

Sistema di strallatura sub-orizzontale della Torre di Pisa

La progettazione concettuale del sistema di strallatura sub-orizzontale provvisoria della Torre di Pisa, oggetto della presente relazione, è stata elaborata dallo scrivente per conto del Consorzio Progetto Torre di Pisa, in accordo con le specifiche tecniche e funzionali derivanti dalle ipotesi generali di progetto delle opere di consolidamento fondazionale.

Si considerano implicite, ed appartenenti ad una *analisi generale di fattibilità ed affidabilità eseguita* dal Comitato di Coordinamento per la Salvaguardia della Torre di Pisa (1), le seguenti indagini: l'analisi globale della risposta strutturale della Torre soggetta alle azioni dirette di tiro degli stralli ed indirette indotte dalle operazioni geotecniche, le verifiche di resistenza e stabilità locali e globali e l'ammissibilità della pressione di contatto in esercizio trasmessa dal sistema di strallatura al paramento murario della Torre.

Il progetto della strallatura sub-orizzontale è stato elaborato in base alle seguenti ipotesi progettuali ed alle osservazioni integrative fatte dalla Commissione tecnica in data 8 luglio 1996:

- induzione di un momento esterno stabilizzante massimo di circa 70 MNm, con un sistema di strallatura posizionato in corrispondenza del 3° ordine (2ª cornice). La legge di variazione dei tiri risultanti (R) e dei momenti (M) trasmessi alla Torre dal sistema di strallatura in funzione della deviazione θ rispetto all'asse di simmetria dei tiri (considerando un tiro massimo del singolo strallo di 1500 kN), è illustrato nel diagramma di fig. 1;
- minimizzazione della componente del tiro diretta parallelamente all'asse della Torre;
- trasmissione delle azioni con meccanismi dipendenti dalle sole condizioni di equilibrio. La soluzione strutturale è caratterizzata principalmente dalla trasmissione di forze gravitazionali note (mediante zavorramento) evitando la possibile generazione di forze per compatibilità elastica, derivanti da possibili ed incerti stati di interazioni deformative, tra le varie sottostrutture componenti il sistema globale. Il sistema di strallatura deve evitare principalmente l'interazione coatti-

La presente pubblicazione riguarda la progettazione concettuale ed esecutiva del sistema di strallatura sub-orizzontale provvisoria della Torre di Pisa. Essa è parte integrante delle operazioni di carattere conoscitivo, progettazione esecutiva e realizzazione degli interventi sulla Torre, eseguite dal Comitato per gli interventi di consolidamento e restauro della Torre di Pisa. Gli stralli, in funi di acciaio ad alta resistenza, sono configurati secondo gli schemi di tensostruttura a curvature contrapposte. Gli stralli possono trasmettere alla Torre uno sforzo massimo di 1600 kN, generato da un sistema di tiro costituito da zavorre di piombo e attuatori oleopneumatici, compensati ad azoto per garantire forze. Lo sforzo degli stralli viene trasmesso alla torre usando il nucleo della torre stessa quale sella di rinvio di 6+6 funi le quali permettono di ripartire lo sforzo di tiro raggiungendo valori molto modesti di pressione di contatto con il paramento murario.

Sub-horizontal cable stayed support system for the Tower of Pisa

This paper discusses the design and execution of the sub-horizontal temporary support system for the Tower of Pisa. This is an integral part of the work being carried out for the build-

up of information, executive planning and the completion of the operations on the tower. The work was carried out by the committee responsible for the consolidation and restoration work on the Tower of Pisa. The stays consist of high resistance steel cables, configured in accordance with the counter-curve tensile structure layout. The stays are able to transmit a maximum effort of 1600 kN to the Tower, generated by a drawing system made up of lead weights and oil-pneumatic drivers, which are nitrogen compensated to guarantee constant effort. The effort of the stays is transmitted to the tower using the nucleus of the tower itself as a return seat of 6+6 cables which divide up the drawing force reaching very modest contact pressure values with the masonry surface.

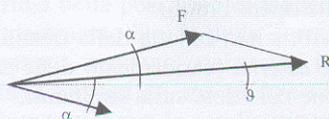
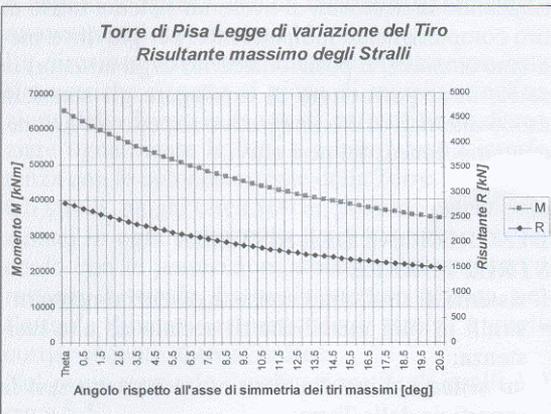
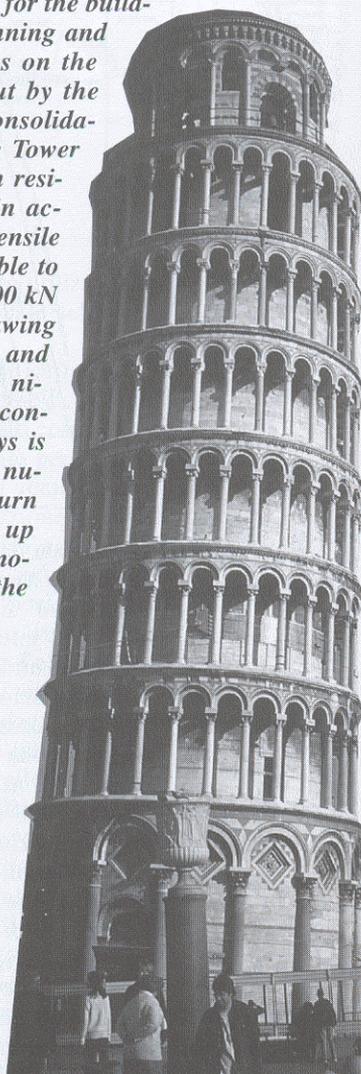
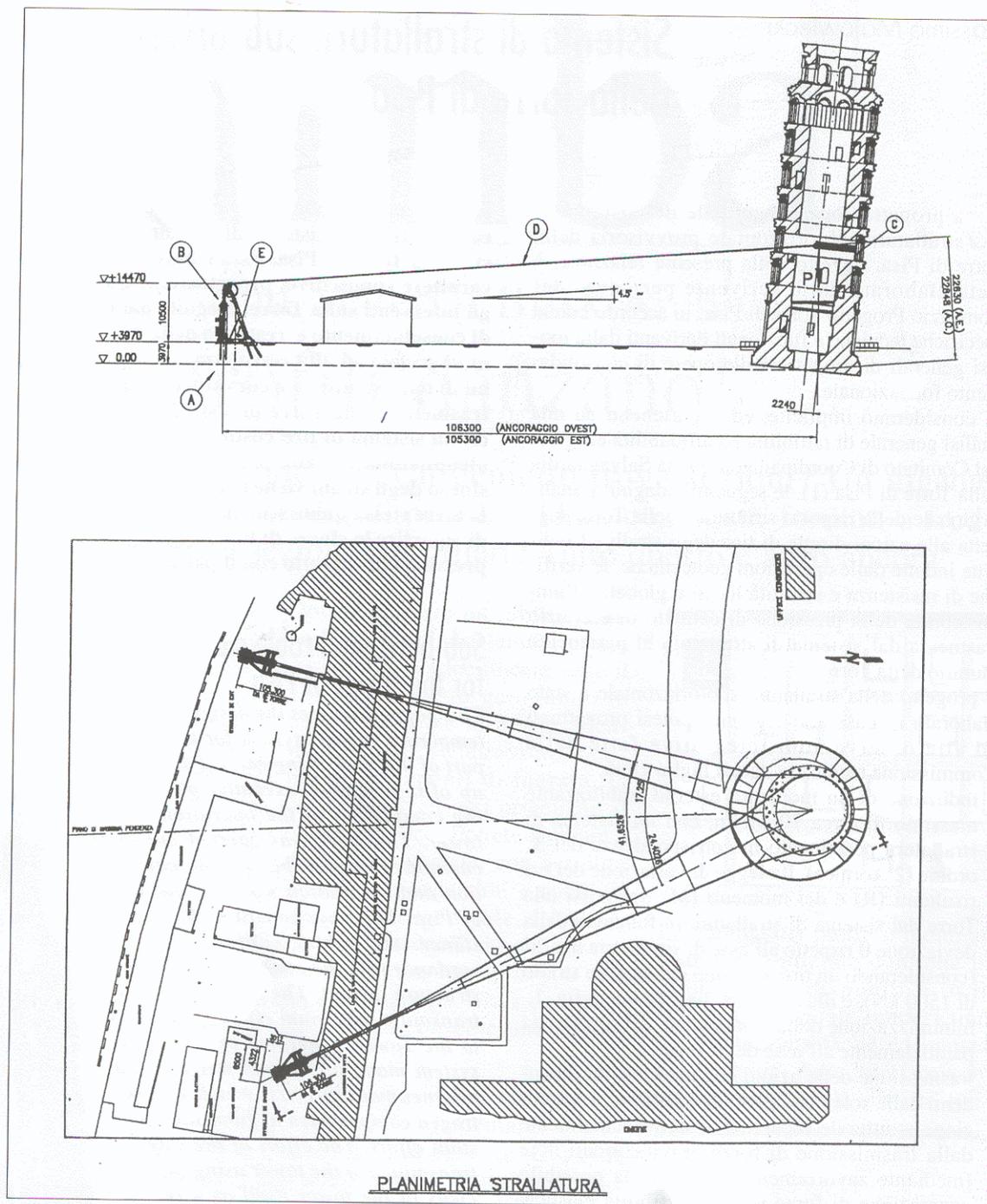


Fig. 1 - Legge costitutiva del tiro e del momento risultante.

Fig. 2a
Disposizione
del sistema
di strallatura.



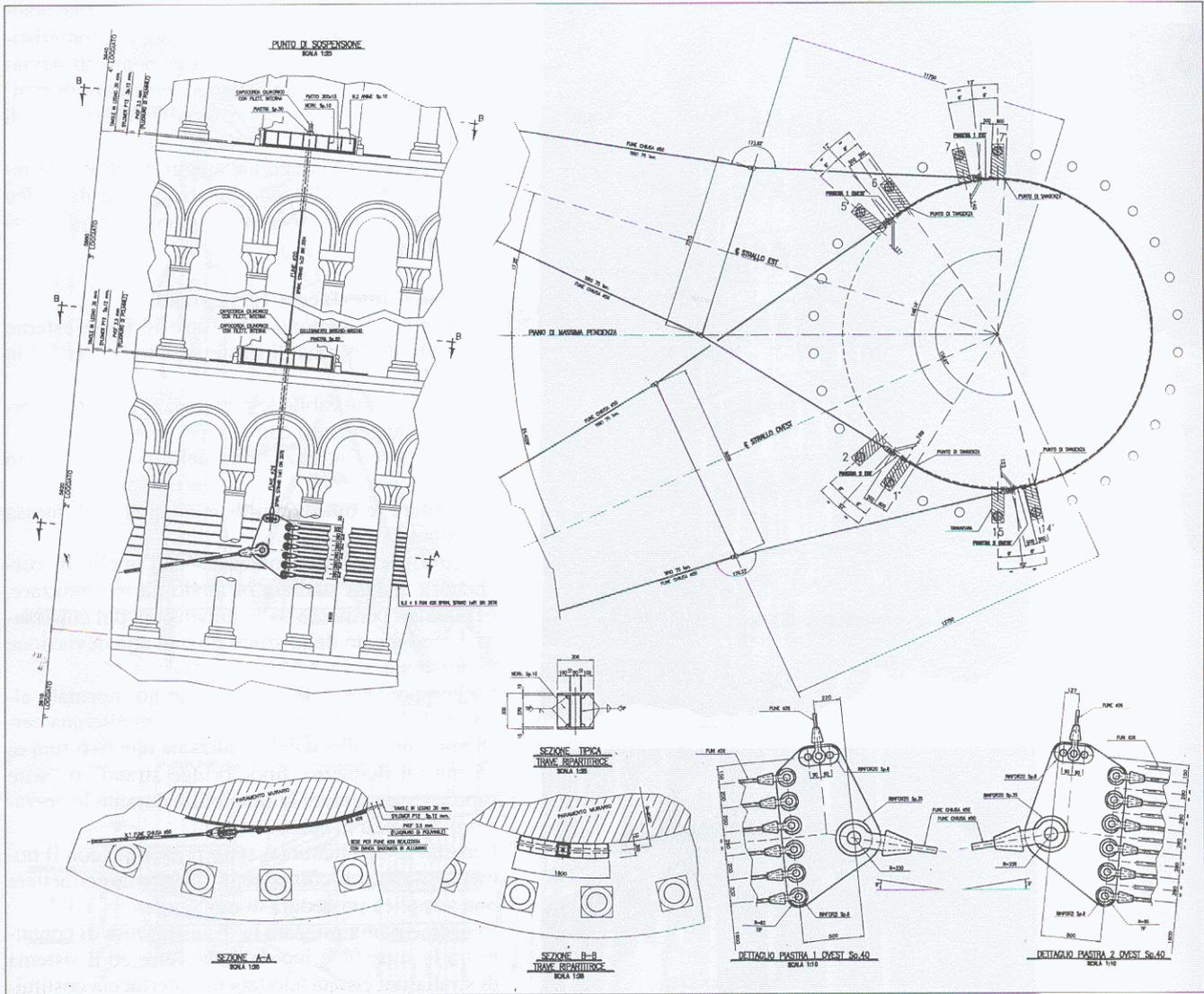
- va causata da spostamenti della Torre di origine termica e da cedimenti fondazionali;
- possibilità di variazione discreta dell'azione indotta, all'interno del valore massimo prescritto, mediante attuatori oleodinamici;
- minimizzazione delle azioni tangenziali di contatto trasmesse alle opere litoidi;
- eliminazione di vibrazioni indotte dalla trasmissione dell'azione esterna (caricamento delle zavorre) e dall'azione del vento sulla strallatura.
- minimizzazione dell'impatto visivo del sistema di strallatura;
- eliminazione dell'interferenza degli stralli con le operazioni di restauro a livello terra.

Il progetto originale (luglio 1996) di strallatura sub-orizzontale è stato modificato in accordo con le presenti specifiche tenendo inoltre in considerazione le osservazioni relative alle specifiche tecniche del 27 ottobre 1997 (linee guida per l'adequa-

mento del progetto). A seguito della riunione del Comitato del 29 e 30 Novembre 1997, sono state delineate le linee guida definitive (comunicate il 23 Dicembre 1997) per l'adeguamento del progetto, ribadendo la necessità di avere un sistema misto di tiro completamente indipendente: per gravità e mediante attuatori. Il posizionamento degli attuatori in serie, deve permettere di impiegare gli stessi in modo alternativo e/o integrativo rispetto all'azione, contemporanea, dei pesi attivi.

DESCRIZIONE DEL SISTEMA STRUTTURALE

- Il sistema di strallatura consiste essenzialmente in:
- stralli in funi metalliche di acciaio ad alta resistenza;
 - un sistema d'interfacciamento e contatto con la superficie della Torre;



- un sistema d'ancoraggio ;
- un sistema di tiro mediante attuatori oleopneumatici servoassistiti;
- un sistema fondazionale con micropali.

Stralli in funi metalliche

Gli stralli, realizzati in funi spirodali di acciaio ad alta resistenza (1570 N/mm^2), presollecciate al 50% del carico nominale di rottura in modo da stabilizzare il valore del modulo elastico ($165 \pm 5 \text{ kN/mm}^2$) sono disposti, in pianta, secondo due direzioni, divaricate rispetto alla traccia del piano di massima pendenza, di circa 41° ($23.75^\circ + 17.25^\circ$) d'angolo compreso, con un incremento (secondo le nuove specifiche) di circa 14° .

Le direzioni degli assi delle strallature non sono simmetriche rispetto al piano di massima inclinazione della Torre, in modo da permettere di distanziare ugualmente le funi e minimizzare l'interferenza con le colonne esterne della Torre.

Gli stralli, lunghi circa 100 m, possono essere posizionati in ogni ordine (livello delle cornici) in accordo con le prescrizioni attuative del progetto di restauro generale. La posizione considerata, nell'attuale dimensionamento degli stralli, è quella corrispondente al terzo ordine.

Nel piano verticale l'inclinazione degli stralli è di circa 5.5° .

Le funi degli stralli cingono la Torre utilizzando la propria configurazione circolare quale sella d'appoggio (fig. 2).

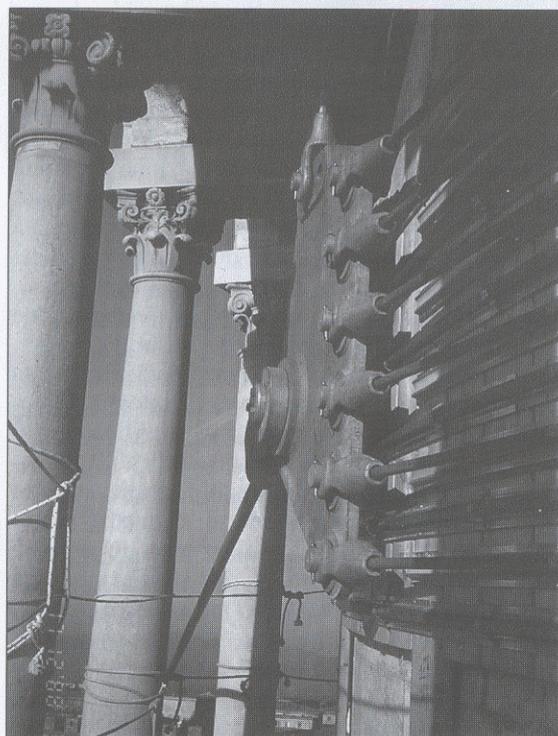
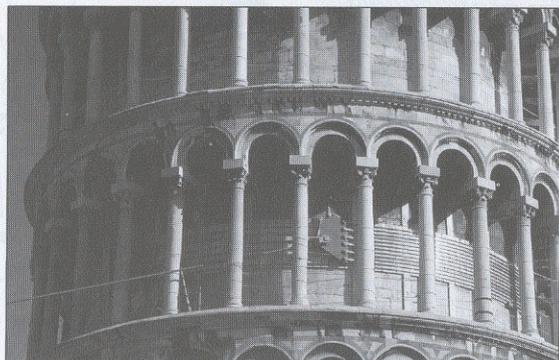
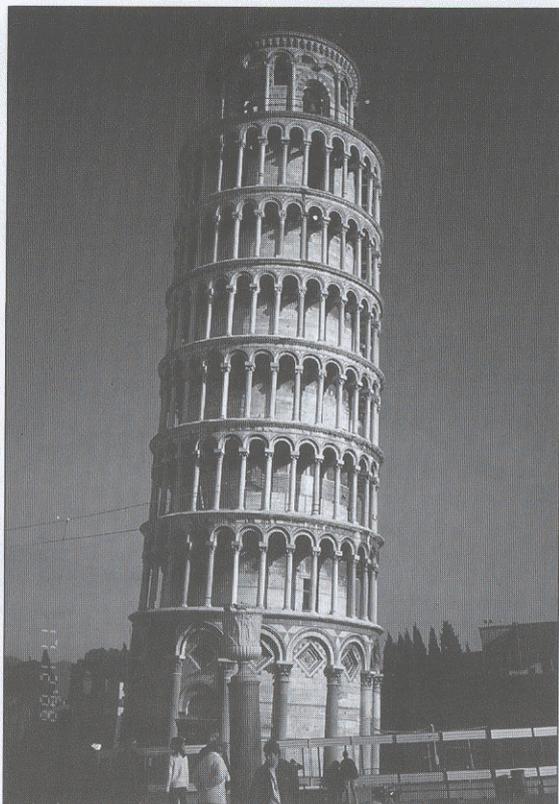
I due rami dello strallo sono tra di loro uniti, con speciali funi di collegamento regolabili, in modo da ottenere una curvatura trasversale contrapposta tipica delle tensostrutture piane, utile per impedire le oscillazioni delle funi indotte dal vento fuori dal loro piano e per regolare l'angolazione d'entrata delle funi in corrispondenza del colonnato. L'angolazione d'uscita degli stralli sarà controllata mediante rilievo topografico della posizione delle colonne interessate al passaggio degli stessi. Questo rilievo è stato utilizzato per l'elaborazione costruttiva di officina del sistema di strallatura.

Prima della posizione di tangenza degli stralli con il paramento litoide della Torre, all'interno del colonnato, vengono posizionati i cavalletti di deviazione formati da una piastra metallica di interfacciamento dove lo strallo singolo, realizzato con una fune spirodiale di 54 mm di diametro, si trasforma nel sistema di avvolgimento della Torre formato da 6+6 funi di 26 mm di diametro. La componente della forza degli stralli, diretta parallelamente all'asse della Torre, viene trasmessa da una fune di 26 mm di diametro verso il colonnato superiore (Fig. 3).

La stabilità, garantita dallo sforzo di trazione, e

Fig. 3
Collegamento degli stralli alla Torre

Foto 1, 2, 3
Posizionamento
dello strallo in
corrispondenza
del 2° loggiato.



l'effetto pendolare, che permette l'automatico adattamento del collegamento, sono state le caratteristiche principali richieste al collegamento di deviazione in ordine a minimizzare le incertezze di posizionamento e quelle relative alle operazioni di montaggio.

In corrispondenza degli ancoraggi, i capocorda regolabili degli stralli sono dotati di celle di carico che permettono di tenere sotto monitoraggio le forze applicate.

Sistema d'interfaccia Torre-stralli

Gli stralli trasmettono alla Torre le forze esterne mediante un sistema di trasferimento progettato in modo da:

- rendere ammissibile le pressioni di contatto (normali e tangenziali) con la superficie litoide;
- permettere l'utilizzazione della porta del terzo ordine;
- facilitare le operazioni di montaggio e di messa in opera.

La configurazione geometrica dell'anello di cerchiatura è stata studiata in modo da minimizzare, per quanto permesso dalle dimensioni del colonnato, l'incremento degli sforzi dovuta alla deviazione di direzione.

La componente dello sforzo esterno, normale all'asse della Torre, viene trasmessa tramite una cerchiatura pre-sollecitabile realizzata con 6+6 funi di 26 mm di diametro, tipo "bridge strand" o "wire rope" per aumentare la flessibilità durante le operazioni di messa in opera.

L'anello di cerchiatura è stato progettato con il numero minimo di componenti, idoneo a permettere una semplice procedura di montaggio.

In ordine a minimizzare la disuniformità di contatto tra la superficie litoide della Torre ed il sistema di strallatura è stata adottata un'interfaccia costituita da:

- guide delle funi di tipo lineare in alluminio e Teflon.
- uno strato di doghe in legno, articolate, di 2,5 cm per la conversione dei carichi lineari in carichi distribuiti;
- uno strato di 3 cm costituito da un cuscino pneumatico o, in alternativa, da uno strato di neoprene alveolare tipo "CELASTO", per assicurare l'uniforme distribuzione delle pressioni;
- uno strato di polytene dello spessore di 2 mm a diretto contatto con la muratura.

L'interfacciamento, permette di ottenere un'affidabile distribuzione uniforme della pressione sulla muratura (20 - 25 N/cm²) rendendola indipendente dalle incertezze legate alla reale distribuzione degli sforzi sulle funi fascianti e consente, inoltre, di eliminare (nel caso di soluzione pneumatica) o ridurre notevolmente (nel caso di neoprene alveolare), le eventuali forze d'attrito tangenziali.

La componente degli sforzi di strallo, diretta parallelamente all'asse della Torre, viene trasmessa al nucleo centrale mediante particolari metallici di interfacciamento, posizionati in corrispondenza delle "pietre pontae".

Questi particolari permettono di utilizzare il paramento litoide principale per la diretta trasmissione degli sforzi trasmessi, generando modeste pressioni locali.

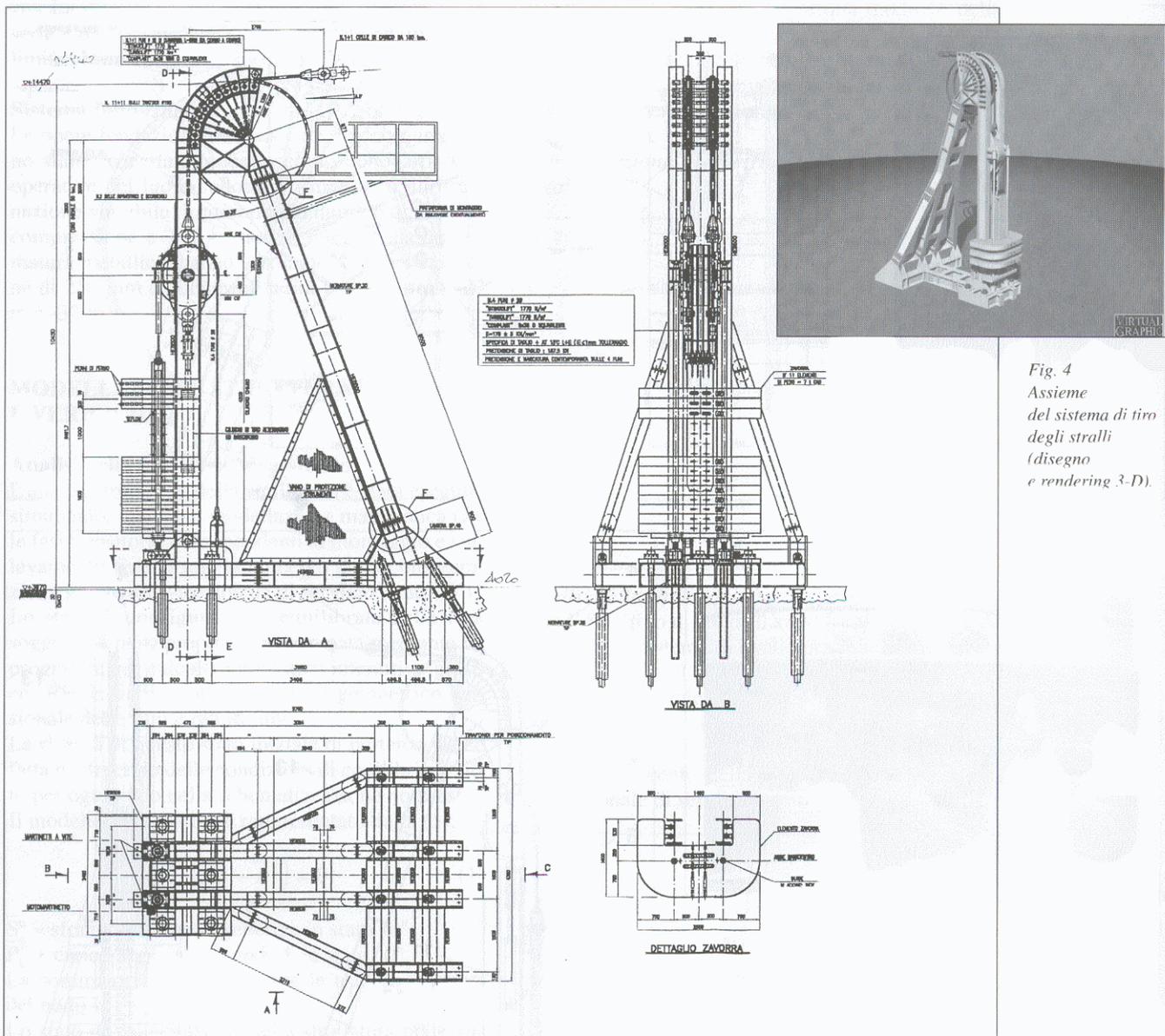


Fig. 4
 Assieme
 del sistema di tiro
 degli stralli
 (disegno
 e rendering 3-D).

Ancoraggio a gravità

Ad una distanza di 103 m dall'asse della Torre, in una zona compresa tra le mura della città e l'Opera Primaziale vengono disposte le strutture d'ancoraggio, atte a trasmettere i tiri degli stralli alle opere fondazionali.

L'ancoraggio degli stralli è costituito da un cavalletto in struttura metallica Fe 510 C di 10.50 m d'altezza e 5.5x4 m di base, realizzata con profili HEB 500 con collegamenti di tipo saldato e bullonato.

In sommità del cavalletto è posizionata una sella di deviazione delle funi di forma circolare, eseguita con rulli su cuscinetti a tamburo in modo da minimizzare lo sforzo di scorrimento dovuto all'attrito volvente. La sella ha raggio pari a 20 volte il diametro delle funi per non avere alcuna penalizzazione sul proprio carico di rottura. Le funi spiriodali vengono deviate in modo da assumere lo stesso angolo dell'asta tesa del cavalletto così da posizionare agevolmente i martinetti di tiro.

Le funi spiriodali principali si collegano ad una carrucola di 1.20 m di diametro sulla quale, con un rimando in seconda, vengono posizionate le funi di deviazioni realizzate con 4 funi di tipo spiriodale o

“wire rope” di 26 mm di diametro. In questo modo è stato possibile dimezzare il peso delle zavorre di piombo con le quali è realizzato il carico gravitazionale.

La zavorra in piombo del peso totale di 750 kN, è costituita da n° 12 pezzi in modo da potere regolare, con sufficiente discretizzazione, il carico di esercizio desiderato dalle necessità operative del progetto geotecnico. Nel caso sia richiesta una maggiore sensibilità relativa all'applicazione dei tiri è possibile applicare carichi parziali sovrappo-
 nendo alla prima zavorra piastre di dimensioni variabili secondo le necessità.

Impiegando due martinetti idraulici a vite, le zavorre vengono sospese agli stralli mediante un tirante in piatti d'acciaio; con degli spinotti di 40 mm di diametro si esegue il collegamento delle zavorre che si desidera attivare. Due tubi verticali in acciaio inox, passanti attraverso i fori dei martinetti, permettono di guidare le zavorre evitando spostamenti e vibrazioni laterali.

Il cavalletto d'ancoraggio è dotato di una base metallica di profilati composti HEB 500 e progettata in modo da potere accogliere, direttamente, l'ancoraggio dei micropali di fondazione.

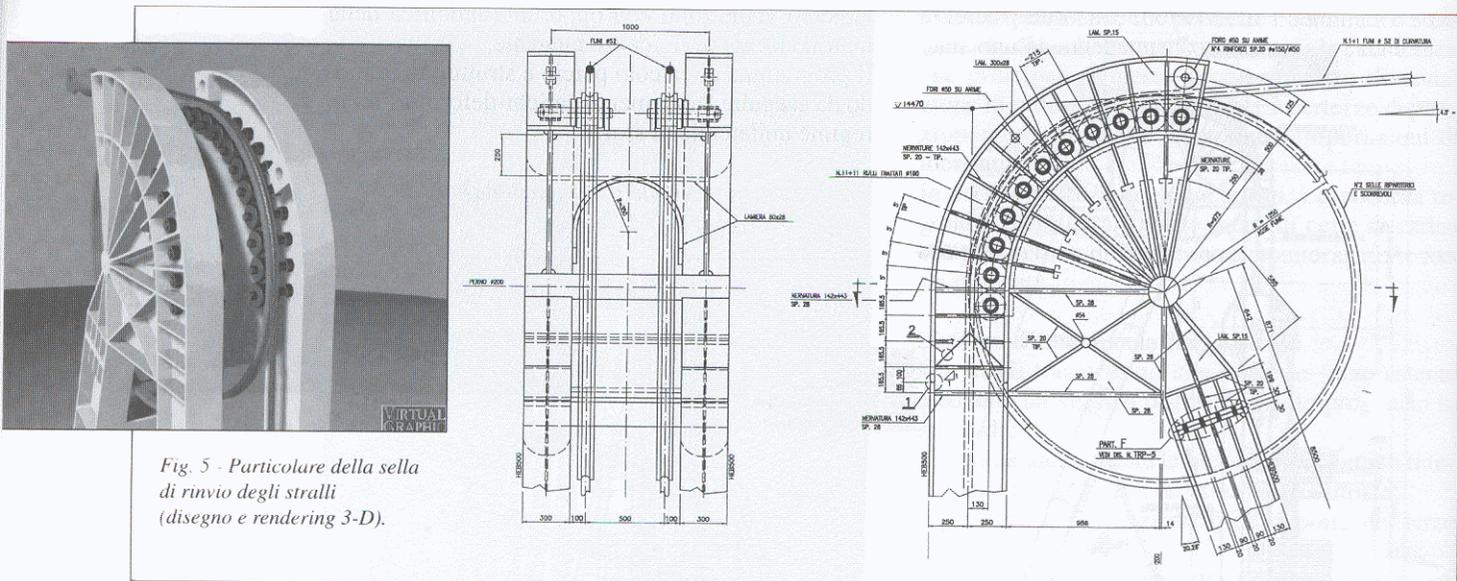


Fig. 5 - Particolare della sella di rinvio degli stralli (disegno e rendering 3-D).

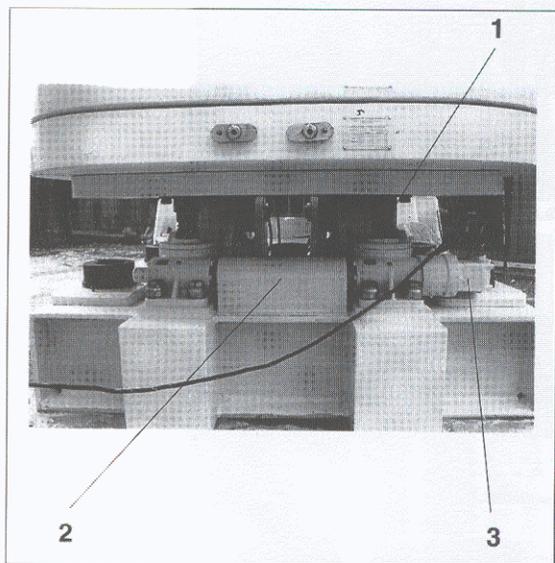


Fig. 6
Sistema di tiro mediante attuatori servoassistiti
1) martinetti a vite
2) albero cardanico di sincronizzazione e relativo carter di protezione
3) motore idraulico orbitale.

Sistema di tiro mediante attuatori servoassistiti

La scelta della tipologia dell' attuttore lineare, atto ad imprimere una sollecitazione di 1500 kN, come richiesto dalle specifiche generali, è stata condizionata principalmente dalla necessità di scorrelare la struttura d' ancoraggio dalla Torre allo scopo di non indurre sovrasollecitazioni da: variazioni termiche, azioni locali del vento sugli stralli, azioni sismiche e spostamenti differenziali impressi. In particolare è determinante, in caso di azioni dinamiche (quali vento e sisma) il tempo di reazione dell' attuttore (0.002 sec.).

Per quanto sopra e tenendo in considerazione il livello di affidabilità statistica richiesto dalle specifiche, si adottano, per ogni posizione di tiro, n° 2 attuatori lineari, oleopneumatici, compensati ad azoto, a sforzo di servizio costante, servoassistiti con monitoraggio continuo.

Il sistema di tiro mediante attuatori è completamente indipendente dal tiro indotto per gravità. Il sistema può essere utilizzato in modo sostitutivo o integrativo tenendo però presente che non è possibile sommare completamente i due contributi in eserci-

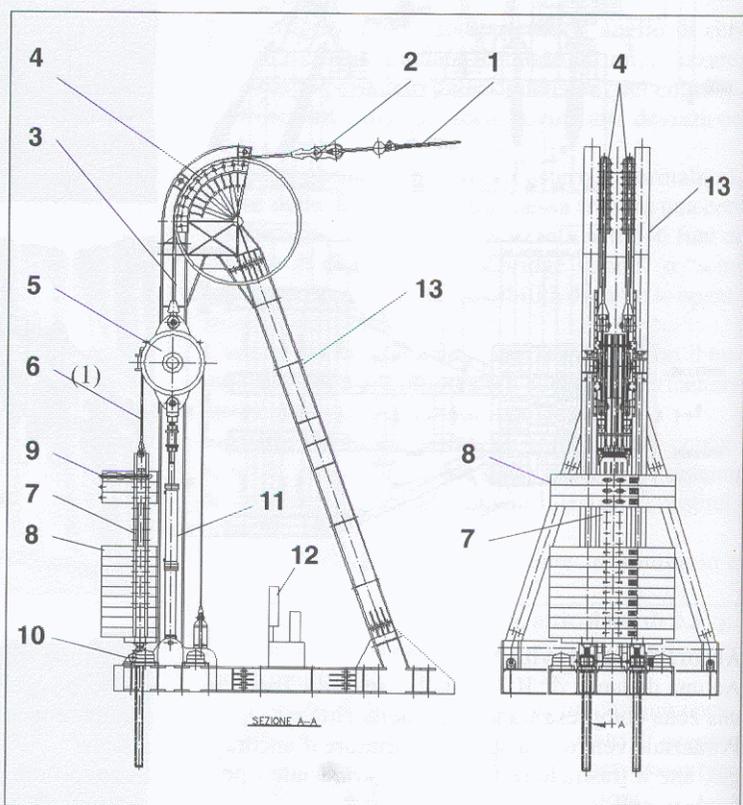


Fig. 7 - Descrizione delle componenti del blocco d' ancoraggio:

- 1) strallo
- 2) cella di carico con perno strumentato
- 3) funi di curvatura (n. 2)
- 4) sella di deviazione delle funi di curvatura
- 5) bozzello
- 6) funi di sollevamento zavorre (n. 4)
- 7) barra di trazione
- 8) zavorre (est n. 12 - ovest n. 12 + 1 addizionale)
- 9) perni di fissaggio delle zavorre alla barra di trazione
- 10) gruppo di sollevamento zavorre
- 11) martinetti oleodinamici intensificatori (n. 2)
- 12) centralina elettro-idraulica
- 13) struttura d' ancoraggio in carpenteria metallica.

zio. La somma dei tiri possibili con i due sistemi in serie è da considerarsi corrispondente ad uno stato limite ultimo.

Sistema fondazionale

Le opere fondazionali del sistema d'ancoraggio sono state progettate tenendo conto delle difficoltà operative del luogo, adottando micropali ad inclinazione variabile. I micropali in numero di 14 (7 in compressione e 7 in trazione), integrati da un'armatura metallica, hanno un diametro di perforazione di 250 mm ed una profondità variabile tra i -22 m e -32 m.

MODELLAZIONE STRUTTURALE E VERIFICHE

Analisi della tensostruttura-strallo

L'analisi strutturale della strallatura è stata eseguita simulando, mediante modellazione matematica (2), le fasi transitorie corrispondenti al montaggio e sollevamento fino al raggiungimento della configurazione geometrico-tensionale di servizio (stato '0'). Lo stato di configurazione equilibrata delle funi soggetta al peso proprio è determinata mediante un programma di calcolo automatico interattivo grafico (RETE) indirizzato alla ricerca geometrico-tensionale delle funi e reti di funi.

La ricerca di questo stato iniziale di partenza viene fatta usufruendo delle condizioni di equilibrio scritto per ogni nodo nella schematizzazione nodi-aste. Il modello matematico è rappresentato dalla (1):

$$\sum (\bar{S}_{ki}^o + \bar{P}_k^o) = 0 \quad (1)$$

\bar{S}_{ki}^o = sforzo dell'asta k_i generica in stato "0";
 \bar{P}_k^o = carico applicato al nodo k in stato "0".
 La sommatoria è estesa a tutte le aste concorrenti del nodo k .

Lo stato di sollecitazione della strallatura nelle varie fasi transitorie considerate è possibile ottenerlo mediante il programma TENSO, che risolve la maglia nodi-aste equivalente mediante il metodo dell'equilibrio seguendo quanto espresso in forma sintetica dalla (2):

$$[k]\{\bar{\delta}_k\}^r = \{\bar{P}_k\} + \{\bar{R}_k^X\}^{r-1} \quad (2)$$

dove:
 $[k]$ = matrice di rigidità globale $[k] = [k_G + k_E]$
 $\{\bar{\delta}_k\}^r$ = vettori degli spostamenti ottenuti alla r -esima iterazione
 $\{\bar{P}_k\}$ = carico applicato al nodo k
 $\{\bar{R}_k^X\}^{r-1}$ = carico fittizio dei termini non lineari.

Il procedimento numerico di risoluzione adottato per il sistema di equazioni non lineari che deriva dall'assemblaggio delle matrici elementari è di tipo semi-incrementale per quanto riguarda i carichi e la non linearità materiale, mentre è di tipo iterativo per quanto attiene alla non linearità geometrica. L'elemento finito fune per definizione non ammette stato di sollecitazione di compressione ($S < 0$). Ad ogni incremento di carico il programma controlla le sollecitazioni per ogni asta e, in caso di $S_{kj} < 0$, l'e-

lemento viene tolto con opportuna modifica della matrice locale di rigidità tangente. Il programma di calcolo perciò è strutturato in modo da eseguire l'andamento carichi-deformazioni in regime unilaterale di sforzi.

Configurazione geometrica-tensionale di servizio (Stato '0')

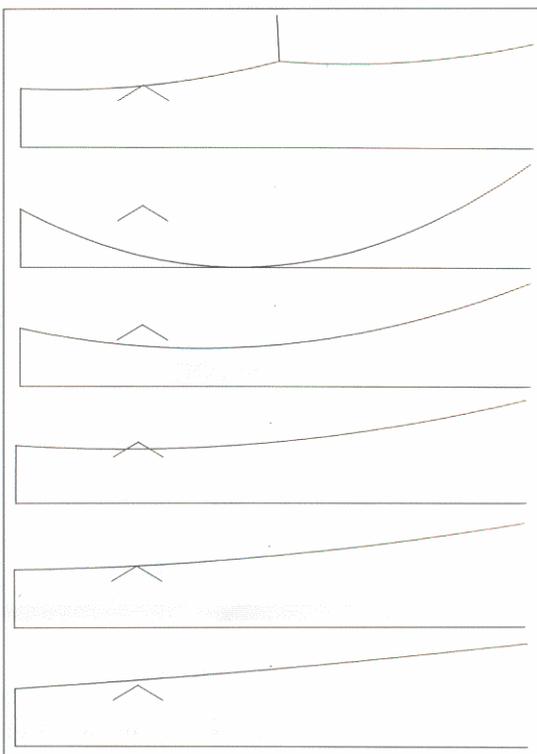


Fig.8 Configurazione di equilibrio degli stralli tensostrutturali - pianta.

Analisi delle situazioni in transitorio

Con l'obiettivo di controllare le forze necessarie da applicare al sistema di strallatura in fase transitoria corrispondente al montaggio e sollevamento sopra l'Opera Primaziale, è stata eseguita un'analisi del comportamento delle funi soggette al proprio peso per configurazioni geometriche incrementali fino al raggiungimento della configurazione geometrico-tensionale di servizio (stato "0").

Fig. 9 - Ricerca del tiro di distacco degli stralli dalla copertura dell'opera primaziale.



Soluzione A:
 Sforzo nella fune 50 kN
 Sforzo nel pendolo 17 kN

 Soluzione B
 Fase 1: Sforzo nella fune 25 kN

 Soluzione B
 Fase 2: Sforzo nella fune 50 kN

 Soluzione B
 Fase 3: Sforzo nella fune 100 kN

 Soluzione B
 Fase 4: Sforzo nella fune 200 kN

 Soluzione B
 Fase 5: Sforzo nella fune 1500 kN

Soluzione	Fase	Tiro Impresso [kN]	h [m]	Freccia [m]	L Fune [m]
B	1	25	-9.80	15.57	108.384
	2	50	-4.19	7.73	103.950
	3	100	-1.38	3.93	102.790
	4	150	-0.44	2.72	102.573
	5	200	0.02	2.11	102.497
A		5 (Gru)			102.809

Verifica frequenziale della tensostruttura-strallo
 In fase preliminare è stata eseguita l'analisi frequenziale del sistema di strallo in modo da controllare le frequenze naturali ed i relativi modi di vibrare in situazione di servizio. I periodi dei principali modi di vibrare sono riportati nella seguente tabella:

Modo	Autovalore	Frequenza circ.	Periodo[sec.]	Frequenza nat. [Hz]
1	6.28144612e+001	7.92555747e+000	0.792775	1.261392
2	8.01923028e+001	8.95501551e+000	0.701639	1.425235
3	1.15310242e+002	1.07382606e+001	0.585121	1.709047
4	2.43241774e+002	1.55962102e+001	0.402866	2.482214
5	2.43435614e+002	1.56024233e+001	0.402706	2.483203

Fig. 10 - Modi di vibrare degli stralli.

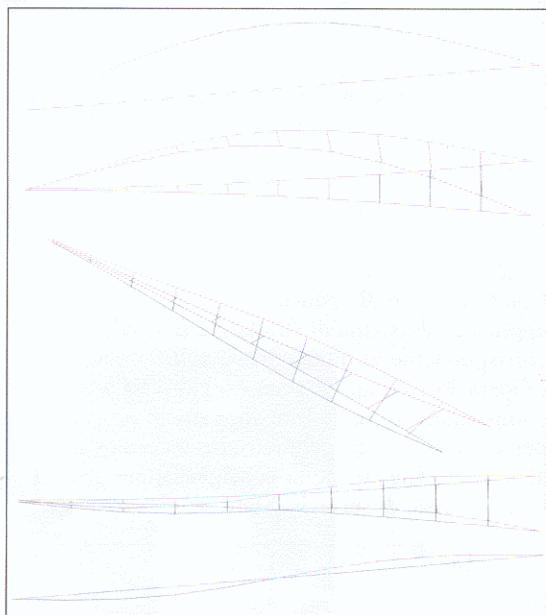
Modo nr. 1

Modo nr. 2

Modo nr. 3

Modo nr. 4

Modo nr. 5



Verifica di resistenza delle funi

Tiro strallo: 1500 kN

Coefficiente di sicurezza minimo richiesto nella condizione "Pretensione + Permanenti": 3.0

Diametro fune	Numero funi per strallo	Tiro su una fune [kN]	Carico minimo di rottura di fune [kN]	Coefficiente di sicurezza
φ 54 S.S. / φ 50 L.C.S.	2	764.6	2643	3.46
φ 26 S.S.	6	127.4	613	4.81
φ 28 W.R.	4	187.5	711	3.79
φ 20 S.S.	1	51.1	363	7.10
φ 16 S.S.	5	32.9	201	6.11

Legenda: S.S. = Spiral Strand; L.C.S. = Locked Coil Strand; W.R. = Wire Rope

Analisi del cavalletto d'ancoraggio

L'analisi strutturale del cavalletto d'ancoraggio è stata eseguita con il metodo dell'equilibrio o degli spostamenti, e mediante elaborazione assistita da computer con procedure interattive grafiche e software indirizzato all'ingegneria civile redatto e controllato in accordo alle CNR-UNI 10024/86 "Analisi di strutture mediante elaboratore: impostazione e redazione delle relazioni di calcolo".

Il programma di analisi strutturale adottato in campo lineare elastico è lo STRAND di Enxsys. Il cavalletto d'ancoraggio è stato analizzato anche

considerando gli effetti di secondo ordine mediante il metodo P-Δ.

Viste e numerazioni

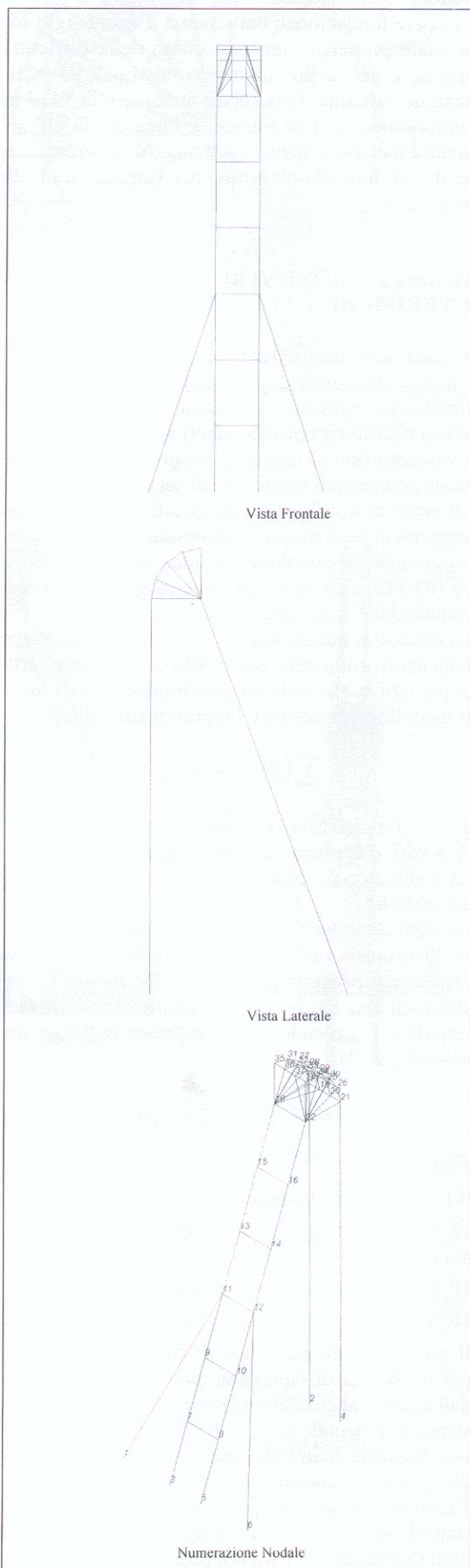


Fig. 11 - Schema del telaio spaziale.

Condizioni e Combinazioni di Carico

Condizione di Carico	Descrizione
1	Peso Proprio Cavalletto
2	Tiro Funi 1500 kN
3	Imperfezione 1/200 N
4	$\Delta T +25^\circ$

Modello Standard:

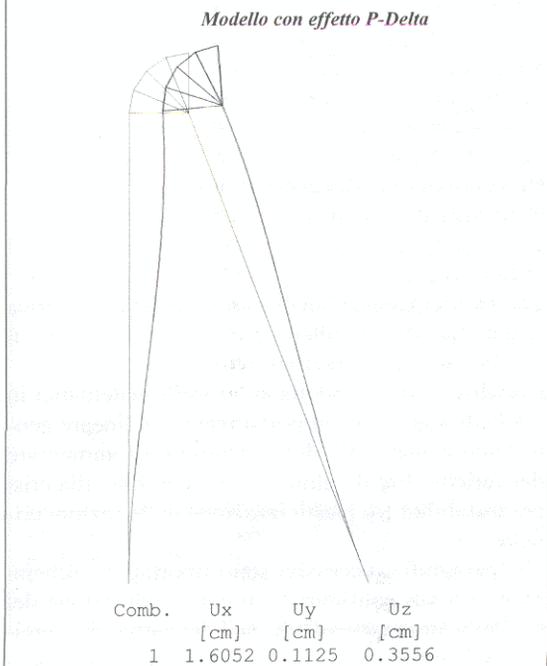
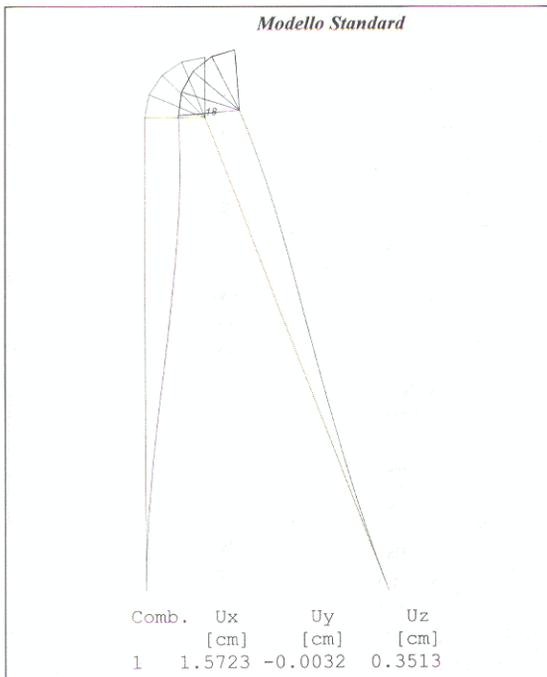
Combinaz. di Carico	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	Cond. 4	Descrizione
1	1.2	1	1		Esercizio
2	1.2	1	1	1	Esercizio + $\Delta T +25^\circ$
3	1.2	1	1	-1	Esercizio + $\Delta T -25^\circ$

Modello con effetto P-Delta:

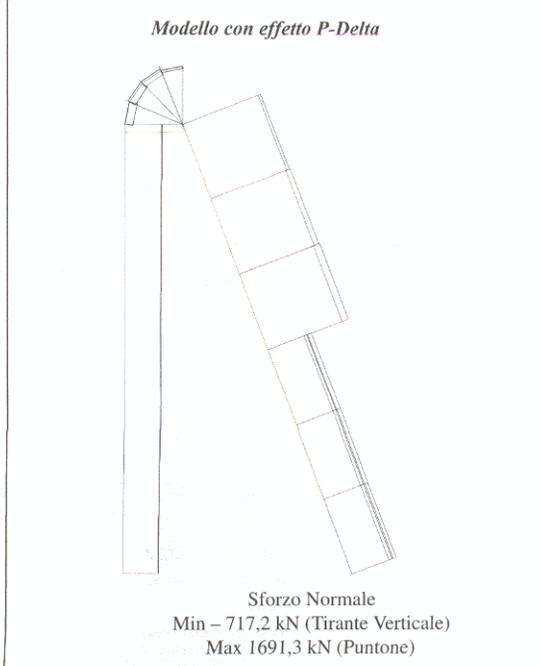
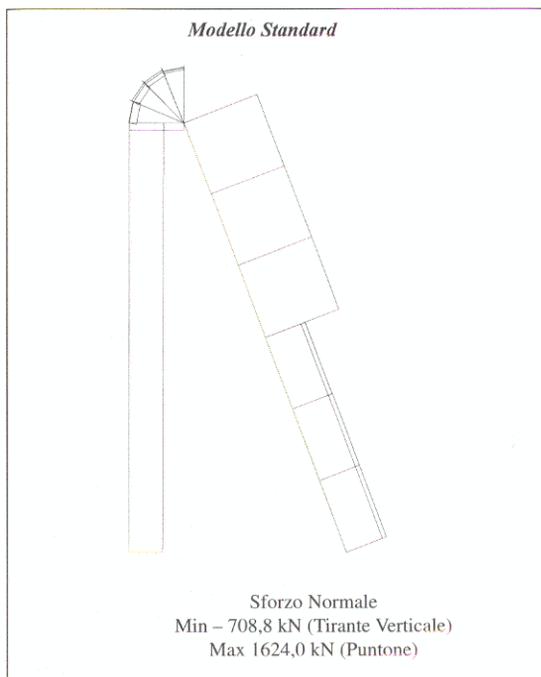
Condizione di Carico	Descrizione
1	Peso Proprio Cavalletto
2	Tiro Funi 1500 kN
3	Imperfezione 1/200 N

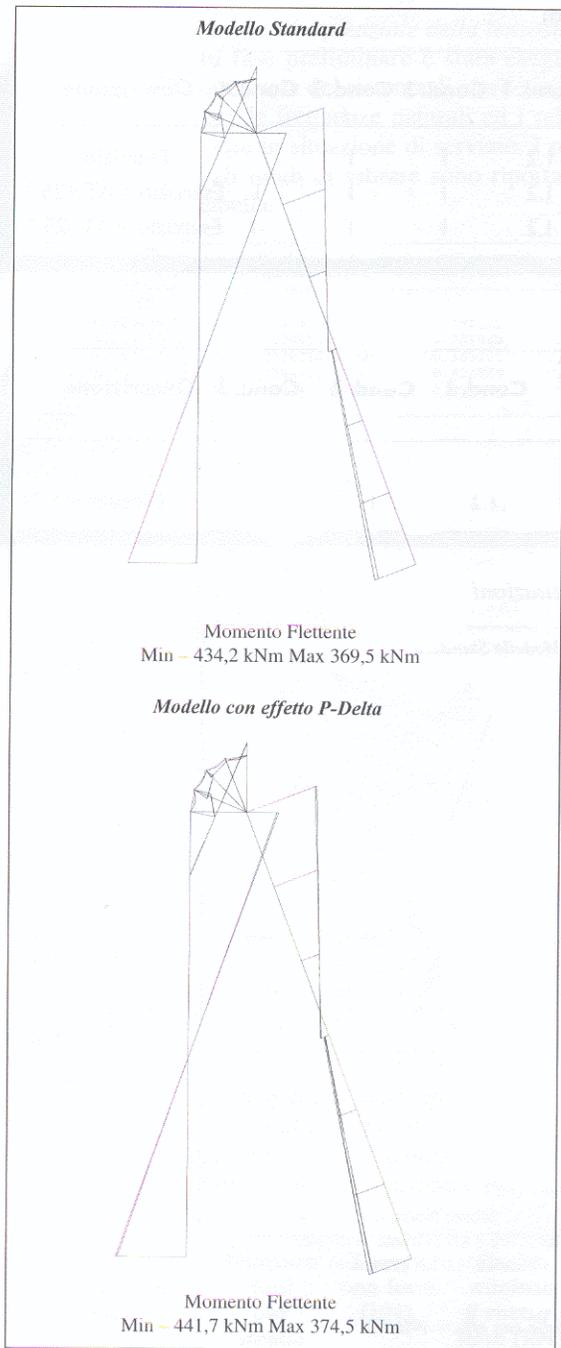
Combinaz. di Carico	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	Descrizione
1	1.2	1	1	Globale

Spostamenti e Deformazioni



Diagrammi Sollecitazioni





Reazioni Vincolari (Modello Standard)

Combinazione I:

Nodo [N]	Rx [N]	Ry [N]	Rz [Nm]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz
6	-305419	-239927	697347	19431	-195427	-59161
5	-355387	17	813649	-7	-224765	-3
4	-89194	-239	-689111	703	-349883	-2
3	-355387	-17	813649	7	-224765	3
2	-89193	239	-689111	-703	-349883	2
1	-305419	239927	697347	-19431	-195427	59161
Tot.	-1500000	0	1643770	0	-1540149	-0

Analisi Frequenziale. Primi Autovalori:

Autovalore [rad/sec ²]	Pulsazione [rad/sec]	Periodo [sec]
1706.3199	41.3076	0.1521
8071.0249	89.8389	0.0699

Fig. 13 - Modi di vibrare del cavalletto d'ancoraggio.

Determinazione del coefficiente di sicurezza a rottura

Premessa

è stata effettuata un'analisi non lineare geometrica e materiale del cavalletto al fine di determinare il coefficiente di sicurezza a rottura.

L'analisi è stata condotta su modelli matematici in grado di seguire il comportamento non lineare geometrico e materiale della struttura all'aumentare dei carichi oltre il valore di esercizio fino alla crisi per instabilità e/o plasticizzazione delle sezioni critiche.

Nei paragrafi successivi sono riportati gli schemi relativi a tali configurazioni con l'indicazione del moltiplicatore critico/"ultimo" del carico di esercizio. Schemi

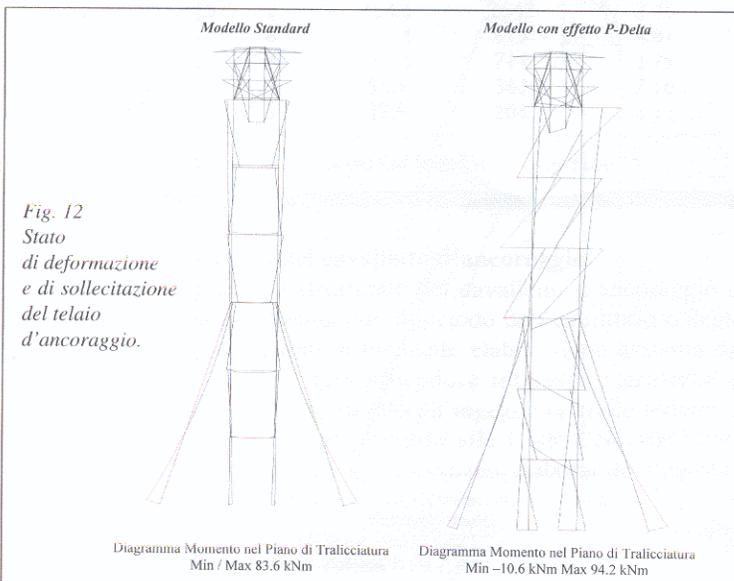
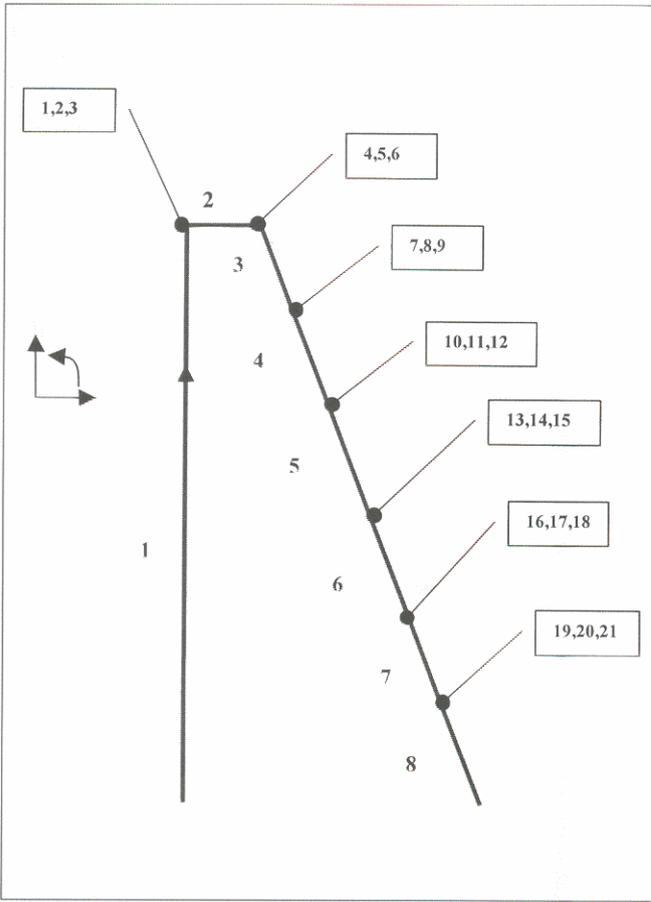


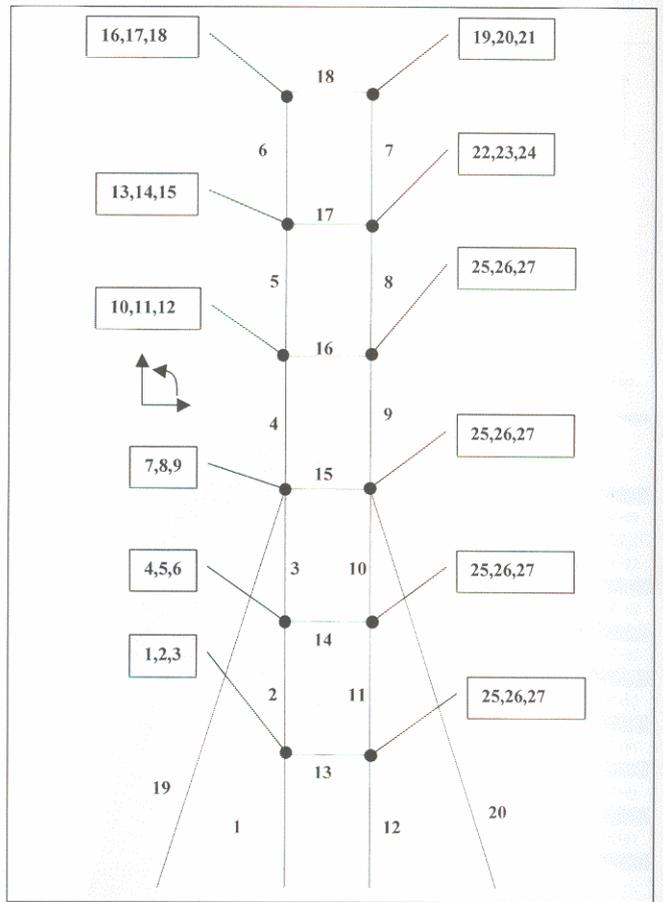
Fig. 12 Stato di deformazione e di sollecitazione del telaio d'ancoraggio.

Schema longitudinale

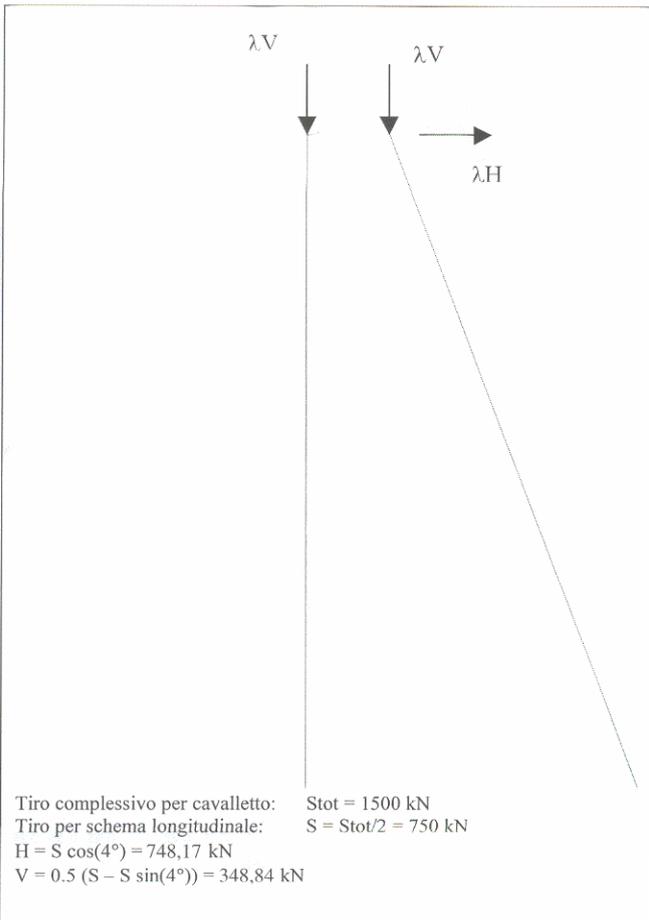


Numerazione gradi di libertà ed elementi.

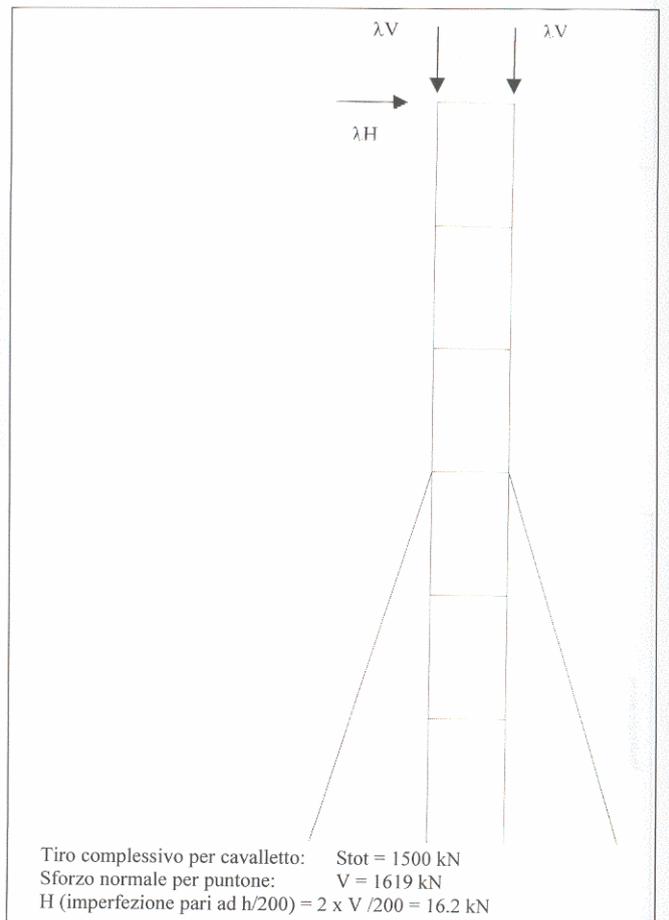
Schema trasversale



Numerazione gradi di libertà ed elementi.

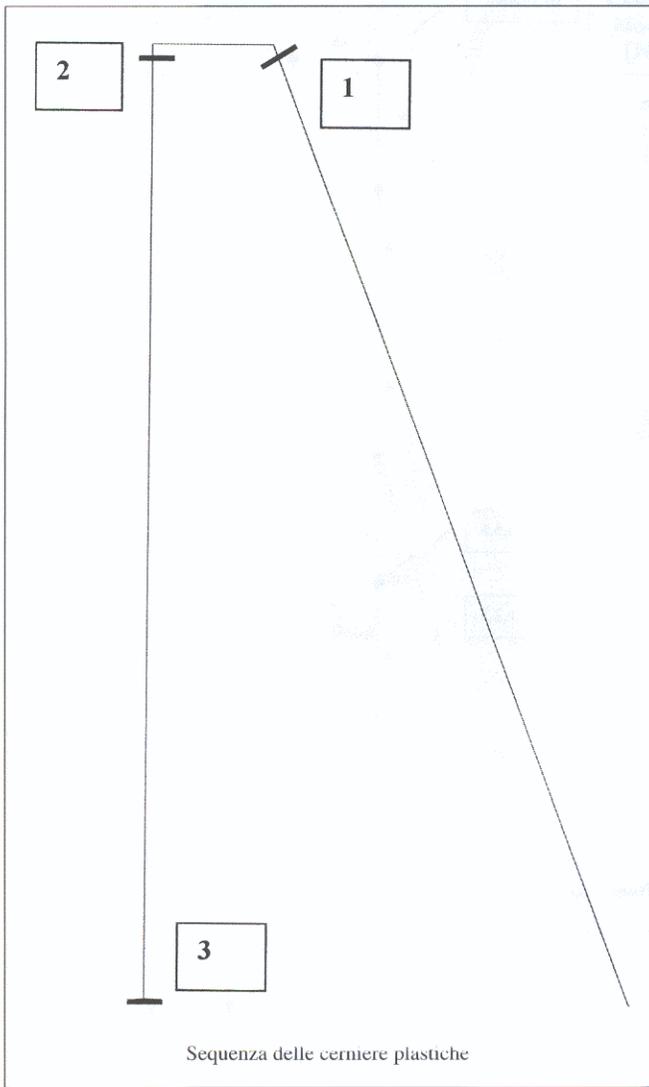


Configurazione di carico.



Configurazione di carico.

Risultati
Schema longitudinale



Cerniera plastica	Moltiplicatore λ
1	2.16
2	2.44
3	2.59

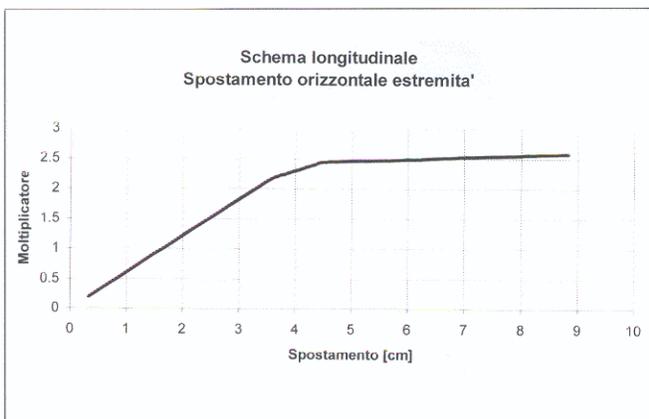
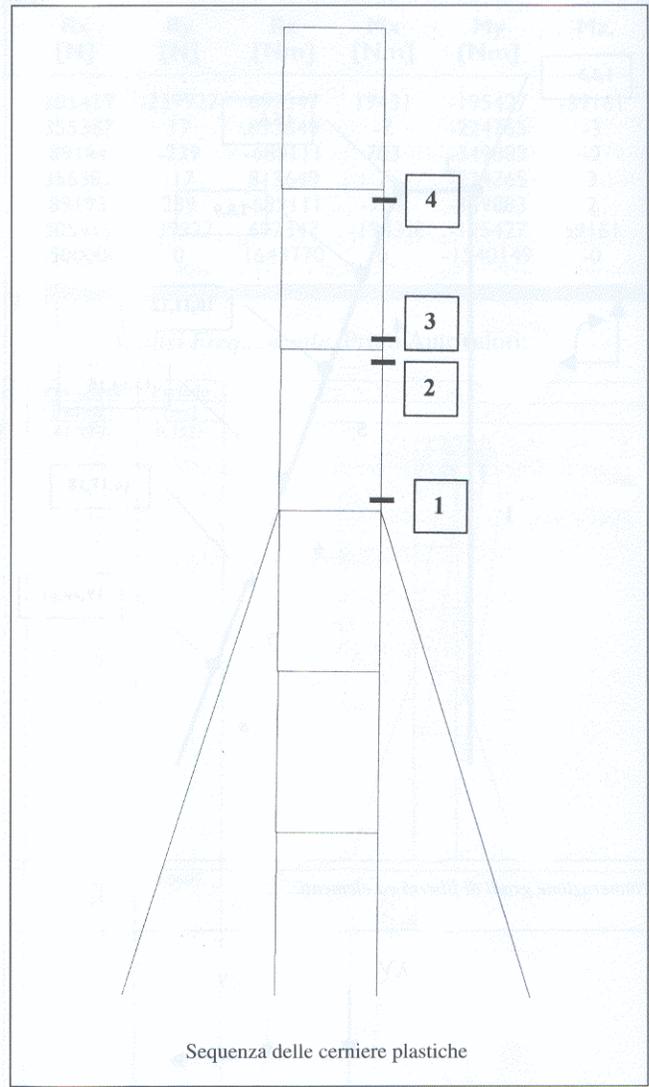


Fig. 14

Schema trasversale



Cerniera plastica	Moltiplicatore λ
1	4.74
2	4.92
3	4.98
4	5.02

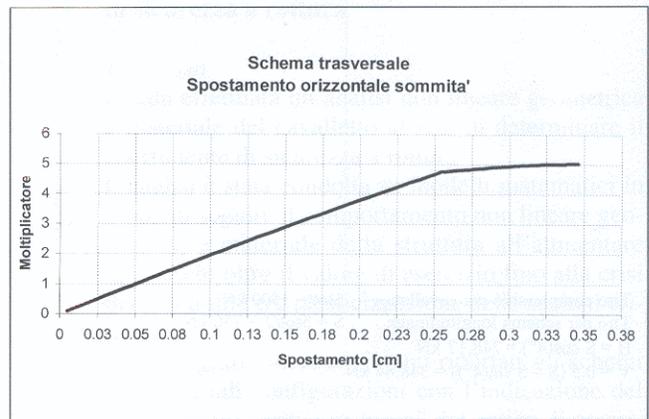


Fig. 15

Verifica dell'interazione suolo-struttura ed analisi dei particolari costruttivi

Una modellazione ad elementi finiti è stata eseguita con il programma Mechanica (3).

Dall'analisi di insieme, tenendo conto della rigidità ponderata del sistema fondazionale, risultano spostamenti in sommità del cavalletto che sono prevalentemente funzione dello stato di deformazione dei micropali (Fig. 16).

In fig. 17 è possibile osservare lo studio della concentrazione delle tensioni sulla testa del cavalletto che ha permesso di progettare gli irrigidimenti locali.

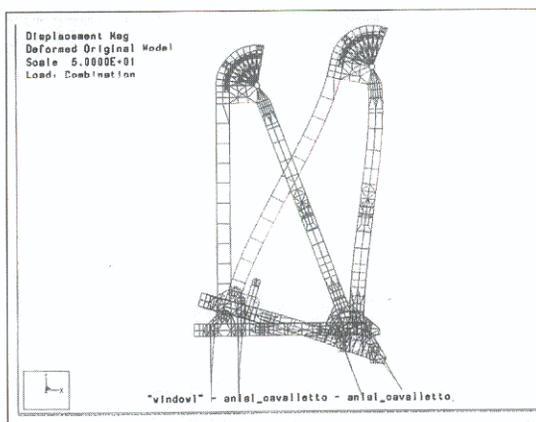


Fig. 16 - Stato di deformazione del cavalletto d'ancoraggio considerando l'interazione suolo-struttura.

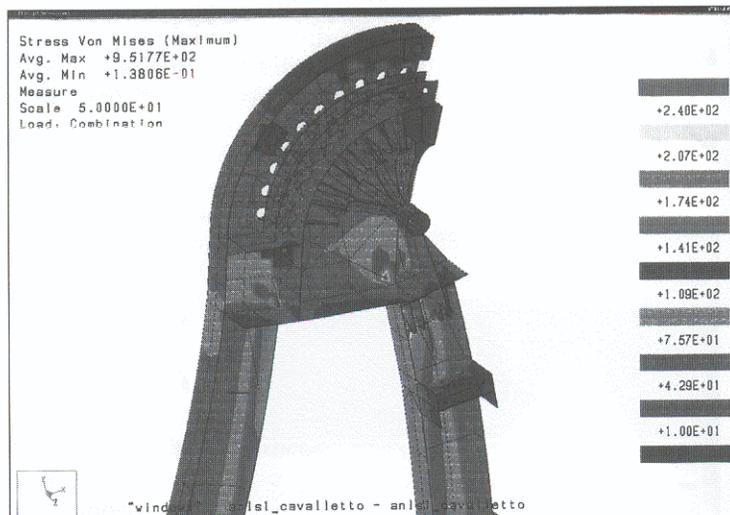


Fig. 17 - Stato di tensione sulla testa dell'ancoraggio.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il sig. G. Villa della SOILMEC, gli ingegneri R. Trevisan e S. Pinardi della STM per la loro collaborazione, e la VIRTUAL GRAPHICS di Forlì per il rendering 3D.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Fritz Leonhardt, The committee to save the Tower of Pisa: a personal report, Structural Engineering International 3/97.
- (2) M. Majowiecki, Tensostrutture: progetto e verifica, CREA, 1995.
- (3) SoilMec, internal report.

CREDITS

Committente: Presidenza del Consiglio dei Ministri
Comitato di Salvaguardia della Torre di Pisa:
 prof. ing. Michele Jamiolkowski (*Presidente*)
 prof. ing. Remo Calzone, prof. ing. Luca Sanpaolesi (*Responsabili tecnico-scientifici*)

Progettista: Studio Tecnico Majowiecki, Casalecchio di Reno (Bologna)

Direzione lavori: prof. R. Felletti, Pisa

Concessionario: Consorzio Progetto Torre di Pisa: BONIFICA - ISMES - ITALSONDA - RODIO - TREVI

Soggetto Esecutore: Consorzio Progetto Torre di Pisa

Costruttore carpenteria metallica e meccanica: TREVI spa - SOILMEC, Cesena

Fornitore funi: TENSOTECEI spa, Milano

Prof. dr. ing. Massimo Majowiecki,
 Studio Tecnico Majowiecki, Casalecchio di Reno (Bologna)