

Monitoraggio del movimento

La Torre di Pisa





1. Introduzione

La Torre di Pisa, in Italia, si è mossa e inclinata sin dall'inizio della sua costruzione. Il pesante carico di muratura sul sottosuolo argilloso instabile e i precedenti tentativi falliti di salvare la torre hanno contribuito alla sua inclinazione. Verso la fine degli anni '80, la sua inclinazione si è avvicinata a un punto critico e la torre era prossima al crollo. Se la famosa torre deve essere salvata per le generazioni future, come si può monitorare la sua stabilità prima, durante e dopo gli interventi necessari?

2. Storia della Torre di Pisa e i vari interventi nel corso dei secoli



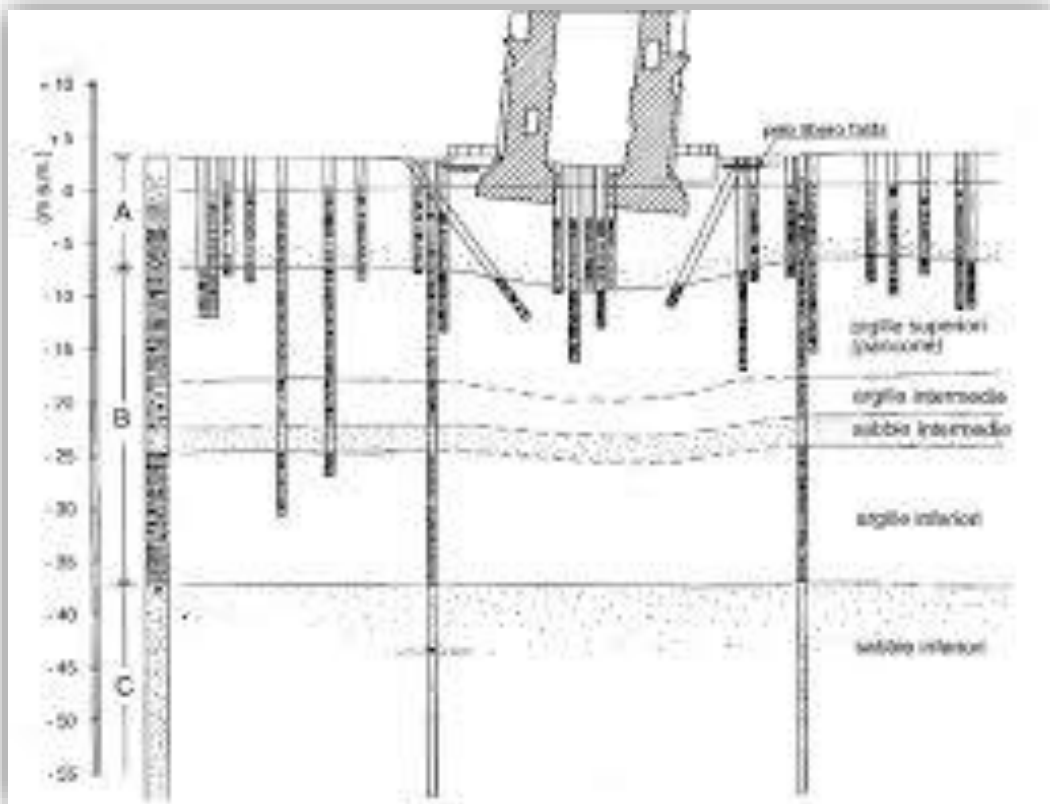
La Torre di Pisa, la cui costruzione iniziò sotto la direzione di Bonanno Pisano nel 1173, iniziò a inclinarsi poco dopo che le fondamenta della torre furono gettate. Questo, unito alla guerra di Pisa contro Firenze, interruppe la costruzione. In ogni periodo di costruzione, furono fatti tentativi per porre rimedio ai problemi, ma non ebbero mai successo. La parte superiore fu costruita verticalmente anche se la torre era inclinata, con conseguente leggera curvatura verso nord. Terminata nel 1370, la torre cilindrica è composta da due facce di blocchi di pietra calcarea. Una scala interna sale a spirale verso il campanile e consente l'accesso ai balconi colonnati su ciascuno dei sei piani. Con un diametro inferiore a 20 metri e un'altezza di 60 metri, la torre funge da campanile per l'adiacente duomo, o cattedrale.

La torre è un interessante esempio di influenza bizantina tra il periodo medievale e rinascimentale ed è famosa per la sua estrema pendenza. La stratigrafia del sottosuolo è in difetto. È composto da limi di sabbia e argilla, seguito da sabbia grigio-media. L'abbassamento fino a 2,5 metri in verticale è concentrato in questo strato.

Nei primi anni del ventesimo secolo, le prime misurazioni dettagliate dello spostamento furono registrate scientificamente utilizzando **apparecchiature di rilevamento**. Poi, nel 1934, un pendolo fu appeso all'interno della torre per misurare lo spostamento della cima rispetto alla base e quindi qualsiasi cambiamento di inclinazione. Il pendolo è costituito da un cavo sospeso che scende al primo piano con l'aiuto di un piccolo peso. Questo filo a piombo traccia lo spostamento orizzontale mentre la torre continua a muoversi.

Nel corso dei secoli furono tentati vari interventi, tra cui la deviazione delle acque sotterranee, l'iniezione di cemento nel sottosuolo e il divieto di traffico automobilistico nei pressi della torre. Persino le campane furono messe a tacere, ma la torre continuò a muoversi. Nel 1987, quando la torre e gli edifici circostanti furono iscritti nella lista del patrimonio mondiale dell'UNESCO, l'inclinazione era aumentata a più di 5 gradi, ovvero a più di 5 metri dalla verticale. Era urgentemente necessario un intervento. Nel 1989, dopo il crollo di una torre in muratura nella vicina Pavia, ci fu un comitato di ricerca internazionale di ingegneri, architetti, restauratori e scienziati per studiare la situazione della torre e proporre una soluzione. L'attuale tasso di movimento della struttura e la forte inclinazione fecero sì che il comitato fosse determinato ad agire prima della fine del millennio. Esperti di fama mondiale in ingegneria strutturale e del suolo furono invitati a proporre soluzioni al comitato, mentre venivano rese disponibili le attrezzature più moderne e sofisticate. Il primo passo, però, fu studiare ogni movimento e monitorare accuratamente la torre.

3. Sistema di monitoraggio automatizzato



Erano necessari vari strumenti. Il comitato ha installato moderni sistemi di misurazione e monitoraggio computerizzati per esaminare la torre e il terreno circostante. Il sistema includeva speciali dispositivi per misurare la quantità di inclinazione, cedimenti verticali, crepe e qualsiasi altro movimento. La prima misurazione ovvia necessaria era il grado di inclinazione. Ciò è stato ottenuto con l'uso di diversi inclinometri, estremamente accurati che misurano il grado di inclinazione o angolo. Questi strumenti sono stati montati in varie configurazioni in tutta la torre lungo diversi assi per catturare il grado di inclinazione e rotazione. Gli inclinometri e il loro posizionamento hanno informato gli ingegneri del grado di inclinazione attuale e, cosa più importante, li hanno informati in tempo reale di eventuali cambiamenti nella torre mentre svolgevano i loro interventi.

La torre non solo è inclinata, ma stava anche affondando verticalmente, era necessario un altro dispositivo infatti, un sistema di livellamento. Questo sistema è una serie di piccoli contenitori riempiti con uno speciale liquido e interconnessi da una rete idraulica. Quando il liquido raggiunge lo stesso livello orizzontale in ciascuno dei contenitori, fornisce una misura dei cedimenti verticali relativi. La torre si sposta anche quotidianamente di piccole quantità. Il movimento dovuto alle differenze di temperatura e alle forze del vento negli edifici in muratura è tipico, ma nelle situazioni in cui la struttura è a rischio, è importante stabilire una misurazione di base.

Questa misurazione informa gli ingegneri se un movimento è dovuto a un vento forte, a una giornata di sole o, più importante, al loro intervento o a un guasto imminente. Una stazione meteorologica è stata posizionata in cima alla torre per registrare la direzione e la velocità del vento, la temperatura ambiente. I termometri sono stati posizionati all'interno della muratura su piani diversi.

Le crepe sono tipiche anche negli edifici in muratura, soprattutto nelle torri vecchie di ottocento anni. Possono essere un segnale di avvertimento di problemi più seri. Sono stati installati **estensimetri** per misurare la propagazione o la riduzione delle crepe in venticinque punti diversi.. Gli estensimetri sono stati calibrati per tenere conto delle variazioni di temperatura e di altre proprietà dei materiali.

Tuttavia, nel caso di una torre così importante a rischio di crollo, gli ingegneri avevano bisogno degli strumenti di monitoraggio e misurazione più sensibili. Questi dispositivi erano collegati a registratori di dati o piccoli computer che registravano tutte le misurazioni in modo continuo. Dai dati, i cambiamenti venivano tracciati per fornire un quadro accurato di deformazioni, cedimenti verticali, movimento e temperatura. I risultati furono quindi immediatamente disponibili per l'uso da parte del comitato per formulare teorie e proporre azioni appropriate. Man mano che si interveniva, gli stessi dispositivi registravano l'intervento. Le misurazioni e gli studi mostravano che l'inclinazione della torre aumentava progressivamente fino a un punto critico infatti la torre rischiava un imminente crollo a causa di un improvviso cedimento del terreno.

4. Interventi finali di stabilizzazione

Nel 1993, il comitato stabilì misure provvisorie urgenti per impedire ulteriori movimenti applicando blocchi da 600 tonnellate sul lato nord delle fondamenta della torre. In seguito, il peso fu aumentato a 900 tonnellate.

Il sofisticato sistema di monitoraggio già in atto rifletteva una riduzione dell'inclinazione e si riuscì di fatti a fermare l'inclinazione. Nel 1998, furono applicati provvisoriamente dei cavi attorno alla torre e ancorati a pesi enormi nascosti dietro altri edifici. Ciò fu fatto come misura precauzionale prima di iniziare ulteriori interventi.

La stabilizzazione definitiva della torre iniziò nel 1999. Trentacinque metri cubi di terreno furono rimossi dal sottosuolo sotto il bordo nord delle fondamenta attraverso una serie di rivestimenti perforati in diagonale nel terreno. Questa operazione proseguì lentamente e con attenzione. Il terreno continuò a essere rimosso in piccole quantità. I dati furono raccolti dal sistema di monitoraggio e analizzati per valutare l'impatto di ogni estrazione sul movimento e sull'inclinazione della torre.

Quando l'operazione fu completata nel 2001, quasi il 10 per cento dell'inclinazione era stato recuperato. Il comitato e il Ministero dei beni culturali italiano convennero che questo valore manteneva l'importante inclinazione pur garantendo la stabilità.

Attualmente, il sistema di monitoraggio continua a funzionare, dimostrando che la torre è stabile e la sua inclinazione è la stessa di quella della metà del XVIII secolo.