

NELLO BEMPORAD - ENZO VANNUCCI
PROPOSTA DI OPERE PROVVISORIALI E DEFINITIVE
PER IL CONSOLIDAMENTO DEL CAMPANILE DI PISA

CAPO PRIMO

Dall'osservazione diretta della Torre Campanaria del Duomo di Pisa e dall'esame degli studi ad oggi pubblicati sui fattori determinanti le cause che hanno prodotto il dissesto statico del Monumento, la cui più evidente dimostrazione è la inclinazione conseguente alla rotazione del piano di fondazione, emergono alcune considerazioni fondamentali:

1 - È necessario porre in rilievo un fatto cui fino ad oggi è stata data scarsa evidenza: il Campanile oltre ad avere subito una notevole rotazione del piano di fondazione, ha subito, nel tempo, un altrettanto notevole abbassamento.

Questo fatto se non strettamente documentabile storicamente, è evidente ove si consideri il piano di spiccato del Campanile in rapporto al piano orizzontale della Piazza dei Miracoli. Tutti gli edifici monumentali medioevali; Battistero, Duomo, Camposanto, hanno un medesimo piano di imposta, pressoché orizzontale, ben più alto di quello del Campanile.

Anche i sondaggi eseguiti all'interno della Torre, sono a favore di questa ipotesi: sotto il carico eccessivo della Torre, il terreno sottostante al cilindro e quello adiacente, si è costipato, il piano di campagna si è abbassato in corrispondenza creando una ben avvertibile depressione.

2 - Le indagini eseguite nel terreno sottostante la Torre hanno solo potuto determinare, di massima, la natura del terreno stesso e la varietà degli strati, senza poter tuttavia permettere una determinazione esauriente su campioni indisturbati, né la ricostruzione di una sezione precisa degli strati, dei quali la giacitura e potenza appaiono discontinue.

3 - Al disopra della parte basamentale della Torre, coll'iniziare delle logge perimetrali, i carichi di lavoro a cui sono assoggettati i diversi materiali non si possono valutare, in quanto possono essere diverse le ipotesi sulle modalità di costruzione e sui rimaneggiamenti subiti dalle strutture.

4 - Le tensioni che si suppongono oggi sul terreno in corrispondenza delle fondazioni della Torre, sono state determinate molto approssimativamente, in quanto le perdite di acqua a cui sono stati sottoposti gli strati ad immediato contatto con le fondazioni stesse, hanno portato degli incrementi di tensione sugli strati vicini, mentre il basamento della Torre, che si ha motivo di supporre di massi a secco, non sappiamo come distribuisce né a che profondità può trasmettere i carichi.

Sarebbe possibile determinare qualche risultato sulla natura del sottosuolo con più sicura approssimazione, ma per fare ciò occorrerebbe ricorrere a sondaggi e carotaggi estesi alla parte interessata dal carico della Torre, determinando con

i campioni indisturbati le caratteristiche acquistate nel tempo dal terreno. Tali prelevamenti non si possono eseguire. D'altra parte fino ad oggi non esiste altra maniera per conoscere con sicurezza le caratteristiche fisiche del terreno e le sue condizioni di lavoro.

Per cui:

Considerato quanto premesso ai punti 2, 3, 4, sulla scarsa conoscenza del terreno, non potendo che esaminare la situazione di fatto quale risulta dagli incrementi della pendenza (che sono misurati annualmente in maniera attendibile solo dal 1911 e sembrano da allora mediamente costanti), poiché ad ogni incremento della pendenza corrisponde una diversa distribuzione delle tensioni nel terreno, ne consegue che: *non possiamo escludere che il limite di resistenza del terreno possa essere raggiunto in un futuro anche prossimo.*

Qualora si accettino tali conclusioni, è ovvio che si impone il predisporre provvedimenti che assicurino la conservazione del Monumento. Tali provvedimenti avranno carattere provvisorio da prima e dovranno dare la possibilità di ulteriori interventi sì da arrivare rapidamente ad una soluzione definitiva che garantisca per l'avvenire la statica della Torre.

Questo fine si propone il presente studio che prevede ambedue le operazioni, la provvisoria e la definitiva, eseguite in superficie e dove la definitiva è l'ulteriore stadio della provvisoria.

Fondamentalmente consistono nell'allargamento delle attuali fondazioni mediante una corona circolare attorno alla Torre sì da riportare i carichi sul terreno in limiti normali.

L'intervento si preoccupa « primum non nocere » nei confronti del Monumento in restauro di cui viene conservata l'integrale originalità. Inoltre si lavora e si distribuiscono i carichi della Torre su di un piano vicino alla superficie del terreno a conveniente distanza nei confronti dell'adiacente Cattedrale sulla quale non si potranno avere riflessi dannosi.

Al restauro statico si accoppia anche il restauro di ripristino, in quanto si prevede di riportare la Torre alla quota di imposta originale definita dagli altri Monumenti della Piazza, intendendo rinnovare così un rapporto estetico formale che originalmente gli artefici si proposero.

Vedremo successivamente che il particolare tipo di intervento, che si propone, potrà essere seguito anche da un leggero raddrizzamento della Torre.

Diamo qui di seguito una sintesi dell'intervento suddividendo in quattro fasi di lavoro, l'operazione totale. Dopo tale esposizione sommaria, passeremo a descrivere più dettagliatamente i lavori da eseguire e la loro attuazione nel tempo.

CAPO SECONDO LE QUATTRO FASI:

a) Opere provvisionali (Tav. 4).

Sono predisposte per una garanzia immediata, valida anche durante il corso dei successivi lavori. Sono di rapida esecuzione e non alterano la configurazione di equilibrio raggiunta dal terreno interessato dalle fondazioni della Torre.

Consistono nella posta in opera di quadri clinici radiali in profilati di ferro impostati su una platea circolare in c.a. concentrica al centro di pressione.

b) *Trasformazione delle opere provvisionali nel bloccaggio clinico definitivo necessario per l'intervento attivo successivo (Tav. 5).*

Consistono nel completamento ed ampliamento della platea in c.a. di cui sopra (semplice anello iniziale) ottenendo una platea innervata che circonda la Torre, e presenta un notevole momento di inerzia.

La struttura è prevista in modo che la platea gravi sul terreno nella parte periferica esternamente alla corona circolare su cui poggiano i quadri in c.a. costituenti il bloccaggio. (Tav. 6).

Tale bloccaggio è composto di due parti; una è aderente alla Torre e può scorrere sull'altra che fa corpo con la platea sulla quale si scarica. Fra le due parti è interposta una corona di martinetti idraulici che possono trasmettere il carico della Torre al bloccaggio esterno.

Il carico di lavoro del terreno sotto la fondazione anulare esterna risulta di Kg/cmq. 0,376.

c) *Intervento attivo. (Tav. 7).*

Prevede l'innalzamento guidato della Torre sul sistema di bloccaggio scaricando come detto, parte del carico sulla platea, in quanto si mantengono sempre in forza le strutture di fondazioni esistenti.

L'innalzamento prosegue fino a riportare la Torre con la base al piano originale presunto.

Durante il sollevamento la pressione sul terreno è data da Kg/cmq. 0,905 sulla parte anulare esterna. Tale carico è diminuito dalla aliquota di lavoro del terreno sotto la vecchia fondazione.

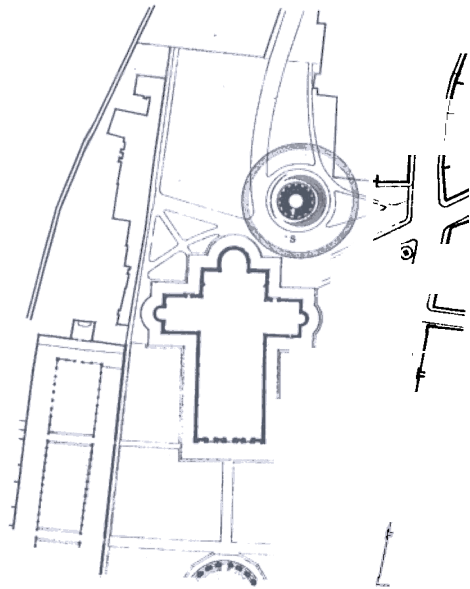
d) *Stabilizzazione della nuova situazione. (Tav. 8).*

Fra la base della Torre sollevata e le fondazioni originali, si getta la struttura di completamento della platea saldando i vuoti che si erano ottenuti nelle precedenti fasi dei lavori. Il carico di lavoro su tutta la superficie di fondazione tende all'entità di Kg/cmq. 0,635.

CAPO TERZO ELENCO CRONOLOGICO DELLE OPERE PREVISTE

a) *Opere provvisionali (tavole 4; 5; 6).*

- 1 - Tracciamento della circonferenza con raggio di m. 22,50 e centro nel centro di pressione (C) dei carichi gravanti sul piano di spiccato (Tavola 6).
- 2 - Tracciamento della circonferenza con metri 32,50 di raggio e determinazione dei punti in cui concorrono le travi che costituiranno le nervature del solettone, tangenti ad una circonferenza di raggio di m. 12,50 attorno al centro di pressione (Tav. 6).
- 3 - Scavo di cm. 60 della corona circolare (A1) della larghezza di m. 3,00 avente per bisettrice la circonferenza con raggio di m. 22,50 (Tav. 4).
- 4 - Scavo entro la corona circolare di cui al capo precedente, per ml. 1,20 sotto il piano di splateamento, del vano necessario per le travi tangenti di cui sopra (T1) e dei travi di collegamento fra i nodi di incrocio delle stesse (Tav. 6).
- 5 - Getto di calcestruzzo armato negli scavi di cui ai numeri precedenti.
- 6 - Posa in opera delle piastre con perni (P) per l'appoggio dei costruendi quadri clinici (Tav. 4).



S : Superficie interessata ai carichi

Fig. 1 - La Piazza dei Miracoli a Pisa. Il campanile e la superficie interessata dal restauro.

Fig. 3 - Campanile a lavori compiuti.

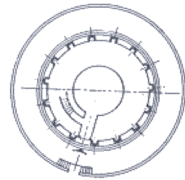
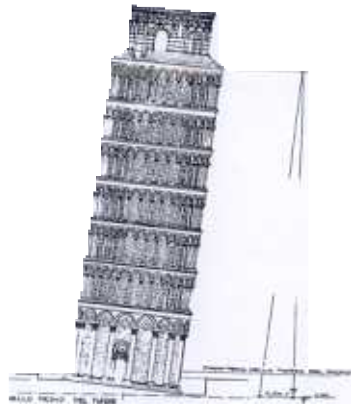
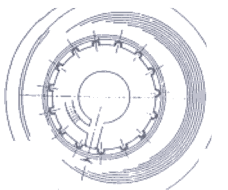


Fig. 2 - Stato attuale. Prospetto sul piano di massima pendenza.

Fig. 4 - Opere provvisorie.

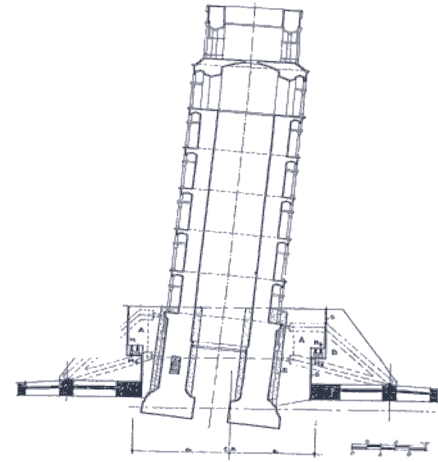
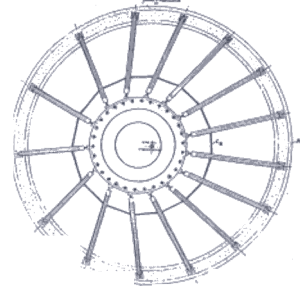
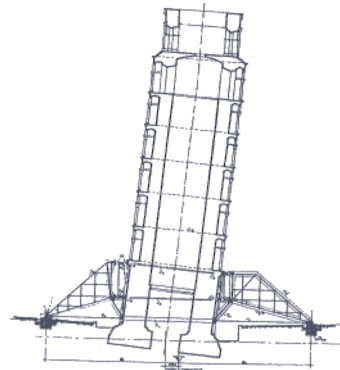


Fig. 5 - Le opere provvisorie sono incorporate nel bloccaggio clinico definitivo.

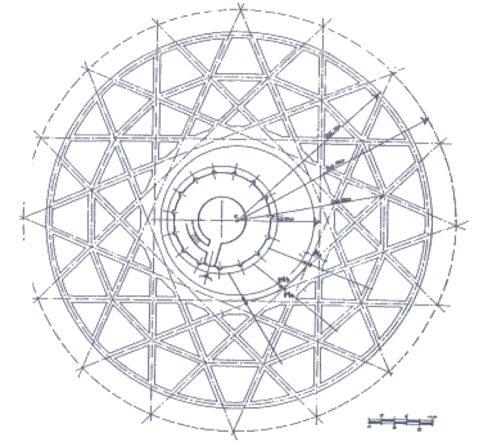


Fig. 6 - Innervatura del solettone resistente.

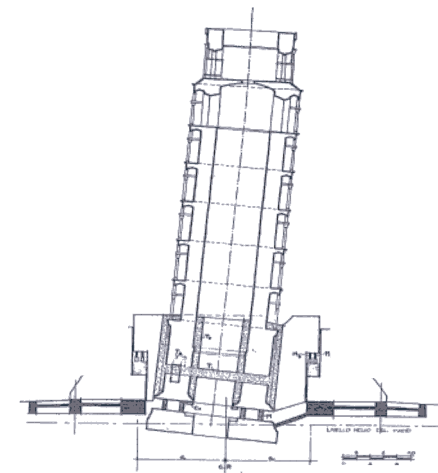


Fig. 7 - Intervento attivo.

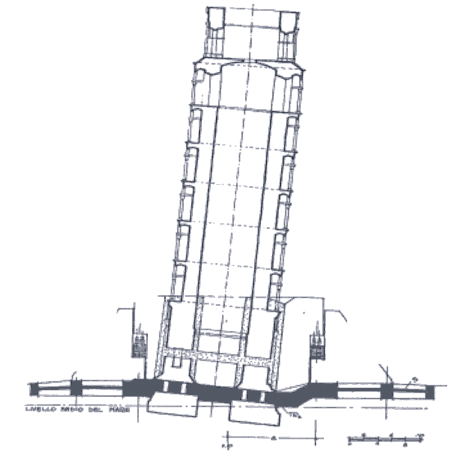


Fig. 8 - Stabilizzazione della nuova situazione.

7 - Inizio della costruzione dei quadri clinici (Q1) con elementi di profilati di ferro prefabbricati e controventati in modo che i quadri clinici si sviluppino sulla verticale dell'appoggio e tenuti in sito da controventature comandate da argani.
 8 - Costruzione di una fasciatura pretesa in profilati di ferro in una sezione orizzontale del basamento della Torre, alla quota d'imposta dei quadri clinici (C1).

La fasciatura è eseguita dopo l'adeguamento delle superfici esterne della

Torre con getti di c.a. isolati dalla pietra mediante uno spessore di composti plastici fibrosi di 3÷5 mm. (Tav. 4).

9 - Posa in opera di catene (f) con possibilità di pretensione fra la cintura in ferro al basamento del Campanile (C1) e le piastre d'imposta dei quadri clinici (P). Ciascuna piastra è ancorata con una catena che si collega alla cintura pretesa (Tav. 4).

10 - Costruzione di cinture (C2) in laminati di ferro pretesi ai diversi piani della Torre in modo da collegare lasciandola, la muratura del cilindro interno.

Eventuale trapanazione di fori e posa in opera di bulloni passanti con piastre di distribuzione, ove occorrono, nel cilindro murario.

11 - Mediante gli organi che comandano la controventatura, vengono fatti rotare i quadri clinici in modo da portarlo nella posizione definitiva (Q2) a contrastare, mediante elementi costituiti da tralicci (H) che terminano in piastre d'appoggio, sulla muratura del cilindro di base della Torre.

L'apparecchiatura d'appoggio viene portata a forzare mediante martinetti (M1 e M2) orizzontali che dal quadro clinico agiscono a mezzo di tralicci sulle piastre.

In questo stadio dei lavori la tensione dei martinetti è contenuta entro i limiti determinati dalla spinta dei quadri per l'azione dovuta al peso degli stessi.

12 - I quadri clinici vengono completati con due doppi elementi dei quali l'uno collega la cintura del basamento con le piastre di appoggio dei martinetti (T2) mentre il secondo (T1) collega il quadro clinico, nel punto d'intersezione dell'elemento portante i martinetti, alla cintura stessa.

13 - I tralicci dei diversi quadri clinici che portano le piastre di appoggio al basamento verranno uniti fra loro da due cinture orizzontali (C3 e C4) eseguite con profilati di ferro saldati elettricamente in modo da fissare la loro posizione rispetto alle generatrici del cilindro di base.

14 - Costituzione di cinture in profilati di ferro che collegano orizzontalmente i quadri clinici (C5).

15 - Eseguite le opere descritte ai capi precedenti, viene data la prima tensione ai martinetti in modo da sviluppare le forze antagoniste per mantenere inalterata la posizione assunta dalla Torre (ordine di grandezza della coppia equilibrante t.m. 2.000). Si costituisce così una struttura intelaiata spaziale che riporta, entro certi limiti, gli incrementi dei carichi sulla corona circolare (A1).

16 - Costituzione di 2 cinture in c.a. (C'3, C'4), isolate come alla voce 8, di distribuzione in corrispondenza alle apparecchiature di appoggio dei quadri clinici conglobanti le cinture in ferro, eseguite lasciando le luci per completare nel futuro mediante altri getti il cilindro in c.a. che successivamente avvolgerà completamente il basamento.

17 - Costituzione di 2 elementi in c.a. (Tp1, Tp2), che dai martinetti, seguendo i quadri clinici, trasmettono all'appoggio sulla corona circolare, le reazioni generate dai martinetti stessi.

18 - Nuova taratura della pressione dei martinetti orizzontali per assicurare la posizione attuale della Torre. (Possibile coppia equilibrante t.m. 20.000).

Con i lavori di cui alle voci precedenti e la nuova taratura delle pressioni, la struttura spaziale che riporta i carichi sulla corona di imposta (A1) risulta atta a sostenere le opere successive.

b) Trasformazione delle opere provvisorie in quelle di bloccaggio clinico definitivo necessario per l'intervento attivo. (Tav. 5).

19 - Scavo e getto in c.a. dell'anello (A2) di imposta delle travi costituenti l'inviluppo di tangenti di cui alla voce 2, raggio medio di m. 28,70 (tav. 6).

20 - Costruzione per campioni delle travi dell'inviluppo mediante scavo e getto di una camicia in c.a. collegata ad elemento di trave a traliccio e staffe.

Il peso dei materiali è dosato in maniera che non debba aumentare il carico sul terreno. Gli elementi della trave a traliccio verranno saldati elettricamente per i diversi tratti e così le armature longitudinali in ferro poste nella parte gettata delle travi.

Nella camicia sono praticati dei fori per la eventuale posa in opera di cavi da c.a.p.

21 - Proseguendo nell'esecuzione delle travi tangenti, si viene a formare l'anello intorno al basamento del campanile. Tale anello viene ad essere costituito dalla camicia in c.a. e da profilati in ferro di completamento che uniscono i vari tralicci delle travi medesime.

22 - Completamento dell'intelaiatura in tralicci di ferro dei quadri clinici per la loro trasformazione in elementi in c.a.

I tralicci sono prolungati fino ad agganciare in basso l'anello circolare costituito dall'inviluppo delle travi in modo da poter sostenere il getto che verrà fatto successivamente.

23 - Scavo di cm. 60 di terreno per campioni fra i tralicci delle travi e getto del solettone, e delle stesse travi tangenziali. Si rileva che le operazioni eseguite fino a questo stadio dei lavori sono disposte in modo che non debbano modificare i carichi gravanti sul terreno.

Per le successive operazioni che comportano variazioni di carichi e nella Torre e nell'apparecchiatura ad essa adiacenti, si predispongono opportune operazioni, in modo che nessuna variazione apprezzabile di tensioni verrà ad influenzare la configurazione attuale assunta nel terreno.

24 - La principale è una prima tensione dei cavi delle travi tangenziali in modo da predisporre il getto degli elementi radiali che inglobano i quadri clinici e dell'anello che circonda il basamento della torre.

I carichi dati dalle opere sottoelencate sono così riportati verso la zona periferica del solettone.

25 - Fasciatura degli elementi architettonici esterni del basamento della Torre, con strato di plastica fibrosa dello spessore da 3 a 5 mm. aumentato convenientemente in corrispondenza dei capitelli e dei bassorilievi, con questa operazione e la successiva, si completano le opere previste nella voce 16.

26 - Getto del cilindro in c.a. (E) aderente alla fasciatura di cui sopra per il contenimento dall'esterno del basamento della Torre, con spessore di circa 1 m. praticandovi le aperture necessarie per le travi radiali che dovranno congiungere solidamente il cilindro murario della Torre al cilindro esterno.

27 - Getto della struttura in c.a. conglobante i quadri clinici e diviso in due elementi distinti: (A) Mensole solidali al cilindro che fascia il basamento della Torre (E) e che permetteranno il sollevamento della medesima in fase successiva.

(B) Elementi d'appoggio sulla nuova struttura portante costituita da solettone innervato.

28 - Posa in opera delle guide (S) fra i due elementi della voce precedente

(A e B) sulle superfici verticali per la prevista particolare traslazione.

29 - Posa in opera delle coppie dei martinetti verticali (M3 ed M4) da mille tonn. nell'apposito alloggiamento lasciato tra i getti eseguiti alla voce 27.

30 - Messa in leggera tensione dei martinetti da 1000 t. in modo da annullare la tensione negativa della struttura in ferro dei quadri clinici che ancora collega i due elementi in c.a. in cui risultano divisi e contemporanea taratura delle tensioni nei cavi delle travi del solettone. (Entra in funzione l'apparecchiatura elettronica di controllo della posizione della Torre).

c) Intervento attivo (Tav. 7).

Operazioni preparatorie — Consistono nei provvedimenti che assicurino la solidarietà completa tra la struttura provvisoria in c.a. eseguita all'esterno del basamento della Torre ed il cilindro murario originale.

Fondamentalmente le opere previste sono costituite da travi in c.a. interessanti diametralmente la Torre a quote diverse e collegate da una trave a spirale gettata nel vano scale, (opportunamente isolata dal pietrame originale) e da una camicia in c.a. all'interno della Torre. Assicurata la completa unione fra le due parti si passa a liberare dalla continuità con le fondazioni originali il cilindro basamentale con la resezione dei ferri che ancora uniscono le due parti del bloccaggio, fra le guide di scorrimento. Si potrà quindi dare inizio all'intervento attivo; ed ecco le operazioni:

31 - Taglio dei tralicci che ancora uniscono i due getti in cui sono stati conglobati i quadri clinici.

32 - Taglio a forza del basamento della Torre in corrispondenza delle finestre del cilindro di avvolgimento per la costruzione delle travi diametrali (T) di sostegno delle murature.

33 - Costituzione della trave elicoidale (T2) che inserendosi sulle travi diametrali, poggia sull'intradosso del vano della scala.

34 - Costituzione di travi verticali (Tv) tangenti nella parte interna del cilindro cavo della Torre che inserendosi nelle travi radiali sostengono mediante la cintura (C11) le sezioni al disopra del piano di spiccato.

35 - Resezione del piano di spiccato in modo da permettere il sollevamento della Torre dalla sezione al disopra del piano di spiccato stesso.

Operazioni per l'assetto definitivo.

36 - Sollevamento per tratti di circa cm. 25 della Torre, agendo sui martinetti verticali (M3 e M4).

I martinetti posti ad uguale distanza nella circonferenza con centro nel centro di pressione della Torre, assicurano la traslazione verticale; salvo eventuali rettifiche date con variazioni nella pressione del fluido. La direttrice del movimento è anche data dalle guide collegate dai sistemi dei cuscinetti a rulli.

Durante l'innalzamento verrà controllata in modo continuo con l'apparecchiatura in opera l'inclinazione della Torre, e con l'apparecchiatura elettronica disposta per i lavori.

37 - La fondazione al disotto del piano di spiccato verrà tenuta in forza durante queste operazioni, mediante l'applicazione di martinetti e spessori dati da lamiere di ferro e cunei.

38 - Ad ogni tratto del sollevamento verranno sopraelevati i pilastri radiali (M) interposti tra la fondazione che resta fissa e il piano di spicco che viene innalzato.

39 - Le operazioni di sollevamento verranno proseguite fino ad avere il piano della Torre alla quota definitiva prevista.

d) Stabilizzazione della nuova situazione.

40 - Dopo conseguita la posizione voluta, si iniziano i getti delle travi (TR2) in c.a. che vengono a collegare i punti diametralmente opposti dell'anello dell'involuppo di travi tangenti, passando fra i pilastri radiali costruiti fra la fondazione e il piano di base della Torre.

41 - Completamento dei getti fra l'anello d'involuppo dei travi tangenti ed il basamento della Torre, e conseguente completamento della platea totale circolare innervata (S).

42 - Dopo la maturazione del conglomerato cementizio, demolizione delle strutture provvisorie eseguite per il lavoro.

43 - Finitura all'estero delle opere di sostegno e di ampliamento delle fondazioni, con gradini, lastricati, asfalti e tappeti erbosi, assicurando la completa educazione delle acque meteoriche in modo da non avere infiltrazioni nel sottosuolo.

Conservazione del Monumento nel tempo.

44 - Il monumento dotato da una base di appoggio dell'estensione progettata risponde a tutti i requisiti della statica.

Eventualmente può essere provveduto a variare di modeste entità la pendenza della Torre mediante la precompressione delle travi con i cavi i cui alloggiamenti sono già considerati nel progetto. È da notare che le travi sono progettate con vari alloggiamenti di cui alcuni liberi che potranno essere usati nel tempo ove si riscontrino l'opportunità di ulteriori interventi.

Sono previsti particolari sistemi esecutivi per preservare le armature in ferro ed i cavi del precompresso dall'azione di agenti esterni.

31 Agosto 1963

NELLO BEMPORAD - ENZO VANNUCCI
PROPOSAL FOR PROVISIONAL AND
DEFINITIVE WORK ON THE CONSOLIDATION
OF THE TOWER OF PISA.
SUMMARY.

The tower, besides leaning as is well known, has also sunk on account of its weight, which has squeezed out the water from the underlying ground. It is feared that the ground will begin to crack under the burden. It is therefore proposed to raise the tower to its original level, which is that of the other contemporary monuments of the Piazza dei Miracoli. The present difference between the two levels of about 1.80 m. allows one, when the entire tower has been lifted, to insert between the present foundations and the projecting building a reinforced concrete slab of circular shape spreading out from the centre of pressure so as to carry the weight within the limits of safety. The whole operation will be carried out on the surface without disturbing the balance of pressures in the ground and around. Four stages are proposed.

a) PROVISIONAL WORK. This constitutes an immediate security measure and is set out so as to fit in with the later work. It will be of rapid execution and consists of a reinforced concrete ring resting on the ground, from which a radial framework will be fixed at an angle with iron frames supporting the tower round its base.

b) TRANSFORMATION OF THE PROVISIONAL WORK OF SUPPORT FOR SUCCESSIVE LIFTING OPERATIONS. The ring will now be enlarged, becoming a strengthened and extended platform all around the tower. This will rest on the ground outside the ring which supports the frames of the provisional structure. These latter will now be changed, by means of reinforced concrete castings forming a definitive support divided into two parts: the first and lower one will join up with the strengthened platform; the second will link up with the tower by means of a reinforced concrete covering and other measures which might make it an adequate support for the entire weight of the tower.

The tower can then be lifted by a ring of hydraulic jacks placed between the two sections, once the jacks are put into place and the provisional girders are removed.

c) ACTIVE INTERVENTION. The tower will be lifted on this system of pre-arranged supports, returning the tower with its base to its original level. The old foundations will be kept intact.

d) FIXING THE NEW SITUATION. Between the raised tower's base and the original foundations a structure will be set up which will complete the platform underneath the tower, while keeping the old foundation intact. The pressure of the new foundations will be reduced to about 0.600 Kg/cm².