

La Torre di Pisa (costruita tra il 1100 e il 1300) fu progettata "diritta" ma cominciò ad inclinarsi già durante la costruzione. Subito si cercò di contrastarne l'inclinazione con speciali accorgimenti costruttivi e nei secoli seguenti si provvide costantemente alla sostituzione di colonne ed altre parti lesionate ma solo con i recenti interventi, che hanno agito sul sottosuolo, si è riusciti a ridurre significativamente la pendenza della Torre. Il lavoro di recupero, che ha richiesto per una spesa di 53 miliardi di lire, garantirà alla torre una longevità di almeno 250-300 anni; oggi, infatti, la pendenza è la stessa del 1838, ridotta di 44 centimetri rispetto a quando la torre fu chiusa al pubblico nel 1990.

Perché pende

Gli interventi di manutenzione e di restauro condotti nel corso del tempo sulla Torre hanno interessato due aspetti: il primo riguardante la conservazione dei materiali che ne compongono la struttura e la decorazione; il secondo legato alla statica, campo nel quale si distinguono problemi relativi alla geotecnica, che interessano il terreno sul quale la Torre è edificata e problemi riguardanti la struttura, cioè le fondazioni e l'elevato visibile in superficie.

Dal punto di vista geotecnico la Torre corre due tipi di rischi. Il primo è legato all'inclinazione, calcolata in circa 5 gradi e mezzo, che genera una rotazione, la quale a sua volta fa aumentare la pressione sull'area su cui si trova la



41 perforazioni inclinate e 38 metri cubi di terreno estratti: la Torre di Pisa è stata raddrizzata di ben mezzo grado, guadagnando 44 centimetri, che le garantiscono almeno altri 300 anni di sicurezza

5 gradi e mezzo... a dritta

Antonella Pirovano

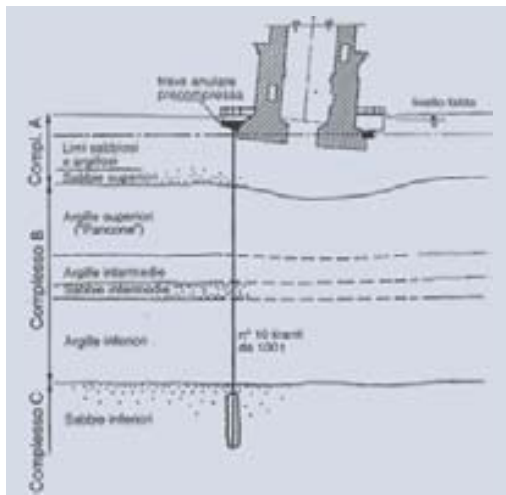
costruzione; ciò causa un ulteriore aumento della rotazione e così via, fino al ribaltamento. Il secondo rischio è quello di una rottura del terreno di fondazione, che causerebbe anch'esso il ribaltamento della Torre. Per capire

l'origine dei rischi geotecnici, bisogna tener conto che il Campanile è costruito su terreni compressibili, cioè soggetti a deformarsi sotto l'effetto del peso, e che esso concentra il suo carico (circa 14500 tonnellate) su una piccola superficie. Il suolo pisano è costituito da una pianura formata per colmamento di ambienti marini o comunque chiusi (paludi), che presenta una successione di strati compositi. A causa del peso esercitato dalla Torre su una zona ristretta, gli strati superiori hanno compresso le argille degli strati sottostanti che nel tempo, lentamente, hanno espulso

la loro acqua, si sono consolidate e hanno portato ad un abbassamento di tutto lo strato (calcolato in circa tre metri). A ciò bisogna aggiungere che tutta la piazza (così come tutta la pianura di Pisa) è soggetta ad un fenomeno di subsidenza, cioè di abbassamento progressivo della superficie del terreno.

Dal punto di vista strutturale, il rischio maggiore per il Campanile è quello di una rottura della muratura sul lato sud (il lato sotto pendenza), in particolare al livello della loggia del II° ordine, che comporterebbe il crollo di tutta la struttura sovrastante. Questa è una vera e propria "zona critica" della Torre: nei secoli, con l'aumento della pendenza, è stata sottoposta a sollecitazioni sempre maggiori (in particolare a sforzi di compressione verticale) e ciò ne ha indebolito la resistenza.

Nonostante la varietà dei suoi problemi, non si deve dimenticare che la Torre è un corpo unitario: gli elementi che la compongono agiscono contemporaneamente in un organismo



Ancoraggi (circa 1000 t). Ipotesi di intervento - abbandonata - per sostituire i pesi ed ottenere un minore impatto visuale sul monumento (1995).

Disegno in sezione della torre e del sistema automatico di monitoraggio. Il Sistema automatico con sensori consente la misurazione di vento, temperatura dell'aria, radiazione solare, azioni sismiche, inclinazioni, spostamenti orizzontali di punti, variazioni dimensionali in verticale e in sezioni orizzontali, ampiezza delle fessure, temperature nelle murature, livelli della falda. La misura avviene ogni 4 ore, può avvenire ogni 4 minuti. La sensibilità delle misure di lunghezza è di 1/100 mm. La sensibilità delle misure di inclinazione è di 1/36000 di grado.



Vista notturna della Torre durante i lavori.

complesso e delicato, dalle reazioni molteplici e interdipendenti. Il rischio geotecnico e quello strutturale, ad esempio, rappresentano una minaccia presi singolarmente, ma anche perché interagiscono fra loro.

Tentativi di raddrizzamento

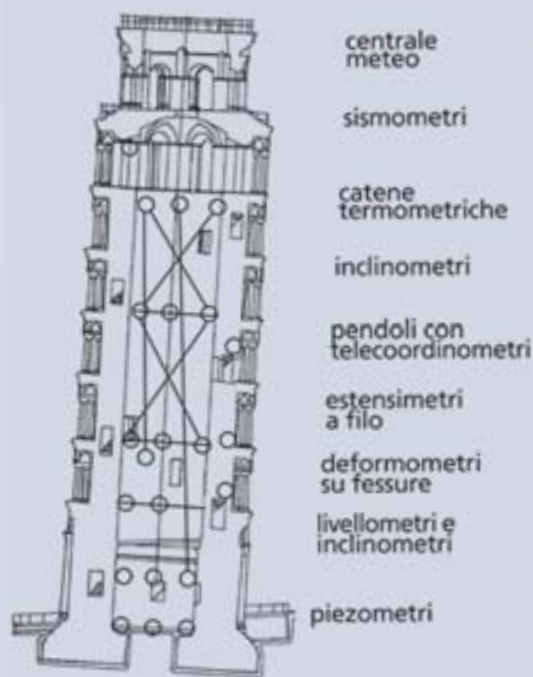
La Torre di Pisa è stata sottoposta a notevoli opere di manutenzione sin dal momento della costruzione ma il primo intervento vero e proprio di restauro è quello degli anni 1838-1839, diretto da Alessandro Gherardesca, il quale riportò in luce tutto il primo ordine del monumento, che era in gran parte interrato soprattutto a causa del rialzamento del livello del suolo nel corso dei secoli. Gherardesca ampliò il "bacino" intorno al monumento, dandogli le dimensioni che vediamo oggi e cercando, con nessun successo, di renderlo impermeabile alle acque risalenti dal terreno con un rivestimento in marmo delle pareti. È verosimile che lo scavo e poi i numerosi pompaggi dell'acqua affiorante, mista a terreno e sabbie, abbiano causato un brusco aumento dell'inclinazione.

Tra la fine dei lavori di Gherardesca (luglio 1839) e l'istituzione, per la prima volta, di una commissione incaricata di occuparsi dei problemi di stabilità della Torre (1907), la manutenzione del monumento proseguì sostanzialmente come nei secoli precedenti, con periodiche riparazioni o sostituzioni delle parti danneggiate. Nel frattempo la situazione delle acque affioranti dal sottosuolo si era decisamente aggravata dopo i lavori di Gherardesca, e in quegli anni furono necessarie numerose operazioni di svuotamento del "bacino" stesso e di pompaggio di acqua.

Quando il 14 luglio 1902 crollò il Campanile di San Marco a Venezia, si temette che anche alla Torre di Pisa potesse toccare la stessa sorte. Fu nominata una commissione interdisciplinare di esperti per studiare con urgenza lo stato di salute della Torre. È questa la prima di una lunga serie di commissioni che vennero formate e lavorarono nel corso del secolo, alcune delle quali ebbero meriti importanti sul piano degli studi e della conoscenza del monumento. La prima Commissione, che lavorò dal 1907 al 1910, fece eseguire sondaggi per approfondire la natura delle fondazioni della Torre e del terreno su cui è poggiata. Proprio in seguito a tali studi, nel 1911 fu iniziato un monitoraggio sistematico dell'edificio, condotto tramite un teodolite sistemato in una posizione fissa. Le misurazioni dei movimenti del Campanile diventarono ancor più precise a partire dal 1934, quando, in una stanza appositamente creata all'altezza del primo ordine, furono sistemati due nuovi strumenti: un inclinometro e una livella.

Tra il 1933 e il 1935 furono messi in atto sia i lavori di consolidamento delle fondazioni, tramite l'iniezione a pressione attraverso fori nella muratura di una miscela di acqua e cemento, sia l'impermeabilizzazione del baci-

SISTEMA AUTOMATICO



no intorno al basamento, ponendo sotto il lastrico una soletta di cemento e uno strato impermeabilizzante. Il problema della risalita delle acque sotterranee fu eliminato ma l'immissione di cemento nelle fondazioni causò anche un netto aumento dell'inclinazione dell'edificio.

I lavori di monitoraggio e di studi continuarono negli anni seguenti. Negli anni settanta fu chiarita l'importanza, per l'inclinazione della Torre, del fenomeno della subsidenza del terreno, che si era accentuato anche per l'abbassamento della falda idrica dovuto agli intensi prelievi e pompaggi d'acque profonde condotti nel dopoguerra. In seguito a queste conclusioni fu vietato, nel 1973, il prelievo di acque profonde in prossimità del Campanile; il loro livello smise di diminuire e anche la velocità di rotazione della Torre tornò ai valori consueti.

Nel frattempo, la manutenzione della "pelle" della Torre non si era mai fermata: riparazioni, consolidamenti e sostituzioni di parti architettoniche e sculture erano andati avanti a seconda delle necessità.

La svolta alla storia del restauro della Torre è legata al crollo inaspettato di un altro monumento: la Torre Civica di Pavia, collassata il 17 marzo 1989. La preoccupazione per il Campanile pisano crebbe in conseguenza e il

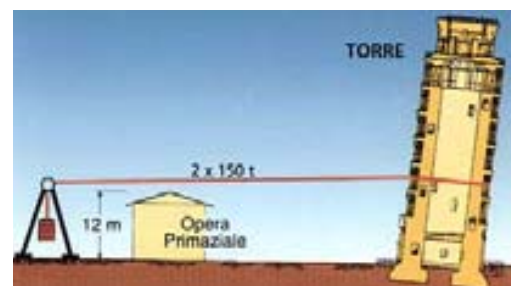
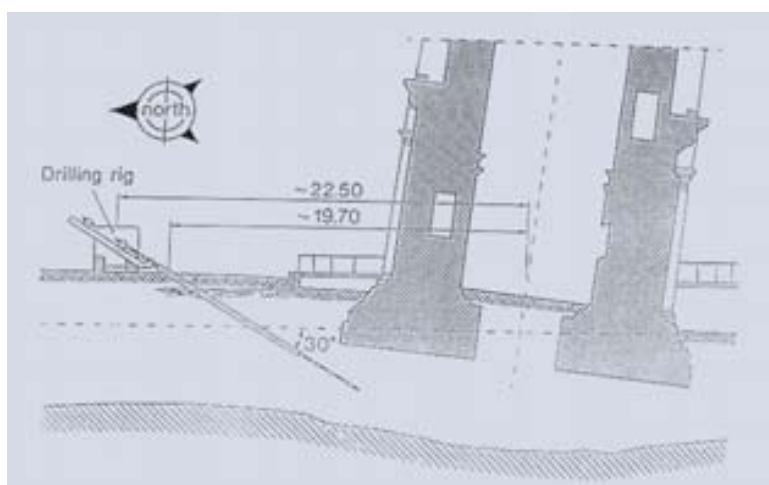
Ministero dei Lavori Pubblici incaricò un Comitato tecnico-scientifico di esaminare il grado di sicurezza del monumento e di preparare un progetto di massima e un progetto esecutivo per il consolidamento e il restauro della Torre. Vista la situazione critica della struttura, gli esperti raccomandarono di impedire al pubblico l'accesso alla Torre e il 6 gennaio 1990 il Campanile del Duomo chiuse i battenti.

L'intervento risolutivo

Gli undici componenti del Comitato instaurato nel 1990 erano ingegneri strutturalisti e geotecnici, geologi, architetti e restauratori. Nel 1997 questo primo organismo fu trasformato, con qualche variazione nei partecipanti, nel Comitato per la Salvaguardia della Torre di Pisa, costituito da quattordici membri italiani e stranieri.

La situazione di rischio che era stata osservata spinse gli esperti a realizzare subito alcuni interventi provvisori e reversibili che aumentassero la sicurezza e dessero il tempo di completare le analisi e gli studi per mettere a

L'intervento risolutivo: l'asportazione controllata di terreno: è stata realizzata attraverso perforazioni inclinate. E' stata studiata anche con un campo prova per la messa a punto della tecnologia. Un'applicazione preliminare è stata montata sulla Torre (2001).



Ancoraggio al suolo previsto come mezzo d'opera per prevenire possibili imprevisti durante gli interventi di asportazione controllata del terreno (1999).

punto gli interventi definitivi. Come cautela strutturale, nel 1992 fu applicata al secondo ordine una cerchiatura composta di cavi in acciaio per prevenire l'allargamento delle fessure esistenti e l'aumento dell'instabilità del paramento di marmo. Alla fine dei lavori alla struttura è stata sostituita da una cerchiatura analoga ma meno visibile. Gli interventi definitivi dal punto di vista strutturale, che avevano lo scopo di aumentare la resistenza delle zone critiche, sono stati preceduti da una vasta campagna di studi e analisi sullo stato delle strutture, che ha fornito una mappatura dettagliatissima dello 'stato di salute' della Torre prima dei lavori di consolidamento. Dal punto di vista geotecnico l'intervento temporaneo consisté nell'applicazione al monumento di un contrappeso formato da grandi lingotti di piombo (maggio 1993 - luglio 1994). Durante e dopo la loro applicazione, l'inclinazione della Torre arretrò effettivamente verso nord per un totale di 48". La soluzione dei piombi rappresentava, però, anche un carico ulteriore per l'edificio ed era molto ingombrante alla vista. Si tentò quindi di sostituirli con un sistema meno vistoso e meno pesante: dieci tiranti d'acciaio, sotterranei, ancorati nelle sabbie a 45 metri di profondità, collegati a martinetti che ne graduavano il tiraggio. Non soltanto gli ancoraggi, una volta messi in forza, avrebbero

Il rilievo della "pelle"

La "pelle" della Torre è stata presa in carico da un altro gruppo di lavoro, formatosi all'interno del Comitato per la Salvaguardia della Torre di Pisa, composto da esperti di archeologia, storia dell'architettura e restauro di materiali lapidei e di malte. In collaborazione con l'Istituto Centrale per il Restauro, sono stati compiuti sia gli studi preventivi che gli esperimenti d'intervento e sono state fornite delle linee-guida per un futuro progetto di restauro di tutte le superfici. Le indagini sono partite con una campagna di rilevamenti sistematici, che ha permesso di stendere un quadro completo della natura delle pietre usate nella costruzione e nella decorazione del Campanile, della loro distribuzione nelle varie parti dell'edificio, della quantità e collocazione delle sostituzioni effet-

tuate nel passato. Inoltre sono state censite le tracce dei restauri precedenti, identificate le tecniche e i procedimenti di lavorazione delle pietre, riconosciuti e localizzati i diversi tipi di deterioramento.

La gran quantità di dati prodotta da queste indagini è stata poi inserita nel sistema informatico Akira GIS Server, progettato (in collaborazione con il Centro di Ricerche Informatiche per i Beni Culturali della Scuola Normale Superiore di Pisa) per documentare su base grafica lo stato di conservazione delle superfici. L'enorme mole di dati gestiti da Akira GIS Server può essere, oltre che visualizzata nelle tavole vettoriali, interrogata ed elaborata in chiave statistica, ottenendo ad esempio informazioni sulla morfologia, lo stato e la composizione di singole pietre o sculture, le analisi di laboratorio che le riguardano, il tutto accompagnato da fotografie e imma-



Lavori di recupero della "pelle".

gini video. Inoltre il sistema, continuamente aggiornabile, è studiato per agevolare il monitoraggio del monumento nel tempo: permette di ricostruire la sequenza, cronologicamente ordinata, degli interventi effettuati sul monumento, su parte di esso o sui singoli elementi architettonici, tenendo traccia di ciascuno di essi

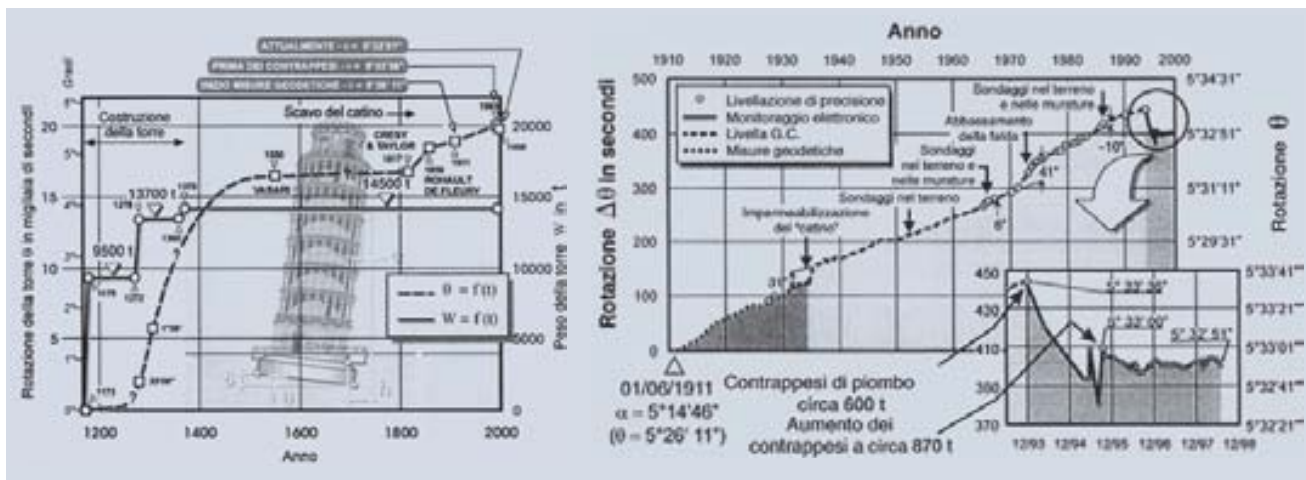
dovuto produrre lo stesso effetto dei piombi, ma sarebbe stato possibile graduarne la tensione a seconda delle esigenze, per mantenere stabile il Campanile in base ai suoi movimenti. I piombi avrebbero dovuto esser tolti gradualmente, parallelamente alla messa in tensione del nuovo sistema. Per collegare la trazione degli ancoraggi alla base del Campanile si sarebbe dovuto realizzare intorno ad essa, al di sotto del "bacino", un anello precompresso. Lo scavo necessario per questa operazione avrebbe interessato una zona subito sottostante il pelo della falda idrica; fu quindi deciso, per precauzione, di congelare il terreno sotto e intorno al punto da scavare. Nel settembre 1995 fu avviato il congelamento a sud-est e a sud-ovest delle fondazio-

ni: ben presto, la Torre cominciò a ruotare verso sud a velocità accelerata (4" al giorno). Di fronte a questo risultato, le operazioni furono interrotte e la soluzione "a dieci ancoraggi" abbandonata, mentre l'applicazione di altri contrappesi di piombo permise di compensare l'aumento imprevisto dell'inclinazione.

La soluzione tecnica definitiva derivò da una serie di studi e analisi dai quali si dedusse che una piccola riduzione dell'inclinazione della Torre (un "ritorno verso nord" di circa mezzo grado) sarebbe bastata a fermare l'aumento della pendenza e a migliorare in modo decisivo e per un lungo periodo le condizioni di stabilità. Ciò avrebbe anche alleggerito la tensione della struttura muraria, e permesso di limitare al minimo gli interventi di

rinforzo. La soluzione scelta, sostenuta dal professore Michele Jamiolkowski, professore ordinario di Ingegneria Geotecnica presso il Politecnico di Torino e presidente del Comitato internazionale per la Salvaguardia della Torre, fu quella di scavare il terreno sotto le fondamenta dalla parte opposta alla pendenza in modo da provocare dei piccoli cedimenti del suolo che, facendo abbassare la Torre su quel lato, l'avrebbero raddrizzata. Rispetto ad altre proposte, questa tecnica aveva tra l'altro il pregio di essere invisibile e di non alterare l'aspetto del monumento.

Il sistema scelto della sottoescavazione, cioè dell'asportazione controllata di determinate quantità di terreno avviene con una serie di piccoli tubi che vengono infilati obliquamente nel



A sinistra: rotazione della Torre di Pisa. A destra: termini nei quali viene descritta la rotazione della Torre.

terreno fino ad arrivare immediatamente sotto le fondazioni; lavorando come delle trivelle, essi estraggono tanto terreno quante sono le loro dimensioni. Una volta tolti i tubi, le piccole cavità così formate si chiudono progressivamente per la pressione del terreno, provocando un leggerissimo cedimento in superficie. Applicando questa tecnica nella zona a nord della Torre, e in minima parte ad est, il Campanile sarebbe dovuto "scendere verso nord", diminuendo così l'inclinazione. L'operazione, estremamente delicata, è stata calibrata e adattata alle circostanze nel corso della realizzazione e condotta per tappe, lasciando al suolo il tempo di consolidarsi fra un'estrazione e l'altra.

Dopo i primi studi ed esperimenti in laboratorio, iniziati nel 1994, nel 1999 fu condotto nella piazza, in una zona fra il Camposanto e le mura appositamente predisposta, un esperimento di sottoescavazione in grande scala. Nel 1997 si decise, prima di effettuare qualsiasi prova direttamente sulla Torre, di creare una struttura di sicurezza per far fronte ad eventuali imprevisti. Il Campanile fu dunque "strallato",

ossia ancorato al suolo con due grossi cavi d'acciaio (stralli) che giravano intorno al terzo ordine ed erano fissati a due ancoraggi. Sistemati in posizione allentata, gli stralli avrebbero potuto essere messi in tensione, in caso di bisogno, in qualsiasi momento. Eseguita la strallatura, nel febbraio 1999 fu dato inizio ad una sottoescavazione preliminare, più lenta e controllata di quella definitiva. Il risultato fu notevole: anche dopo l'arresto delle operazioni, necessario a far consolidare il terreno, la Torre continuò a spostarsi verso nord. Si aggiunsero allora tre altri lingotti di piombo e i movimenti della Torre, da quella data, si fermarono. La sottoescavazione definitiva fu compiuta tra il febbraio 2000 e il febbraio 2001.

Tramite 41 perforazioni inclinate sono stati estratti 38 metri cubi di terreno, il 70 % del quale a nord delle fondazioni e il 30% sotto di esse. I piombi sono stati rimossi nel gennaio 2001 e nel giugno si è potuta togliere la strallatura. È stato così ottenuto il previsto 'raddrizzamento' della Torre di mezzo grado. La situazione attuale è quella di circa duecento anni fa, prima dello scavo del bacino del 1838-1839, ed è probabile che rimanga definitiva: infatti, se anche la Torre ricominciasse ad

inclinarsi di ben 6" l'anno (una prospettiva "esagerata", che i geotecnici ritengono impensabile), ci vorrebbero 300 anni prima di tornare alla situazione del 1990, poiché il terreno a sud della costruzione è adesso meno cedevole e più consolidato, grazie alla secolare espulsione di acqua da parte delle argille.

Nel 1998-1999 è stato realizzato anche l'intervento strutturale definitivo. Nella zona critica del primo e secondo ordine sottopendenza la muratura è stata consolidata con iniezioni di malte e con l'inserimento di barre in acciaio inossidabile; barre dello stesso tipo sono state usate anche per rafforzare gli architravi della loggetta e il loro legame con la "canna". Al posto della cerchiatura provvisoria ne è stata installata una meno visibile, in filo d'acciaio inossidabile spesso 4 millimetri.

Per preservare e aumentare la stabilità del bacino ne è stato rinforzato il muro esterno; inoltre una serie di cavi d'acciaio interrati tutto intorno al Campanile, posti sotto il fondo del bacino e messi in tensione, ha rinsaldato il legame fra il bacino e la costruzione.

Si ringrazia l'Opera della Primaziale Pisana per l'uso del materiale.