

CARLO CESTELLI GUIDI
PROLEGOMENI AL PROBLEMA DELLA STABILITÀ
DELLA TORRE DI PISA

Ricorderò che la torre è costituita da un robusto tamburo in muratura con muri esterni in pietra e riempimento a secco che si eleva a circa 50 metri sulla base (7^a cornice).

Esso è fondato su un anello di oltre 18 metri di diametro esterno con piccolo vuoto al centro. Si presume che tale anello poggi direttamente sul terreno, senza palificazione, per quanto ciò non sia ben accertato. Certo che la muratura di base non è stata concepita per trasmettere il carico a dei pali.

La fondazione venne iniziata nel 1173. Nel 1185, ossia 12 anni dopo, vennero sospesi i lavori quando la torre era giunta a metà del terzo piano; la pressione del terreno in tali condizioni era di 3,5 kg/cmq.

La sospensione dei lavori probabilmente non fu dovuta a preoccupazioni per la stabilità della costruzione, per quanto, certamente, dovevano essersi verificati forti assestamenti del sottosuolo. Va rilevato del resto che la muratura del Campo-santo carica il terreno con 4 kg/cmq, pur senza notevoli dissesti.

Nel 1275, ossia 90 anni dopo, Giovanni Di Simone riprende i lavori e (9 anni dopo) nel 1284, erano completati altri tre ripiani. Nuova sospensione dei lavori, questa volta per alcune preoccupazioni per l'inclinazione assunta dalla Torre ed anche per ragioni politiche: erano gli anni della sconfitta della Meloria.

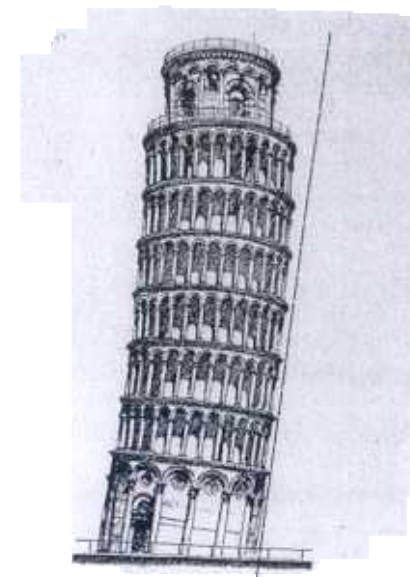
Solo nel 1350 la Torre venne completata con la costruzione della cella campanaria e, riferendo il piano del pavimento di questa a quello del sottostante ordine, si rileva un rialzamento da un lato di ben 45 cm.

È da presumere che con tale rialzamento il pavimento sia stato allora riportato in piano.

Quindi il campanile era stato costruito in un periodo di tempo di ben 180 anni. Osservando l'insieme dei tre monumenti: il Campanile, il Duomo ed il Battistero, appare che il campanile non sovrasta gli altri monumenti come dovrebbe per le sue funzioni e quindi è da pensare che il progetto iniziale non sia stato realizzato. Alcuni autori ritengono che la Torre avrebbe dovuto raggiungere l'altezza di 70 metri.

In relazione ai successivi rialzamenti dei piani, che sono particolarmente messi in evidenza dai disegni del Fontana in scala alterata delle figure 1 e 2, è da ritenersi che lo strapiombo dell'ultima cornice fosse alla fine dei lavori di metri 1,63. Il Sampaolesi ci dice che nel 1817, ossia 467 anni dopo, era di metri 4,83, e l'incremento successivo è stato di circa un millimetro all'anno. Quindi attualmente lo strapiombo è di circa 5 metri a cui corrisponde una pendenza di 1 a 10.

Fig. 1 - Disegno del Fontana rappresentante le successive inclinazioni della torre.



La pressione media sul terreno a Campanile ultimato è di 5,5 kg/cmq e l'abbassamento generale medio dall'inizio si presume che sia di circa 1,50 m con un dislivello della fondazione da un estremo all'altro di circa 2 metri. È evidente che, date le caratteristiche dell'opera, si tratta di un movimento rigido di tutta la struttura. E, poiché l'entità dei cedimenti è stata desunta con riferimenti all'adiacente Duomo, è da presumere che i valori assoluti siano ancora maggiori.

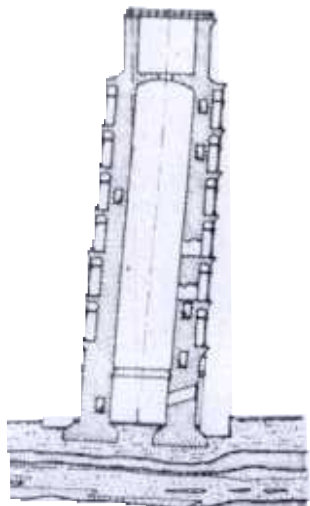
La storia della costruzione del Campanile è particolarmente interessante, poiché pone in rilievo quanto lento sia stato l'andamento della costruzione e quindi l'aumento di pressione della fondazione sul terreno e, ben a ragione osserva il Terracina in una sua interessante conferenza, che se la Torre fosse stata costruita rapidamente, certamente se ne sarebbe verificato il crollo, e, aggiungo, ciò prima di giungere al termine dei lavori, poiché le pressioni interstiziali avrebbero favorito fenomeni di rifluimento della sottostante massa argillosa, come si è verificato più volte, in tempi recenti, per costruzioni pesanti rapidamente costruite su terreni cedevoli.

Il sottosuolo è costituito da materiale alluvionale in alternanze limose, argillose ed anche sabbiose, di composizione molto variabile, senza alcuna ricorrenza orizzontale fino alla profondità di 10 metri; trattasi di materiale depositato nel delta dell'Arno.

Da metri 10 a metri 23 si rinviene invece una stratificazione argillosa contenente il 60% di acqua salmastra e, al disotto, ancora alternanze limo-argillose fino alla profondità di circa 41 metri dal piano di campagna, ove si trova un potente banco di sabbia compatta. Osservando la rappresentazione della fig. 2 relativa ai campioni di tutto un sondaggio, si vede la predominanza del limo.

Per esperienza personale di altri lavori eseguiti nella zona, anche a distanza dalla piazza, ad esempio per un ponte dell'Arno, ho ritrovato tale banco circa

Fig. 2 - Sezione della torre con la stratigrafia del sottosuolo rilevata da Canevari.



alla stessa quota assoluta, ed esso costituisce un ottimo strato di appoggio per tutto il sottosuolo pisano.

La prima domanda da porsi è se le caratteristiche del sottosuolo della Torre siano le stesse di quelle del terreno circostante. Ritengo di poter rispondere certamente « no ».

La ripartizione delle pressioni della Torre nel sottosuolo certamente è notevole; si può senz'altro dire, con ipotesi prudenziale, che mediamente il carico si diffonde in un cono di angolo non minore di 30 gradi, il che comporterebbe, nella semplicistica ipotesi della ripartizione uniforme, a una pressione media a 10 metri di profondità, circa 1/3 di quella applicata in superficie, ma sappiamo pure che la pressione massima è molto maggiore proprio al disotto della Torre, tanto che applicando i noti procedimenti, si troverebbe che la pressione massima, a 20 metri di profondità, sarebbe al centro ancora superiore a quella media applicata in superficie.

E poiché, dato il tempo trascorso, il consolidamento primario è certamente scontato ed anche il secondario va verso l'esaurimento, allo stato attuale si deve pensare alla Torre poggiante non sul cedevolissimo terreno pisano capace di non sopportare pressioni oltre 1 kg/cmq, bensì su un corpo di terra il quale, attraverso i secoli, si è lentamente consolidato con espulsione di acqua interstiziale e riduzione del volume dei vuoti.

Quindi la Torre si prolunga nel sottosuolo in una massa di terra a caratteristiche del tutto diverse e migliori, come portanza, di quelle del terreno circostante.

Prescindendo da tale situazione del sottosuolo, non si può del resto spiegare il fatto che la Torre sia ancora stabile e non si possono neppure programmare dei seri lavori di consolidamento.

E chi volesse accingersi ad un calcolo dello stato attuale di consolidamento degli strati argillosi, si troverebbe nella grave incertezza di valutare anzitutto la distribuzione delle pressioni al piano di appoggio della Torre. Si sente parlare di 10 kg/cmq da un lato e di 1 kg/cmq dall'altro, ma ciò sarebbe vero se il sottosuolo rispettasse il dominio di Winkler, ossia la proporzionalità fra pressione ed abbassamento.

Il fenomeno esaminato con mentalità geotecnica si presenta in modo ben diverso e sappiamo solo con certezza che la risultante del solido delle reazioni di sottofondo deve avere la stessa linea di azione della risultante dei carichi alla quale fa equilibrio. Quindi sarà un solido eccentrico rispetto al centro della fondazione, ma certamente la compressione al lembo sarà minore dei 10 kg/cmq. Ciò è essenziale per il giudizio sulla stabilità.

Una questione che ha sempre appassionato gli studiosi è di individuare le cause che hanno prodotto l'inclinazione. Molti l'attribuiscono al movimento delle acque sotterranee. Io non condivido tale tesi e ritengo che la direzione della corrente di falda all'incirca in senso opposto all'inclinazione della Torre, circostanza questa che viene citata a sostegno della tesi, sia puramente casuale.

Sono invece propenso a ritenere che la causa debba ricercarsi in una eterogeneità dei primi strati, ovvero nell'influenza di pressioni trasmesse da opere preesistenti o contemporanee alla costruzione.

Si legge nei documenti che in prossimità della Torre si sono rivenute delle pavimentazioni romane a 1 metro di profondità e sopra di esse resti di una necropoli.

Non mi è stato possibile rintracciare dei documenti che mostrino la situazione prima della costruzione della Torre ed è strano che gli autori non si siano preoccupati di accertarla, ma è certo che l'ipotesi di preesistenti costruzioni sullo stesso terreno non può essere esclusa.

Si legge pure che nei periodi di interruzione dei lavori, vi furono accatastamenti di materiale nel cantiere, probabilmente pietra già lavorata o in lavorazione, e questa può essere stata un'altra causa di consolidamenti parziali.

Se si riflette alla grande sensibilità del sottosuolo pisano all'applicazione di carichi anche modesti, non appare azzardata ricercare la causa iniziale dell'inclinazione nei fenomeni citati.

E nell'affacciare questa ipotesi penso principalmente a quello strato relativamente superficiale di argilla che vediamo deformato nel disegno di Canevari, strato che certamente era molto cedevole ancor più degli strati profondi e che veniva direttamente interessato da carichi superficiali.

Certo che erano cause minime, ma una volta innestato il movimento di rotazione, una eccentricità del carico ha accentuato il fenomeno.

Ho ritenuto di soffermarmi su questa disamina dello strato del terreno sottostante alla Torre perché ogni discussione ha scarso interesse se viene ignorato il problema geotecnico.

Si tenga presente che la fondazione si è abbassata di ben 2,50 da un lato e 0,50 dall'altro e quindi il terreno ha raggiunto proprio dal lato più caricato una compattezza che ne distingue nettamente la capacità portante da quella del terreno non caricato.

Si aggiunga che crolli repentini sono sempre dovuti a rifluimenti e questi avvengono con i terreni a fine granulometria, quasi sempre a causa dell'intervento

delle pressioni interstiziali, ma tale pericolo è certamente scongiurato per la Torre, per le ragioni dette.

Il movimento della Torre si palesa chiaramente ritardato, ed il grafico degli strapiombi nel tempo è caratteristico dei cedimenti su terreni argillosi. Il suo andamento è molto simile a quello dei cedimenti del Duomo di Kanisberg che ha raggiunto 1,80 m e che dopo 500 anni ancora subisce degli incrementi considerevoli.

Peraltro, anche se per ragioni dette ha scarso significato il riferimento alla posizione attuale della risultante rispetto alla linea di nocciolo della fondazione, e quindi anche questo non è un dato che deve preoccupare, pure indubbiamente è prudente pensare a migliorare la stabilità della Torre e ciò principalmente per l'evenienza di cause imprevedibili che possono sollecitare staticamente e dinamicamente la struttura.

La scelta del sistema di rafforzamento delle fondazioni è certamente ben difficile, anche perché le soluzioni sono molteplici e porre mano a qualsiasi lavoro in prossimità della Torre desta serie apprensioni. Ricordo che nel 1935 vennero eseguite delle iniezioni cementizie nella muratura di base per la impermeabilizzazione della fossa della torre ad evitare il prosciugamento per pompaggio. Questo semplice lavoro produsse un incremento temporaneo degli strapiombi di oltre il doppio di quelli del periodo precedente.

È a tutti noto che da tempo vengono fatte le più strane proposte di consolidamento del campanile delle quali molte non sono più serie di quella di raddrizzare il campanile tirandolo a monte con delle funi collegate a paranchi. Peraltro vi sono state anche soluzioni interessanti suggerite da tecnici di valore.

La soluzione più semplice, per quanto banale, che è stata adottata per opere pregevoli, quali ad esempio il Campanile di Trani, di smontare la Torre e ricostruirla, non è applicabile al caso particolare poiché la pietra di cui è formata la Torre di Pisa si frantumerebbe.

Le soluzioni attendibili possono suddividersi in due categorie: le une che prevedono la sottofondazione dell'opera, sostituendo in definitiva all'attuale sistema statico uno nuovo, le altre che prevedono di assicurare la stabilità della Torre con un miglioramento della attuale situazione statica del sottosuolo.

Fra le prime sono comprese quelle esistenti nella riduzione della pressione sul terreno con un allargamento della base, ma se questa sarebbe stata una buona soluzione adottata all'inizio, oggi appare di efficacia incerta, in quanto il terreno laterale alla Torre, anche in profondità, ha caratteristiche di compressibilità ben superiori a quelle del terreno sottostante, e quindi darebbe scarso contributo.

Altra soluzione è la sottofondazione con pali, e questa, per essere efficace, dovrebbe pervenire allo strato di sabbia a 40 m di profondità, ma fare dei pali vorrebbe dire alterare completamente l'attuale situazione statica del terreno.

Si è pensato anche a pali avvitati, ma a parte le difficoltà di raggiungere forti profondità, anche essi produrrebbero un'alterazione dello stato attuale del terreno.

Inoltre va considerata la difficoltà di trasferire il carico della Torre e dei pali perimetrali e sussiste anche la preoccupazione che i pali taglierebbero ed isolerebbero il corpo di terra sottostante alla Torre intercettando la diffusione laterale del carico.

Diversi provvedimenti sono stati suggeriti per assicurare la stabilità della Torre durante i lavori di sottofondazione, sia mediante strallature metalliche, sia puntoni cementizi, ed anche con martinetti che prenderebbero appoggio su fon-

dazioni provvisorie. Questa soluzione la ritroviamo frequentemente ed alcuni vorrebbero addirittura sollevare e raddrizzare in parte la Torre. Viene la preoccupazione di alterare la situazione statica del sottosuolo a danno anche dei vicini monumenti.

Tali soluzioni, appartenenti alla prima categoria di lavori, prescindono dall'attuale situazione del sottosuolo direttamente sottostante, per passare ad una soluzione di sostentamento in parte o del tutto indipendente.

Le soluzioni della seconda categoria, concettualmente più interessanti, si basano sulla conoscenza della geotecnica per migliorare la consistenza del sottosuolo in modo da arrestare il movimento in atto e bloccare la Torre sulla sua attuale posizione, ovvero raddrizzarla lievemente.

Gli interventi consistono in una solidificazione della massa argillosa portante con processi fisico-chimici, ovvero procedimenti meccanici quali la costituzione di un reticolo spaziale cementizio armato.

In sostanza sono sistemi che integrerebbero il processo già verificatosi naturalmente nei secoli del consolidamento del terreno sottostante, che costituisce una fondazione profonda formata dalla stessa terra.

Anche tali procedimenti presentano molte incognite quali l'incertezza dell'entità della variazione di volume della terra, che potrebbe ripercuotersi in ulteriori movimenti della Torre.

Si vede che le soluzioni, o per meglio dire le idee, sono molte, ognuna ha pregi e difetti, ma dare un giudizio su delle idee non è possibile in un problema del genere poiché il passaggio al dettaglio di esecuzione di ognuna di esse è così irto di difficoltà che l'idea che può sembrare la migliore potrebbe rivelarsi poi inattuabile.

Comunque un serio sviluppo di un progetto non può avvenire altro che sulla base di una approfondita conoscenza geologica del sottosuolo e per questo non ritengo sufficienti le cognizioni attuali occorrendo conoscere le caratteristiche fisiche del terreno proprio direttamente sottostante alla Torre e non solo di quello circostante, come anche sarebbe utilissimo avere dei dati oltre che sugli strapiombi anche sugli attuali incrementi dei cedimenti assoluti.

L'importanza dell'opera e la delicatezza dell'intervento nell'attuale assetto statico consigliano di fare appello alle competenze geotecniche di tutto il mondo indicando un concorso internazionale, ma ripeto, non su delle sole idee bensì su concreti progetti esecutivi spinti fino allo studio di ogni dettaglio esecutivo, e vi è da sperare che sia possibile ridare saldezza alle gambe di questo insigne malato, senza costringerlo a portare delle stampelle.

CARLO CESTELLI GUIDI
PROLEGOMENA TO THE PROBLEM OF THE STABILITY
OF THE TOWER OF PISA.
SUMMARY.

By the time the tower was finished, it was already 1.63 m. out of the perpendicular. It is now 5 m.

The average pressure on the ground from the completed tower is 5.5 Kg/sq. cm. The subsoil is to a depth of ten metres alluvial substance deposited by the River Arno and below that, strata of clays containing 60% water.

It will be shown how its sinking, on average about 1.50 m. from its foundation, is caused by the slow compaction of the clay bank.

The author insists that the phenomenon be examined from a geotechnical point of view, and that if the hypothesis of perfect elasticity indicates a maximum pressure on the ground of 10 Kg./sq. cm., in reality considerations of the plastic behaviour of the ground become of less importance.

The leaning would originally have been produced by differences in the surface layers of soil.

The author notes that the tower's stability is owed to the fact that the ground underneath it, already compacted, presents a much greater resistance than the surrounding ground in the present state of affairs.

He therefore thinks that, although there is no foreseeable danger of any immediate collapse, it would be prudent to act by achieving an improvement in the static situation of the subsoil, which does not require any work under the foundations.