PROLEGOMENI AL PROBLEMA DELLA STABILITÀ DELLA TORRE DI PISA

C. CESTELLI GUIDI (*)

SOMMARIO: Si riporta il testo di una Conferenza tenuta dall'Autore al *Circolo del Pi-greco* in Roma nel febbraio 1964, insieme agli interventi verificatisi nel corso del successivo dibattito.

1 - Presentazione dell'Ing. Rebecchini (1)

L'argomento che il prof. Carlo CESTELLI GUIDI tratterà riguarda alcuni aspetti dei problemi relativi alla stabilità della Torre di Pisa, argomento questo di cui si discute da tempo ed il cui interesse si riaccende periodicamente a distanza di anni.

Il fatto che la Torre sia soggetta ad un continuo lento e quasi inesorabile movimento che potrebbe un giorno farla definitivamente rovinare è indubbiamente fatto che ha preoccupato e continua a preoccupare non soltanto i tecnici, ma studiosi di storia dell'arte, uomini di cultura e vastissimi strati di opinione pubblica non soltanto in Italia, poichè le più varie proposte di rimedi sono pervenute non solo d'oltre Alpe ma anche d'oltre Oceano.

La Torre, di cui fu iniziata la costruzione intorno all'anno 1170, fa parte, unitamente al Battistero, alla Cattedrale ed al Campo Santo, di quel complesso monumentale del Campo dei Miracoli di Pisa che è forse il più bello e completo esempio di arte Romanica che possediamo in Italia; costruito in un periodo felicissimo della storia della Città di Pisa, tra il XII e XIV secolo quando appunto la Repubblica Marinara di Pisa, nel pieno del suo fulgore, estendeva il dominio oltre l'isola d'Elba, sulla Corsica, sulla Sardegna e fino alle Baleari.

Il fascino che emana questo monumento non è dovuto soltanto a ragioni artistiche o di carattere storico, ma in gran parte deriva proprio dalla sua particolare deformazione. Oserei quasi dire che gran parte delle decine di migliaia di turisti che vengono ogni anno, a visitare Pisa, sono attratti proprio dal fenomeno della « Torre pendente ».

Rileggendo il « Viaggio in Italia » di Charles DE BROSSES, che potremmo definire un turista « ante litteram », si può vedere che anche questo uomo di cultura del XVIII secolo, nel descrivere le meraviglie del Campo dei Miracoli è particolarmente colpito dall'inspiegabile stabilità della torre.

Proprio questo mi sembra il fatto interessante; che tutti vorremmo vedere mantenuta, ben s'intende, la stabilità della torre, ma in questa sua strana posizione di equilibrio che sembra instabile.

Ci guiderà nell'esame di questo problema il Prof. CESTELLI GUIDI che ritengo non abbia bisogno di presentazioni. È socio del nostro Circolo ormai da vari anni e credo che sia stato professore di molti di noi.

Professore di *Tecnica delle Costruzioni* della *Facoltà di Ingegneria di Roma*, membro del *Consiglio Superiore dei LL.PP.*, è stato di recente riconfermato Presidente del nostro Ordine Professionale. Egli parlerà quale esperto di problemi relativi alla Meccanica del Terreno, e pertanto esamineremo il problema sotto questo particolare aspetto che forse è proprio quello nel quale risiede la chiave della soluzione per la stabilità della Torre.

Prima di cedere a lui la parola, desidero rivolgere un ringraziamento a tutti i presenti e particolarmente agli illustri ospiti che hanno voluto aderire a questo nostro incontro. Come al solito, al termine dell'esposizione del relatore, sarà aperto un dibattito al quale mi auguro vogliano partecipare il più gran numero di presenti.

2 - Conferenza del Prof. Cestelli Guidi

Nel prendere la parola su un argomento particolarmente delicato per i suoi riferimenti storici, tecnici ed artistici, mi preoccupa il fatto che a un uditorio così scelto come quello di questa sera, la mia esposizione appaia di scarso rilievo.

Affrontare il problema della stabilità della Torre pendente di Pisa è compito ben arduo e nello stesso tempo delicato, e voglio chiarire fin d'ora, affinchè l'aspettativa non sia delusa, che non intendo proporre una soluzione per il consolidamento di questo insigne

---

(*) Prof. Ing. Carlo CESTELLI GUIDI, titolare della cattedra di *Tecnica delle Costruzioni* nella *Facoltà di Ingegneria* dell'*Università di Roma*.

(1) Dott. Ing. Gaetano REBECCHINI, presidente del *Circolo del Pi-greco*.

monumento che deve la sua popolarità nel mondo, oltre ai suoi pregi artistici, anche alla sua malattia, tanto da far esprimere il dubbio ad alcuni autori che la pendenza fosse voluta fin nella concezione dell'opera dell'architetto BONANNO.

Mi limiterò ad inquadrare il problema tecnico e nel fare la diagnosi della malattia porrò l'accento sull'aspetto geotecnico, spesso trascurato, poichè ritengo che ogni studio della cura, che prescinda dalla esatta conoscenza del sottosuolo e dalla interpretazione delle vicende da esso subite nei secoli, non possa costituire la premessa ad una felice soluzione.

Quindi il mio apporto sarà molto modesto ma mi auguro che il reale interesse di questa riunione venga dagli interventi che seguiranno.

Non vi tedierò con una esposizione storica del campanile; per chi interessasse, esiste una pregevole pubblicazione del SAMPAOLESI, sintesi di quanto è stato scritto fino ad oggi sul monumento.

Ricorderò solo 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 (7ª cornice); le strutture sono perfettamente integre.

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.

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 sul 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 Camposanto carica il terreno con 4 kg/cmq, pur senza notevoli dissesti.

Nel 1275, ossia 90 anni dopo, Giovanni DI SIMONE riprendeva 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 orizzontale.

Quindi il campanile venne 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

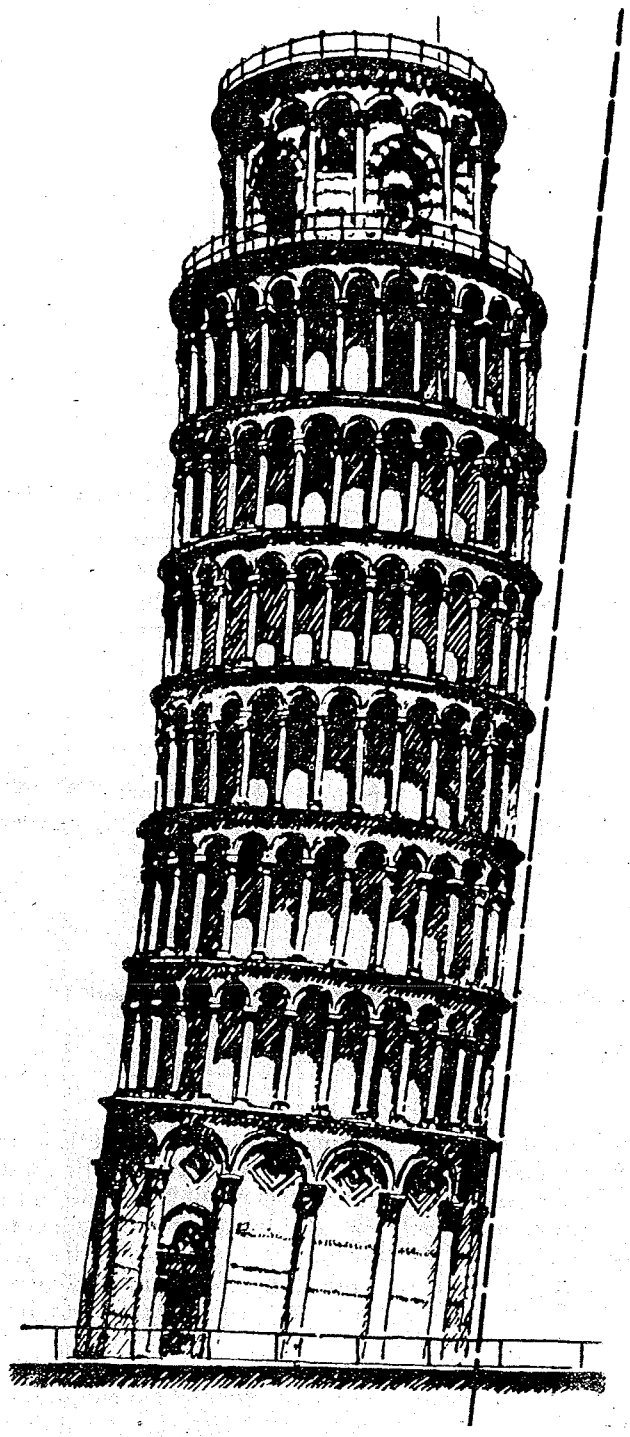

Fig. 1.

del FONTANA in scala alterata delle figg. 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.

La pressione media sul terreno a campanile ultimato è di 5,5 kg/cmq e l'abbassamento generale

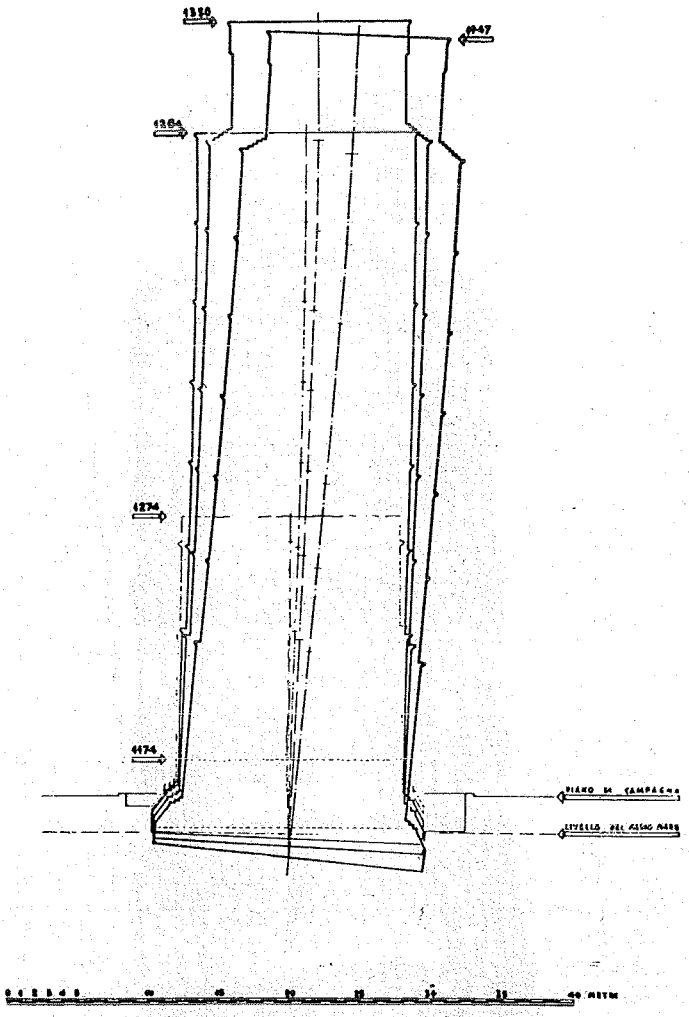

Fig. 2.

medio dall'inizio si presume che sia di circa 1,50 m con un dislivello da un estremo all'altro della base di fondazione di circa 2 metri. È evidente che, date le caratteristiche dell'opera, si tratta di un movimento rigido di tutta la struttura. E, poichè l'entità dei cedimenti è stata desunta con riferimento all'adiacente Duomo, è da presumere che i valori assoluti siano ancora maggiori.

La storia della costruzione del campanile è particolarmente interessante poichè 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 del termine dei lavori, poichè 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 erette su terreni cedevoli.

Dopo questa breve esposizione storica della costruzione parliamo del vero protagonista della vicenda, ossia del sottosuolo.

La fig. 3 (Canevari) mostra la conoscenza del sottosuolo che si aveva nel 1910 a seguito di sondaggi. Si nota un banco di terra argillosa di spessore variabile fra 3 e 5 metri particolarmente depresso verso il lato pendente.

Maggiori indicazioni sono fornite dai sondaggi eseguiti nel 1953 dalla Ditta Rodio, dai quali risulta che 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 una stratificazione argillosa contenente il 60 % di acqua salmastra, e, al disotto, ancora alternanze limo-argillose fino alla profondità di circa 40 metri dal piano di campagna, ove sembra si trovi un potente banco di sabbia compatta. Osservando la rappresentazione della fig. 6 relativa ai campioni di tutto un sondaggio, si vede la predominanza del limo.

In altri lavori eseguiti nella zona, anche a distanza dalla piazza, ad esempio per un ponte sull'Arno, ho ritrovato tale banco circa alla stessa quota assoluta, ed esso costituisce un ottimo strato di appoggio.

Molto interessanti sono i risultati delle prove geotecniche su campioni di terra indisturbati, ma va

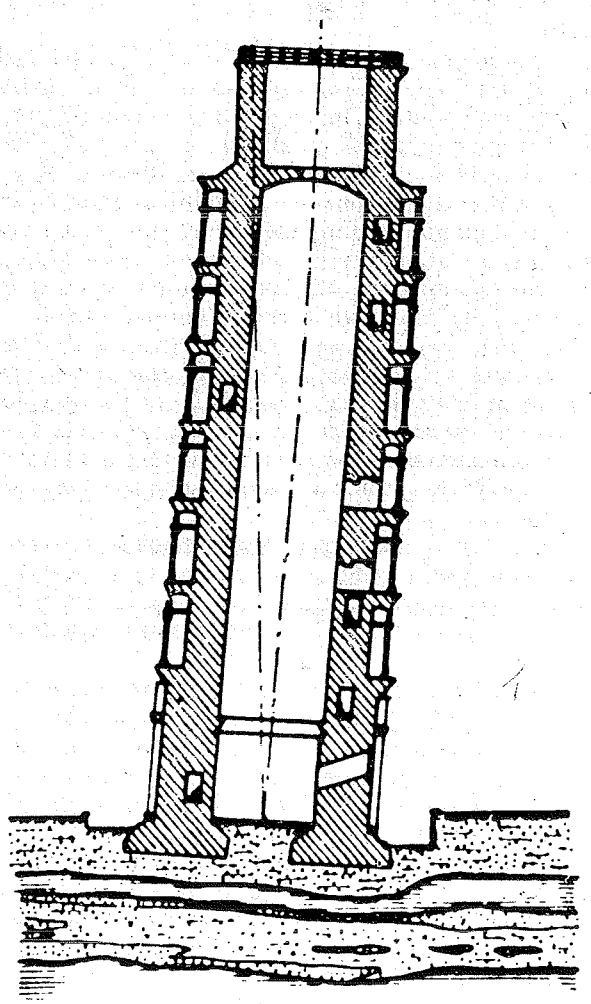

Fig. 3.

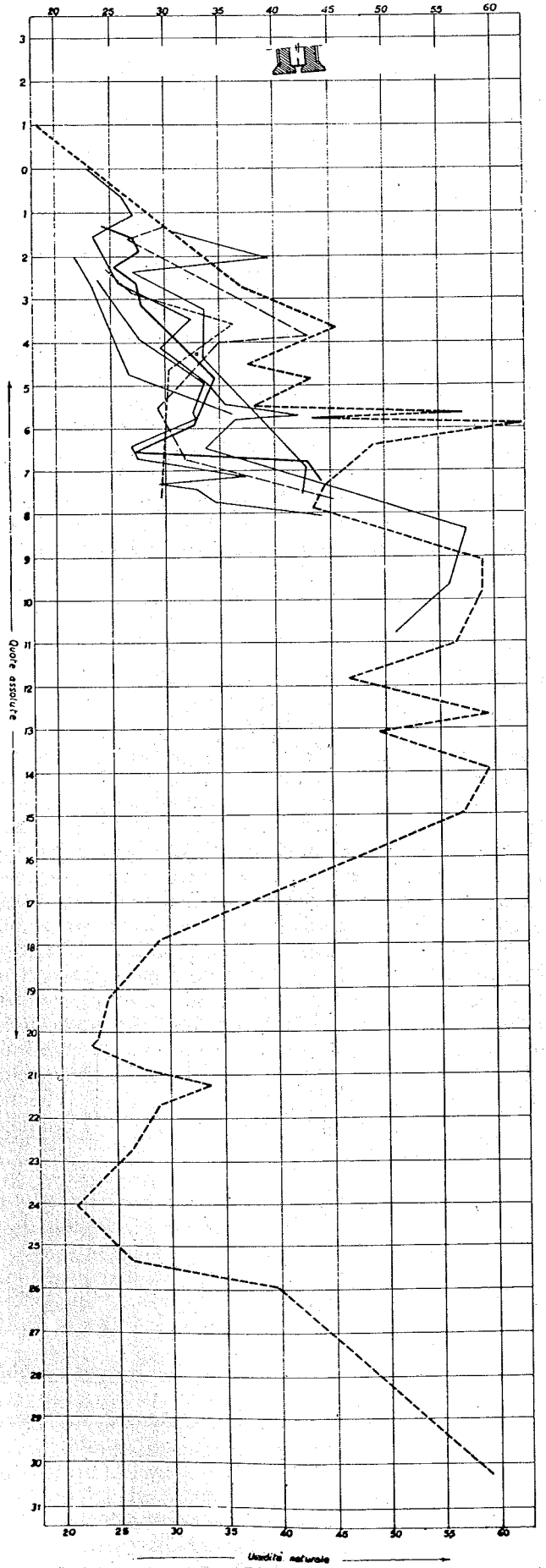
Quote assolute
Umidità naturale

Fig. 4.

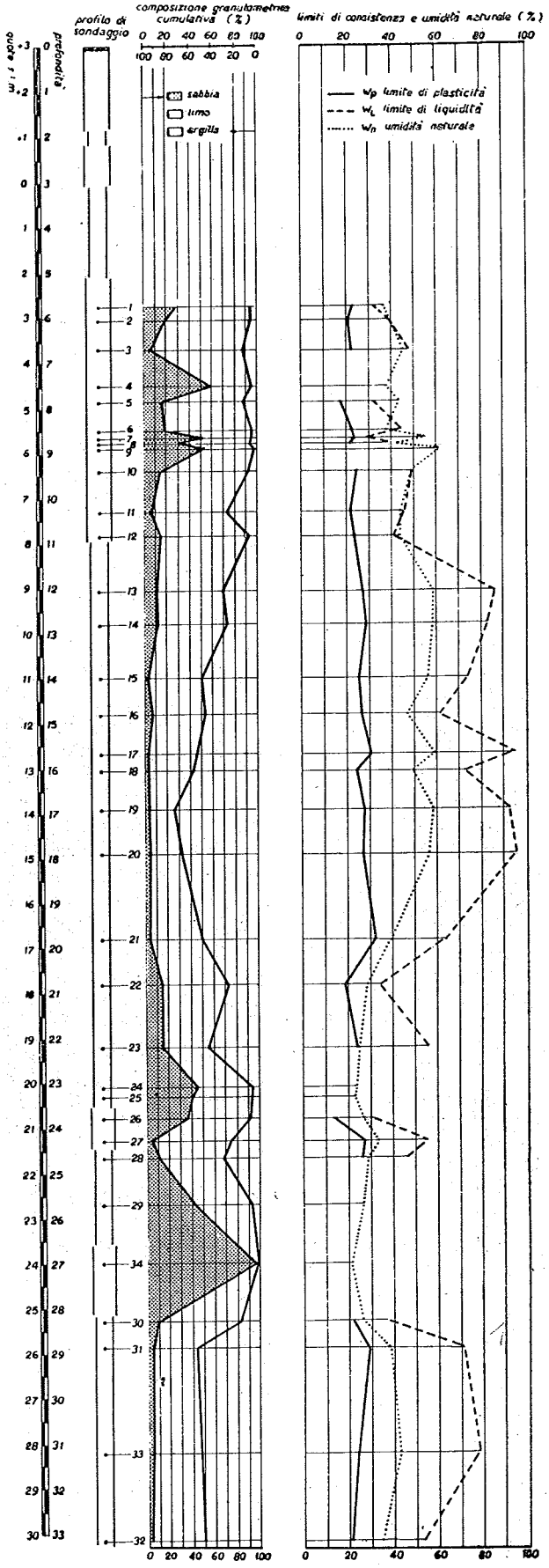
profilo di sondaggio
composizione granulometrica cumulativa (%)
sabbia
limo
argilla
limiti di consistenza e umidità naturale (%)
w_p limite di plasticità
w_L limite di liquidità
w_n umidità naturale

Fig. 5.

categorie: le une che propongono 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 situazione statica del sottosuolo.

Fra le prime sono comprese quelle che riducono la 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 del terreno.

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

Inoltre va considerata la difficoltà di trasferire il carico della Torre a 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 fondazioni provvisorie. Questa soluzione la ritroviamo frequentemente ed alcuni vorrebbero addirittura sollevare e raddrizzare in parte la Torre. Viene la preoccupazione di alterare l'assetto del sottosuolo a danno anche dei vicini monumenti.

Le soluzioni appartenenti alla prima categoria di lavori, prescindono dall'attuale situazione statica del terreno direttamente sottostante, per passare ad un 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 con procedimenti meccanici, o anche con la costituzione di un reticolo spaziale cementizio armato.

In sostanza sono sistemi che integrerebbero il processo già verificatosi naturalmente nei secoli del consolidamento di quel terreno sottostante, che costituisce in definitiva una fondazione profonda.

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 così delicato poichè 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 geotecnica 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 consigliano di fare appello alle competenze geotecniche di tutto il mondo indicendo un appalto concorso internazionale, ma ripeto, non per delle sole idee bensì per 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.

Nel chiudere questa mia introduzione al problema della stabilità del campanile di Pisa Vi ringrazio di avermi ascoltato con tanta pazienza e sarò ben felice di rispondere ai quesiti che mi porrete nei Vostri interventi.

3 - Discussione

Dott. ing. Mario Fernando Guiducci:

L'amico e consocio Carlo Cestelli Guidi ci ha brillantemente illustrato la storia e le traversie del campanile di Pisa.

In particolare abbiamo molto gradito le interessantissime citazioni storiche, le quali esprimono le ansie, la prudenza ed in fondo anche la saggezza dei tecnici che ci hanno preceduto.

Di particolare interesse per noi tecnici (o meglio geotecnici) i dati sui sondaggi e sulle prove, ed infine interessantissima la breve ma chiarissima esposizione dei diversi progetti e concetti in merito ai provvedimenti per assicurare ai nostri posteri la torre pendente.

Poichè ogni ingegnere che si occupa, o si è occuto, di geotecnica penso che abbia almeno una volta immaginato e concertato un sistema per stabilizzare (o raddrizzare, o sistemare) la torre — ed anche io ne ho in cuore uno, ormai da diverso tempo, ed anzi conto di descriverlo — ci stupiamo molto che l'illustre prof. Cestelli Guidi non abbia voluto, in questo consenso di amici, illustrarci la sua idea.

Vorremmo pregarlo di mettere da parte, almeno per questa volta, la sua proverbiale modestia e di illustrarci meglio ciò che soltanto traspare dalla sua esposizione.

Contiamo, e siamo certi, che non vorrà deluderci.

Esaminiamo un momento insieme questi tre punti che a me sembrano fondamentali; e ciè:

a) *la storia della costruzione;*

b) *i dati geotecnici sulle terre e gli accertamenti eseguiti;*

c) *le possibilità di intervento.*

La storia della costruzione è molto importante poichè da essa, e non da altro, si può ricavare l'andamento delle pressioni, quello dei cedimenti e ricostruire quindi non solo la storia dei fatti, ma anche quella di quanto è avvenuto nel terreno sottostante e circostante alla torre. Su alcun punti vorrei in particolare fermare un momento la Vostra attenzione.

I) Il campanile è di molto successivo al Duomo: è certo quindi che quando fu iniziato, il terreno era sotto l'influenza dei poderosi carichi della chiesa.

II) Sembra che ai livelli delle prime cornici si siano apportate, all'atto della costruzione, correzioni in senso opposto a quelle relative all'attuale pendenza.

Questi due fatti lascerebbero pensare che in un primo tempo la torre abbia accennato ad assestarsi di più verso nord che non verso sud.

E la decisione di Giovanni Di Simone del 1275 di riprendere i lavori potrebbe essere stata dettata proprio dalla stabilizzazione degli assestamenti: non però verso sud, ma verso nord. E la cosa può essere spiegata alla luce del primo punto.

Il terreno dalla parte nord risentiva degli importanti carichi della chiesa e si stava ancora assestando all'epoca della costruzione dei primi elementi del campanile.

Perciò i movimenti dovevano preferenzialmente essere di verso opposto di quelli attuali. D'altro canto il fatto che la torre abbia iniziato a muoversi all'inizio della costruzione lascia pensare che, dati i pesi modesti, non sia stata solo la torre a causare col suo peso l'inizio del moto, ma anche i pesi circostanti (forse anche le cataste di pietrame da costruzione).

Il fatto che però sul lato sud il terreno fosse meno consolidato che sul lato nord, se in un primo tempo aveva contribuito ad arrestare il movimento di rotazione in quanto con i suoi cedimenti aveva riappariglato quelli del lato nord non dovrebbe aver tardato a fare sentire la sua influenza. Infatti, cosa potrebbe essere successo? Il cedimento sul lato nord, caricato da più tempo, ad un certo punto è stato superato da quello del lato sud e la torre ha iniziato ad inclinarsi da quella parte. E per molto tempo la rotazione è stata provocata dal maggior cedimento del lato sud rispetto al nord poichè il terreno a nord era meno compressibile che a sud. Le compressibilità avevano quindi più influenza delle pressioni.

Insieme ai cedimenti sono però cresciute anche le pressioni (siamo in pressione eccentrica). Oggi la situazione è rovesciata nel senso che la torre continua ad appendersi verso sud, malgrado il terreno sia da quella parte meno compressibile — il fatto avviene soltanto perchè le pressioni sono troppo squilibrate.

Possiamo noi riportare le cose a condizioni simili, non uguali, a quelle che indussero il Di Simone a proseguire la costruzione della torre? A mio giudizio si.

Ciò significa che potremo portarle mediante un oculato e controllato giuoco (o meglio equilibrio) di carichi alle condizioni di rotazione nulla attraverso una prima rotazione verso nord.

L'altro punto della storia che vorrei sottolineare è quanto avvenne dal 1840 al 1930 a causa dei pompaggi di acqua nel cosidetto « catino ». In quel periodo la pendenza è aumentata da circa il 9 % al 10 % probabilmente per un acceleramento del processo di consolidazione dei limi argillosi sottostanti.

Le iniezioni impermeabilizzanti hanno permesso nel 1932 di porre termine al pompaggio e quindi il fenomeno ha ripreso il suo vecchio corso.

Non credo che tali aggottamenti abbiano potuto provocare trasporti di materia sotto le fondazioni; penso piuttosto che l'effetto sia stato un po' quello che noi oggi provochiamo artificialmente accellerando il consolidamento mediante una diminuzione delle pressioni dell'acqua interstiziale.

Passando ora ad esaminare i dati tecnici si deve purtroppo constatare come questi siano pochi, dispersi e soprattutto non coordinati.

Due punti in particolare mi risultano non appurati:

— si parla sempre di strapiombi e mai di cedimenti; penso che sarebbe molto interessante, anche se di più difficile misurazione, conoscere come si esplica questa rotazione, cioè dove sta l'asse di rotazione. Noi non sappiamo, o almeno io non so, di quanto scende annualmente il baricentro della torre.

Non possiamo così controllare e ricostruire l'andamento dei cedimenti che sono quelli che generano le rotazioni della base.

— L'altro punto riguarda le indagini geotecniche in sito ed i sondaggi. Sono stati, è vero, eseguiti diversi sondaggi col campionatore continuo Kjellmann e si sono individuate esattissimamente le stratificazioni lungo l'asse Nord-Sud. Ma da tutto ciò si deduce soltanto che i terreni sono limi sabbiosi e argillosi con formazioni probabilmente lenticolari assolutamente confuse.

Non sono state eseguite trivellazioni sotto la torre le quali dovrebbero accertare invece le differenze di caratteristiche meccaniche (compressibilità, contenuto in acqua ecc.) tra il lato Sud e quello Nord.

È quindi auspicabile che le indagine vengano riprese alla luce della geotecnica più moderna, soprattutto per appurare le caratteristiche differenziali dei terreni diversamente compressi: sia quindi in senso radiale, sia alle varie profondità.

Dai dati attuali che il Prof. Cestelli ci ha riportato e che si riferiscono non ai terreni sotto la torre ma a quelli circostanti (e la cosa è molto diversa) si ricava comunque che si tratta di limi, più che di argille, le cui caratteristiche migliorerebbero moltissimo per effetto della consolidazione.

Il modulo di compressibilità abbiamo notato che cresce enormemente col carico; così che è spiegabile la stabilità del campanile proprio col fatto che questi limi compressi sono in grado di fornire caratteristiche di resistenza veramente formidabili.

Perciò altre prove di laboratorio e prove in sito (penetrometro e *vane-test*) potrebbero fornire altre utilissime informazioni per tirare delle conclusioni costruttive.

Sembra comunque accertato (l'ing. Terracina qui presente nè da in una sua pubblicazione ampia dimostrazione) che la torre rispetto al carico critico sia

ancora stabile con un coefficiente di circa 2. Quindi da questo punto di vista dovremmo essere più che tranquilli. Non sembrerebbe esserci assolutamente pericolo di crollo per raggiungimento del carico di rottura. Rimane invece il pericolo per il fenomeno di instabilità. Le reazioni corrono appresso alle pressioni senza riuscire a raggiungerle, dato che lo strapiombo aumenta, e naturalmente la cosa non può durare all'infinito. È vero che agli aumenti di pressione corrispondono forti incrementi del modulo di compressibilità e quindi cedimenti via via più piccoli, ma non sembra che questo fatto sia sufficiente a fermare il fenomeno. Le misure dei cedimenti verticali della torre dovrebbero fornirci proprio l'indicazione che manca a riguardo.

Basterà, però che aumentiamo un po' il cedimento del lato Nord perchè automaticamente si giunga ad un nuovo equilibrio nel quale i cedimenti siano uniformi (almeno per un certo tempo) sotto tutta la torre.

In sostanza adesso il problema non è di consolidare la parte Sud che è già consolidata, ma di accelerare un po' il consolidamento della parte Nord per ricentrare la torre di quel tanto che consenta non l'eguaglianza della reazione, ma l'uniformità del cedimento. Quindi a Sud si otterrebbero maggiori pressioni su un terreno meno compressibile: a Nord una minor pressione su nn terreno un po' più compressibile.

Si comprende come per far tutto questo siano necessarie le indagini differenziali.

Il problema della torre di Pisa è enormemente più vecchio della geotecnica. Ciò spiega come mai si sia sempre guardato alla torre anzichè al terreno sotto la torre che è la vera ed unica causa di tutto il male.

La torre sta benissimo; ha una struttura formidabile e deve proprio a questo la sua vita attuale. Io quale geotecnico vedo la soluzione nell'ambito e con i mezzi della geotecnica. Non è detto però che altre strade non possano essere valide se sviluppate in un clima di collaborazione costruttiva.

Sono d'accordo con l'Ing. Terracina che basterebbe un piccolo raddrizzamento della torre per assicurarne la stabilità. Sono un po' meno d'accordo sul mezzo da impiegare.

Penso, che guardandoci indietro nella storia della torre si possa anche trovare la chiave per la sua soluzione. Infatti:

1) Il peso della torre ha agito su un terreno inizialmente non ugualmente compressibile.

2) Questo fatto ha portato maggior cedimenti sul lato più debole (lato Sud).

3) Questi cedimenti hanno però raggiunto valori tali per cui l'effetto è stato quello di far diventare, quello che era il lato più debole, il lato più forte.

4) I pompaggi eseguiti dal 1840 al 1930 provano quanto importante sia l'influenza dell'acqua sul decorso dei cedimenti.

Perciò ritengo che sia proprio l'azione combinata sulla falda e sui carichi a dover produrre quel piccolo raddrizzamento necessario per raggiungere, non la stabilità in senso assoluto cioè l'immobilità, ma l'uniformità degli abbassamenti, o meglio ancora l'inizio di un movimento inverso. Peraltro la riduzione della massima pressione potrebbe produrre proprio l'annullarsi di ogni abbassamento.

Avrete ormai compreso che la mia idea consiste quindi nell'impiego di drenaggi verticali in accoppiamento con un modesto ricarico da eseguirsi sul lato Nord.

Il ricarico deve essere modesto e guidato nei suoi effetti dai drenaggi anche per rispetto al Duomo, perchè sarebbe assai spiacevole che per raddrizzare la torre si danneggiasse la chiesa.

Dott. ing. Fernando Terracina:

Il collega Guiducci ha presentato acutamente e chiaramente alcune conseguenze dalla diagnosi dello stato della Torre di Pisa, esposta dal prof. Cestelli Guidi; questa diagnosi nei riguardi del terreno può schematicamente riassumersi in una sola parola: consolidazione; sotto l'effetto del carico agente sul terteno cioè, ha rifluito l'acqua, non il materiale solido, il quale si è maggiormente addensato.

La diagnosi ha già di per sè stessa un senso genericamente ottimistico perchè si sa che consolidazione vuol dire riduzione della ulteriore compressibilità ed aumento di quella resistenza al taglio che domina il potere portante dei terreni; questo adattamento del terreno alle sollecitazioni si è certamente verificato anche nel senso che dal lato Sud, dove le pressioni sono maggiori, la consolidazione è maggiore.

A questo riguardo penso potrà interessarvi sapere che un giudizio decisamente ottimistico sulla stabilità del terreno che sopporta la Torre di Pisa, mi è stato comunicato da chi può essere considerato Maestro di noi tutti in fatto di meccanica delle terre, da Karl Terzaghi; questi mi ha anzi espresso la sua meraviglia per il fatto che ancora ci si occupi e preoccupi della Torre di Pisa.

Evidentemente il professor Terzaghi ritiene che l'assestamento raggiunto abbia ormai determinato condizioni di tutta tranquillità.

Resta però il problema di un apprezzamento quantitativo del grado di sicurezza raggiunto; per tale indagine, data l'eccezionalità dell'edificio e l'evoluzione del terreno, è naturalmente da scartare, come ha detto il prof. Cestelli Guidi, il semplice confronto tra le pressioni massime applicate e la pressione indicata genericamente come quella sopportabile dal terreno di Pisa; occorre piuttosto rifarsi ai criteri indicati dalla moderna meccanica delle terre, i quali come è noto partono da certe ipotesi di schematizzazione delle possibili superfici di slittamento; naturalmente il calcolo deve basarsi sulle attuali caratteristiche del terreno *sottostante* alla Torre, quali cioè sono dopo 8 secoli di consolidazione; di esse però poco o nulla sappiamo di preciso perchè vi sembrerà forse strano, ma il fatto è che le indagini sono state fatte finora si può dire esclusivamente nel terreno intorno alla Torre; l'idea che sia indispensabile indagare il terreno modificato dal consolidamento sembra essere stata del tutto estranea alla mente degli indagatori; certo è che non ha influenzato le indagini; e altrettanto può dirsi, almeno per quel che mi risulta, e fino alla pubblicazione del mio primo studio sull'argomento, dell'idea che le caratteristiche del terreno sono certamente oggi, al contrario di quel che era all'inizio, molto migliori del lato Sud rispetto al lato Nord.

In tali condizioni per tener conto dell'assestamento ho fatto ricorso ad un artificio cui accennerò sommariamente. Poichè, come ha accennato il prof. CESTELLI GUIDI, la consolidazione primaria può ritenersi praticamente esaurita, ho ammesso che in ogni punto sia stata raggiunta la resistenza a taglio corrispondente all'assestamento; in tale ipotesi, si può ammettere in prima approssimazione che quella resistenza sia in ogni punto proporzionale alla pressione di assestamento secondo un coefficiente « fittizio » di attrito che compendia sia la coesione che il vero attrito; occorre quindi scegliere un valore opportuno per questo coefficiente e tener poi conto dell'eccentricità del carico, la quale indubbiamente peggiora la situazione; il procedimento non va certo esente da mende e meriterebbe, credo, di essere criticamente esaminato, ciò che però finora nessuno ha fatto.

Comunque il risultato è abbastanza tranquillizzante, non però certo fino al punto di indurre a trascurare il continuo progresso dell'inclinazione.

Il progresso del movimento non può infatti lasciarci indifferenti; tanto più che si tratta di un monumento di importanza eccezionale; quando un edificio si muove, sia pure lentissimamente, sia pure perchè le particelle si addensano e non vi è inizio di movimento di una parte del terreno rispetto a un'altra secondo superfici pericolose, dobbiamo sempre pensare che si crea almeno una facilitazione a superare i valori di primo distacco dell'attrito interno, e quindi già per fatto una riduzione del grado effettivo di sicurezza nei riguardi di un moto qualunque.

Nel caso della Torre di Pisa poi, ad ogni aumento dell'inclinazione corrisponde un aumento dell'eccentricità del carico sulla base, quindi delle pressioni dal lato basso della fondazione, e un permanere di soprapressioni interstiziali, sia pure lievissime, cui corrispondono inadeguate pressioni intergranulari efficaci per la resistenza.

Dalle considerazioni precedenti ho dedotto (e pubblicato già da qualche anno) il suggerimento, secondo cui più che, o almeno prima di rinforzare il terreno o la torre conviene ridurre l'inclinazione della torre, in modo da riportare le pressioni ai valori che avevano qualche secolo fa; si otterrebbe certamente il risultato di consentire un ulteriore assestamento senza aumento delle pressioni; spingendo però opportunamente il raddrizzamento si dovrebbe addirittura ottenere l'arresto di ogni movimento; la teoria suggerisce che basterebbe a tale scopo eliminare le eventuali residue sovrapressioni dell'acqua interstiziale e cioè portare le pressioni totali al di sotto di quelle corrispondenti all'assestamento raggiunto. Anche se si tratta ormai solo di assestamenti secondari, se ne dovrebbe ottenere una sostanziale attenuazione. A tale scopo si noti bene che dovrebbe essere sufficiente un modesto raddrizzamento (forse meno del $^1/_2$ % pari a 1/20 dell'inclinazione attuale) tale da non modificare sensibilmente l'aspetto della Torre quale ormai è nella Storia, nè quindi il suo valore di richiamo turistico.

Naturalmente l'arresto del movimento non basterebbe a tranquillizzare chi ritiene che la pressione sul terreno dovrebbe essere ridotta a 1 kg/cmq; tuttavia penso che esso sarebbe per tutti un risultato apprezzabile.

Ammessa la convenienza dell'accennato lieve raddrizzamento come attuarlo? Il modo più semplice mi sembra sia quello di sottrarre una piccola quantità di terreno sotto la fondazione dal lato alto, in modo da provocarne l'abbassamento; l'idea è tanto semplice, che, se dobbiamo credere a un quotidiano, è stata suggerita anche in una lettera scritta al Sindaco di Pisa... da una alunna delle scuole elementari italiane di Buenos Aires, che forse l'aveva sperimentata giocando con la sabbia sulla spiaggia...

Si dovrebbe operare mediante trivellazioni opportunamente disposte; non ritengo che si andrebbe incontro al pericolo di un acceleramento del moto attuale, che è stato da taluni prospettato come paradossale conseguenza della formazione di vuoti sotto la parte alta; secondo me essendo la torre libera di ruotare, la distribuzione delle pressioni non potrebbe che modificarsi subito in senso favorevole alla stabilità; e del resto i vuoti determinati con la trivellazione non dovrebbero mai superare poche decine di decimetri cubi, infinitesima parte del corpo portante che ammonta a molte migliaia di metri cubi.

Seguendo questa via si lascerebbe operare con velocità controllabile il peso della Torre, senza ingombrare la Piazza, *senza turbare in nessun modo l'attuale prezioso assestamento, nè il regime delle pressioni e delle acque, senza effettuare nel terreno tagli, nuove fondazioni, ecc.;* tutte cose progettate talvolta con disinvoltura e che invece mi preoccuperebbero nei riguardi sia del terreno sia della Torre (che oggi non ha una incrinatura), assai più delle minime e lentissime sottrazioni di terreno da me considerate.

L'ing. Guiducci ha peraltro prospettato un diverso modo di ottenere il raddrizzamento: l'applicazione di carichi sul terreno dal lato Nord e l'accelerazione dell'assestamento mediante dreni vericali; è una via che merita certo di essere attentamente studiata e valutata in base alle complesse modalità che essa esige.

Sia l'uno che l'altro metodo potrebbero essere facilmente sperimentati con terreni simili, sotto altri edifici, ad es. sotto una delle tante torri della Toscana, ovvero serbatoi, o corpi artificialmente predisposti.

Rispetto alle proposte di sottofondazioni la mia proposta di lieve raddrizzamento presenta il vantaggio di un costo assai moderato e perciò, se si ammette che non importi rischi, penso che dovrebbe essere presa in considerazione, almeno come fase preliminare, in quanto arrestando il moto della Torre dovrebbe consentire di eseguire con maggiore tranquillità le più complesse opere eventualmente ritenute necessarie.

In verità i concetti che sono alla base di questa proposta sono estremamente semplici, ma mi permetto di affermare che, a differenza di quelli che presiedono a taluni grandiosi progetti, essi non sono in contrasto ma in armonia con ciò che ci ha insegnato la Meccanica delle Terre negli ultimi decenni.

Dott. Ing. BARBI:

Professor Cestelli, Lei ci ha fatto una conferenza splendida sulla Torre di Pisa, ce ne ha raccontata la storia, ci ha raccontato quando è nata, ci ha comunicato i valori dei carichi, ci ha raccontato tutto ed

è stata un'esposizione meravigliosa; noi però siamo venuti a sentire il Prof. Cestelli non per questo, ma per la sua figura, per sapere cosa lui avrebbe in programma di fare se avesse l'incarico; noi vogliamo conoscere l'opinione del Prof. CESTELLI, cioè quello che farebbe il Professore nelle condizioni attuali se avesse l'incarico di rafforzare la Torre di Pisa.

Allora entreremmo nel vivo, perchè abbiamo sentito la conferenza, — per lo meno dal mio punto di vista — fredda. Io voglio sentire la sua opinione Professore, cioè: « se io avessi l'incarico di fare il rafforzamento della Torre di Pisa farei questo, questo e questo, vorrei questo, questo e questo ». Vorremmo avere un poco di vita; tutta cultura abbiamo sentito, tutta cultura verissima, ma se Lei avesse l'incarico Professore, cosa farebbe?

Dott. ing. Giuseppe RINALDI, Presidente di Sezione del *Consiglio Superiore dei LL.PP.*:

Se permettete desidero aggiungere qualche cosa per chiarire la richiesta dell'ing. BARBI al Prof. CSTELLI.

Dalla sua esposizione questa sera abbiamo sentito quanto può essere fatto per il salvataggio della Torre da parte dei geotecnici. Conoscevamo soluzioni di strutturalisti, ma essendovi in sostanza, tra la struttura superiore ed il terreno strette relazioni, l'esposizione fatta dal Prof. CESTELLI, integrata da quella dell'ing. GUIDUCCI e da quella dell'ing. TERRACINA, ci ha presentato altre possibilità.

A questo punto, dalla esposizione CESTELLI c'è da domandarsi quale può essere un piano di azione pratico per il salvataggio della Torre.

Questo piano potrà essere oggetto di una indagine da eseguirsi da un Organismo culturale che credo possa essere la stessa *Associazione Geotecnica.*

Si potrebbe forse arrivare ad un piano di azione attraverso una proposta fatta dall'*Associazione Geotecnica* con particolari proposte di studio e di ricerca.

Dott. Ing. Paolo BERTAGNOLIO, Presidente di Sezione del *Consiglio Superiore dei LL.PP.*:

Prof. CESTELLI, quelle proposte molto semplici, quasi banali per tentare di consolidare la Torre non potrebbero però portare a compromettere la monolicità della Torre stessa? Perchè, se non erro, mi sembra di aver sentito che non molto tempo fa siano state fatte delle iniezioni nella parte basamentale delle fondazioni della Torre perchè questa si stava spaccando. Allora vorrei sentire appunto, se sotto questo riguardo, eventualmente, si potrebbe stare tranquilli, insomma se si esclude il pericolo di rottura della muratura della torre durante i lavori.

Dott. Ing. Mario Fernando GUIDUCCI:

Io volevo soltanto rispondere al Presidente BERTAGNOLIO su quella questione dei rafforzamenti e delle iniezioni. Forse il Presidente si riferisce ai lavori fatti nel 1943, credo, a seguito di un colpo ricevuto dal campanile di Pisa dalla nostra contraerea nel 1942, oppure ai lavori che furono eseguiti nel 1950 dalla *Società Rodio* che consolidò con delle iniezioni, praticamente, la muratura che esiste fra le due fodere di pietra che costituiscono il tamburo, però — non mi risulta credo — che la muratura del campanile fosse lesionata.

Un'ultima risposta che volevo dare all'amico Ing. TERRACINA era che la mia proposta non era tanto rivolta all'uso di un rilevato di sovraccarico, quanto all'impiego appunto di drenaggi che da soli forse già potrebbero innestare moltissimo; comunque c'è qui presente l'Ing. NOCCIOLI che per molti anni è stato a Pisa e che forse più di me potrà rispondere a questo interrogativo.

Dott. Ing. Ranieri NOCCIOLI, Ispettore Generale del *Genio Civile*:

I lavori che furono eseguiti intorno al campanile di Pisa dal '33 al '34 tendevano, in ordine a disposizioni ricevute dal Consiglio Superiore ad eliminare la fuoriuscita d'acqua. Dopo i lavori del GHERARDESCA per mettere allo scoperto la base del campanile e la creazione del giardino eseguita nel 1838, si formò — come tutti ricordano certamente — una polla che usciva proprio alla base del campanile, lato sotto pendenza, il che obbligava a continue pompature per mantenere asciutto il catino. I lavori che furono intrapresi tendevano esclusivamente ad impermeabilizzare le murature di fondazione che — per lo meno da quello che si è potuto rilevare da numerose perforazioni fatte (se ne fecero mi sembra 4 serie all'esterno, 4 serie dall'interno variamente inclinate in numero di 681 fori) — per quanto eseguite a sacco, non risultarono a sacco. La malta che li univa era una malta che aveva fatto un'ottima presa (come era la malta di S. Giuliano che veniva adoperata allora) malta con proprietà idrauliche, preparata con la cottura a legna e certamente superiore a quella che le stesse cave producono oggi. Una volta poi impermeabilizzate le fondazioni, fu reso stagno il catino e quindi eliminata la fuoriuscita d'acqua e ripristinato il livello della falda freatica che prima, praticamente, era depressa. Immediatamente eseguita l'impermeabilizzazione del catino si notò subito un aumento dello strapiombo. L'impermeabilizzazione fu effettuata nel giugno del 1935 e dopo pochi giorni si verificò un aumento superiore a quello che si verificava nell'addietro, un aumento di strapiombo che nel giro di 3-4 mesi raggiunse quasi i 5 mm. Dopo di che il campanile ritornò ad inclinarsi in misura pressocchè costante intorno a 1 mm. Ora, contrariamente a quanto può risultare dalla pubblicazione del SAMPAOLESI, in effetti le misure sicure possono prendersi soltanto dal 1911; il campanile ebbe dei movimenti piuttosto sensibili negli anni 1838 e 1858, dell'ordine almeno dei 5 mm l'anno; dal 1958 al 1911, invece, pur essendo un po' difficile confrontare questi dati non conoscendo i punti di riferimento degli strapiombi misurati dal CRESY, gli ordini di grandezza furono intorno a 1,2 mm. Dal 1911 ad oggi l'aumento si è mantenuto su questi valori di 1,2 mm o di 1 mm; in particolare dal 1934 ho seguito i movimenti del campanile attraverso gli strumenti che abbiamo installato durante quei lavori di impermeabilizzazione delle fondazioni, ed ho osservato un aumento di strapiombo di circa 31-32 mm in 30 anni, che si corrispondono attraverso diversi metodi, sia quelli con misure geodetiche sia attraverso un inclinometro a piombo sia con una livella

a altissima precisione. Ritengo quindi che non vi sia un fenomeno asintotico in questo momento, per lo meno dal 1911 al 1963, ma si abbia un movimento praticamente costante dell'ordine di circa 1 ÷ 1, 2 mm. Spostamenti tanto ridotti naturalmente possono essere osservati solamente nel tempo, perchè il campanile è soggetto a dilatazioni termiche piuttosto sensibili. Basta che un'osservazione venga eseguita durante il periodo in cui vi è stata una serie di giorni di sole, oppure una serie di giorni di cielo coperto, per avere delle differenze dell'ordine di qualche millimetro.

Ad esempio, durante il giorno il campanile descrive proprio un'ellisse; seguendo il movimento del sole. Nell'inverno i movimenti sono maggiori nel senso nord-sud, nell'estate invece sono maggiori nel senso est-ovest, perchè ovviamente le parti esposte sono quelle a est o quelle ad ovest. Questo era quello che volevo precisare.

Prof. ing. Carlo Cestelli Guidi (conclusione): l'amico Guiducci con la sua esposizione ha portato un valido contributo alla questione della stabilità della Torre di Pisa e particolarmente interessante appare la Sua acuta osservazione sulla inclinazione iniziale della Torre che avrebbe potuto essere di senso opposto alla attuale. La sua proposta di un parziale raddrizzamento della Torre con drenaggi e ricarichi è degna di considerazione.

Mi rallegra il sentire gli interlocutori d'accordo sulla necessità di indagare sulle caratteristiche meccaniche del sottosuolo con tutti i mezzi più moderni della geotecnica ed anche di sentirli concordi nel ritenere che possa trovarsi una soluzione « geotecnica » per il consolidamento del sottosuolo della Torre.

Non esprimo alcun parere sulla proposta dell'ing. Terracina, certamente interessante, come volutamente non ho fatto per le altre. Mi limiterò solo a rilevare che viene presentata da un tecnico che non è solo un teorico, bensì anche un pratico che per molti anni è stato dirigente del settore geotecnico di una delle più importanti Imprese di Costruzione italiane. Comunque la Sua proposta, come altre, richiederebbe per l'attuazione un attento studio sperimentale.

All'Ing. Barbi rispondo che fin dall'inizio ho avvertito che non avrei proposto alcuna soluzione e del resto il titolo stesso della conversazione « Prolegomeni al problema della stabilità della torre di Pisa » lo dice chiaramente.

Chiarisco che non ho ricercato la soluzione del problema e che scopo di questa mia conversazione è di richiamare l'attenzione sul fatto che troppo spesso viene trascurato che trattasi di un problema essenzialmente geotecnico. Del resto sarei veramente presuntuoso ad indicare una soluzione, poichè proprio io ho detto che solo studi seri e dettagliati possono essere presi in considerazione essendo difficile giudicare dalle sole idee.

Voglio anche aggiungere che dalla mia esposizione si può intuire quale è la mia opinione al riguardo.

All'ing. Bertagnolio ha esaurientemente risposto l'ing. Noccioli che ringrazio sentitamente di essere intervenuto in quanto Egli più di tutti noi conosce il problema della torre di Pisa ed è ben nota la Sua competenza cosicchè le notizie che ci ha dato sono veramente interessanti.

Il Presidente Rinaldi con il Suo intervento ha sottolineato l'opportunità di studiare ogni procedimento nell'ambito della geotecnica e certo che la Sua proposta all'*Associazione Geotecnica* di promuovere studi e dibattiti è da prendersi in seria considerazione.

Mi auguro quindi che questa riunione alla quale ha partecipato con tanto interesse un numero così rilevante di tecnici altamente qualificati abbia presto un seguito.

Itroduction to the stability problem of the tower of Pisa

Summary: The paper reports a lecture delivered by the Author, together with the following discussions.

Itroduction au problème de la stabilité de la tour de Pisa

Sommaire: On rapporte le texte d'une conférence sur le problème et les discussions suivantes.