



PONTIFICIA
ACADEMIA
SCIENTIARVM

COMMENTARII

VOL. I

N. 36

GUSTAVO COLONNETTI

SU LA POSSIBILITÀ DI SOTTOFONDAZIONE
DEL CAMPANILE DI PISA

EX AEDIBVS ACADEMICIS IN CIVITATE VATICANA

SU LA POSSIBILITA' DI SOTTOFONDAZIONE DEL CAMPANILE DI PISA

GUSTAVO COLONNETTI
Accademico Pontificio

SVMMARIVM — Cum plures architecti iam proposuerint substructiones celeberrimae Pisanae turri faciendas, neque propositae rationes servari possint sine ruinae periculo, Auctor proponit, ut ad eas substructiones tuto constituendas, turris ipsa prius aliquantum extollatur.

Il Campanile della Primaziale di Pisa, noto in tutto il mondo per la squisita eleganza della sua architettura, ma anche, e forse più, per l'arditezza del suo strapiombo, ha ancora una volta richiamata l'attenzione di quanti si preoccupano della sua stabilità, accusando, negli ultimi due anni un sensibile aggravamento del lento ma continuo accrescersi della sua pendenza.

Perchè ciò avvenga è ben noto: i valenti architetti che tra il 1174 ed il 1283 progettaron e costruirono il Campanile, non si curarono di dargli un'adeguata fondazione; si limitarono a poggiare l'enorme massa — che pesa ben 15.000 tonnellate — su di un terreno sicuramente incapace di sopportarla. La costruzione non era ancora giunta a metà della sua altezza che già il terreno incominciava a cedere sotto il suo peso. Donde

Nota presentata il 12 ottobre 1963 durante la Sessione Plenaria della Pontificia Accademia delle Scienze.

una breve sospensione dei lavori; poi questi vennero ripresi e la torre elevata fino a 56 metri di altezza. Da settecento anni la sua pendenza va lentamente ma continuamente crescendo; lo strapiombo ha ormai raggiunto i m. 4,50.

Da cinquant'anni i movimenti del Campanile sono seguiti e misurati con grande precisione. Paolo Pizzetti che era, prima della guerra mondiale, professore di geodesia all'Università di Pisa, organizzò una triangolazione geodetica che serve tuttora alla determinazione degli spostamenti di un certo determinato punto della settima cornice per rapporto a dati capisaldi. Noi sappiamo così che, durante questi cinquant'anni, lo spostamento medio non ha superato gli otto decimi di millimetro all'anno; con varianti però non trascurabili da un anno all'altro: vi fu per esempio un anno, il 1935, in cui, essendo stati eseguiti certi lavori intesi ad impermeabilizzare la platea e le pareti del catino che circonda il basamento della torre, si verificò uno spostamento di oltre 5 mm. che dimostrò fino a quale punto fosse sensibile la torre ad ogni sia pur cauto intervento nelle sue fondazioni o sul terreno che le sopporta.

Il ritmo degli spostamenti ridivenne normale fin dall'anno seguente e tale si mantenne fino a questi ultimi tempi. Nel 1962 lo spostamento raggiunse però i 2 mm. ed otto decimi, e nell'anno in corso si sono già riscontrati quasi 2 mm.

Donde l'allarme.

* * *

Vien fatto di chiedersi: il pericolo è reale ed imminente?

La risposta non può essere dubbia: allo stato delle cose la risultante dei carichi è ancora interna al nocciolo centrale della base d'appoggio — e conseguentemente l'asse neutro è esterno ed ancora lontano (forse una decina di metri) dal contorno di detta base —. Se pertanto i cedimenti continuassero a verificarsi col ritmo che ha caratterizzato quest'ultimo cinquantennio, o anche quello accusato negli ultimi due anni, il

Campanile di Pisa avrebbe ancora davanti a sè molti anni di vita. Ma è un'ipotesi su cui non si può fare nessun serio assegnamento: man mano che ci si andrà avvicinando alla fase critica, e ben prima di averla effettivamente raggiunta, è possibile che si verifichino fatti nuovi, che cioè l'equilibrio del terreno si rompa e la situazione precipiti verso la catastrofe.

Bisogna dunque provvedere, e provvedere senza indugio, tanto più che, man mano che la pendenza cresce ed il terreno viene sovraccaricato sotto pendenza, le operazioni da compiersi diventano necessariamente più delicate e più pericolose.

* * *

Ed ecco allora la seconda domanda: che cosa si può fare?

A questa domanda hanno cercato di rispondere le numerose commissioni di valorosissimi tecnici che l'Opera della Primiziale ed il Ministero dei Lavori Pubblici hanno incaricato dello studio dell'arduo problema.

Alla stessa domanda hanno anche cercato di rispondere numerosi progettisti italiani e stranieri che al Ministero competente hanno, specie in questi ultimi anni, fatto pervenire le loro proposte intese tutte a dotare la torre di quella fondazione efficiente che disgraziatamente non le hanno dato i suoi costruttori.

Ma tanto i progettisti quanto le autorità che di quei progetti sono state investite, si sono resi conto del pericolo che incombe su qualsiasi lavoro di sottofondazione della torre; perchè è fuor di dubbio che basterebbe dare inizio ad un lavoro del genere per determinare un turbamento dell'attuale precario stato di equilibrio del terreno, con conseguenze che è assolutamente impossibile prevedere, e che nessuno può seriamente illudersi di contrastare mediante incastellature o puntellature che la torre non mancherebbe di travolgere nella sua caduta se le dovesse venire a mancare l'attuale sostentamento alla base.

Personalmente non vedo che una soluzione possibile, che, in collaborazione coll'ing. RICCARDO MORANDI, ho in questi giorni messa a punto e sottoposta all'esame ed al giudizio delle Autorità responsabili: sollevare la torre, sollevarla di quel poco (o di quel tanto) che sarà necessario perchè essa non gravi più col suo peso sul sottostante terreno; costruire in esso senza più alcuna preoccupazione statica la fondazione voluta, e riposare poi la torre (con movimento inverso a quello impiegato per sollevarla) sulla fondazione, che la potrà sopportare indefinitamente e con assoluta sicurezza.

* * *

Ecco ora in breve come potrebbe venire concepita e condotta l'arditissima impresa.

Il tamburo inferiore della torre dovrà per l'occasione venir circondato da una robusta fasciatura in cemento armato pre-compresso, avente il compito di stringerlo quanto occorre per renderlo ad essa perfettamente solidale (fig. 2).

La fasciatura riposerà su di un anello di acciaio che circonda la base della torre, e che è alla sua volta portato da quindici sistemi di cavi facenti capo a quindici coppie di martinetti simmetricamente ed uniformemente distanziate sul terreno circostante, e poggianti su solide fondazioni del tutto indipendenti dalla fondazione della torre.

Un adeguato dispositivo di ancoraggi farà sì che le azioni verticali esercitate dai martinetti si trasmetteranno integralmente all'anello portante, e quindi alla torre, ed imprimeranno loro un lentissimo moto di traslazione verticale.

Man mano che questo si verificherà il peso della torre verrà a trasferirsi sui martinetti; e quando la somma delle azioni da essi sviluppate eguaglierà il peso della torre noi saremo sicuri che questo non graverà più sul sottostante terreno.

Allora, e allora soltanto, si potrà procedere ai lavori di

sottofondazione, qualunque essi siano per essere, e ciò senza più alcun pericolo per la incolumità dello storico monumento.

A lavori ultimati, i martinetti, eseguendo a ritroso la loro manovra, deporranno la torre sulla nuova fondazione atta a sostenerne indefinitivamente il peso, e le famose campane, che da tanti anni prudenza vuole che tacciano, potranno di nuovo diffondere la loro voce nel cielo di Pisa.

* * *

Perchè una tale duplice delicatissima operazione possa compiersi in condizioni di assoluta sicurezza, due condizioni debbono realizzarsi: l'una riguardante la sincronizzazione nella manovra dei martinetti, l'altra relativa al controllo dei movimenti da essi determinati.

Entrambe sono rese possibili dagli studi eseguiti in questi ultimi due anni in vista del progettato salvataggio dei templi di Abu-Simbel minacciati dalle acque del Nilo che si sollevano mano a mano che si eleva la diga di Assuan.

Rispondendo all'appello lanciato dall'Unesco al mondo intero, noi italiani avevamo redatto un ardito progetto di sollevamento di un'intera montagna, a mezzo di un nuovissimo tipo di martinetti idraulici a regolazione meccanica della corsa, studiati e messi a punto dalla « Grandi Motori » della FIAT.

Che il nostro progetto ⁽¹⁾ — che era stato unanimemente giudicato « primo » da una Commissione internazionale di esperti — sia poi stato abbandonato dall'Unesco che, non essendo riuscita a trovare il necessario finanziamento, sembra disposta a ricorrere a pietose soluzioni di ripiego, ha una importanza assai relativa.

Quel che veramente conta si è che un importante progresso

(¹) G. COLONNETTI: *Il progetto italiano per il salvataggio dei templi di Abu Simbel*. Accad. Naz. dei Lincei, anno CCCLVIII (1961), quad. n. 49.

G. COLONNETTI: *Les temples d'Abu Simbel en danger*. Pontificia Aca-
demia Scientiarum. « Commentarii », vol. I, n. 7 (4 oct. 1962).

è stato intanto realizzato nella tecnica dei martinetti idraulici, e che questo progresso può venire utilizzato per rendere possibile, attraverso la manovra che ho sopra descritta, la salvezza di un monumento come la Torre di Pisa che, a noi italiani, e non a noi soltanto, interessa quanto, e forse più delle colossali statue di Ramsete II e della regina Nefertari.

Due parole dovrebbero bastare a chiarire il concetto informatore in base al quale, in questo nuovissimo tipo di martinetti, si possono realizzare spostamenti ben definiti, qualunque sia la resistenza che essi incontrano.

A tal fine, nella parete di un cilindro — nell'interno del quale un pistone può muoversi sotto l'azione di un fluido in pressione — è disposta una apparecchiatura destinata a proporzionare automaticamente la pressione del fluido motore all'entità del carico applicato al pistone, onde rendere possibile che gli spostamenti di questo vengano determinati indipendentemente dalla entità e dalle eventuali variazioni del carico stesso.

Tale apparecchiatura è documentata nella figura 3 e nella annessa descrizione delle modalità del suo funzionamento.

In alcuni miei precedenti scritti ⁽²⁾ si trova la giustificazione di questo modo di procedere, nonché la documentazione di alcune prove eseguite nell'Istituto Dinamometrico Italiano.

Queste prove hanno fornito una espressiva misura della prontezza e della precisione con cui questo tipo di martinetto realizza gli spostamenti del carico che gli vengono richiesti

(2) G. COLONNETTI: *Un nouvel appareillage pour la création d'états de coaction*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, t. 255, 27 août 1962.

G. COLONNETTI: *Ricerche sperimentali su di un modello di martinetto idraulico con controllo meccanico della corsa*. Atti dell'Accademia delle Scienze di Torino, vol. 96, 14 novembre 1962.

G. COLONNETTI: *Le problème de la synchronisation des vérins dans le relevage de masses imposantes*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, t. 256, 14 janvier 1963.

colla semplice manovra della madre vite, e ciò qualunque sia il carico che il martinetto sopporta e comunque questo carico varii, senza che da parte dell'operatore si avverta una sensibile variazione della potenza (in ogni caso piccolissima) occorrente per la manovra della madre vite.

Condizione questa essenziale che rende possibile la perfetta sincronizzazione di un numero qualunque di martinetti.

* * *

Quanto alle apparecchiature di controllo, esse sono state studiate e messe a punto nei Laboratori dell'Istituto Dinamometrico Italiano del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Esse presuppongono un orizzonte artificiale costituito dalla superficie libera di un liquido pesante (fig. 4) sulla quale verranno sistemati quindici galleggianti, ciascuno dei quali comanda un trasduttore differenziale ad induttanza variabile, capace di segnalare le variazioni di posizione del punto del solito anello portante della torre a cui il trasduttore è collegato, con una precisione che è dell'ordine dei centesimi di millimetro.

Va da sè che il segnale d'uscita di ciascun trasduttore oltre che per la doverosa segnalazione al quadro di comando, potrebbe venire utilizzato per il comando diretto del corrispondente martinetto. La manovra potrebbe in questo modo divenire completamente automatica.

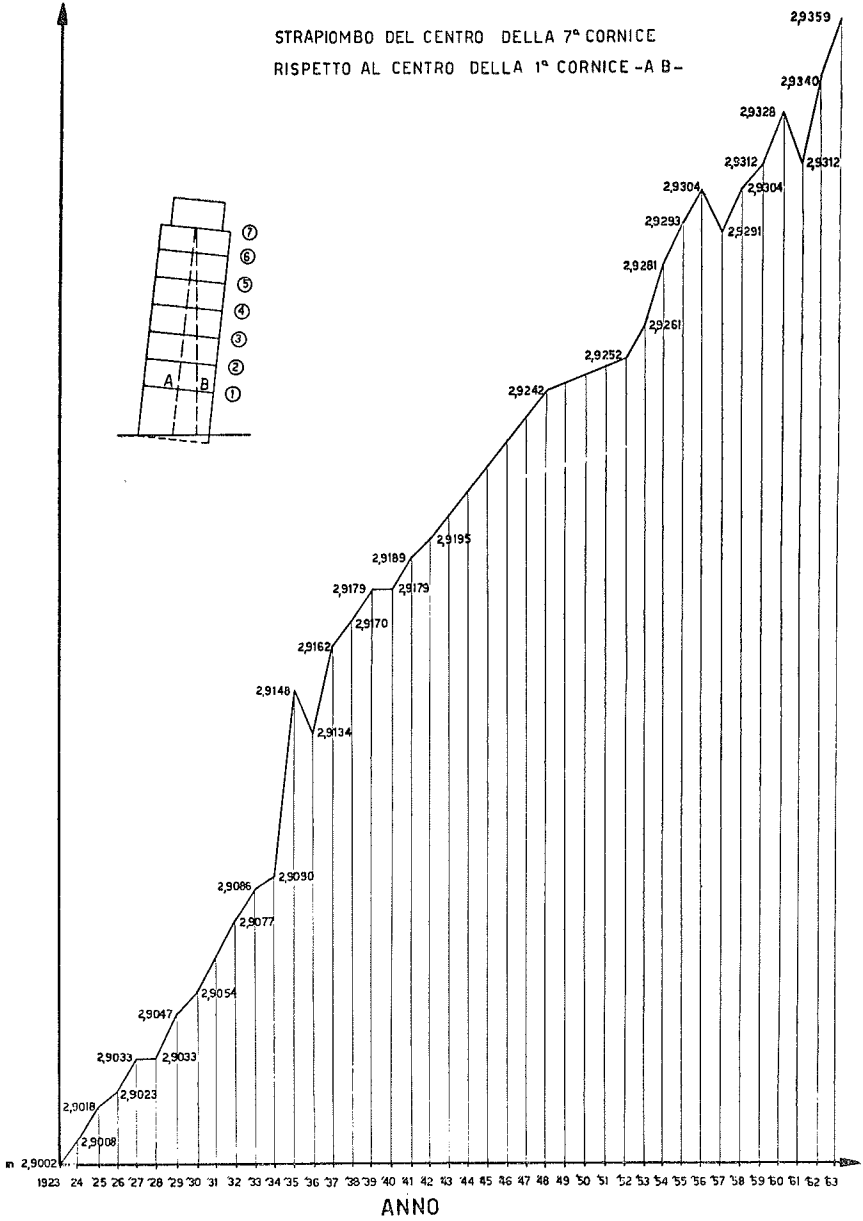


fig. 1

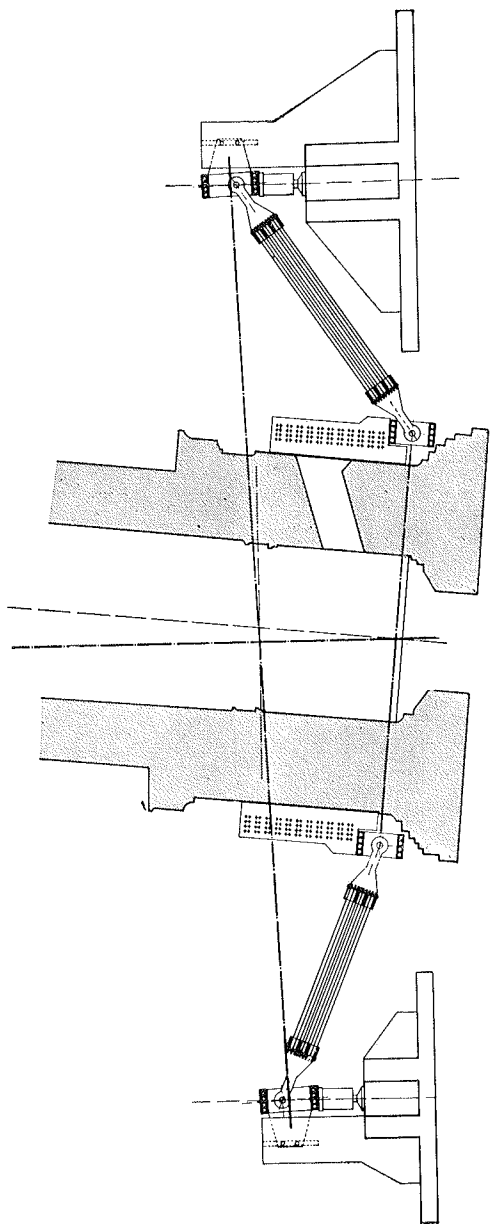


fig. 2

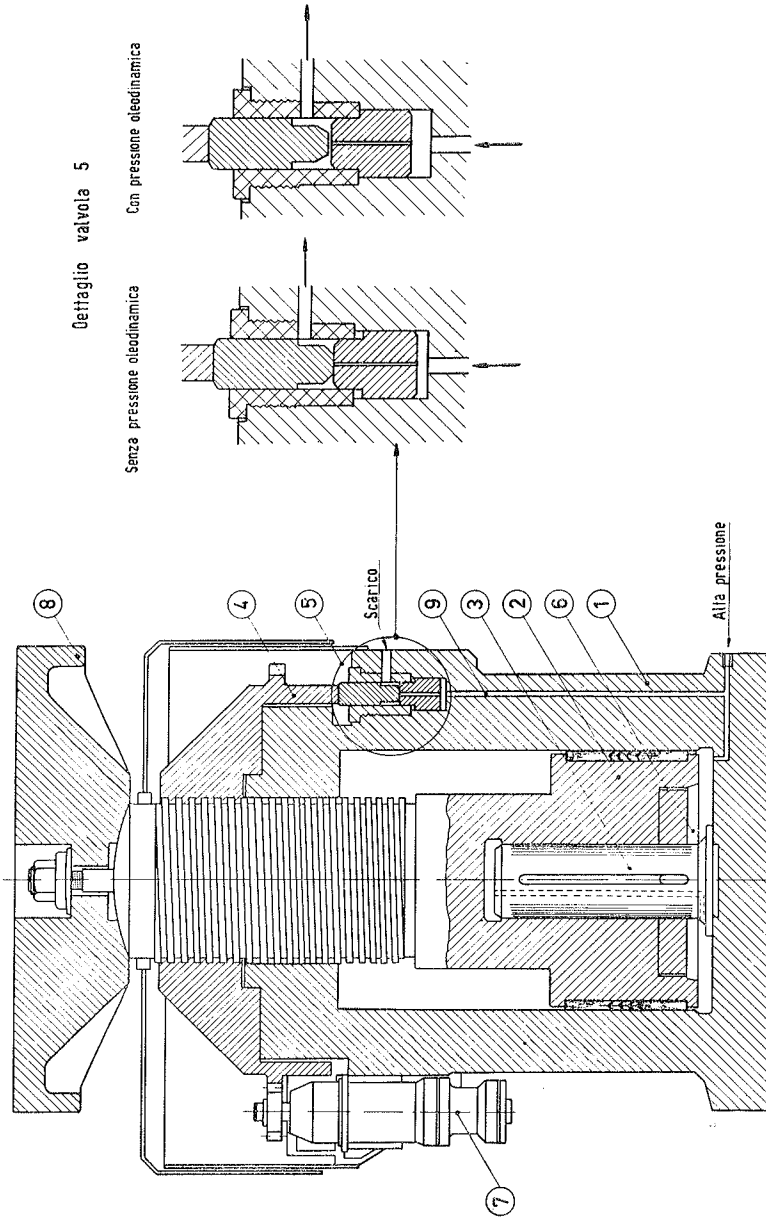


FIG. 3 — *Martinetto idraulico con controllo meccanico della corsa (Brevetto FIAT).*

1. Cilindro.
2. Pistone con filettato.
3. Perno di centraggio del pistone.
4. Ruota a madre vite per il controllo degli spostamenti.
5. Valvola per l'autocontrollo della pressione.
6. Camera dell'olio in pressione.
7. Motore idraulico per il comando della ruota a madre vite 4.
8. Piastra di supporto del carico.
9. Condotto dell'olio alla valvola 5.

FUNZIONAMENTO DEL MARTINETTO

In posizione di riposo o di sostentamento statico, essendo nulla la pressione dell'olio, il condotto 9 risulta chiuso dalla valvola 5 su cui preme la madre vite 4 sotto l'azione del carico eventualmente applicato alla piastra 8 ed al pistone 2.

Tale carico viene pertanto trasmesso per via esclusivamente meccanica dal filetto della vite alla madre vite e da questa direttamente al cilindro.

All'inizio del funzionamento il condotto 9 resta chiuso fino a che nella camera 6 del cilindro la pressione non abbia raggiunto un valore leggermente superiore a quello che corrisponde al carico da sollevare.

In fase di sollevamento del carico, insieme col pistone 2 si solleva anche la madre vite 4 avvitata sul suo stelo, ed attraverso la valvola 5 si viene ad aprire una via di scarico all'olio, la cui pressione nella camera 6 cessa di crescere e si stabilizza nella misura richiesta dal carico.

Si determina così una specie di galleggiamento del pistone, grazie al quale la trasmissione del carico avviene attraverso l'olio in pressione, e la madre vite, completamente scaricata, può venire liberamente manovrata a mezzo del motorino idraulico 7.

Ora ogni rotazione della madre vite, in un senso o nell'altro, determina uno strozzamento o un ampliamento della luce di scarico controllata dalla valvola 5, e dunque un incremento od una diminuzione della pressione dell'olio nella camera 6, con conseguente immediato incremento o diminuzione della spinta che l'olio esercita sul pistone.

Ne segue che ad ogni movimento di rotazione impresso alla madre vite dovrà corrispondere un movimento di traslazione del pistone (e quindi del carico che esso sopporta) movimento che avrà termine non appena, riportata alla primitiva misura la luce di scarico nella valvola 5, si sarà ristabilito l'equilibrio tra il carico e la pressione dell'olio.

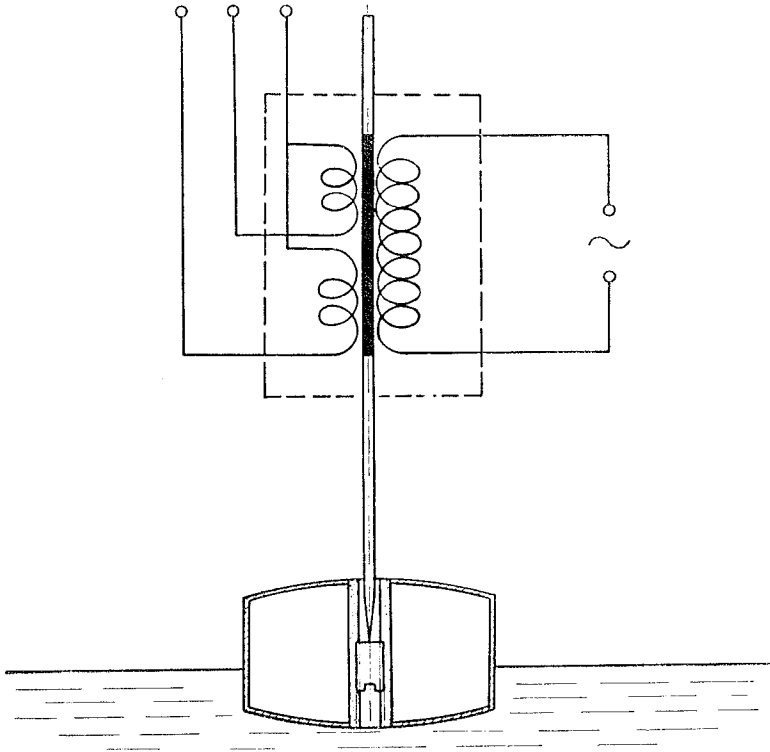


fig. 4