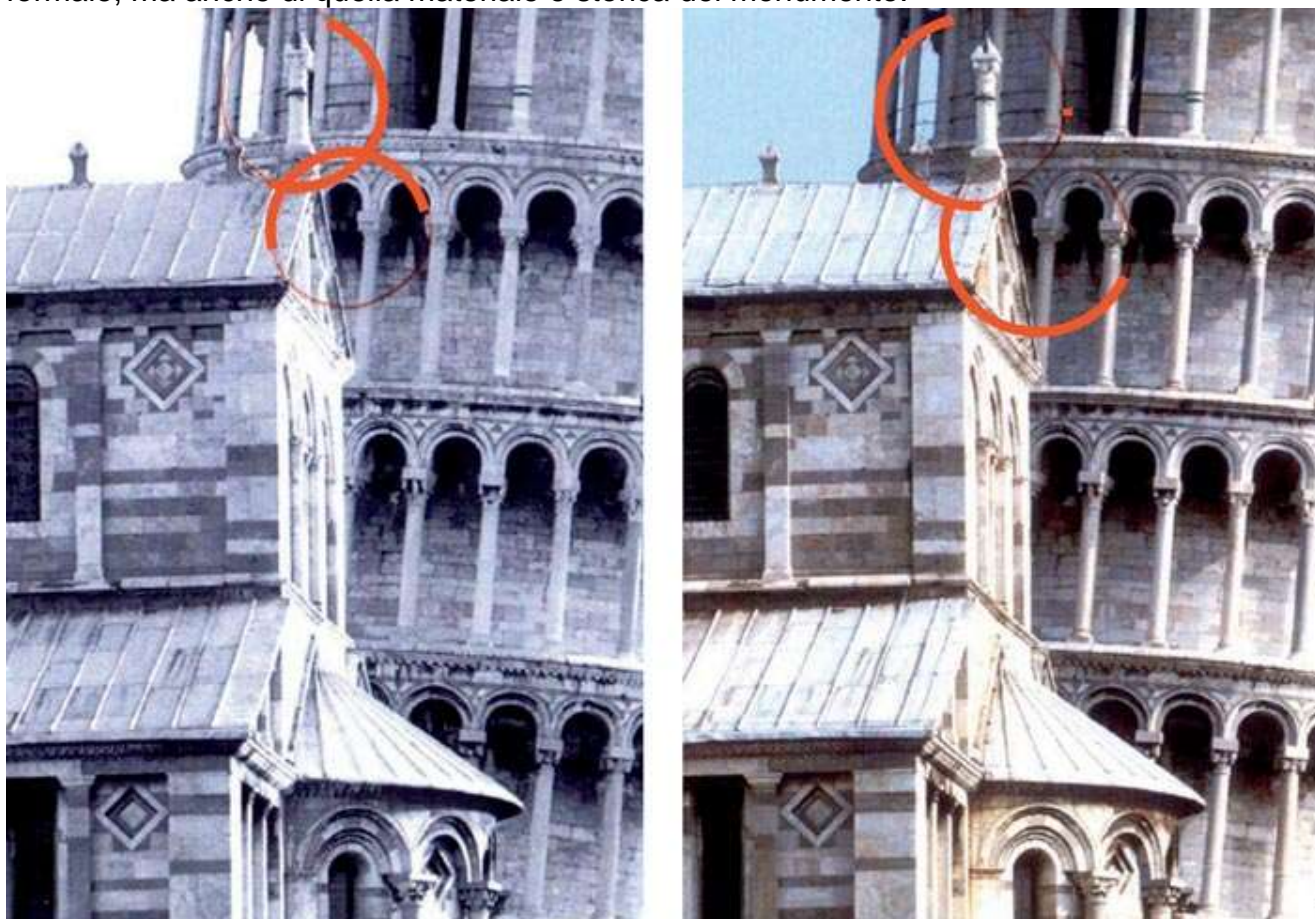
In presenza di questo duplice rischio (quello geotecnico di un collasso per ribaltamento e quello strutturale di una rottura delle murature) e di una situazione che si andava aggravando, il Comitato adottò una strategia in due tempi: realizzare immediatamente interventi di stabilizzazione provvisoria, curandone la completa reversibilità, onde guadagnare il respiro per poter adeguatamente studiare e, parallelamente, sperimentare e attuare gli interventi di stabilizzazione definitiva. Per quanto riguarda il rischio strutturale, gli interventi provvisori sono consistiti nella cerchiatura di alcune zone della Torre con trefoli debolmente pretesi.

Gli interventi sono consistiti nell'inserimento di barre di acciaio inox di collegamento tra i paramenti interno ed esterno della muratura, nella esecuzione di iniezioni alle murature e nella cerchiatura con fili armonici inox in sommità al 1° ordine e al piede del 2° ordine; essi hanno riguardato zone molto limitate della Torre. Per quanto riguarda il rischio geotecnico, l'intervento provvisorio è consistito nell'applicazione alla Torre di un contrappeso sul lato nord; il contrappeso era costituito da una catasta di lingotti di piombo, che ha raggiunto un peso totale di circa 1.000 tonnellate.

Per concepire e progettare gli interventi definitivi di stabilizzazione geotecnica, il Comitato ha sviluppato un'approfondita analisi del problema di stabilità dell'equilibrio: tenendo conto della natura non lineare e non elastica del vincolo esercitato dai terreni di fondazione, si è giunti alla conclusione che una modesta riduzione dell'inclinazione sarebbe stata sufficiente ad arrestare il progredire dell'inclinazione e a migliorare sostanzialmente le condizioni di stabilità.

Dopo una lunga e accanita discussione il Comitato ha pertanto deciso di ridurre l'inclinazione della Torre di circa mezzo grado, e cioè all'incirca del 10% del valore attuale, inducendo un cedimento dell'estremo nord della fondazione.

Oltre a migliorare sostanzialmente le condizioni di stabilità della fondazione, un tale intervento avrebbe provocato anche una riduzione dello stato tensionale nella Torre, contribuendo quindi a limitare al minimo il rinforzo strutturale necessario; inoltre esso sarebbe stato totalmente rispettoso non solo dell'integrità formale, ma anche di quella materiale e storica del monumento.



## Soluzioni individuate

Il Comitato ha preso in esame diversi possibili mezzi per raggiungere un tale risultato; fra questi, ad esempio, la realizzazione di una piastra di cemento armato alla superficie del terreno lato nord, che applicasse al terreno stesso un carico attraverso l'azione di cavi d'acciaio pretesi ancorati nelle sabbie inferiori, o la contrazione delle argille superiori, sempre a nord della Torre, a mezzo di pompaggio sotto vuoto o di elettroosmosi. Tali soluzioni sono state studiate con analisi numeriche di vario tipo, con modelli in piccola scala a gravità naturale e in centrifuga, con indagini in sito in grande scala.

A seguito di questo complesso di studi e ricerche, la scelta è infine caduta su di un intervento che induce il cedimento del lato nord della Torre estraendo in modo controllato piccoli volumi di terreno a nord e al di sotto del piano di fondazione (la cosiddetta sottoescavazione).

Prima di operare sulla Torre, si è ritenuto indispensabile condurre una prova in sito in grande scala. Infatti, benché i risultati di tutte le indagini e analisi svolte fossero stati positivi, il Comitato non poteva essere certo che essi fossero totalmente rappresentativi del comportamento di una torre alle soglie dell'instabilità. Per tale motivo si è deciso di iniziare a operare sulla Torre con una fase di sottoescavazione preliminare molto limitata e solo dopo aver installato una struttura di presidio che potesse fronteggiare eventi inattesi. L'opera di presidio è costituita da due stralli suborizzontali collegati alla Torre a livello del 3° ordine e facenti capo a due strutture di ancoraggio poste a Nord della Torre, a tergo dell'edificio dell'Opera Primaziale.

Infine, si è dato corso alla vera e propria sottoescavazione della Torre, suddivisa come si è detto in una fase preliminare e una definitiva. Una volta completata la rimozione di tutte le opere provvisorie è stato necessario provvedere al ripristino e al rinforzo del Catino, operazioni che hanno comportato un altro intervento di carattere strutturale. Esso peraltro ha prodotto anche un benefico incremento del grado di sicurezza geotecnico, per effetto dell'efficace collegamento realizzato tra il Catino e la fondazione della Torre.





## **Il sistema di monitoraggio**

Durante la fase dei lavori è stato installato un complesso sistema di monitoraggio che ha consentito il rilevamento continuo di molti parametri rilevanti ai fini del controllo del monumento. Terminati i lavori, l'impianto di monitoraggio è stato opportunamente modificato, anche semplificandolo, per adattarlo alle diverse esigenze del controllo del comportamento nel tempo della Torre.

Il rilevamento geometrico più importante è ovviamente quello della pendenza, che viene effettuato in continuo da tre pendoli, di cui uno "rovescio", cioè con il filo ancorato alla base della Torre e l'estremità superiore collegata a un galleggiante; a differenza dei pendoli normali, che sono in sostanza dei fili a piombo, il pendolo rovescio non risente delle deformazioni della struttura in elevato ed è quindi più adatto a misurare i movimenti della fondazione.

Gli spostamenti dei pendoli sono rilevati da "telecoordinometri" dotati di raggio laser, che li trasmettono, mediante condutture che attraversano a nord il muro della Torre, passano sotto il Catino e proseguono interrati fino alla stanza nel palazzo dell'Opera Primaziale in cui vengono acquisiti tutti i dati. Durante il corso dei lavori, i movimenti della fondazione sono stati controllati anche da un sistema di livellazione costituito da un circuito idraulico esteso a tutto il perimetro della stanza a pianoterra della Torre.

Vi sono poi "deformometri", che rilevano le variazioni di ampiezza delle lesioni monitorate; estensimetri a filo, per la misura della variazione delle dimensioni della Torre; accelerometri per il rilevamento delle azioni dinamiche, in particolare sismiche, che possono interessare il monumento.

In molti casi, per l'installazione degli strumenti in parete, nella gola cava della Torre, si è dovuto ricorrere all'ausilio di rocciatori, specializzati in lavori aerei.

## **L'intervento provvisorio con contrappesi di piombo**

Il problema era quello di applicare alla Torre, sul lato nord, una forza verticale di alcune centinaia di tonnellate, risolto costruendo attorno alla base del monumento una trave anulare in calcestruzzo armato precompresso, sulla quale sarebbero poi stati accatastati lingotti di piombo e che avrebbe trasferito alla Torre il peso dei lingotti.

La costruzione della trave anulare porta-piombi è avvenuta nel periodo maggio-giugno 1993.

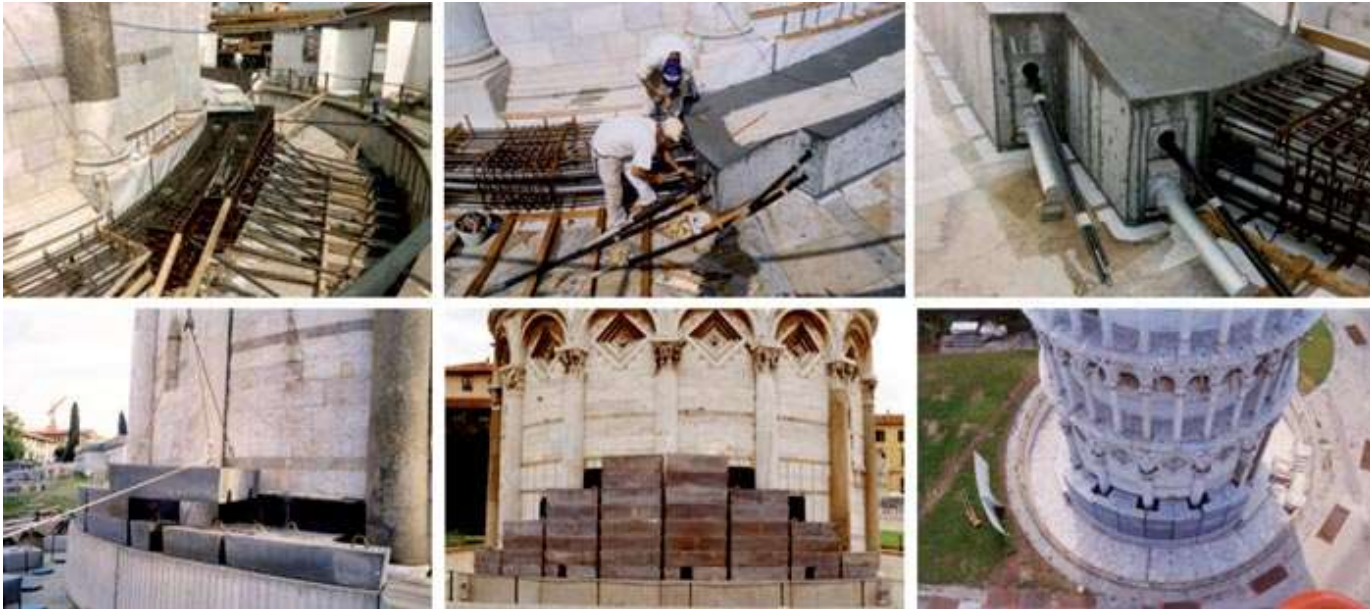
La trave è stata realizzata in conci separati da giunti, in modo da poter poi essere rimossa più facilmente.

La posa in opera dei lingotti di piombo è iniziata nel luglio 1993 ed è proseguita gradualmente fino al gennaio 1994, raggiungendo un carico di circa 700 ton., comprensivo del peso proprio della trave anulare. A seguito dell'intervento l'inclinazione della Torre è diminuita di circa 50 secondi d'arco, equivalenti a una diminuzione dello strapiombo di circa 12 mm.

Cosa ancora più importante, dopo l'applicazione del contrappeso si è arrestato il progressivo movimento della Torre verso sud, che aveva in precedenza una velocità dell'ordine di 1 mm all'anno.

Successivamente il contrappeso di lingotti di piombo è stato aumentato fino a raggiungere un carico complessivo di circa 1.000 ton.

A fianco, l'unità centralizzata di acquisizione dati installata all'interno nella Torre. I dati di misura venivano resi disponibili in tempo reale alla stazione di consultazione presso gli uffici del cantiere.



### **I provvedimenti di rinforzo strutturale**

Fin dalle prime fasi dei lavori del Comitato è apparso evidente che, in alcune zone della struttura in elevazione della Torre, si verificava uno stato di sollecitazione molto intenso e vi era quindi il rischio di una rottura del materiale lapideo.

Tale rischio era particolarmente grave nella zona del secondo ordine, lato S-O; in questa zona infatti vi è un brusco restringimento della sezione muraria rispetto al primo ordine, inoltre la struttura è indebolita dalle aperture della scala elicoidale e della porta di uscita sul loggiato della prima cornice. L'insidia di una rottura della muratura risiede nel fatto che essa avviene in modo improvviso, senza segni premonitori.

### **Cerchiature provvisorie**

È stato pertanto deciso di attuare immediatamente un provvedimento provvisorio di messa in sicurezza, consistito nella cerchiatura delle zone critiche con trefoli di acciaio rivestiti da una guaina di teflon, messi in opera con una lieve pretensione. L'intervento è stato attuato nel giugno 1992 e concepito per essere totalmente reversibile (infatti i cavi sono stati rimossi tra il novembre 2000 e il gennaio 2001, poco prima che venissero installate le cerchiature definitive).

### **Rinforzo della struttura muraria**

Nel frattempo, lo stato tensionale nella struttura muraria era stato studiato in modo estremamente approfondito mediante un dettagliato modello a elementi finiti. Furono prese in esame le azioni sismiche attese e le azioni del vento: per entrambe queste azioni furono condotte approfondite ricerche. Contemporaneamente venne studiato in modo assai approfondito lo stato di conservazione della struttura muraria, mediante perforazioni, prove su campioni, ispezioni televisive in foro, endoscopie e tomografie di vario tipo. Sovrapponendo la mappa dello stato tensionale a quella del degrado della muratura, ci si rese conto che solo in una zona limitata della Torre si verificava una vera e propria situazione di pericolo. A questa ridotta zona è stato limitato l'intervento di rinforzo definitivo, per il quale si è cercato di realizzare il miglior compromesso possibile fra le esigenze della sicurezza e quelle del rispetto dell'integrità del monumento.

L'intervento è consistito nella iniezione di malta di cemento, nell'inserimento di barre che collegano fra loro in senso radiale i paramenti interno ed esterno della Torre e nella cerchiatura della prima cornice e della base del 2° ordine. Le iniezioni sono state effettuate nel periodo che va dal giugno 1999 al gennaio 2000.

La malta, appositamente studiata, aveva la seguente composizione:

- 75 kg di Microlite FSTP (cemento ultrafine ferrico con fumi di silice);
- 75 litri di acqua;
- 2,25 litri di additivo Rheobuild;

- circa 1,6 t/m<sup>3</sup> il peso di volume della miscela;
- 0,4 atm di pressione massima di iniezione.

Particolari del dispositivo per il tiro, l'ancoraggio e il detensionamento dei trefoli, e dell'operazione di tesatura con l'apposito martinetto.

Le zone trattate interessano la zona sud della muratura del 1° ordine a cavallo del piano di massima pendenza e le murature del 2° ordine nella zona indebolita dal vano scala e dalla porta di accesso al 1° loggiato; nelle figure sono riportate le posizioni dei fori primari e secondari previsti in progetto, cui in fase esecutiva sono stati aggiunti altri fori per migliorare l'assorbimento delle murature.

Il quantitativo totale di miscela iniettata è stato pari a circa 18 metri cubi. Le barre radiali di collegamento dei paramenti, in acciaio inossidabile AISI 410, filettate, sono state messe in opera perforando la muratura dall'interno e ancorate, dopo tesatura, mediante rondella e dado in apposita nicchia sul paramento interno. Tutte le barre si arrestano a una distanza dal paramento esterno della Torre compresa tra 10 e 20 cm. L'ancoraggio interno è stato realizzato, a seconda dei casi, con iniezione di cemento o fiale di resina. Tutte le operazioni di cucitura suddette sono state effettuate nel periodo settembre 1999 - gennaio 2000.

### **Nuove cerchiature**

Per integrare l'effetto di contenimento delle cuciture radiali delle murature nella zona più critica, rappresentata, come si è visto, dal brusco restringimento delle murature nel passaggio dal 1° e 2° ordine, il Comitato decise che, dopo la rimozione delle cerchiature provvisorie, queste venissero in parte sostituite con nuove cerchiature, altrettanto efficienti, ma di caratteristiche estetiche e funzionali tali da consentirne il mantenimento permanente.

Le nuove cerchiature sostituiscono quelle provvisorie di 8 trefoli al di sotto della cornice del 1° ordine e di 4 trefoli alla base del 1° loggiato, mentre nessuna cerchiatura è stata prevista al posto dei 6 trefoli superiori.

Le cerchiature definitive, anche allo scopo di ridurre sensibilmente l'ingombro, sono realizzate con fili di acciaio inossidabile del diametro di 4 mm, trafilati a freddo per incrementarne le caratteristiche meccaniche fino a valori paragonabili, anche se un po' inferiori, a quelli dell'acciaio armonico.

Per la posa in opera, in tensione, di queste cerchiature è stata predisposta un'apposita apparecchiatura, analoga a quelle adoperate in passato per la precompressione di sili cilindrici.

La cerchiatura sotto la cornice del 1° ordine è costituita da 116 spire disposte su 4 strati (35+31+27+23); ciascuno strato è realizzato con un unico filo ancorato con morsetti alle estremità. Lo sforzo di trazione totale applicato ai fili è di circa 9 t. L'installazione di questa cerchiatura è iniziata nel dicembre 2000 e terminata nel gennaio 2001.

La cerchiatura alla base del 1° loggiato è costituita da 60 spire disposte su 3 strati (24+20+16) e lo sforzo di trazione totale applicato ai fili è di circa 4,6 t; la sua esecuzione è avvenuta nei mesi di gennaio e febbraio 2001.

### **Il modello per la sperimentazione della sottoescavazione**

Oggi che la sottoescavazione della Torre è stata portata a termine con successo, può sembrare un intervento quasi troppo banale.

In realtà la scelta di questo metodo è stata molto travagliata.

Dopo una lunga fase di calcoli e di prove in piccola scala, si decise di dar corso a una prova in grande scala nella stessa Piazza dei Miracoli, onde dimostrare in modo definitivo l'efficacia del metodo e mettere a punto i dettagli tecnologici. In un angolo della Piazza, fra il Camposanto e la Porta del Leone, si è costruita una piastra circolare di cemento armato del diametro di 7 m, dopo aver strumentato il sottosuolo e la superficie di contatto fra terreno e piastra.

La piastra è stata caricata con una zavorra di calcestruzzo, la quale realizza un carico eccentrico che ha provocato una rotazione verso sud.

Tale rotazione è stata poi parzialmente recuperata sperimentando la tecnica di sottoescavazione.

La prova di sottoescavazione in grande scala, svoltasi dal settembre 1995 all'agosto 1996, ha avuto pieno successo e ha dato l'ultima spinta agli incerti per procedere con tale tecnica sulla vera Torre.



## **Strallatura di presidio della Torre**

Quando si passò a operare sulla Torre, si ritenne indispensabile munirsi di un'opera di presidio, da azionare nel caso si fosse verificata qualche circostanza imprevista che avesse messo a rischio il monumento. La scelta cadde su un sistema di stralli suborizzontali, costituiti ciascuno da due funi chiuse di acciaio del diametro di 50 mm, agganciate alla Torre a livello del 3° ordine, e facenti capo a due strutture a cavalletto in carpenteria metallica, poste a tergo dell'edificio dell'Opera Primaziale, che borda la Piazza dei Miracoli a nord. I due cavalletti di ancoraggio trasmettevano alla propria fondazione anche sforzi di trazione e taglio e pertanto fu necessario dotarli di una fondazione su pali trivellati di piccolo diametro, della lunghezza di circa 33 m. La portata dei pali fu controllata con prove di carico. La struttura metallica in elevazione era direttamente vincolata ai pali, collegati fra loro da una platea di cemento armato. Si noti che la strallatura non era concepita per vincolare la Torre, ma per applicarle, se necessario, una forza stabilizzante; pertanto ogni strallo, dopo una sella di rinvio che lo riportava in direzione verticale, faceva capo a un meccanismo che poteva applicare il tiro allo strallo sia tramite zavorre di piombo, sia tramite martinetti comandati da una centralina oleodinamica.

Ciascuno dei due sistemi di tiro poteva applicare a ogni strallo uno sforzo massimo di 150 ton.; peraltro, nel caso di impiego simultaneo di zavorre e martinetti, il tiro complessivo non avrebbe potuto superare le 200 ton. per strallo.

L'intervento di stabilizzazione della Torre tramite sottoescavazione venne portato a termine senza che si verificasse alcun imprevisto, pertanto l'opera di presidio non è mai stata azionata, al di là dell'applicazione del tiro minimo necessario per dare agli stralli la configurazione geometrica iniziale desiderata (circa 12 ton. per lo strallo ovest e circa 7 ton. per lo strallo est).

I lavori per la realizzazione della strallatura sono iniziati nel giugno 1998, con la realizzazione dei pali di fondazione, e sono terminati nel dicembre 1998, con la messa in tiro degli stralli.

Particolari della strallatura: fra ciascuna fune e la sella del cavalletto era interposto un perno strumentato per misurare in continuo lo sforzo agente sulla Torre, scevro di ogni attrito dei meccanismi di tiro.

## **Stabilizzazione della Torre tramite sottoescavazione**

La sottoescavazione, come metodo di stabilizzazione definitiva della Torre, presenta numerosi aspetti positivi, fra cui l'assoluto rispetto per l'integrità formale, storica e materiale del monumento. Un altro grande vantaggio di questa tecnica è quello di non richiedere alcuna importante struttura od opera di ingegneria; a causa di questa, per così dire, discrezione, l'intervento non ha presentato aspetti particolarmente spettacolari che si prestino a essere illustrati in immagini.

Nello schema della predisposizione delle attrezzature per l'intervento si notano la batteria principale a nord, per la sottoescavazione vera e propria della Torre, e le due batterie secondarie a est e a ovest, destinate invece alla eventuale rimozione del terreno sotto il fondo del Catino, per assecondarne, ove fosse stato necessario, il suo movimento solidale alla Torre.

In realtà, poiché il Catino, opportunamente rinforzato, non ha presentato particolari problemi durante la sottoescavazione, le due batterie secondarie non sono mai state utilizzate.

Lo schema mostra, per ciascuno dei 41 tubi di perforazione ed estrazione del terreno, la massima lunghezza raggiunta dai tubi stessi, che è interessante mettere in relazione con il perimetro della fondazione; nella sezione è indicata la disposizione altimetrica dei tubi, in cui è evidenziata la presenza dei seguenti elementi:

- tubi-guida posizionati sulla trave di cemento armato;
- tubi di rivestimento della perforazione, inseriti nei tubi-guida e spinti fino alla distanza dalla fondazione di circa 2,60m, limite al di là del quale si vuole che l'asportazione del terreno espliciti i suoi effetti;
- tubi interni ai precedenti, ruotanti e avanzanti, contenenti eliche controrotanti rispetto a quelli.

## **Modalità realizzative**

Una macchina operatrice è stata appositamente predisposta per essere in grado di far ruotare, controrotare e avanzare o retrarre simultaneamente il tubo e l'elica, nonché di far scorrere coassialmente

all'elica una punta strumentata. La sottoescavazione si attuava facendo avanzare contemporaneamente il tubo, l'elica e la punta strumentata; si arretravano poi, sempre congiuntamente, tubo ed elica, facendo nello stesso tempo fuoriuscire la punta strumentata, in modo che questa rimanesse di fatto ferma nel vano cilindrico creato nel terreno dall'arretramento del tubo e dell'elica.

La punta strumentata poteva quindi, mediante i sensori di cui era dotata, segnalare l'avvenuto riempimento parziale o totale del foro nel terreno.

L'estrazione avveniva per avanzamenti di 50 cm; il volume massimo estraibile con la prima operazione era di circa 17 litri; retraendo il tubo con l'elica il foro tendeva a richiudersi più o meno completamente; il grado di riempimento del foro era rilevabile, oltre che con la punta strumentata, dal quantitativo di terreno asportato in una successiva operazione, facilmente misurabile tramite l'equivalente volume d'acqua che fuoriusciva dalla sommità del tubo. La ripetizione, in tempi successivi, dell'operazione nello stesso sito consentiva di asportare la quantità di terreno voluta in ciascun punto; quando il tubo risultava completamente riempito dal terreno, l'elica veniva estratta e ripulita dal materiale. In totale sono stati estratti quasi 38 metri cubi di terreno.

La mappa, corredata di una scala cromatica e disegnata sulla base dei rapporti giornalieri delle operazioni, consente di valutare la distribuzione in pianta della intensità della sottoescavazione e di rilevare il volume estratto in litri per metro quadrato.

Dalla mappa si può notare come l'estrazione del terreno sia avvenuta in gran parte all'esterno della fondazione della Torre, penetrando comunque sotto questa per non più di 2 m, e con una leggera asimmetria rispetto al piano di massima pendenza; la sottoescavazione è stata infatti un po' più marcata verso ovest allo scopo di contrastare la tendenza della Torre a ruotare, sia pure in misura assai minore, anche verso est.

Per effetto della sottoescavazione la Torre, alla fine dell'intervento, come previsto aveva ruotato verso nord, di circa 1.800 secondi d'arco (mezzo grado sessagesimale), corrispondenti a uno spostamento verso nord della settima cornice di circa 43 cm e a un abbassamento di circa 17 cm del punto più a nord del Catino.

Il raddrizzamento, oltre a riportare la pendenza della Torre a quella che aveva circa 200 anni fa, comporta una riduzione delle pressioni sul terreno a sud, tale da aumentare in misura significativa e tranquillizzante il grado di sicurezza del monumento nei confronti della instabilità, quasi al limite critico prima dell'inizio dei lavori.

Dopo una limitata sottoescavazione preliminare effettuata nel periodo febbraio-maggio 1999, la sottoescavazione definitiva è iniziata nel febbraio 2000 e terminata di fatto nel gennaio 2001, con ulteriori modesti interventi fino al 6 giugno 2001, quando la rimozione delle batterie di tubi è stata completata.