

La Tour de Pise

1. Préface

Le clocher du Dôme de Pise, mieux connu sous le nom de Tour de Pise, et dont les caractéristiques historiques, artistiques et du milieu ambiant n'ont pas besoin d'être mises en relief ici, a été et continue à être au centre des études et des débats concernant le problème de sa conservation et de sa stabilité.

On a écrit beaucoup de paroles, de chiffres et d'analyses à ce sujet; on a formulé des hypothèses, quelque fois contradictoires; on a analysé les techniques de construction et les matériaux, les caractéristiques géométriques et statiques pour chercher à donner une solution aux questions qui se posaient pour la recherche des causes de la condition actuelle du monument.

En plus on a formulé des prévisions pour la sécurité future de la structure tout en considérant les augmentations de pente qui pourraient se vérifier dans les années prochaines.

Tout ce zèle représente une justification valable pour considérer la Tour comme un cas emblématique pour l'application d'une méthodologie d'étude dont le but est de proposer une intervention de consolidation.

Evidemment soit la qualité de la méthode soit les moyens employés sont strictement mis en corrélation avec l'importance et le caractère d'unicité du monument.

Cependant un danger ultérieur est repérable précisément dans l'application des moyens et des techniques que l'on peut employer dans l'œuvre de consolidation; danger peut-être encore plus grave pour la Tour: celui de mettre au premier plan le problème technique de la conservation, en se réjouissant aussi des résultats éventuellement obtenus avec l'application de moyens sophistiqués, oubliant les valeurs et les exigences liées à son être, surtout, un monument historique et architectural.

Il faudra donc savoir conjuguer et intégrer la connaissance scientifique du problème et l'application de la technique en respectant les valeurs du monument même, de sorte qu'il puisse continuer à transmettre à la postérité son propre témoignage historique sans devoir renoncer à être un chef-d'œuvre.

2. Caractéristiques générales de la structure

La Tour est située à Pise, dans le Campo dei Miracoli (ill. 1) et peut être considérée, du point de vue structural, constituée d'un seul corps cylindrique en maçonnerie, fortement incliné vers la midi par rapport à la verticale, et doué à l'extérieur d'éléments architectoniques décoratifs. Il y a, en effet, huit files d'arcades alliées au corps cylindrique au moyen des coursives, auxquelles il est possible d'accéder par un escalier qui se trouve à l'intérieur de la structure de maçonnerie de la Tour.

À l'intérieur, au contraire, la Tour se présente creuse et lisse. En haut, au niveau de la cage du clocher, il y a une voûte rabaissée avec une lucarne centrale hexagonale.

La hauteur géométrique de la Tour, qui est définie comme la distance qui passe entre le centre C' (ill. 2) de la terrasse annulaire au sommet de la cage du clocher et le centre C de l'anneau de pose des fondations, est de m 58.36.

La Tour pousse obligatoirement au-dessous du plan de la campagne jusqu'à une profondeur moyenne de mt 4.30; raison pour laquelle la hauteur mesurée du même centre c' avec l'intersection du plan de la campagne est de mt 54.06. En ce cas on se réfère à la mesure moyenne à cause des dimensions diamétrales de la Tour: celle-ci, en effet, est au-dessous du plan de la campagne de mt 3.30 du côté de la sur-pente et de mt 5.30 du côté de la sous-pente.

La maçonnerie qui constitue la Tour n'est pas en matériel homogène mais est constituée de deux parements de maçonnerie en pierre de taille de San Giuliano interposés avec une structure de détritifs de pierres et mortier de chaux.

Il a fallu à peu près soixante-dix ans pour construire le monument et les travaux furent interrompus et repris plusieurs fois, selon le schéma indiqué (ill. 4), même si selon les études effectuées on a constaté que pendant cette période il n'y eut pas de préoccupations à cause des éventuels affaissements des terrains. On attribuait les mouvements de la structure aux faits habituels qui étaient déjà prévus et acceptés grâce à la connaissance du sous-sol pisan.

Cette affirmation, rendue après les études effectuées sur la Tour par la commission nommée par le Ministère des travaux publics pendant les années 1965 jusqu'à 1971, n'est plus acceptable en considérant

que l'histoire de la construction du monument et les techniques employées sont une preuve des soucis que la condition de la structure a toujours soulevés.

La constante conscience du mouvement justifie les longues périodes d'interruption et reprise des travaux pendant la construction de la Tour.

Les divers mouvements subis par le monument pendant la construction sont témoignés soit par la présence de soi-disant cales, c'est-à-dire dans la pose en œuvre de claveaux (moellons) de pierre opportunément façonnés qui devaient corriger l'inclinaison du plan de construction, soit par la technique de construction de l'édifice à logettes pour permettre les opportunes corrections de volume.

Le graphique (ill. 4) montre les phases de construction en indiquant soit les périodes de suspension et reprise des travaux, soit les mouvements subis pendant la construction même.

En outre le fait que l'inclinaison se soit manifestée quand le monument n'était pas encore terminé a causé des sollicitations additionnelles du type non axialsymétrique dans la structure.

Par conséquent, la connaissance des matériaux employés, les techniques constructives et l'histoire de la construction même sont des paramètres fondamentaux pour l'actuel état de tension des structures, mais il est difficile de s'en rendre compte; il faut donc faire des hypothèses simplificatrices pour la connaissance de cette situation.

Du graphique, qui peut représenter en synthèses l'histoire statique de la Tour pendant les différentes phases de construction, émerge un fait saillant: la Tour, pendant la première phase de construction, c'est-à-dire jusqu'à la réalisation de la quatrième file de colonnes, a commencé à s'incliner du côté opposé par rapport à la situation actuelle.

3. Les mouvements de la Tour

Que la Tour de Pise soit inclinée, est bien connu, mais il faut s'arrêter un instant sur cette caractéristique particulière, en excluant les hypothèses fantaisistes d'intentionnalité de l'inclinaison, c'est-à-dire que la Tour fut construite inclinée. La Tour a rejoint la configuration actuelle à cause d'une succession de mouvements, mouvements qui ont été contrôlés à partir de 1911, après la nomination d'une Commission par le Ministère de l'instruction publique en 1908 pour l'étude des conditions statiques de la Tour de Pise.

En cette occasion on a utilisé pour la première fois les procédés géodésiques pour établir avec grande précision la position planimétrique de la Tour par rapport aux repères constitués exprès dans la place du Dôme, fournissant ainsi des éléments de référence pour relever dans le temps les éventuelles modifications de l'inclinaison de la Tour.

Depuis décembre 1965 l'Institut géographique militaire (I.G.M.) exécute périodiquement des mesures optiques-géodésiques. En plus on a disposé dans la Tour une installation d'instrumentation fixe, constituée par des niveaux à lecture directe, niveaux à registration continue, anémographe enregistreur, plurithermographe et plusieurs thermomètres télétransmetteurs enregistreurs.

Les informations fournies par ces instruments peuvent être liées aux mouvements de la Tour. On peut dire se trouver en face d'un des premiers cas de monitoring continu d'un monument.

En plus on a effectué des mesures de haute précision altimétrique et planimétrique qui relie la Tour aux repères extérieurs et éloignés.

Grâce à ces mesures et contrôles on a obtenu le graphique qui représente les augmentations d'inclinaison de la Tour à partir de 1911 jusqu'en 1978. On relève, de ce graphique, que pendant ces 67 années, la Tour a subi une augmentation d'inclinaison de 390" en passant d'une inclinaison de 5° 14' 46" en 1911 à l'inclinaison de 5° 21' 11" en 1978, avec une vitesse d'environ 6 secondes par an.

Si la vitesse d'inclinaison était hypothétiquement constante, le diagramme représentatif serait linéaire, comme à peu près il en résulte.

On évince, en outre, que pendant l'intervalle de temps entre 1932 et 1936 le diagramme présente une accélération positive, comme celle de 1973.

Pour ce qui concerne les années suivantes on peut parler d'une vitesse presque constante.

4. Caractéristiques des terrains de fondation

L'étude de la zone environnante a été particulièrement scrupuleuse aux fins de pouvoir se servir constamment d'un mécanisme de relevés des mouvements de la Tour. D'une manière analogue on a cherché à connaître à fond les caractéristiques des terrains de fondation. Comme information générale on relève que toute la zone actuellement occupée par les dépôts de l'Arno est en phase d'affaissement (subsidence).

Du niveau du sol (à presque 3 m au-dessus du niveau de la mer) jusqu'à une profondeur de presque 3 m se trouve un terrain limoneux-argileux hétérogène.

Ce terrain contient une nappe phréatique au cours irrégulier à cause de l'hétérogénéité du terrain même et des restes des anciens produits manufacturés qui déterminent des variations de perméabilité sur distances brèves.

Les terrains qui constituent le sous-sol de la Tour sont en effet caractérisés par une considérable variabilité des propriétés et des caractéristiques physiques-mécaniques.

Grâce aux résultats des expériences de laboratoire et aux enquêtes sur place, on a localisé trois stratifications principales: la première, définie complexe A, est constituée de terrains pour la plupart limoneux-sableux et s'étend du plan de la campagne sur à peu près 10 m; la deuxième, complexe B, est constituée de terrains pour la plupart argileux et arrive à une profondeur de presque 3 m; la troisième, complexe C, est constituée de sables éoliens avec intercalations limoneuses et argileuses.

L'illustration n. 6 montre les valeurs des pressions de contact entre les fondations et le terrain et les isobares des tensions verticales sur plans parallèles aux plans de fondation.

On peut noter l'augmentation des valeurs des tensions du côté de la sous-pente (inclinaison).

Schématissant le comportement du terrain avec l'hypothèse de Winkler on obtient, grâce aux pressions de contact sur la trace du plan à l'inclinaison maximum, les valeurs maximum et minimum de 91.8 t/mq et de 3.80 t/mq.

5. Etat de tension de la Tour

Avant de commencer l'analyse des œuvres de protection et de consolidation proposées pour la Tour, il faut se rappeler que la détermination et l'étude de l'état de tension des structures qui la composent sont particulièrement importantes pour la Tour même.

Après les récentes études effectuées à l'Université de Pise, on a obtenu des résultats intéressants et des indications très utiles aussi pour ce qui concerne les éventuelles futures variations de l'état de tension des structures, dues aux augmentations de l'inclinaison de la Tour.

Pour l'analyse du complexe structural constitué par le corps cylindrique, par les coursives et par la colonnade, on a adopté un schéma dont l'hypothèse était que la coursive avait la seule fonction de reliage.

Pour ce qui concerne la vérification de la section du tambour on a dû résoudre le problème de l'homogénéité des matériaux, puisque le parement de maçonnerie est, comme on a déjà vu, constitué de deux parements, l'un extérieur et l'autre intérieur, en pierre de San Giuliano, et est doué d'une partie intérieure de maçonnerie à sac. On a donc adopté un coefficient d'homogénéité $n = E_p/E_m$ égal à quatre, et un module d'élasticité E_m pour la maçonnerie égal à 200.000 kg/cmq, obtenu des analogies avec les similaires structures en maçonnerie.

En ce qui concerne les hypothèses sur les matériaux il faut encore considérer que, pour l'état actuel de tension de la Tour, les phénomènes visqueux qui se sont vérifiés dans la période de l'existence de la structure sont particulièrement importants tenant compte que la maçonnerie à sac a un comportement typiquement visqueux.

Les informations initiales peuvent être résumées de la façon suivante, relativement aux caractéristiques des matériaux:

Resistenza cubica a compressione del paramento esterno murario	1572 kg/cmq
Resistenza a trazione (determinata con prova brasiliana)	42.35 Kg/cmq
Modulo di elasticità normale (E_p)	780.000 kg/cmq
Resistenza cubica a compressione della muratura a sacco interna	87.52 Kg/cmq
Resistenza a trazione	7.52 Kg/cmq
Modulo di elasticità normale (E_m)	200.000 kg/cmq
Rapporto $E_p/E_m = n$	4
Resistenza a compressione del marmo costituente le colonne	1527 kg/cmq
Modulo elastico	785.720 kg/cmq

Les résultats finals obtenus peuvent être ainsi schématisés:

Tensione massima attuale nel paramento:	34,6 kg/cmq
Relativo grado di sicurezza a rottura	$\frac{1527}{34,6} = - 44$
Tensione massima attuale nella muratura	8,4 kg/cmq
Relativo grado di sicurezza a rottura:	$\frac{87,58}{8,4} = - 10$
Tensione media attuale nella colonna più caricata	39,1 kg/cmq
Tensione media attuale nella colonna meno caricata 2° ordine:	*33,3 kg/cmq
Incremento di pendenza compatibile con l'assenza di trazioni nel nucleo murario al livello α_0 :	- 1° 30'
Incremento di pendenza compatibile con l'integrità del colonnato:	- 2° 30'

En outre, afin d'essayer la marge de sécurité de la structure pour les futures augmentations d'inclinaison, on a calculé les tensions normales extrêmes du parement en pierre de la maçonnerie pour des augmentations du plan-base de 30' en 30', jusqu'à un maximum de 3 degrés.

Les résultats obtenus permettent de supposer que la situation de la structure semble presque acceptable jusqu'à un accroissement d'inclinaison pareil à 2° 30'; et que, avec un accroissement de 3° les résultats obtenus ne sont plus physiquement acceptables. On peut donc considérer que si la structure conservait un rythme d'accroissement moyen d'inclinaison de 6" par an, elle resterait dans les marges de sécurité pour les prochaines 300 années. A ce moment-là, la structure rejoindrait une augmentation d'inclinaison de 30' mais le collapsus se vérifierait certainement dans 1500 ans avec une augmentation d'inclinaison de 2° 30', à moins que le complexe structural ne subisse une altération du comportement qui avancerait un tel évènement.

6. Interventions de consolidation

En 1972 le Ministère des travaux publics ouvrit une adjudication-concours internationale, à laquelle participèrent vingt-deux firmes. L'avis d'épreuve laissait aux concurrents la possibilité de choisir la solution des interventions, en imposant quelques conditions fondamentales.

En particulier on imposa que la Tour devait conserver son aspect en respectant son inauguration structurelle.

En plus on a prescrit que, quelle que soit la solution proposée, l'inclinaison de la Tour pouvait être réduite entre la limite maximum d'un degré sexagésimal.

Les solutions proposées ont été de valeur et variées mais cependant aucun des projets n'a été jugé apte pour l'adjudication-concours.

Après un examen comparatif des projets considérés valables, on a remarqué que les diverses solutions proposées suivent des procédés semblables soit dans la phase préliminaire soit dans celle conclusive.

Les différentes solutions prévoient, en synthèse, l'exécution d'une série, pas nécessairement complète, d'interventions graduelles qui essentiellement sont constituées de:

- a) régulation de la nappe par moyen d'un écran d'injection capable d'imperméabiliser les sables intermédiaires et inférieurs qui se trouvent à une profondeur de plus de 60 m;
- b) installation d'œuvre de protection provisoire constituée de treillis métalliques à capuchon, disposés de manière à peu près similaire dans les différentes solutions, autour de la Tour, conçus de façon qu'ils puissent avoir soit une fonction passive d'opposition aux éventuels mouvements du monument, soit une fonction active de trait sur la Tour même.

La consolidation définitive est confiée, selon les différentes solutions, à des palifications avec des caractéristiques et dispositions différentes, soit au-dessous soit dans la zone périphérique de la Tour.

On a, de toute façon, prévu des structures robustes de reliage et de cerclage de l'embasement du fond.

Les palifications prévues dans les différentes solutions sont constituées par des pilotes de petit diamètre, et d'une longueur d'à peu près 60 m pour pouvoir prendre position dans les sables profonds du complexe C.

Une fois consolidée la fondation de la Tour, les différentes solutions prévoient une consolidation de la structure de maçonnerie du complexe et le successif démontage graduel de l'œuvre de protection.

Une autre solution prévoit la précharge du terrain dans la zone au Nord de la Tour en agissant sur un radeau en ciment armé sur lequel prennent position des tirants ancrés en profondeur.

Avec ce procédé on crée un flux du côté de la sur-pente pour balancer la distribution des pressions actuelles qui présentent des pics du côté de la sous-pente.

Nous n'approfondirons pas les autres solutions proposées pour nous arrêter un moment sur la situation actuelle.

Au moment actuel il y a un groupe de projection, nommé par le Ministère des travaux publics, qui est en train de rédiger le projet exécutif, et une Commission ministérielle prête à l'examiner.

En attendant on avait disposé et préparé un ouvrage provisoire de sauvegarde en structure métallique. Cette structure, composée d'éléments de dimensions facilement manœuvrables, a été empilée dans une zone adjacente de la Tour, disposée pour un montage rapide qui devait pouvoir se compléter en trois jours, dans le cas où il aurait été nécessaire de s'en servir à cause d'un cours anormal du mouvement de la Tour.

Malheureusement la structure métallique empilée est, actuellement une masse de fer rouillé et inutilisable. Il est souhaitable que quelque chose soit fait au plus tôt.

Professeur ingénieur Alberto Defez

La Torre di Pisa

1. Premessa

Il Campanile del Duomo di Pisa, meglio conosciuto come Torre di Pisa, e sulle cui caratteristiche storiche, artistiche ed ambientali risulta superfluo soffermarsi in questa sede, e' stato ed e' tuttora al centro dibattiti relativi al problema della sua conservazione e stabilita'.

Per esso si sono scritti fiumi di parole, cifre e analisi, sono state formulate ipotesi, a volte contraddittorie, sono state analizzate le tecniche costruttive ed i materiali, le caratteristiche geometriche e quelle statiche per cercare di dare una soluzione agli interrogativi che si ponevano per la ricerca delle cause dell'attuale stato del monumento. Sono state inoltre formulate delle previsioni per la futura sicurezza della struttura considerando gli incrementi di pendenza che si potrebbero avere negli anni futuri.

Tutto questo impegno costituisce una solida giustificazione per considerare la Torre quale caso emblematico per l'applicazione di una metodologia di studio finalizzata alla proposta di un intervento di consolidamento. Ovviamente sia la qualita' del metodo che i mezzi impiegati sono strettamente correlati all'importanza ed al carattere di unicita' del monumento. E tuttavia proprio nell'applicazione dei mezzi e delle tecniche che si possono impiegare nell'opera di consolidamento si puo' ravvisare un ulteriore pericolo, forse ancora piu' grave, per la Torre: quello costituito dal porre in primo piano il problema tecnico della conservazione, compiacendosi anche dei risultati che si potrebbero ottenere dall'applicazione di sofisticati mezzi, dimenticando i valori e le istanze connessi al suo essere, in primo luogo, monumento storico ed architettonico.

Occorrera' quindi saper coniugare ed integrare la conoscenza scientifica del problema e l'applicazione della tecnica con rispetto dei valori del monumento stesso, perche' esso possa continuare a tramandare negli anni la propria testimonianza storica senza dover rinunciare ad essere opera d'arte.

2. Caratteristiche generali della struttura

La Torre e' ubicata a Pisa nel Campo dei Miracoli (fig. 1) e puo' essere considerata, dal punto di vista strutturale, come costituita da un solo corpo cilindrico in muratura, fortemente inclinato rispetto alla

verticale verso mezzogiorno e dotato esternamente di elementi architettonici decorativi. Vi sono infatti otto ordini di loggiati collegati al corpo cilindrico mediante ballatoi, ai quali e' possibile accedere con una scala interna alla struttura muraria della Torre.

All'interno la Torre invece si presenta cava e liscia. In alto, al livello della cella campanaria, vi e' una volta ribassata con un lucernaio centrale esagonale.

L'altezza geometrica della Torre che viene definita come la distanza che intercorre tra il centro C' (fig. 2) della terrazza anulare in vetta alla cella campanaria e il centro C dell'anello di posa delle fondazioni, e' di mt 58.36.

La Torre si spinge, obliquamente al disotto del piano di campagna per una profondita' media di mt 4.30, per cui l'altezza, misurata dallo stesso centro C' con l'intersezione del piano di campagna, e' di mt 54.06. Si fa riferimento in questo caso alla misura media a causa delle dimensioni diametrali della Torre: questa infatti e', al di sotto del piano di campagna, per 3.30 mt dalla parte soprapendenza e per 5.30 mt dalla parte sottopendenza.

La muratura costituente la Torre non e' in materiale omogeneo ma e' formata da due paramenti murari in pietra da taglio di San Giuliano con interposta una struttura in detriti di pietre e malta di calce.

La costruzione del monumento duro' circa settanta anni e fu piu' volte sospesa e ripresa, secondo lo schema riportato (fig. 4), anche se dagli studi effettuati e' risultato che durante tale arco di tempo non ci furono preoccupazioni provenienti da eventuali cedimenti dei terreni. I movimenti della struttura appartenivano a fatti abituali che la conoscenza del sottosuolo pisano faceva prevedere ed accettare. Questa affermazione, riportata a conclusione degli studi effettuati sulla Torre dalla Commissione appositamente nominata dal Ministero dei LL.PP. negli anni 1965-1971 viene pero' disattesa constatando che la storia della costruzione del monumento e le tecniche impiegate sono una prova delle preoccupazioni che hanno sempre destato le condizioni della struttura. La costante coscienza del dissesto fornisce inoltre la spiegazione dei lunghi periodi di sospensione e ripresa dei lavori che si ebbero durante l'arco della costruzione della Torre.

I differenti movimenti subiti dal monumento durante la costruzione sono provati sia dalla presenza delle cosiddette «zeppe», cioe' nella posa in opera di conci di pietre opportunamente sagomate che avevano il compito di correggere l'inclinazione del piano di costruzione,

sia dalla tecnica di costruzione dell'edificio a rosette, per consentire opportune correzioni di volume.

Il grafico (fig. 4) illustra appunto le fasi di costruzione indicando sia i periodi di sospensione e ripresa dei lavori sia i movimenti subiti durante la costruzione stessa. Il fatto inoltre che l'inclinazione si sia manifestata quando il monumento non era ancora ultimato ha fatto sì che nella struttura si siano generate delle sollecitazioni addizionali di tipo non assialsimmetrico. Pertanto la conoscenza dei materiali impiegati, le tecniche costruttive e la storia della costruzione stessa sono parametri fondamentali per l'attuale stato tensionale delle strutture, ma risulta altrettanto difficile tenerne conto per cui si deve necessariamente ricorrere a delle ipotesi semplificative per la conoscenza di tale stato.

Dal grafico, che può rappresentare in sintesi la *storia statica* della Torre durante le varie fasi della costruzione, emerge un fatto saliente, che la Torre nella prima fase della costruzione, cioè fino al raggiungimento del 4° ordine di colonnati, ha iniziato a pendere dalla parte opposta rispetto alla situazione attuale.

3. I movimenti della Torre

Che la Torre di Pisa sia pendente è ben noto a tutti, ma su questa caratteristica peculiare occorre soffermarsi, escludendo le ipotesi fantasiose di intenzionalità dell'inclinazione, che cioè la Torre fosse stata costruita pendente.

La Torre ha raggiunto l'attuale configurazione per un susseguirsi di movimenti, movimenti che sono stati posti sotto controllo a partire dal 1911, a seguito della nomina di una Commissione da parte del Ministero della Pubblica Istruzione nel 1908 per lo studio delle condizioni statiche della Torre di Pisa. Furono allora impiegati per la prima volta i procedimenti geodetici allo scopo di stabilire con grande precisione la posizione planimetrica della Torre rispetto a caposaldi costituiti appositamente nella Piazza del Duomo, al fine di fornire così elementi di riferimento per rilevare nel tempo gli eventuali mutamenti dell'inclinazione della Torre.

Dal dicembre 1965 l'Istituto Geografico Militare (IGM) esegue periodicamente misurazioni otticogeodetiche. Inoltre sono stati installati nella Torre un impianto di strumentazione fissa, costituita da livelle a lettura diretta, livelle a registrazione continua, anemografo registratore, pluritermografo e vari termometri teletrasmettenti registratori.

I dati forniti da tali apparecchiature possono essere connessi con i movimenti della Torre. Si può ritenere di trovarci di fronte ad uno dei primi casi di monitoraggio continuo di un monumento.

Sono stati inoltre effettuati misurazioni di alta precisione altimetriche e planimetriche che collegano la Torre a caposaldi esterni e lontani.

Da questa campagna di misurazioni e controlli è stato tratto il grafico che rappresenta gli incrementi di inclinazione della Torre a partire dal 1911 fino al 1978. Da questo grafico si rileva che nell'arco di 67 anni, che separano le due date estreme, la Torre ha subito un incremento di inclinazione di 390". Passando da un'inclinazione di 5 14' 46" del 1911 all'inclinazione di 5 21' 11" del 1978, con una velocità di circa 6 secondi all'anno.

Se la velocità d'inclinazione fosse ipoteticamente costante, il diagramma rappresentativo sarebbe lineare, come pressappoco risulta.

Si evince inoltre che nell'intervallo di tempo tra il 1932 e il 1936 il diagramma presenta un'accelerazione positiva, così come intorno il 1973. Per il restante si può parlare di velocità quasi costante.

4. Caratteristiche dei terreni di fondazione

Lo studio dell'area circostante è stato particolarmente accurato per poter disporre continuamente di un meccanismo di rilevazione circa i movimenti della Torre. Analogamente sono state compiute indagini approfondite per conoscere le caratteristiche dei terreni di fondazione. Come dato generale si rileva che tutta l'area attualmente occupata dai depositi dell'Arno è in lento moto di abbassamento (subsidenza). Dal livello del suolo (a circa 3 mt sul livello del mare) fino ad una profondità di circa tre metri è presente un terreno limoso-argilloso eterogeneo. Tale terreno contiene una falda freatica con andamento irregolare dovuto all'eterogeneità del terreno stesso ed ai resti di antichi manufatti che determinano variazioni di permeabilità su brevi distanze. I terreni costituenti il sottosuolo della Torre sono infatti caratterizzati da una notevole variabilità delle proprietà e delle caratteristiche fisico-meccaniche. Dai risultati delle prove di laboratorio e delle indagini in sito sono state individuate tre principali stratificazioni: la prima, definita come complesso A, è costituita da terreni prevalentemente limo-sabbiosi e si estende dal piano di campagna per circa 10 mt; la seconda, complesso B, è formata da terreni in prevalenza argillosi ed arriva ad una profondità di circa m 37; la terza, complesso C, è formata da sabbie eoliche con intercalazioni limose e argillose.

La fig. 6 illustra i valori delle pressioni di contatto tra le fondazioni ed il terreno e le isobare delle tensioni verticali su piani paralleli al piano di fondazione.

Si può notare l'incremento dei valori delle tensioni nel lato sottopendenza. Schematizzando il comportamento del terreno con l'ipotesi di Winkler si ottengono, per le pressioni di contatto sulla traccia del piano di massima pendenza, i valori massimi e minimi di 91.8 t/mq e di 3.80 t/mq.

5. Stato di sollecitazione della Torre

Prima di passare ad analizzare le opere di presidio e di consolidamento proposte per la Torre, occorre ricordare che particolarmente importante per la stessa risulta la determinazione e lo studio dello stato di sollecitazione delle strutture che la compongono.

Da recenti studi effettuati all'Università di Pisa si sono ottenuti interessanti risultati e utili indicazioni anche per eventuali prossime variazioni dello stato tensionale delle strutture dovuto ad incrementi di pendenza della Torre.

Per l'analisi del complesso strutturale costituito dal corpo cilindrico, dai ballatoi e dal colonnato fu adottato uno schema avente per ipotesi che il ballatoio dovesse assolvere la sola funzione di collegamento.

Per quanto riguarda la verifica della sezione del tamburo si è dovuto risolvere il problema della omogeneità del materiale, essendo, come già si è detto, il paramento murario formato da due paramenti, uno esterno ed uno interno, in pietra di San Giuliano, con una parte interna di muratura a sacco. Si è pertanto adottato un coefficiente di omogeneizzazione $n = E_p/E_m$ uguale a quattro ed un modulo di elasticità E_m per la muratura pari a 200.000 kg/cm², ricavato da analogie con strutture murarie simili.

Per quanto riguarda le ipotesi sui materiali vi è inoltre da considerare che per l'attuale stato tensionale nella Torre risultano particolarmente importanti i fenomeni viscosi che si sono manifestati nell'arco di vita della struttura e ciò tenuto conto del fatto che la muratura a sacco ha un comportamento tipicamente viscoso.

I dati iniziali possono essere così riassunti, relativamente alle caratteristiche dei materiali:

Resistenza cubica a compressione del paramento esterno murario	1572 kg/cm ²
Resistenza a trazione (determinata con prova brasiliana)	42.35 Kg/cm ²
Modulo di elasticità normale (E_p)	780.000 kg/cm ²
Resistenza cubica a compressione della muratura a sacco interna	87.52 Kg/cm ²
Resistenza a trazione	7.52 Kg/cm ²
Modulo di elasticità normale (E_m)	200.000 kg/cm ²
Rapporto $E_p/E_m = n$	4
Resistenza a compressione del marmo costituente le colonne	1527 kg/cm ²
Modulo elastico	785.720 kg/cm ²

I risultati finali ottenuti possono essere così schematizzati:

Tensione massima attuale nel paramento:	34,6 kg/cm ²
Relativo grado di sicurezza a rottura	$\frac{1527}{34,6} = \sim 44$
Tensione massima attuale nella muratura	8,4 kg/cm ²
Relativo grado di sicurezza a rottura:	$\frac{87,58}{8,4} = \sim 10$
Tensione media attuale nella colonna più caricata	39,1 kg/cm ²
Tensione media attuale nella colonna meno caricata 2° ordine:	*33,3 kg/cm ²
Incremento di pendenza compatibile con l'assenza di trazioni nel nucleo murario al livello α_0 :	$\sim 1^\circ 30'$
Incremento di pendenza compatibile con l'integrità del colonnato:	$\sim 2^\circ 30'$

Per saggiare inoltre il margine di sicurezza della struttura per prossimi incrementi della pendenza sono state calcolate le tensioni normali estreme del paramento in pietra della muratura per incrementi di inclinazione del piano base, di 30' in 30', fino ad un massimo di tre gradi.

I risultati ottenuti, fanno ritenere che la situazione della struttura appare quasi accettabile fino ad un incremento di inclinazione pari a 2 30', e che con un incremento di 3 non si ottengono più risultati fisicamente accettabili.

Purtanto si può ritenere che se la struttura conservasse un ritmo di incremento medio di inclinazione di 6" all'anno, rimarrebbe in regime di sicurezza per i prossimi 300 anni allorché si raggiungerebbe un incremento di pendenza di 30. Ma il collasso sarebbe certamente raggiunto tra 1500 anni con un incremento di pendenza di 2 30', sempre che il complesso strutturale non subisca una modifica del comportamento che anticiperebbe tale evento.

6. Interventi di consolidamento

Nel 1972 il Ministero dei Lavori Pubblici bandì un appalto-concorso internazionale, che vide la partecipazione di ventidue ditte. Il bando di gara lasciava alla libera scelta dei concorrenti la soluzione degli interventi imponendo alcune condizioni fondamentali. In particolare fu imposto che la Torre dovesse conservare il suo aspetto nel rispetto della sua organicità strutturale. Inoltre fu prescritto che, qualunque fosse stata la soluzione proposta, la pendenza della Torre poteva essere ridotta entro il limite massimo di un grado sessagesimale. Le soluzioni proposte sono state quanto mai varie e pregevoli, ma ciononostante nessuno dei progetti fu considerato idoneo ai fini dell'appalto-concorso.

Da un esame comparativo dei progetti ritenuti meritevoli si evince che le varie soluzioni proposte segnano procedimenti affini sia in fase preliminare che conclusiva.

Le varie soluzioni prevedono, in sintesi, l'esecuzione di una serie non necessariamente completa di interventi graduali che sostanzialmente sono costituiti da:

- a) regolazione della falda che prevede la realizzazione di uno schermo di iniezioni tale da impermeabilizzare le sabbie intermedie ed inferiori, che giacciono ad una profondità di oltre 60 m.
- b) installazione di opera di presidio provvisoria costituita di tralicci metallici a cappuccio disposti, in maniera poco diversa l'una soluzione dall'altra, intorno alla Torre, concepiti in modo da svolgere sia una funzione *passiva* di opposizione ad eventuali movimenti del monumento, sia una funzione *attiva* di tiro sulla Torre stessa.

La consolidazione definitiva è affidata nelle varie soluzioni a palificate, con caratteristiche e disposizioni varie, sia al disotto che perifericamente alla Torre. Sono comunque previste strutture robuste di collegamento e di cerchiatura del basamento fondale. Le palificate previste nelle varie soluzioni sono costituite da pali di piccolo diametro

della lunghezza di circa 60 m onde attestarsi nelle sabbie profonde del complesso «C». Consolidato che sia la fondazione della Torre le varie soluzioni prevedono un consolidamento della struttura muraria del complesso e successivo smontaggio graduale dell'opera di presidio.

Altra soluzione prevede la precarica del terreno nella zona a nord della Torre, agendo su di una zattera in cemento armato sulla quale si attestano tiranti ancorati in profondità. Con tale procedimento si crea un flusso di pressione dalla parte di soprapendenza al fine di bilanciare la distribuzione delle pressioni attuali che presentano dei picchi dal lato di sottopendenza.

Tralasciamo di approfondire le altre soluzioni proposte per soffermarci sulla situazione attuale.

Allo stato vi è un gruppo di progettazione nominata dal Ministero dei LL. PP. che sta redigendo il progetto esecutivo ed una Commissione Ministeriale che è pronta per esaminarlo.

Nell'attesa si era disposta ed approntata un'opera provvisoria di salvaguardia a struttura metallica. Tale struttura, composta di elementi di dimensione facilmente manovrabile, era accatastata in un'area adiacente alla Torre, predisposta per un rapido montaggio da potersi completare nel giro di tre giorni, ove se ne fosse richiesto l'impiego a seguito di un andamento anormale del movimento della Torre.

Purtroppo la struttura metallica accatastata è allo stato un amasso di ferro arrugginito ed inservibile. Non vi è che da augurarsi che si faccia presto.

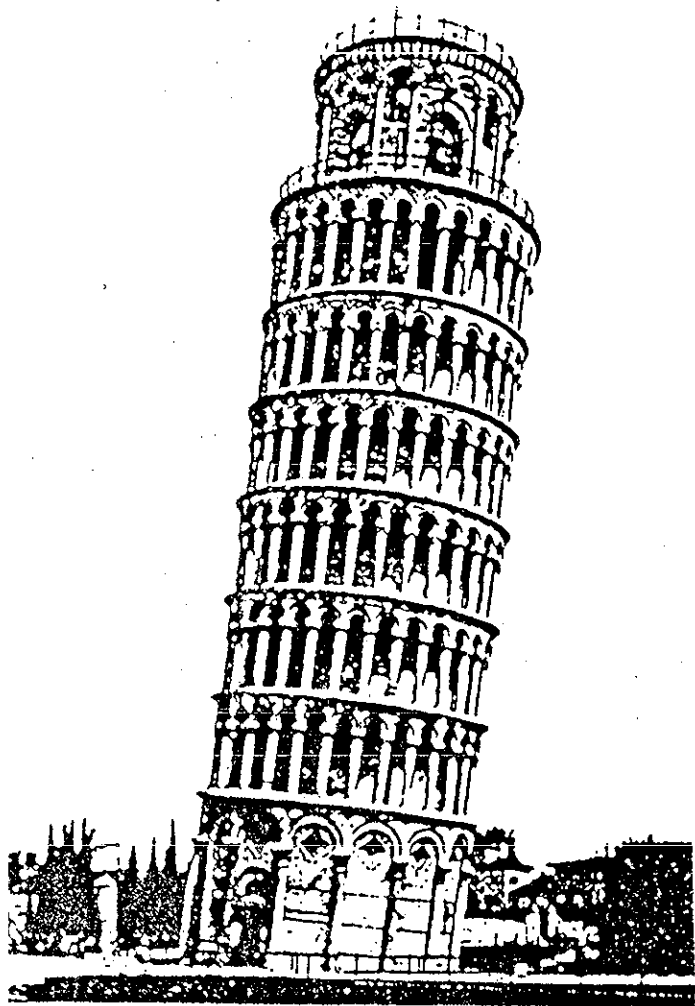


Figura 1 — Veduta della Torre.

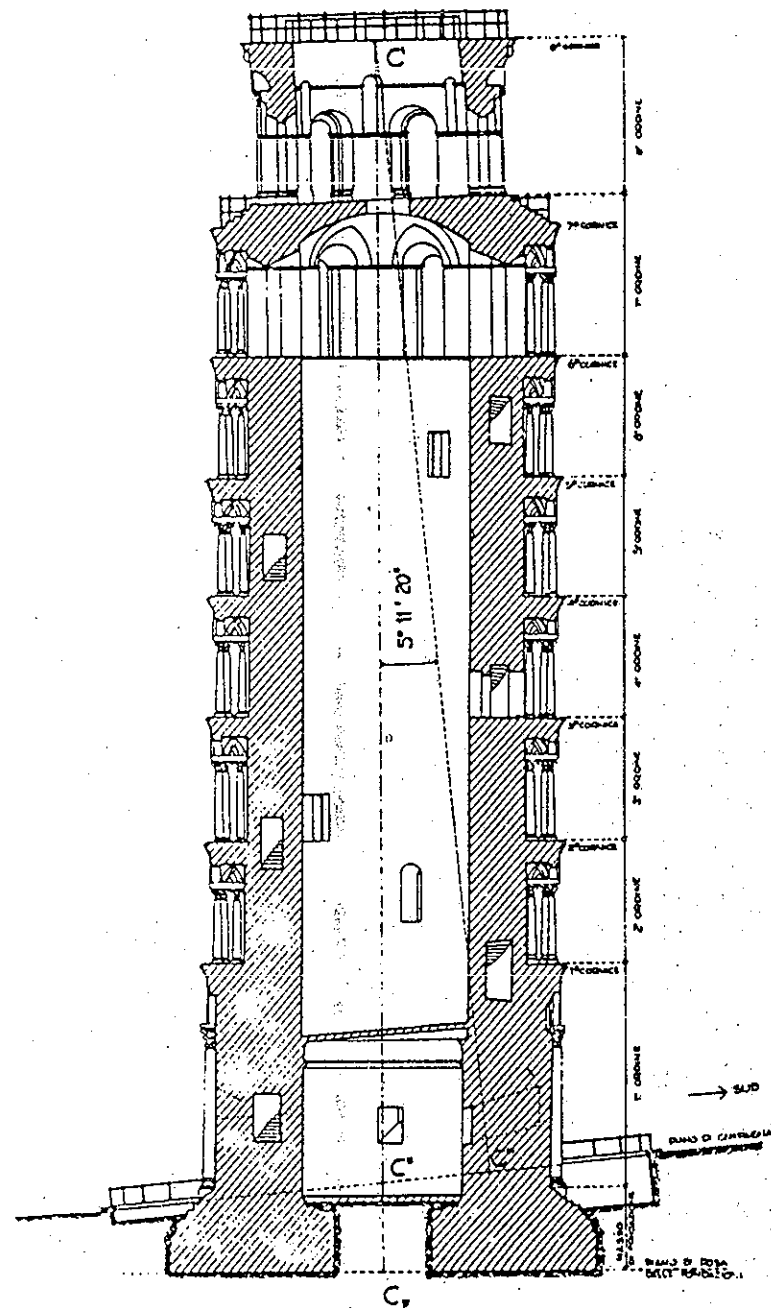


Figura 2 — Sezione della Torre con valore della pendenza riferito al 1979.

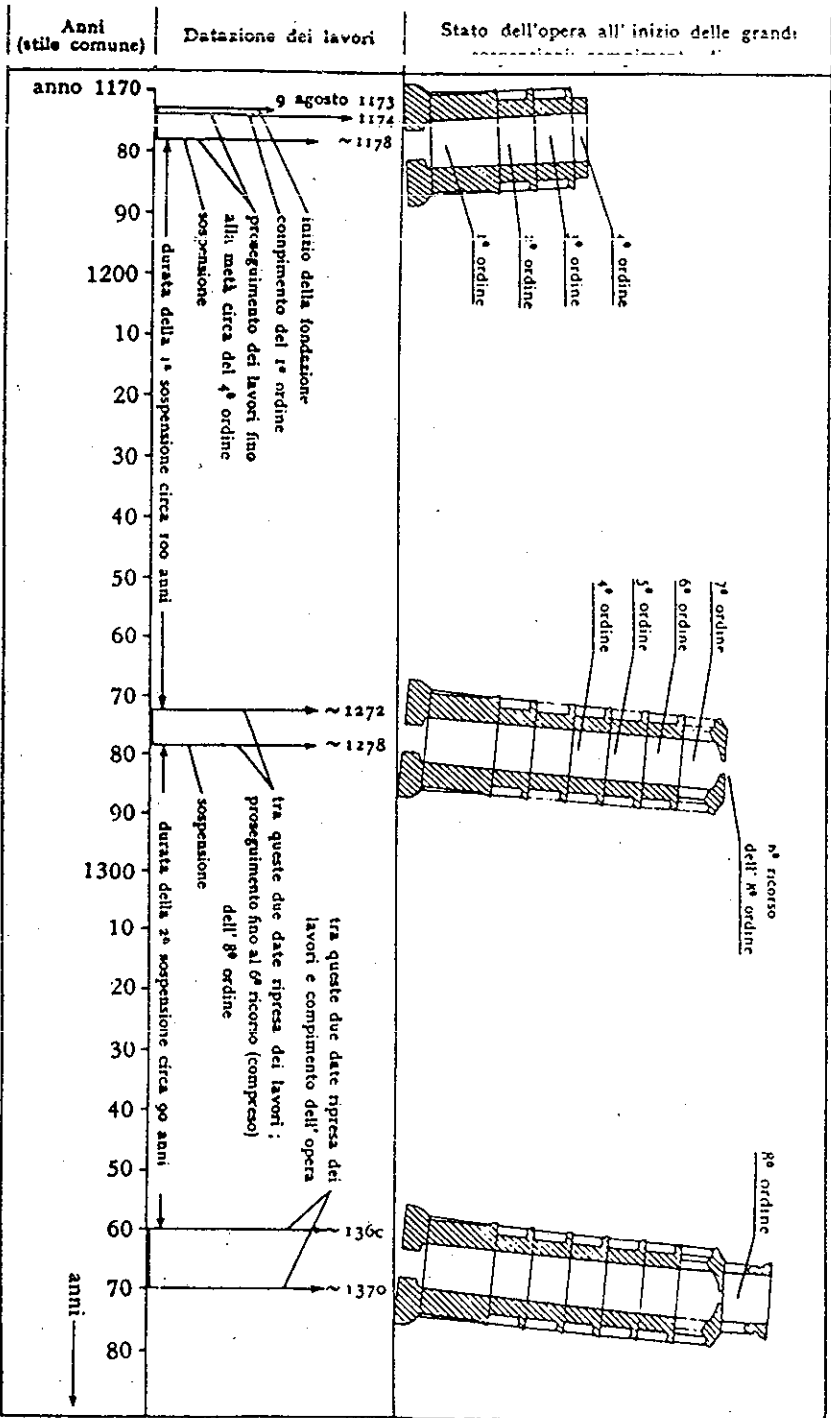
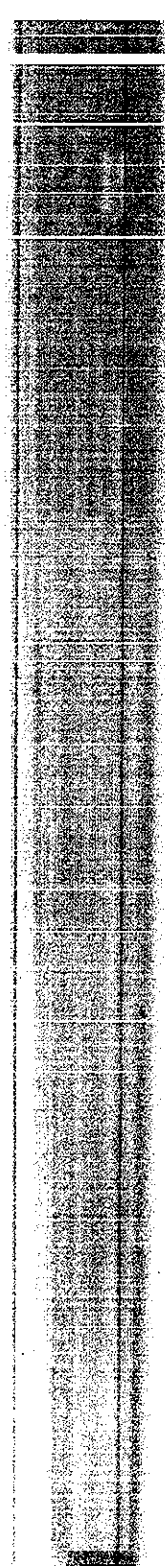


Figura 4 — Fasi di costruzione della Torre



INCLINAZIONE ASSE TORRE ANNO 1911 : 5° 52' 16" N
 INCLINAZIONE ASSE TORRE AL 1811-1812 : 6° 22' 11"

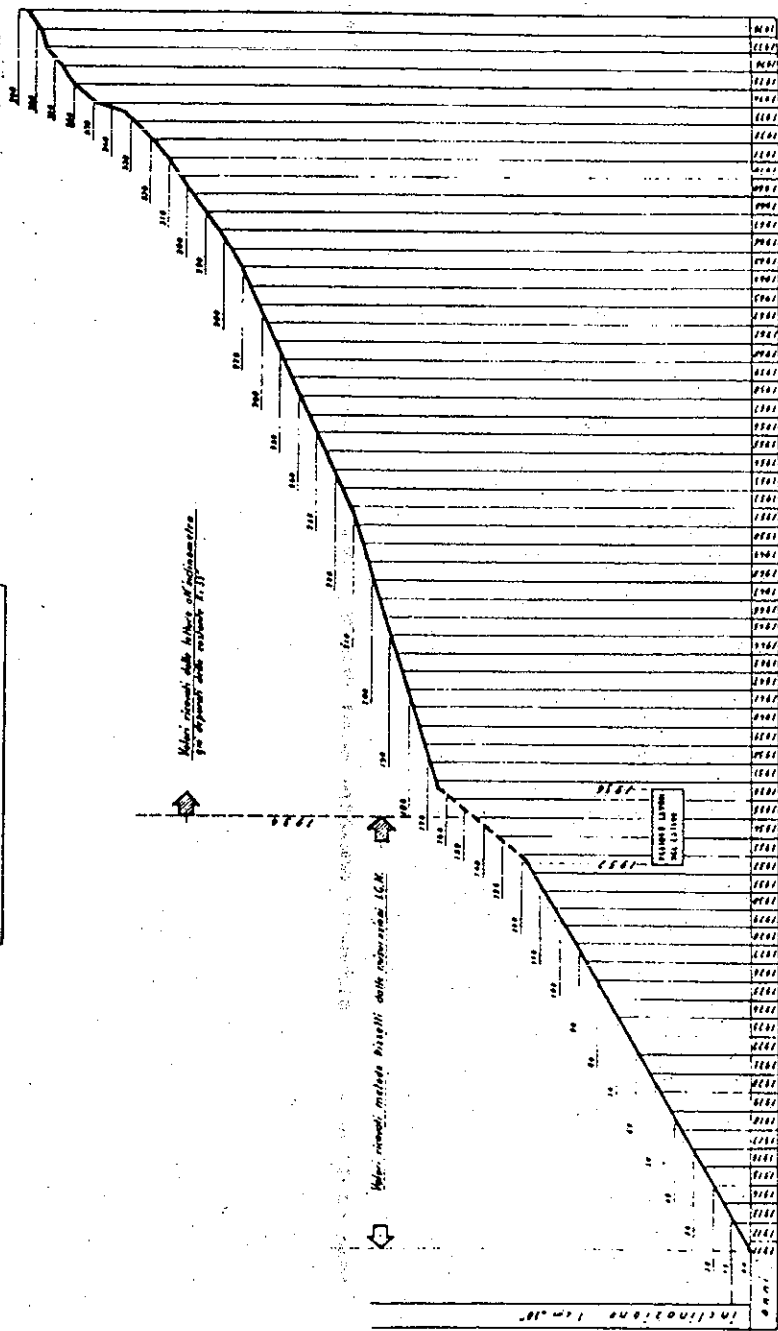


Figura 5

Summary

The Tower of Pisa

A survey is made of the general characteristics of the monument and its static condition as well as the variations in this condition due to the increase in its slope which are being registered continuously and relentlessly.

Provisions are also made on how long the Tower is likely to survive if the speed at which the Tower continues to lean does not undergo variations.

The profound causes for the precarious state of the Tower are examined and the proposals for intervention for its consolidation to save it from indubitable loss are expounded.

Prof. Ing. Alberto Defez

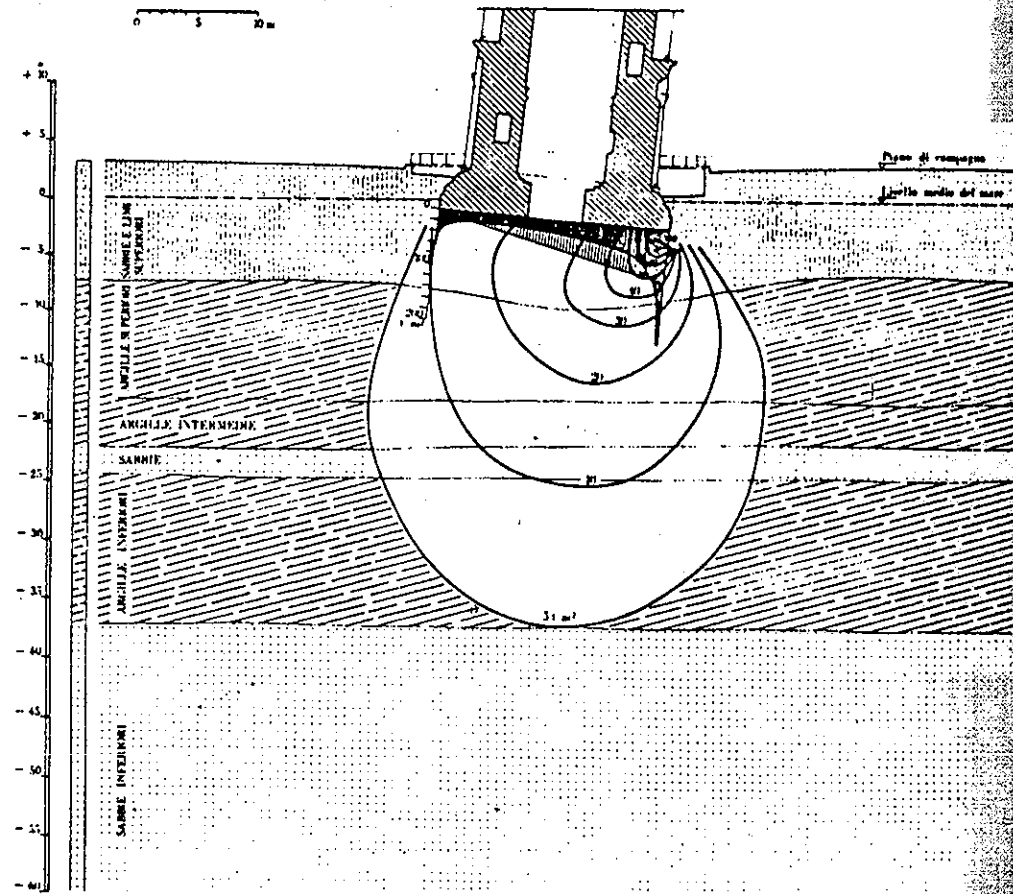


Figura 6