UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIDAD DE POSGRADO

PROBLEMAS ESPECIALES EN GEOTECNIA
CIMENTACIONES - TORRE DE PISA

Dr. Ing. Jorge E. Alva Hurtado

www.jorgealvahurtado.com

TORRE DE PISA

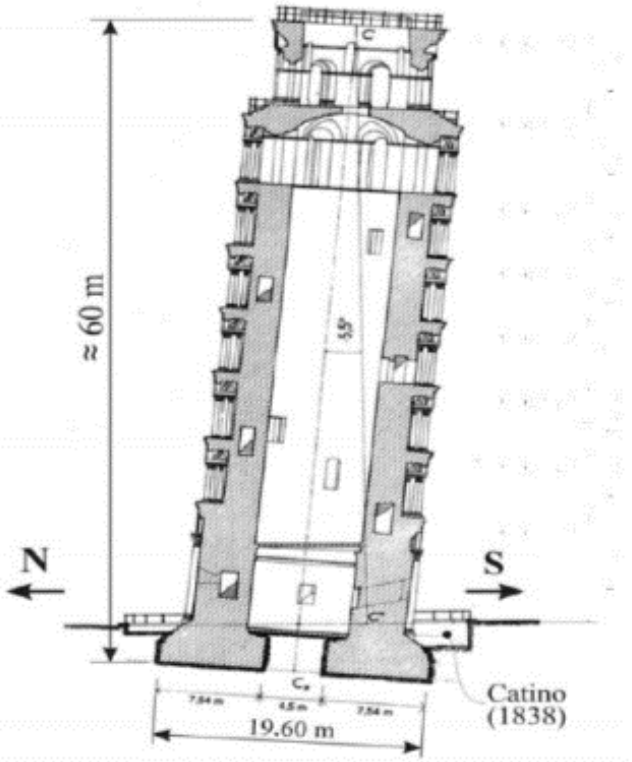
CONTENIDO

- ANTECEDENTES
- DATOS GENERALES
- ESTUDIOS GEOTÉCNICOS
- DATOS GENERALES DE LA FALLA
- DESCRIPCIÓN DEL TERRENO DESPUÉS DE LA FALLA
- ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE CARGA DESPUÉS DE LA FALLA
- TRABAJOS DE REPARACIÓN
- ENSAYOS GEOFÍSICOS POSTERIORES
- CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

TORRE DE PISA

TORRE DE PISA

Datos generales



Peso	14700 to
Altura del centro de gravedad	22,6 m
Momento de vuelco	327 MNm
Presión media de cimentación	≈500 kPa

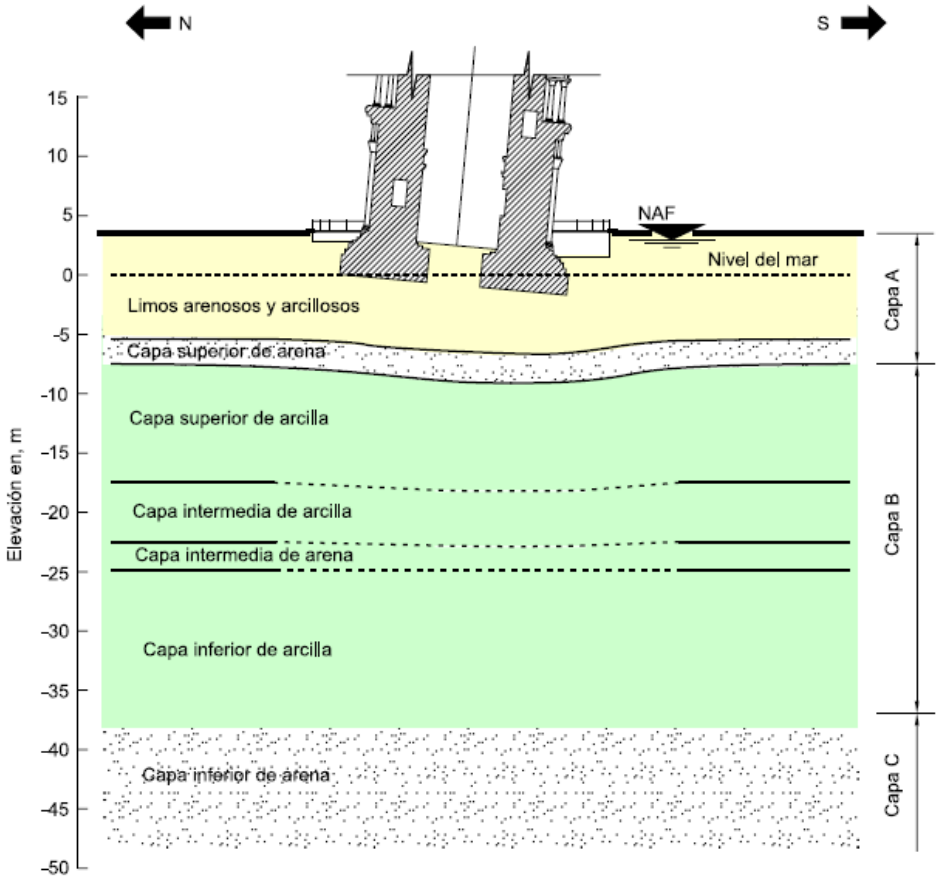
- Altitud de la Piazza dei Miracoli: 6 msnm.
- Altura: 55.8 metros. Cuenta con 8 niveles.
- Diámetro externo de la base: 15.484 m
- Diámetro interior de la base: 7.36 m
- Peso: 147.000 kN
- Grosor de las paredes en la base: 6 m.
- Número de escalones: 294
- Material de construcción: mármol
- Dirección de la inclinación:
  - ✓ Hacia el Norte: años 1173-1250
  - ✓ hacia el Sur: años 1272-1997

González (2016)

TORRE DE PISA

Datos generales

Cimentación de la Torre. Es una zapata circular de 19.6 m de diámetro a 5.5 m de profundidad máxima y 7.54 m de ancho en promedio; el área de contacto de la cimentación es de 285.8 m^2 y la presión media que trasmite es de 50.7 t/m^2. Se sabe que en el sitio hay restos etruscos y romanos.



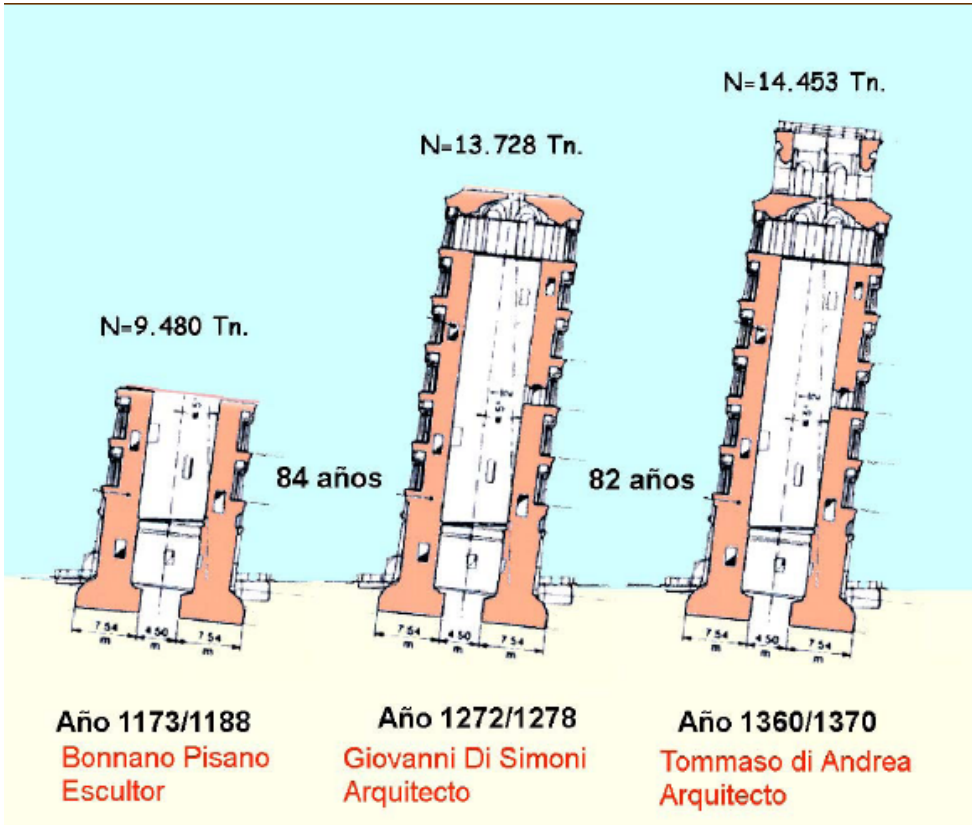
TORRE DE PISA

Historia

Galileo y sus experimentos desde lo alto de la torre de Pisa

TORRE DE PISA

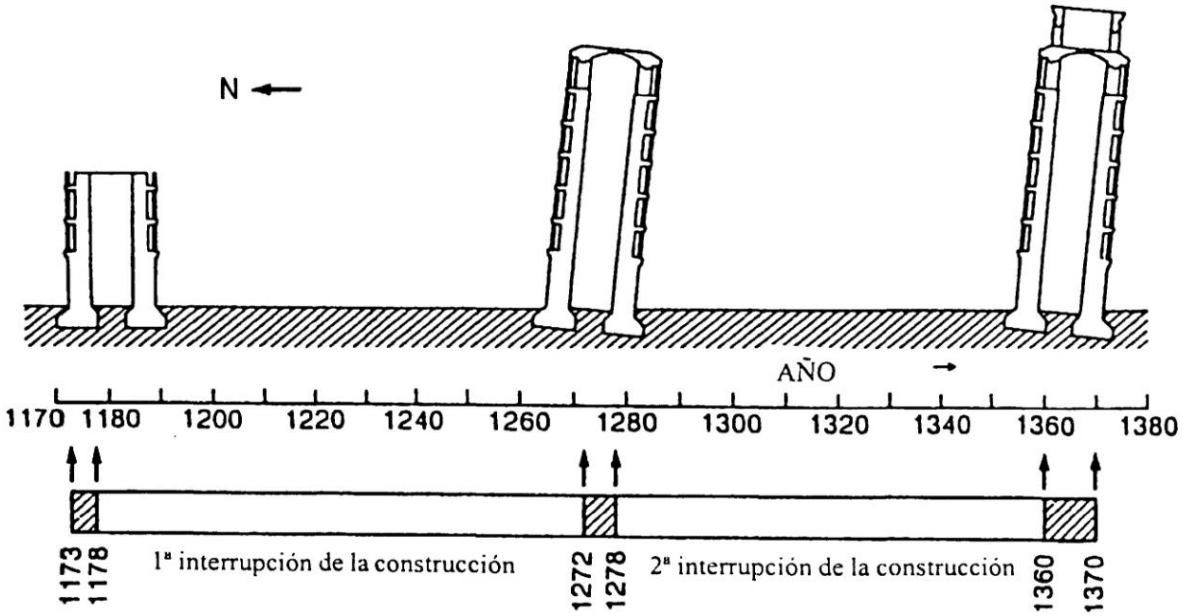
Historia



El arquitecto Bonano Pisano la empezó a construir en 1173 como el el campanario de la Catedral de Santa María de la Asunción en la Plaza de la Catedral de Pisa.

TORRE DE PISA

Evolución cronológica de la inclinación según las fases de ejecución.



- **1178:** Cuando la torre la Torre había alcanzado los 50 pies de altura (15 m.) y ya lucía su tercer anillo de arquería, la parte sur se había asentado entre 3 o 4 cm.
- **1278:** Cuando se acababa la séptima cornisa, el desplome era de 2,7 pies (0.81 m.).
- **1550**: Vasari dispone un anillo (placa armada alrededor de la cimentación) vinculándolo fuertemente a la cimentación.
- **1838**: Alessandro Della Gherardesca recalzó y reforzó, fajando, el plinto visible. El giro de la base de la cimentación era superior a 5° (asentamiento de 0.82 m, desplome 3.40 m.)
- **1934**: Desplome de 4,80 m. Rodio perforó 361 agujeros e inyectó 93 tn de super cemento en el suelo.

Fuente: F. Veniale “Comité Internacional para la salvaguarda de la Torre de Pisa. Dpto. de Ciencias de la Tierra. Universidad de Pavía

TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

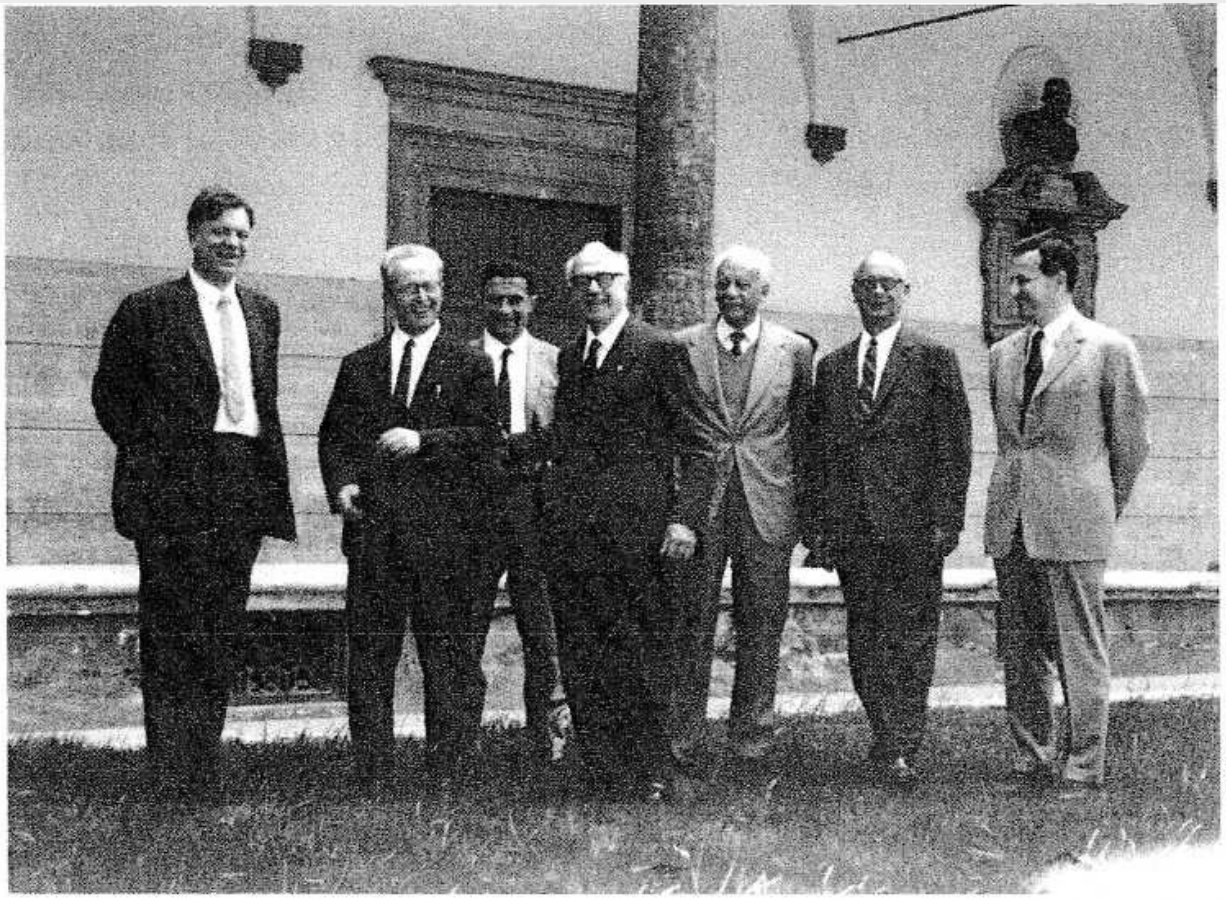
La historia de las comisiones encargadas de la salvaguarda de la Torre de Pisa es muy larga. Se podría decir que la primera se remonta al año de 1298, cuando se reunieron a discutir los expertos de entonces sobre la reanudación de la construcción.

La Segunda Comisión inició el estudio en 1840 y la Tercera Comisión en 1907.

Desde entonces han participado destacados ingenieros geotécnicos, entre ellos C. Trevisan, A.W. Skempton, S. Marchetti, A. Kezdi, G.A. Leonards, C. Viggiani, J.B. Burland y M. Jamiolkowsky. K. Terzaghi (1934) también realizó un estudio de la Torre.

TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos



Comisión del Grupo Geotécnico de Polvani (el Profesor Sir Alec Skempton está en el extremo izquierdo)

Burland (2008)

TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Estratigrafía

El suelo debajo de la Torre de Pisa consta de tres formaciones:

- Horizonte A, de unos 10 m de espesor, está compuesto por depósitos blandos de limos arenosos y arcillosos depositados en condiciones de marea.
- Horizonte B consta de arcilla marina blanda sensible normalmente consolidada que se extiende hasta una profundidad de unos 40 m.
- Horizonte C es arena marina densa que se extiende hasta una profundidad de unos 60 m aproximadamente.

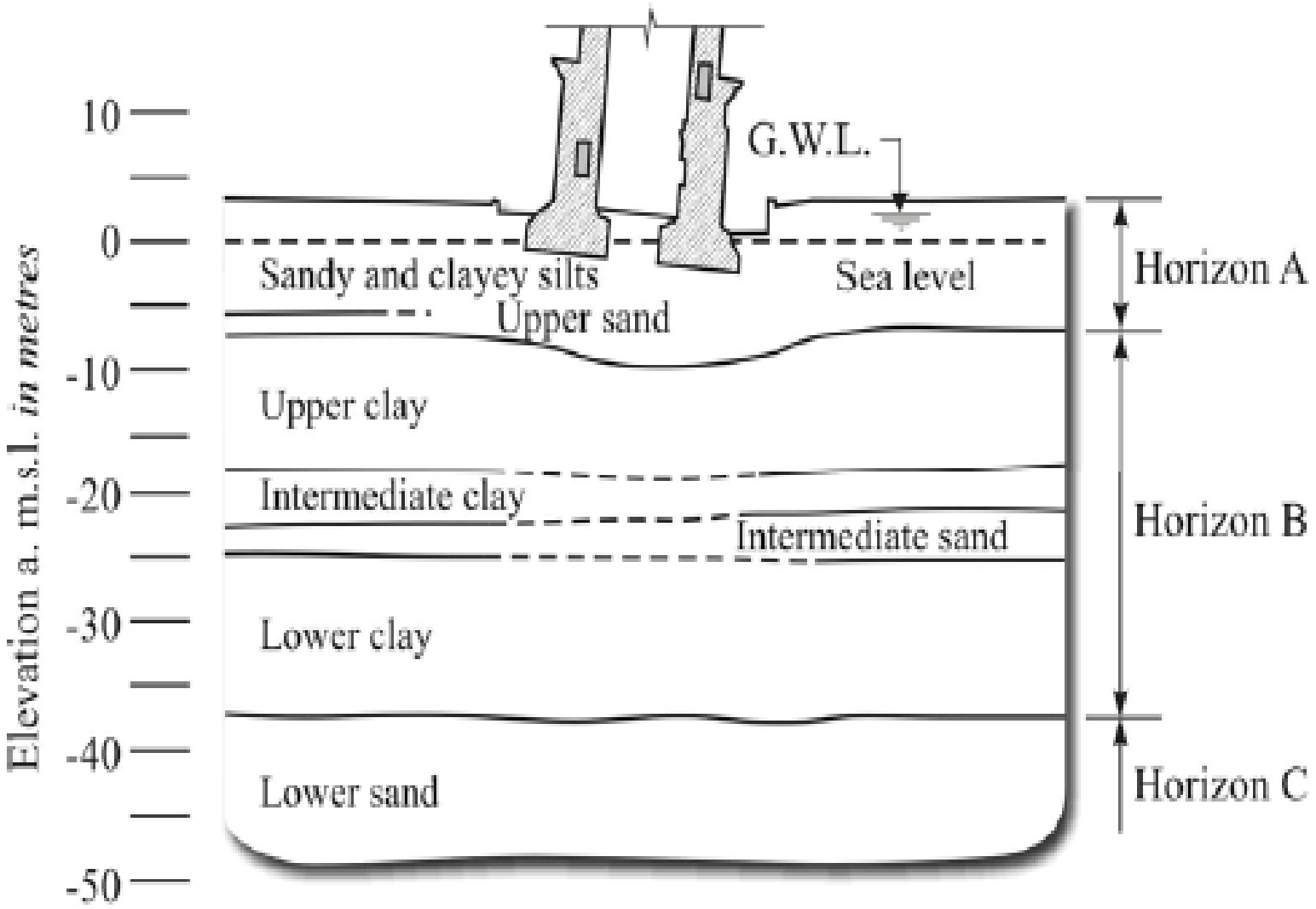
El nivel freático se encuentra entre 1 m y 2 m por debajo del nivel de la Piazza Miracoli correspondiente a la cota +3.0 msnm .

El contacto entre el Horizonte A y la arcilla marina del Horizonte B se distribuye debajo de la Torre, lo que indica que experimentó asentamientos promedio de entre 3.0 m y 3.5 m.

TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Estratigrafía



TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Descripción del estrato A

El horizonte A está constituido por una capa limosa (A1) superpuesta a una capa de arena uniforme, de unos 2 m de espesor (A2).

La capa limosa A1 fue descrita por el Comité Polvani como una secuencia caótica de niveles y lentes de limos y arenas, caracterizados por propiedades de clasificación e índice muy variables.

La capa (A1’) está probablemente constituida principalmente por un suelo cohesivo (A1’) y la capa (A1’’) por suelo sin cohesión.

En el horizonte A, se realizaron pruebas de laboratorio a las muestras recuperadas principalmente de las porciones cohesivas de la capa.

Por lo tanto, la distinción entre las capas A1’ y A1’’ no se basó en pruebas sino en los resultados de la penetración del cono y pruebas de piezocono.

TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Descripción del estrato A

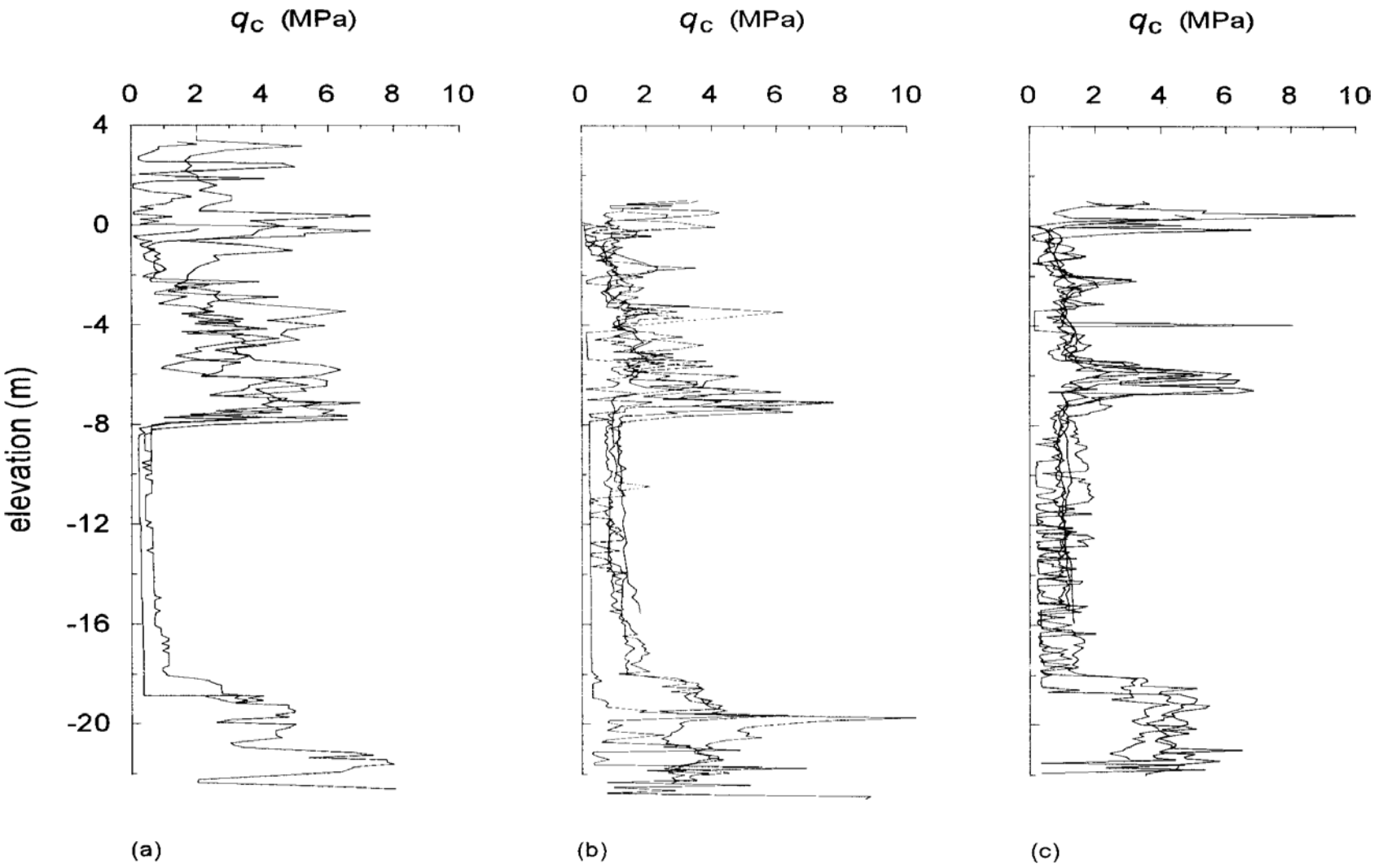
Tal división se basó tanto en la resistencia de la punta qc y el exceso de presión de poros Δu (cuando esté disponible) medido en las pruebas CPT y CPTU (Lancellotta y Pepe 1990).

Específicamente, el suelo se clasificó como:

1. (A1‘) limo arcilloso cuando qc <1,5 MPa y Δu> 60 kPa;
2. (A1”) arena limosa cuando 1.0 <qc <3.0 MPa y Δu <60 kPa;
3. (A2) arena gris cuando qc> 3 MPa y Δu <60 kPa.

TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

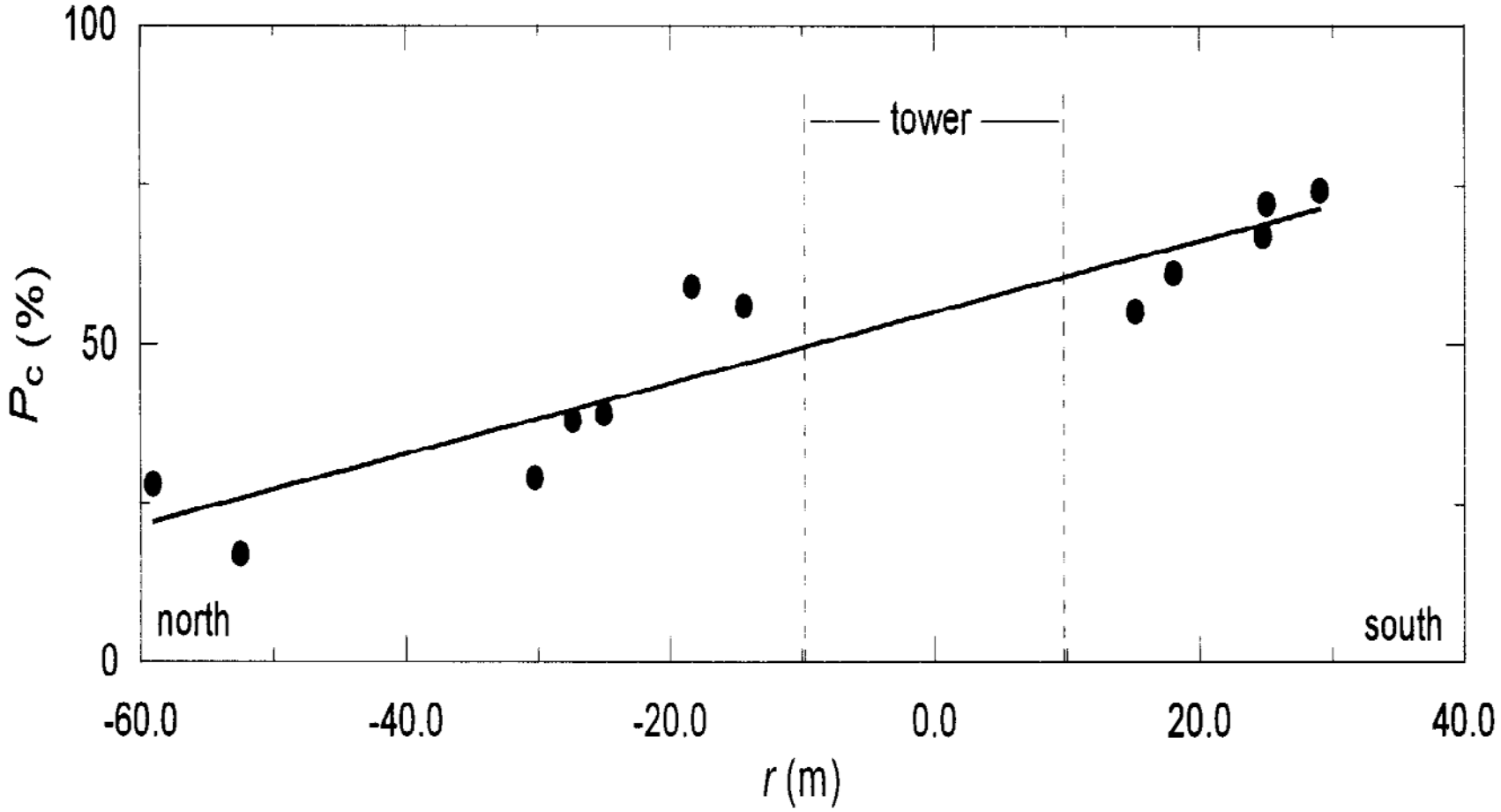


Ref.: S.Rampello y L.Callisto (2011)

TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

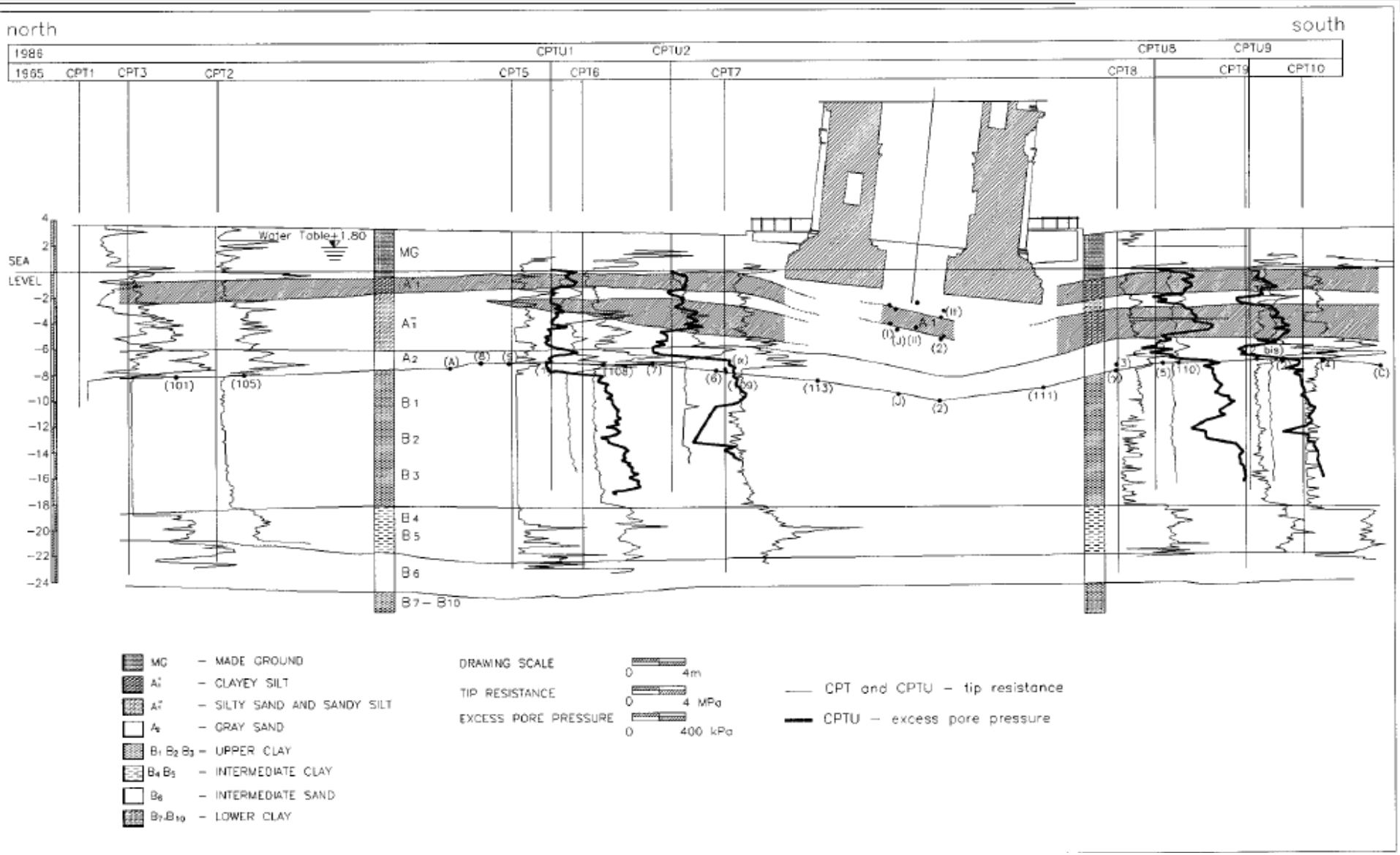
Porcentaje de arcilla limosa en el estrato A



Ref.: S.Rampello y L.Callisto (2011)

TORRE DE PISA

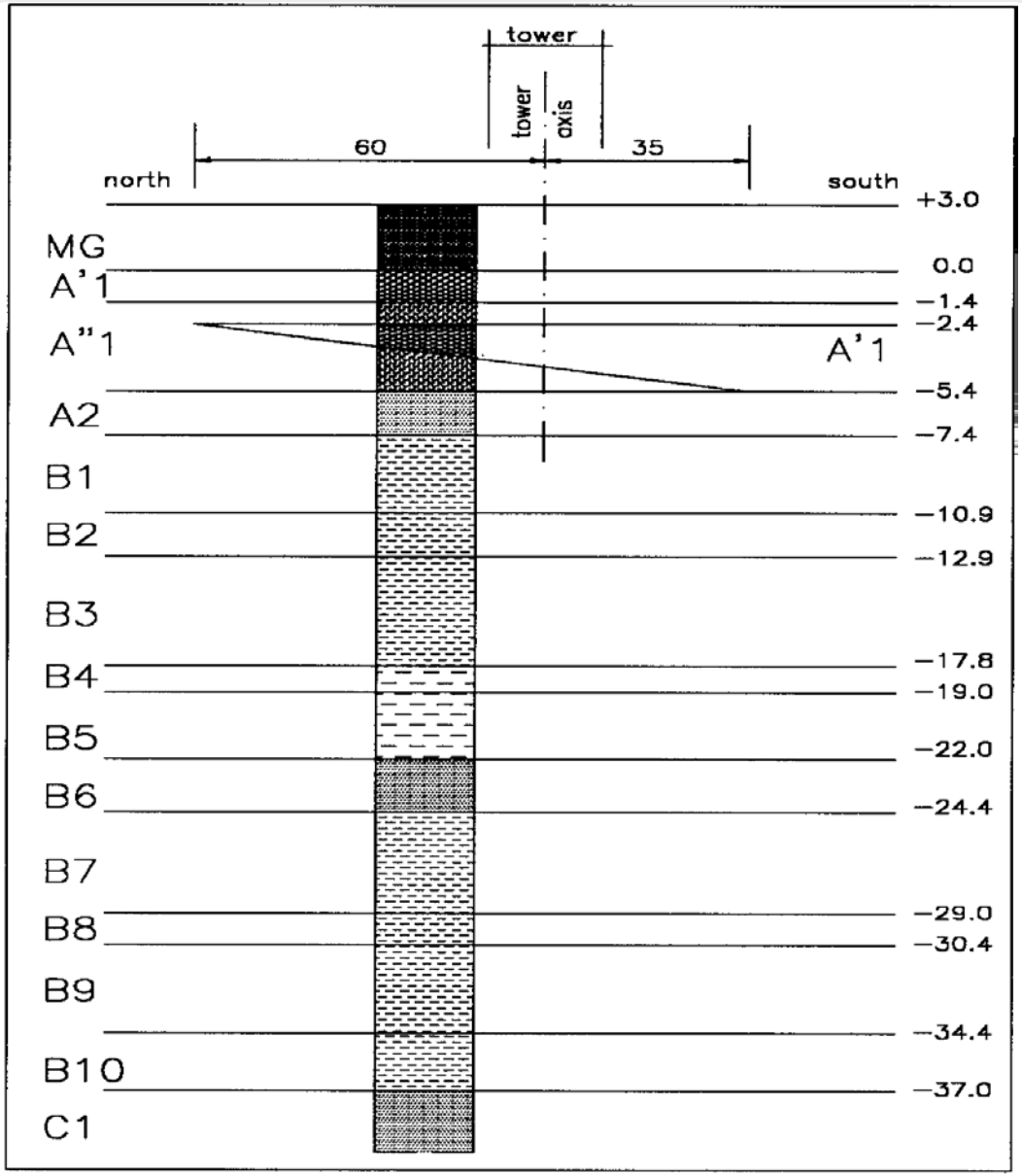
Estudios geotécnicos



Ref.: S.Rampello y L.Callisto (2011)

TORRE DE PISA

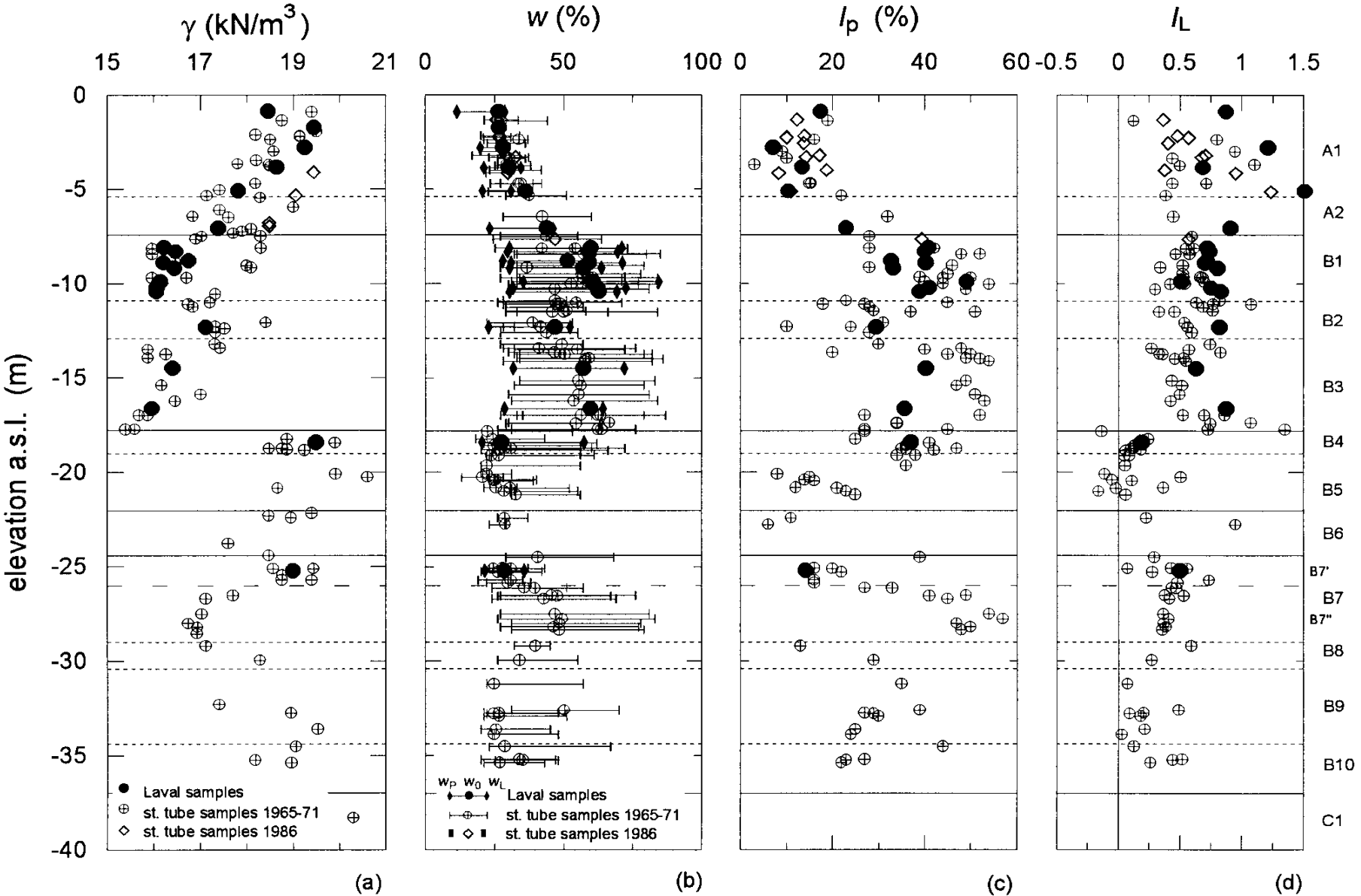
Estudios geotécnicos



La Figura muestra un esquema simplificado del subsuelo, cuyo estrato A contiene una capa cohesiva A1' de espesor variable, según los resultados de las pruebas de penetración.

TORRE DE PISA

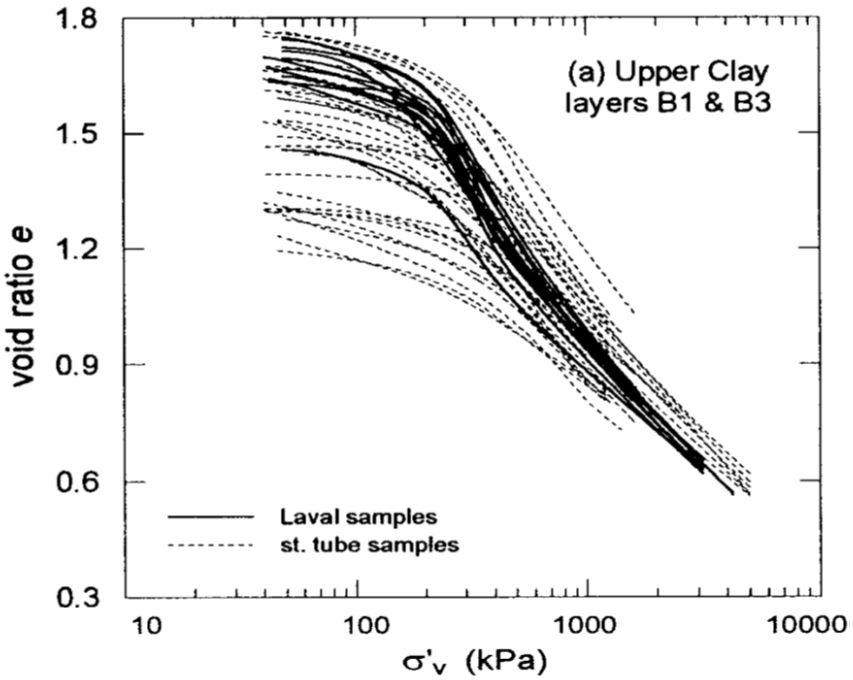
Estudios geotécnicos

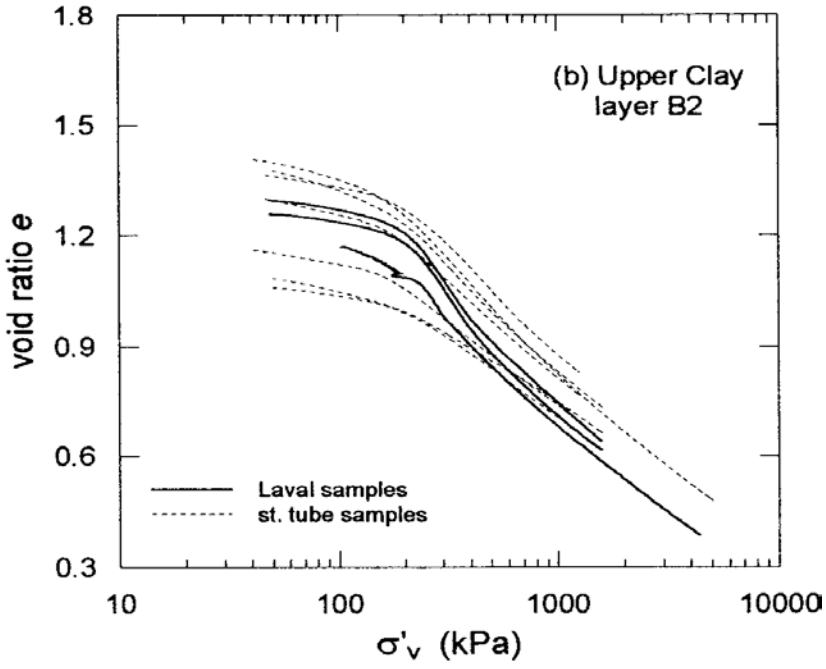


TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Compresibilidad – Ensayo edométrico





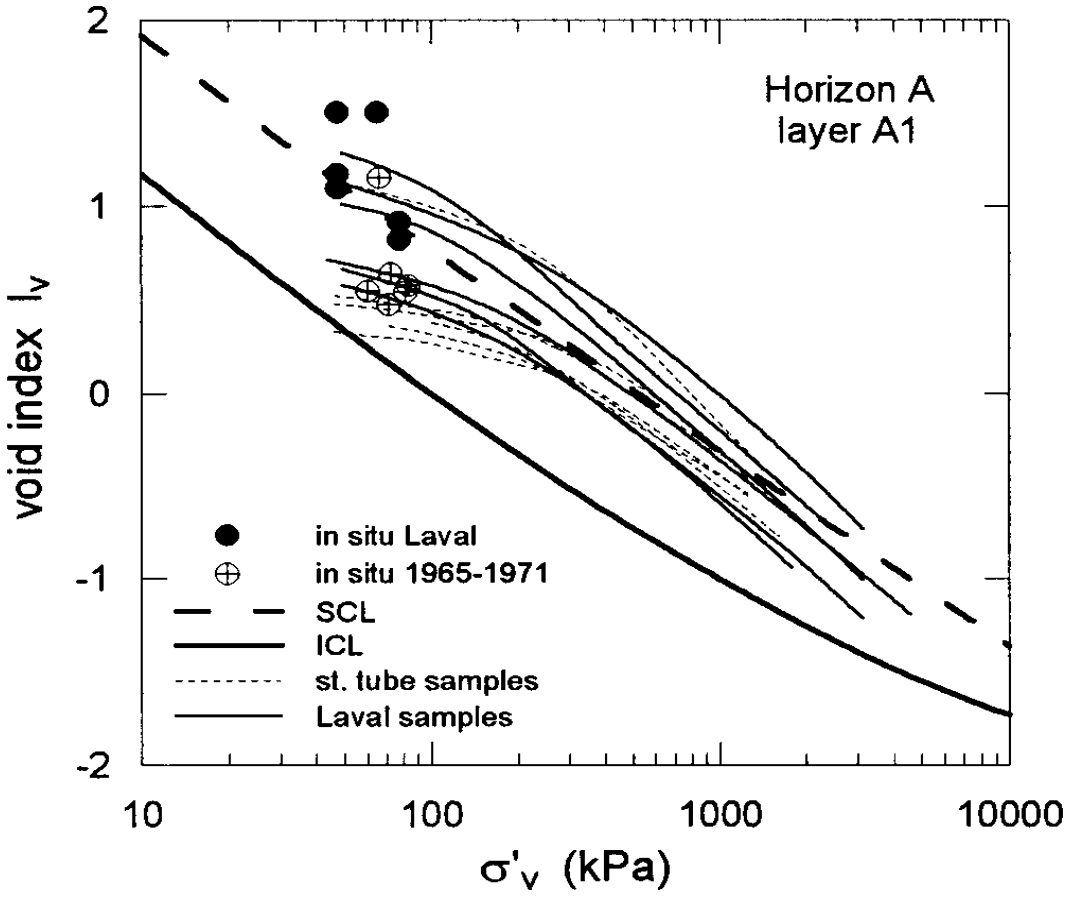
- El muestreador Laval, proporciona muestras de mejor calidad que el muestreador de pistón estándar, lo que permite una evaluación más precisa de la compresibilidad de la arcilla superior.
- La alta compresibilidad presentada por las nuevas muestras debe considerarse como una propiedad de la arcilla, la cual no se ha observado claramente en el pasado debido a la alteración del muestreo.

TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Compresibilidad – Ensayo edométrico

Normalización del estrato A

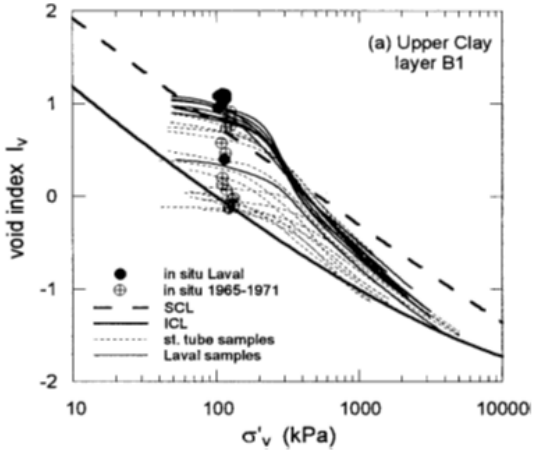


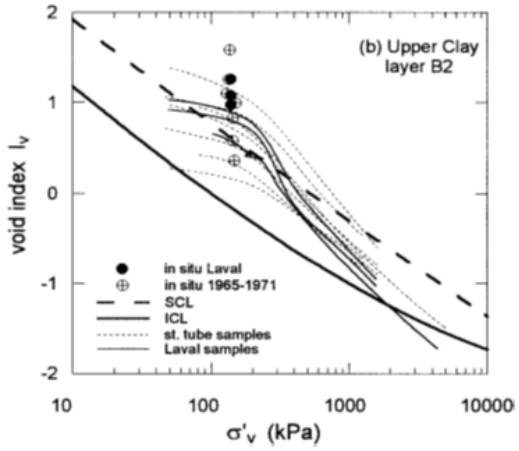
TORRE DE PISA

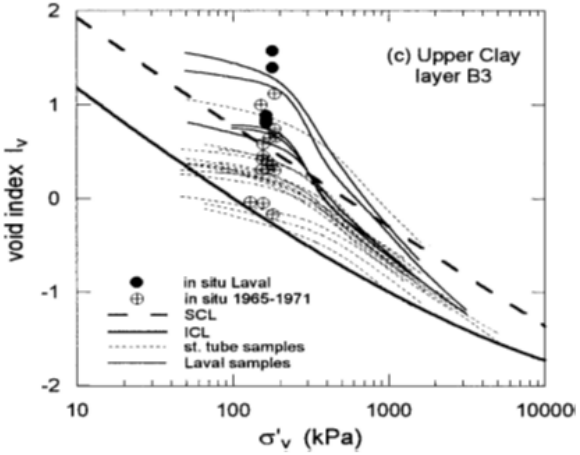
Estudios geotécnicos

Compresibilidad – Ensayo edométrico

Normalización del estrato B







En las figuras se grafican :

- Los círculos completos y abiertos que representan el estado in situ de las muestras nuevas y antiguas, respectivamente.
- La línea de compresión de sedimentación (SCL) y la línea de compresión intrínseca (ICL) definida por Burland (1990)

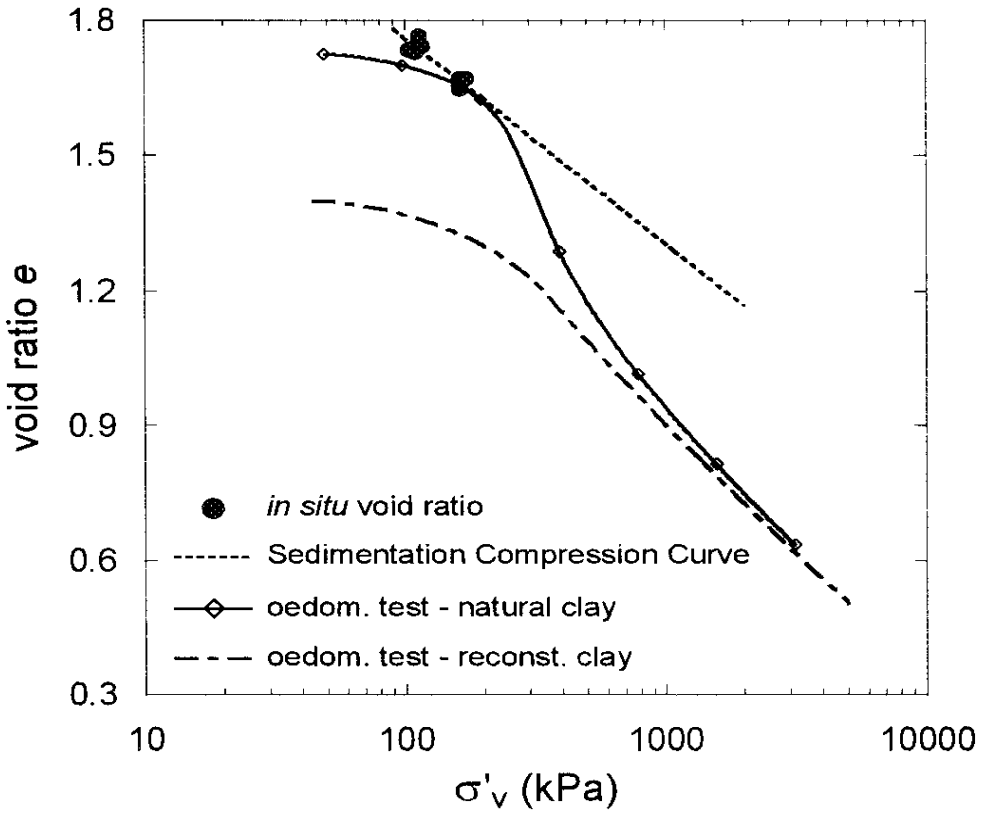
El SCL es el lugar de las condiciones in situ para la mayoría de las arcillas naturales normalmente consolidadas, mientras que el ICL es la línea de compresión del edómetro normalizada para casi todas las arcillas reconstituídas.

TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Compresibilidad – Ensayo edométrico

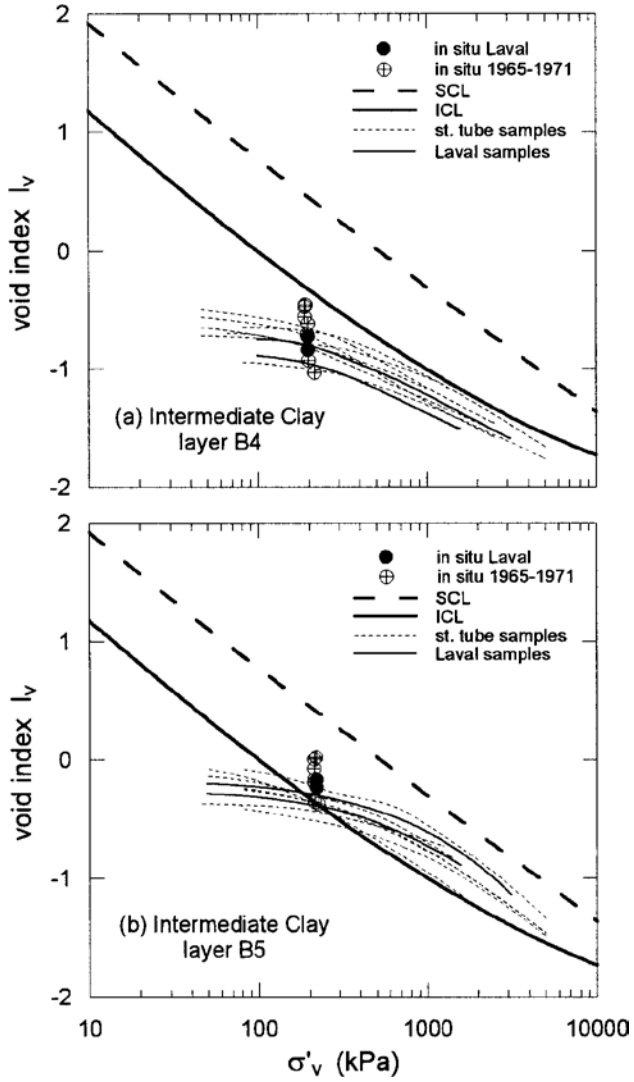
Curvas de compresión del edómetro para una muestra reconstituída en la arcilla superior.



TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Compresibilidad – Ensayo edométrico



Normalización del estrato B (arcilla intermedia)

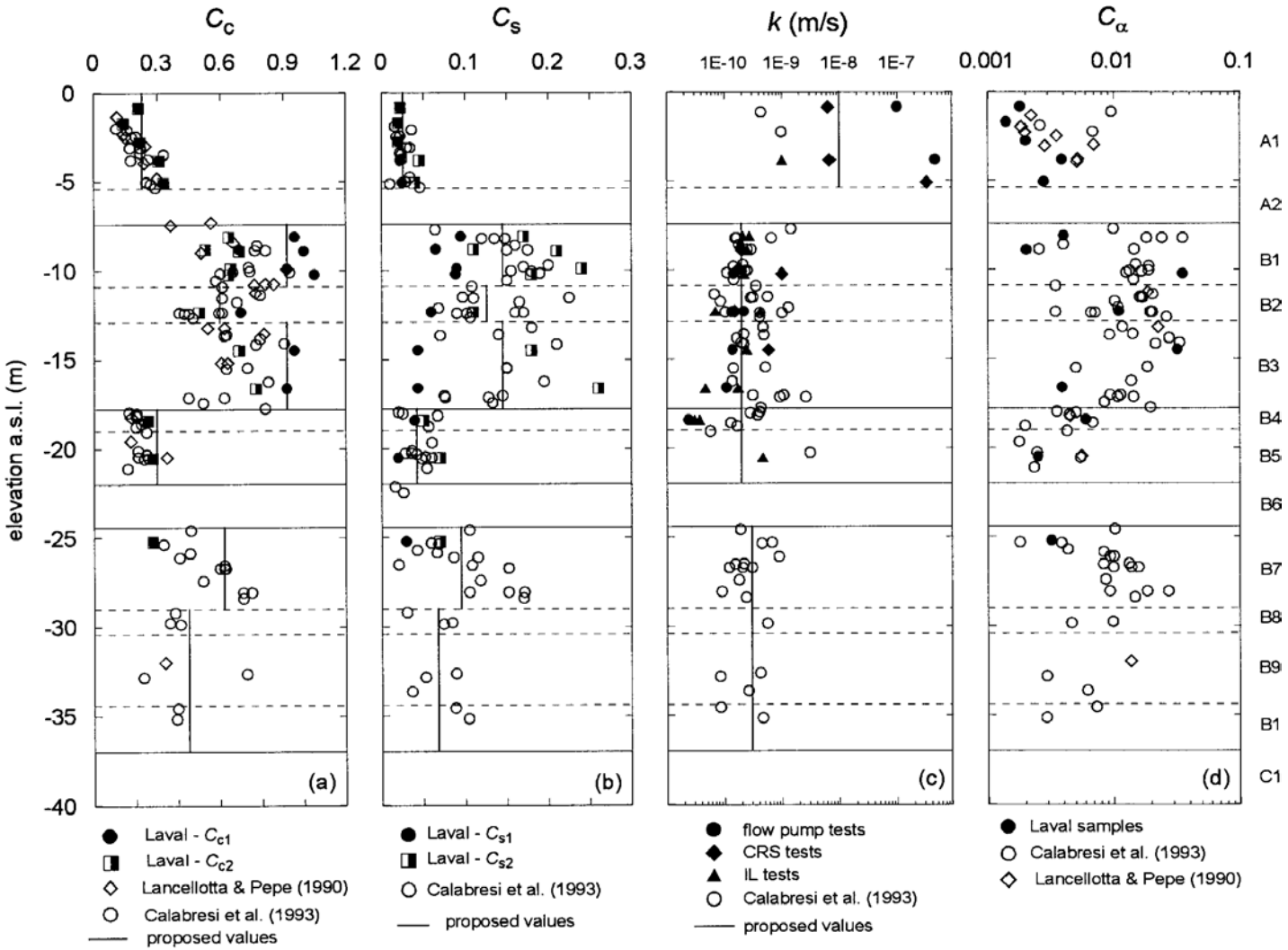
Se grafican en las figuras:

- Las curvas de compresión del edómetro normalizadas para la arcilla intermedia (capas B4-B5)
- Los resultados obtenidos del muestreador Laval están en buen acuerdo con las muestras anteriores.
- Los puntos de datos in situ se trazan cerca o debajo de la ICL, lo que sugiere que la microestructura natural es similar a la reconstituída.
- Cuando se alcanza el límite elástico, las curvas se trazan cerca de la ICL, lo que indica una microestructura, al menos en el rango de las tensiones aplicadas.
- Por lo tanto, se puede sugerir que la arcilla intermedia no es muy sensible a la desestructuración inducida por el muestreo del tubo estándar.

TORRE DE PISA

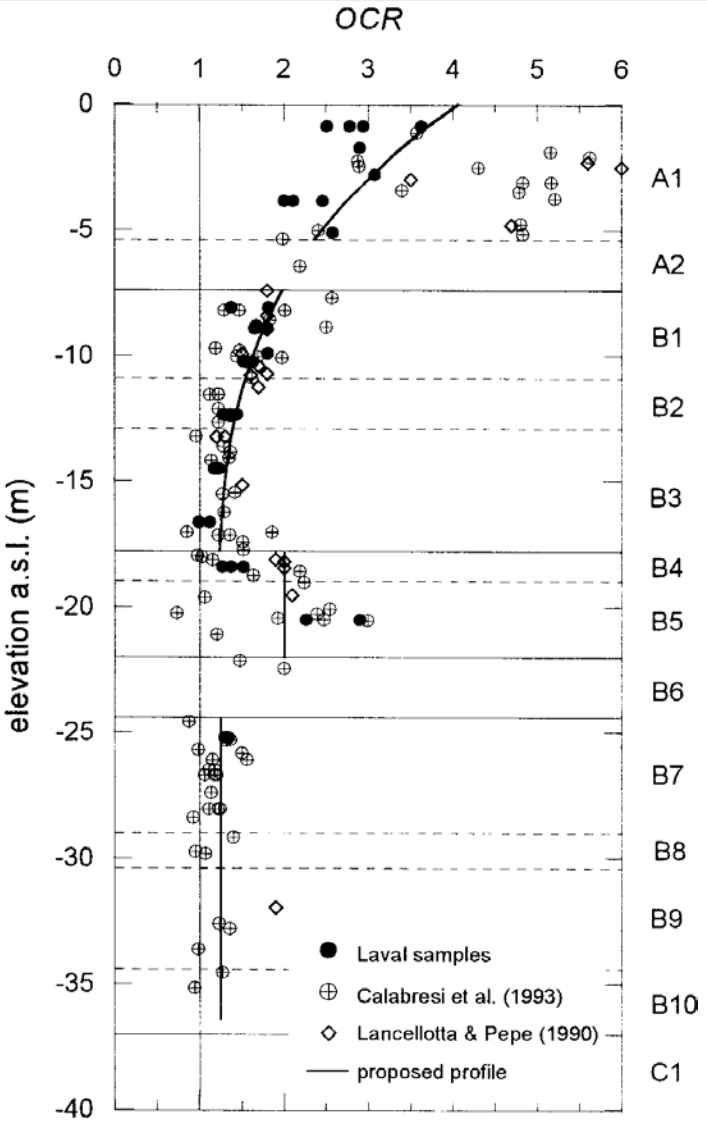
Estudios geotécnicos

Parámetros de compresibilidad



TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos



Perfil de la relación de límite elástico OCR

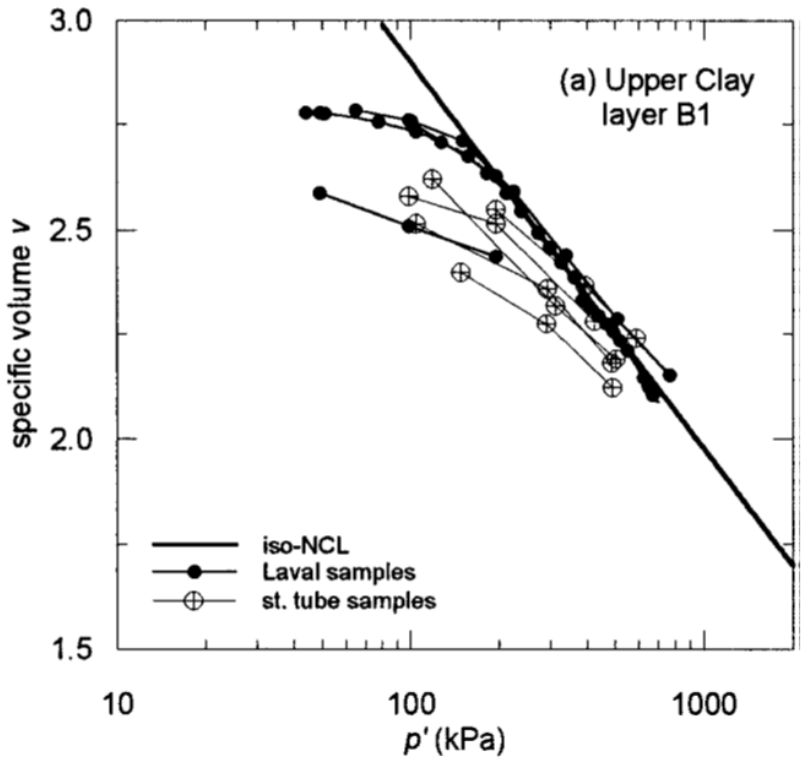
- En la arcilla superior, el OCR parece disminuir con la profundidad, desde aproximadamente 2 hasta valores solo ligeramente superiores a 1.
- En la arcilla intermedia, se observó una relación de hasta 3.
- En la arcilla inferior, los valores de OCR no parecen variar con la profundidad, y están en el rango de 1 a 1,5.

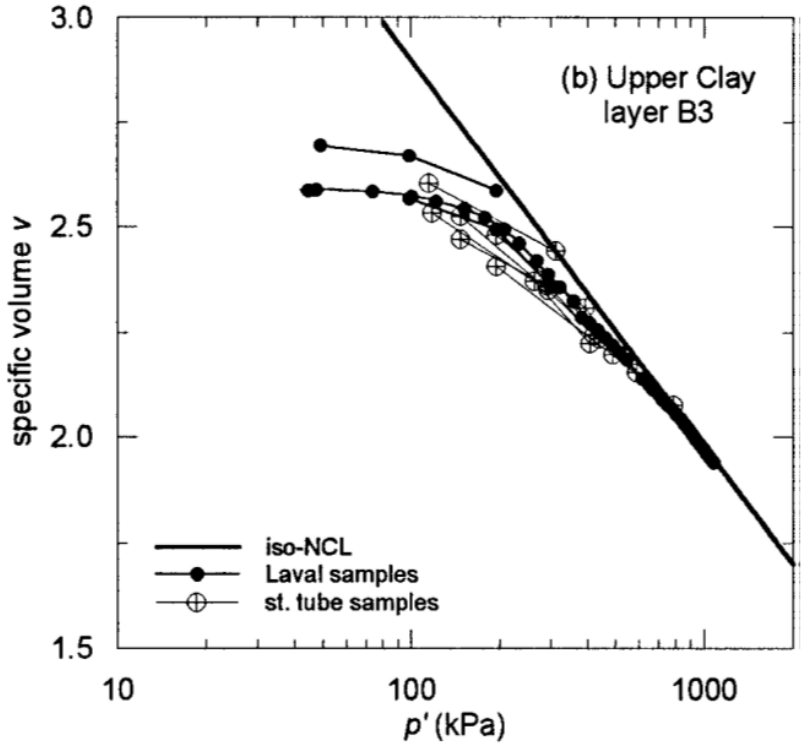
Se eligió un valor constante de OCR = 2.

TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Ensayos de compresión isotrópica

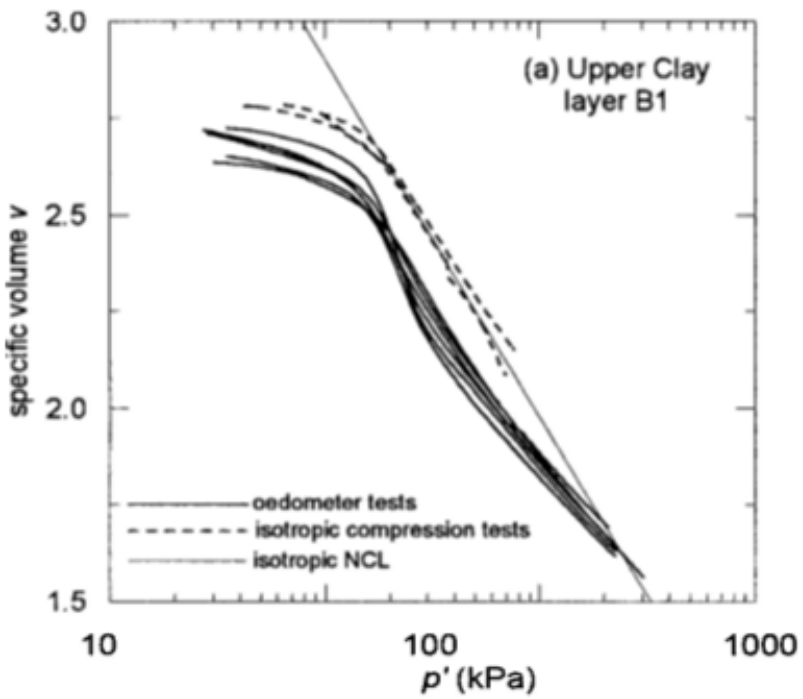


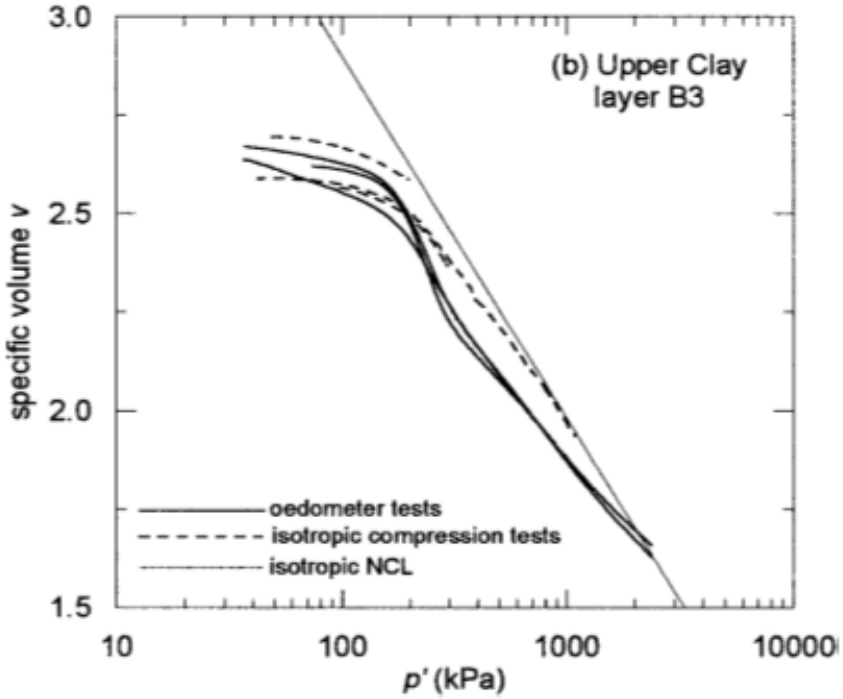


TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Curvas de edómetro y compresión isotrópica





TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

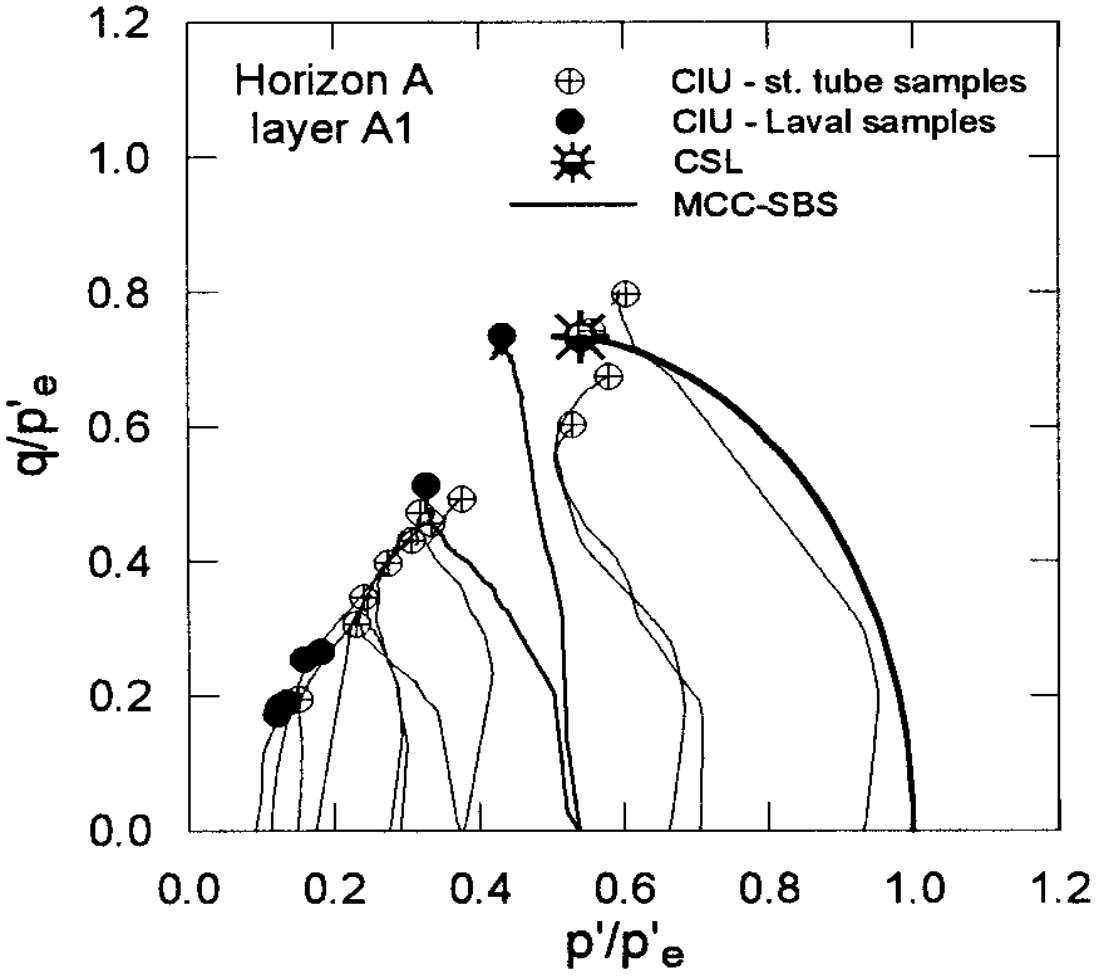
Parámetros de corte y compresibilidad

Layer	Symbol	N_{100}	λ	κ	φ'_{cv} (°)	M
Horizon A	MG	—	—	—	34	—
	A1″	—	—		34	1.36
	A1′	1.92	0.10	0.011	34	1.36
	A2	—	—	—	34	—
Upper Clay	B1	2.90	0.40	0.063	25	1.0
	B2	2.41	0.26	0.055	25	1.0
	B3	2.90	0.40	0.063	22	0.85
Intermediate Clay	B4	1.96	0.13	0.018	29	1.14
	B5	1.96	0.13	0.018	29	1.14
Intermediate Sand	B6	—	—	—	34	—
Lower Clay	B7	2.54	0.267	0.041	28	1.1
	B8	2.15	0.195	0.030	25	1.0
	B9	2.15	0.195	0.030	25	1.0
	B10	2.15	0.195	0.030	25	1.0
Horizon C	C1	—	—	—	34	—

TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

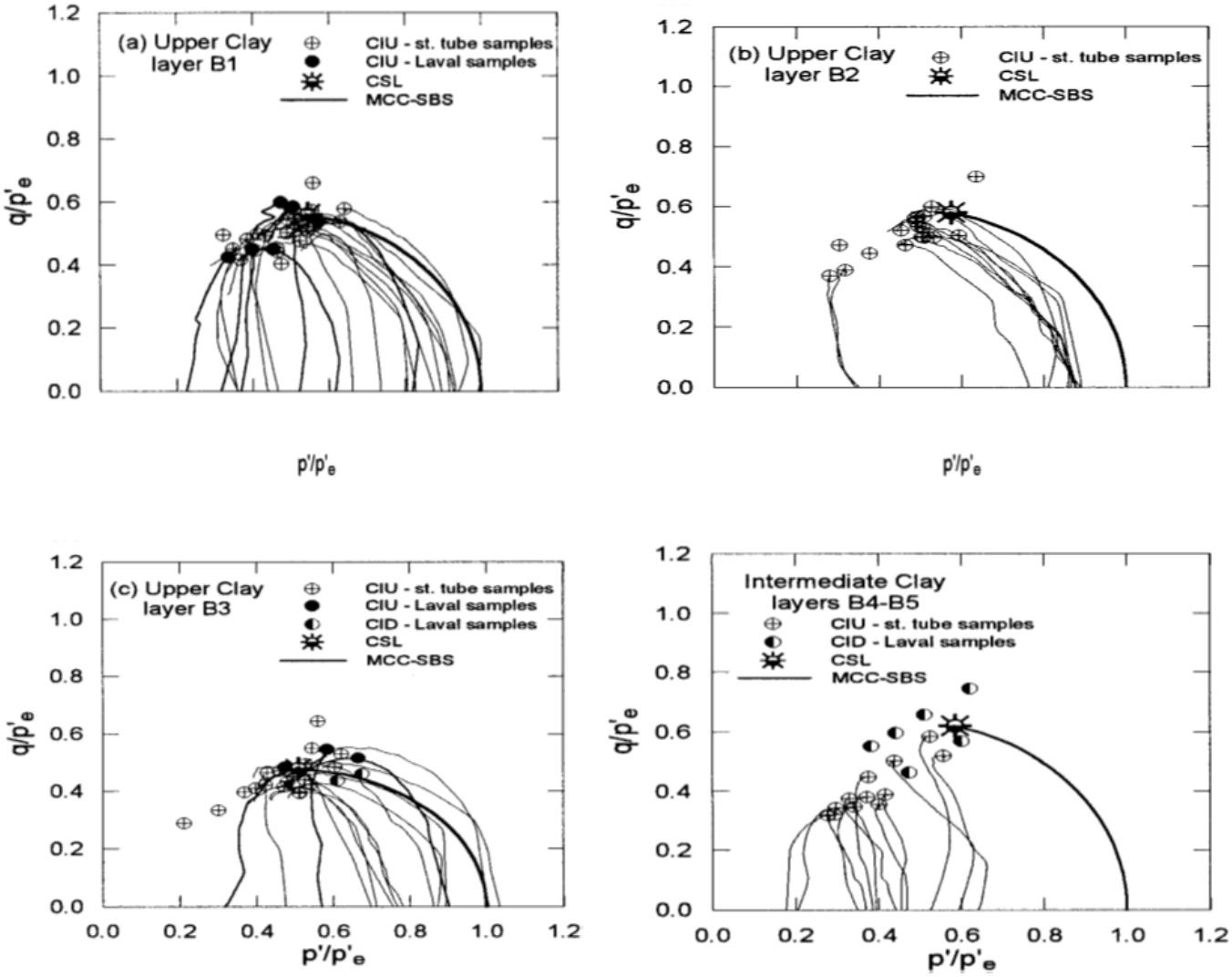
Modified Cam Clay (MCC)



TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

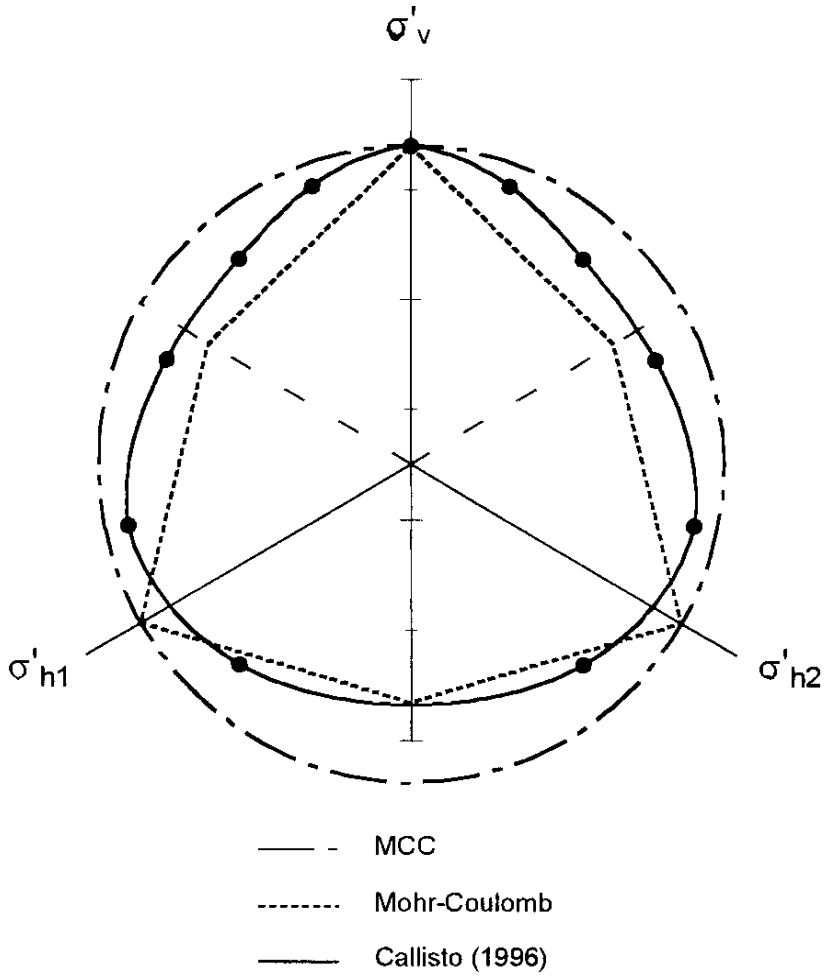
Modified Cam Clay (MCC)



TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Modified Cam Clay (MCC)

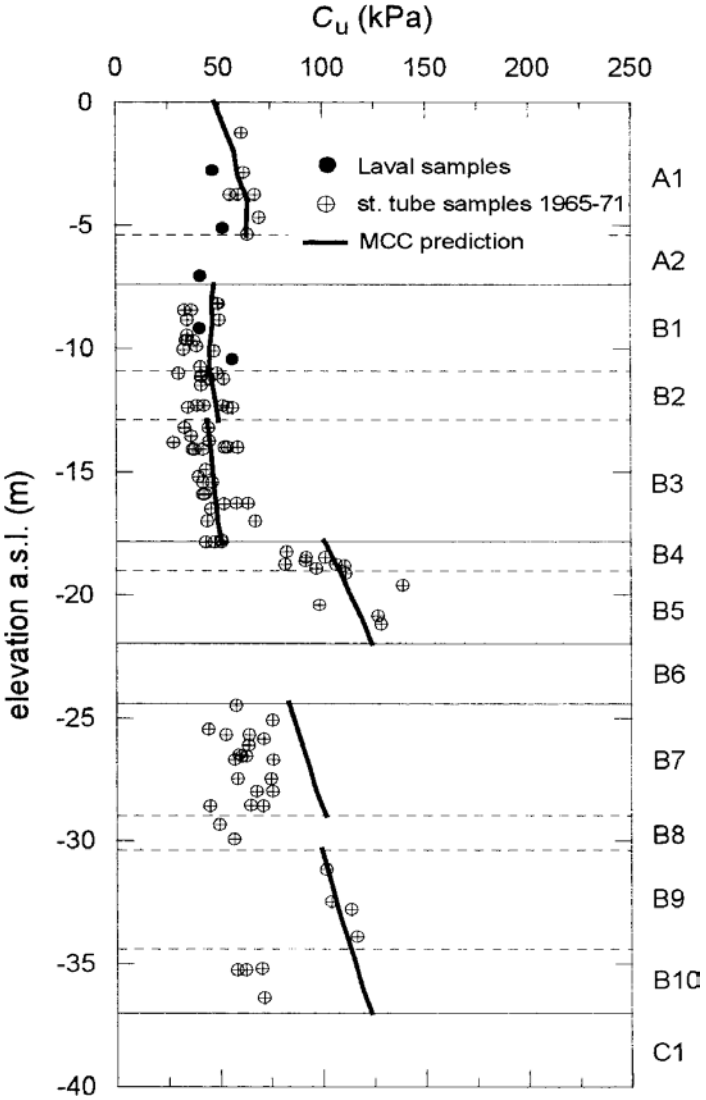


La recta de estado en el plano octaédrico se compara con la envolvente de falla de Mohr-Coulomb y con la forma del envolvente de falla encontrada por Callisto (1996) mediante pruebas triaxiales drenadas realizadas manteniendo p igual al valor in situ.

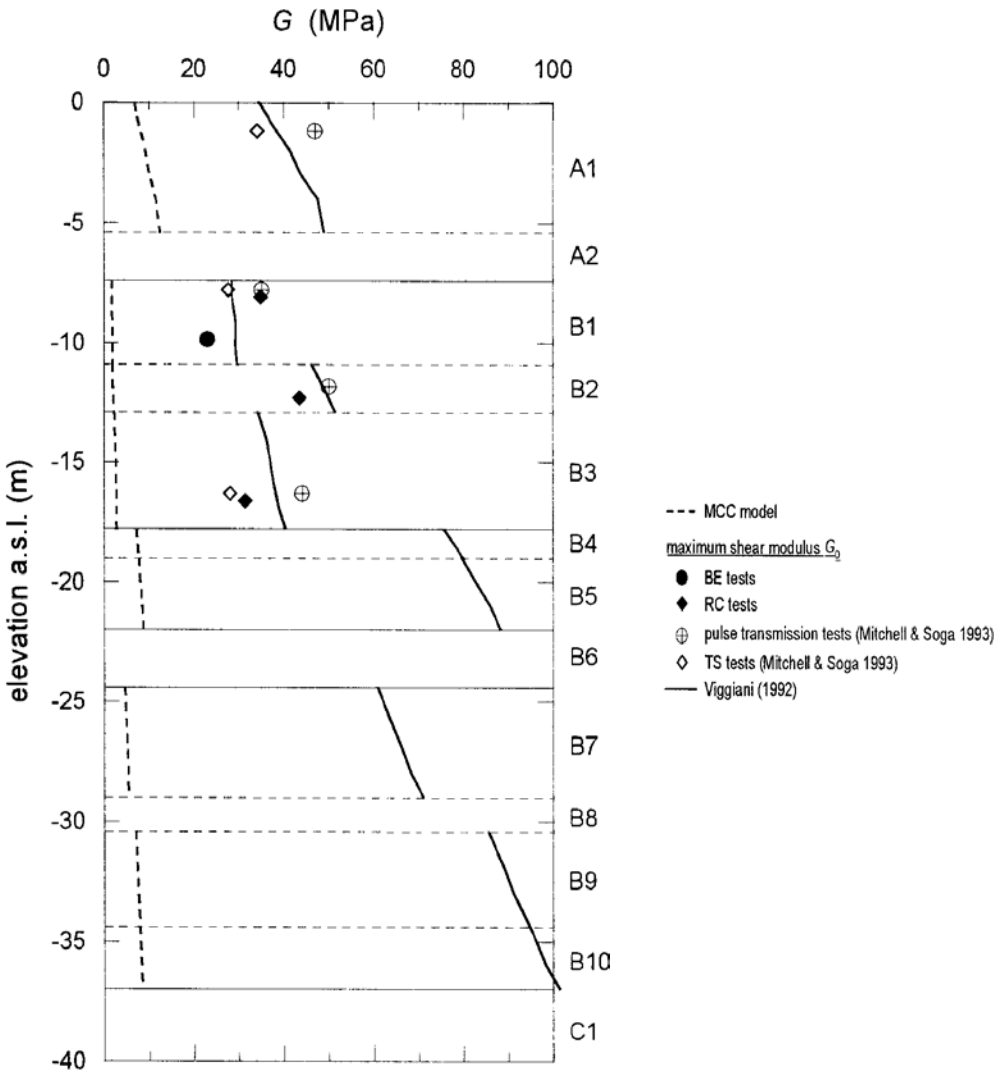
TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Resistencia no drenada



Rigidez del suelo



TORRE DE PISA

Estudios geotécnicos

Parámetros para modelo de MCC

Layer	Symbol	I_p	S	n	m
Horizon A	MG	—	—	—	—
	A1*	14	17.7	0.72	2.25
	A1'	14	17.7	0.72	2.25
	A2	—	—	—	—
Upper Clay	B1	44	5.6	0.82	2.07
	B2	25	11.6	0.77	1.05
	B3	44	5.6	0.82	2.07
Intermediate Clay	B4	22	13.0	0.76	1.91
	B5	22	13.0	0.76	1.91
Intermediate Sand	B6	—	—	—	—
Lower Clay	B7	35	7.9	0.80	1.96
	B8	29	9.9	0.79	1.83
	B9	29	9.9	0.79	1.83
	B10	29	9.9	0.79	1.83

TORRE DE PISA

Causas de la falla

(a) Causa original:

- **La mayor compresibilidad del suelo en el lado sur**

(b) Causa secundaria:

- **La mayor presión en el mismo lado**

Ref.: Terracina (1962)

TORRE DE PISA

La segunda causa ha ido incrementándose y ha sido calculada por la teoría del diagrama lineal, las curvas muestran en cada caso la diferencia de presiones y asentamientos en los lados sur y norte

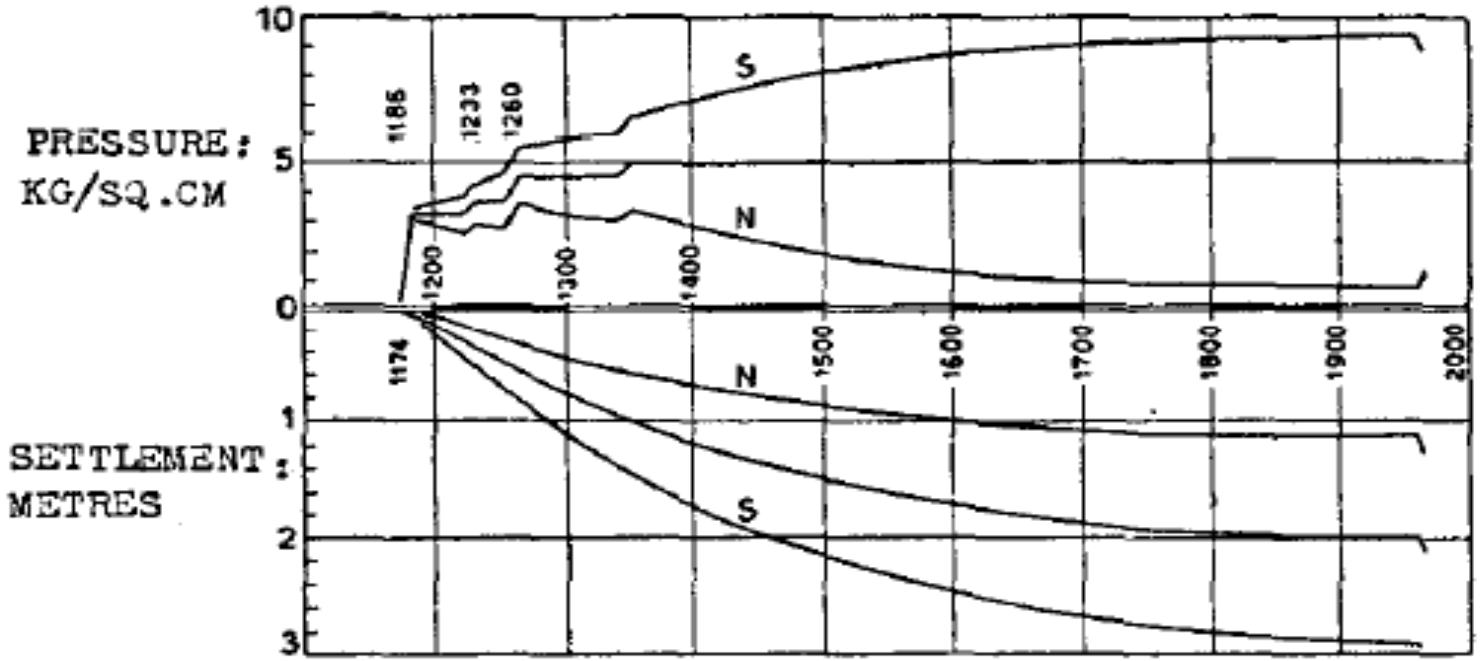


Fig. 2

Ref.: Terracina, 1962

TORRE DE PISA

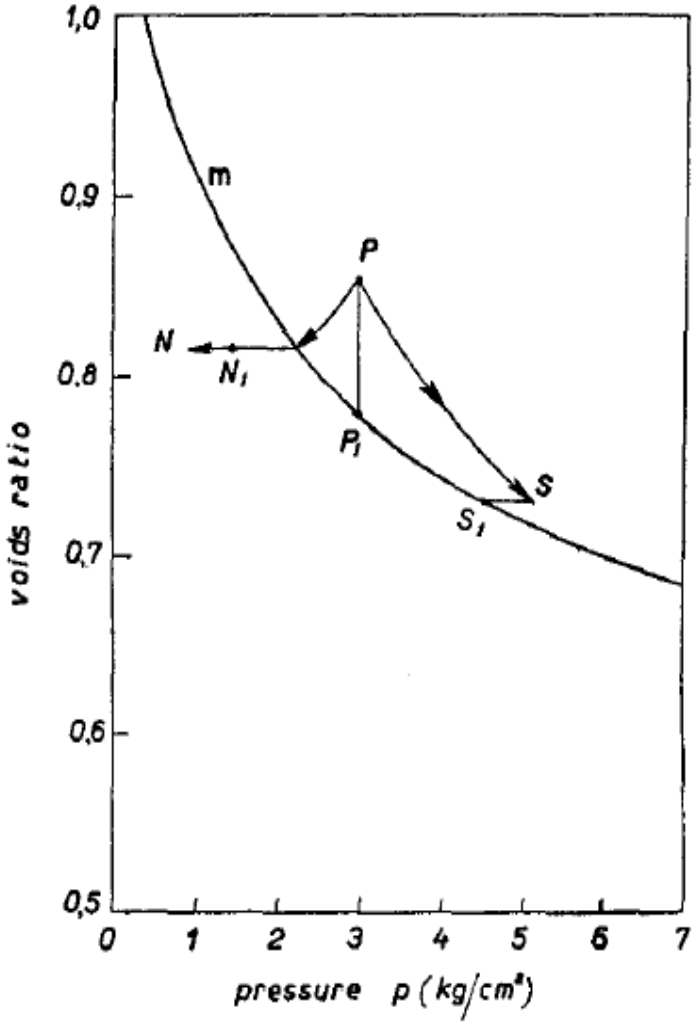


Fig. 3.

La Figura muestra que m es la línea del suelo consolidada, lo que ha sido obtenido de los resultados de las pruebas edométricas realizadas sobre material remoldeado comenzando desde el límite de liquidez.

Se puede deducir como primera aproximación, que los puntos debajo de la línea m representan posiciones de equilibrio, y los que están por encima de la línea representan condiciones no consolidadas.

La línea P - PI representa un ensayo en edómetro.

Ref.: Terracina (1962)

TORRE DE PISA

Propuesta de estabilización de Terracina ,1962

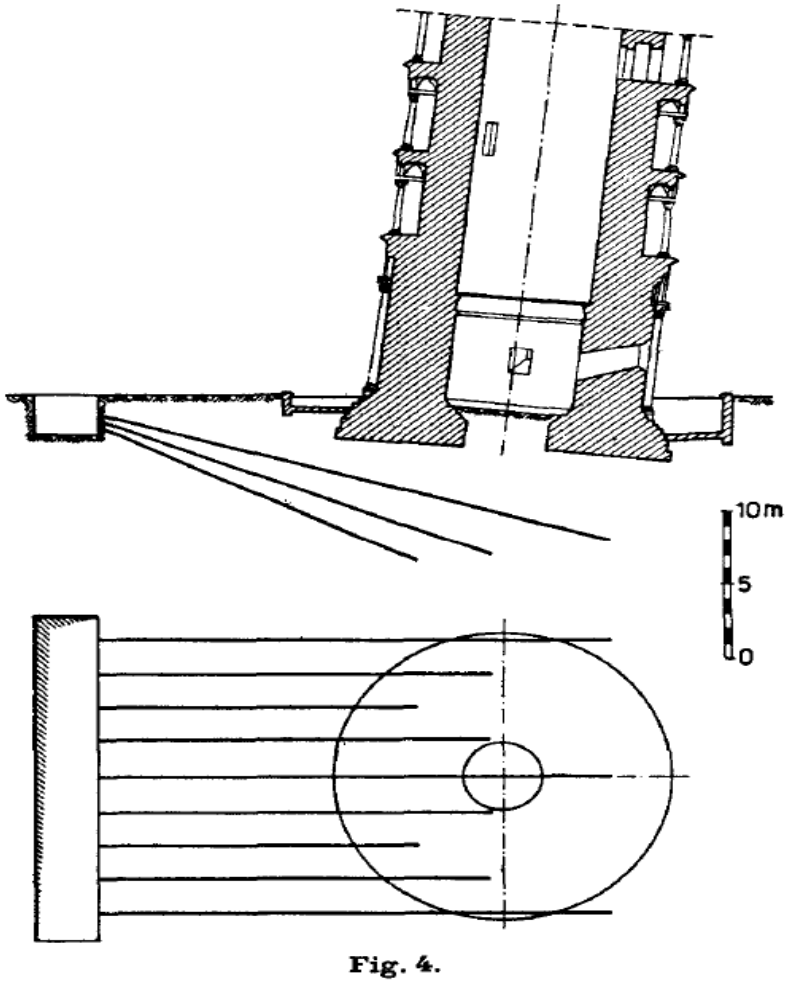


Fig. 4.

Es muy probable que una reducción de 1% en la inclinación (que ahora es del 10%) sea suficiente, llevando los valores de la presión al nivel de los que existían hace 200 o 300 años, para detener el movimiento de la torre.

Esta corrección podría efectuarse de la manera más sencilla y segura mediante la eliminación de material del lado norte por una serie de perforaciones, que se pueden organizar como se muestra en la figura.

TORRE DE PISA

Concurso de 1972

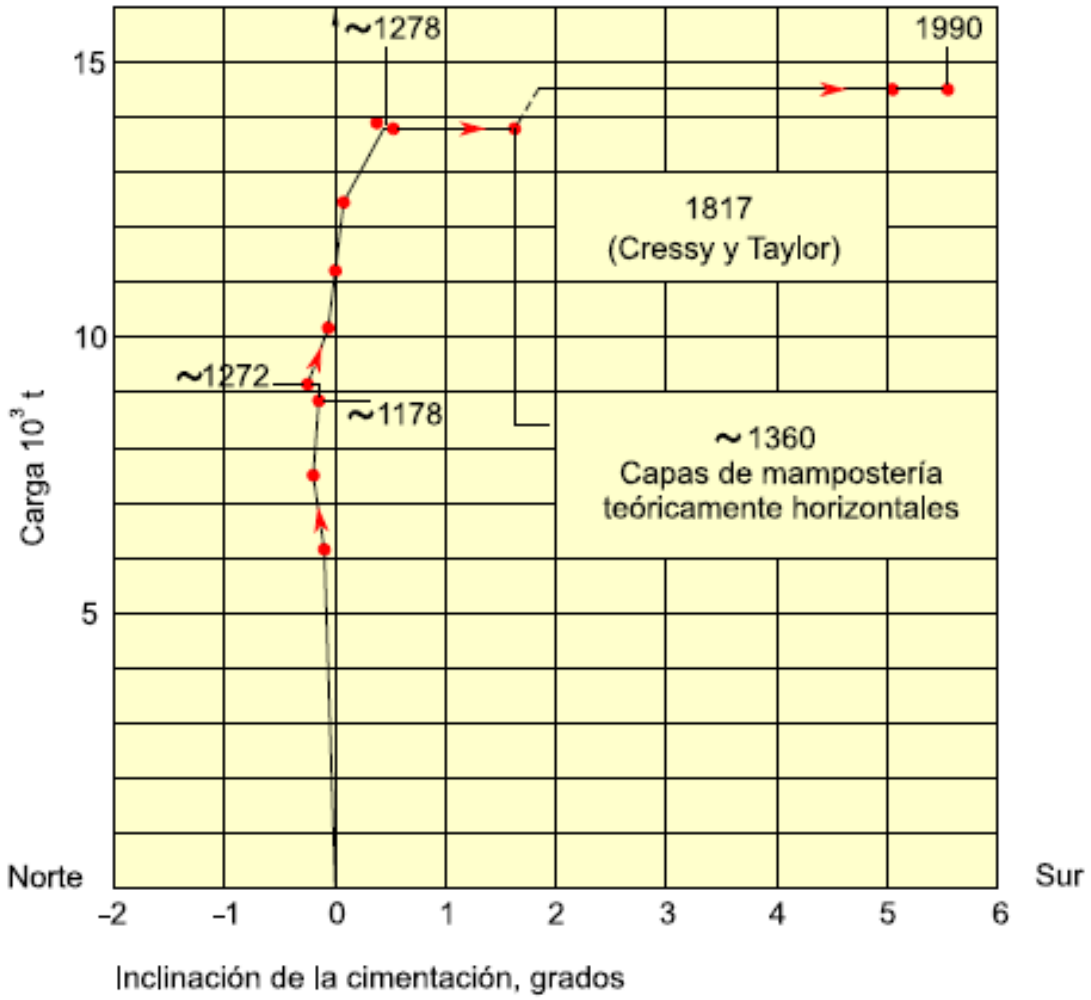
En ese año el Gobierno Italiano convocó a lo que llamó el Concurso a Contrata para seleccionar la mejor manera de proteger la Torre sin intentar corregir su inclinación, en el que participaron más de 50 proyectos, algunos ingeniosos y otros poco afortunados. Además, a largo de los años, se han presentado decenas de proyectos para corregir la inclinación de la Torre.

Trabajos de estabilización

En 1990 el Gobierno italiano, preocupado por el progresivo aumento de la tasa de inclinación y el riesgo de colapso estructural debido a la fragilidad de la mampostería, designó un Comité Internacional multidisciplinario para la salvaguardia y estabilización de la Torre Inclinada de Pisa. Una descripción exhaustiva de las actividades del Comité, incluídos los que se centran en la estabilidad estructural y las consiguientes necesidades de refuerzo de la mampostería.

TORRE DE PISA

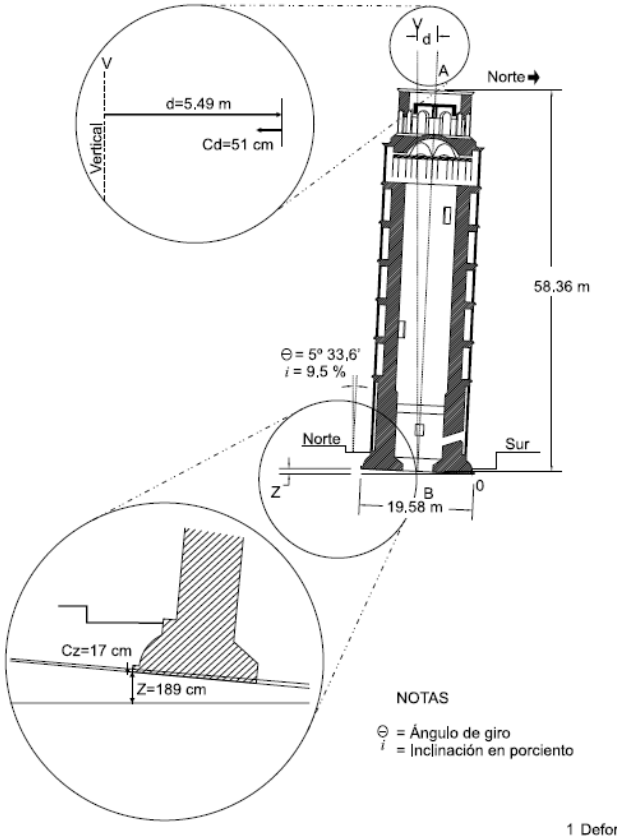
Inclinación de la cimentación de la Torre Pisa.



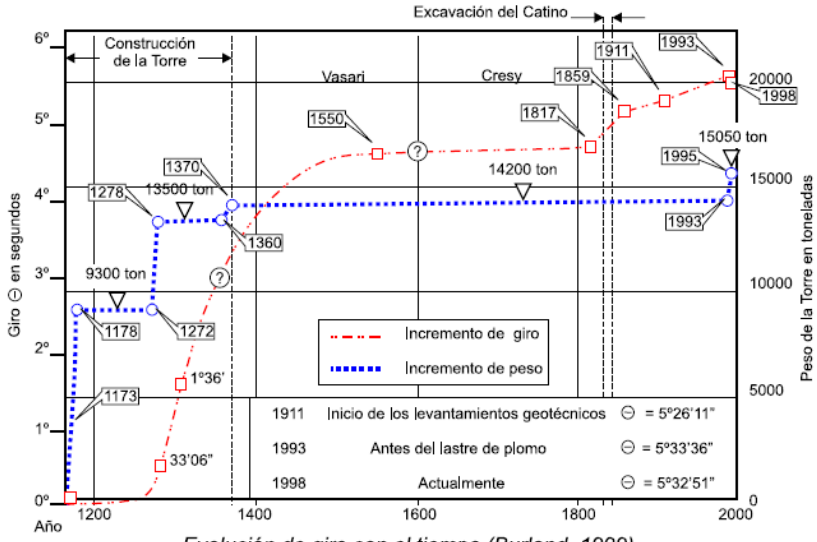
TORRE DE PISA

Valores medidos de la deformación y la corrección de la Torre Pisa.

Hacia 1990 la velocidad con la que se inclinaba la Torre era de 5.4” por año y su inclinación total era de unos 5.5°, equivalente al 9.6 % de desplomo. Estas inclinaciones resultan del hundimiento diferencial de la base. Para ese entonces el extremo sur se había hundido 1.84 m con respecto al lado Norte.



El hundimiento teórico estimado por la consolidación de las arcillas es de 2.8 m, lo que implica que el lado norte se ha hundido 1,86 m y el lado sur 3,75 m para alcanzar el diferencial de 1.89 m medidos en 1993.



Evolución de giro con el tiempo (Burland, 1999)

Deformación angular	Desplomos	Deformación diferencial
Acumulada total (Θ = 5° 33.6') 1)	*Máximo* d = 58.36 sen 5.56° = 5.65 m	$z = \frac{19.58}{58.36}$ 5.65 = 1.89 m
Anual (Θ = 5.06") 2)	*Anual* Δd = 58,36 sen 5,06"=1,43 mm	$\Delta z = \frac{19.58}{58.36}$ 1.43 = 0.48 mm
Corrección alcanzada (Θ = 30.7') 3)	*Corrección lograda* Cd = 58,36 sen 30.7' = 52.1 cm (52,1 es teórico, 44,2 es real)	Cz = $\frac{19.58}{58.36}$ 52.1 = 17.5 cm (17,5 es teórico, 16 es real)

1 Deformación medida en 1993.

2 Las mediciones geotécnicas de 1911 a 1993 (antes de colocar el lastre) demuestran que la torre giró 7'25" en esos años.

3 Los parámetros de la corrección son: Θ=30.7' y Cz=16 cm (Jamiolkowski, 2001)

4 Este giro correctivo alcanzado de 30,7' se puede interpretar literalmente como regresar a la torre a la inclinación que tenía hace 333 años; sin embargo, la gráfica histórica de su inclinación demuestra que se recupera a la posición de hace unos 150 años.

TORRE DE PISA

Con respecto a la sismicidad

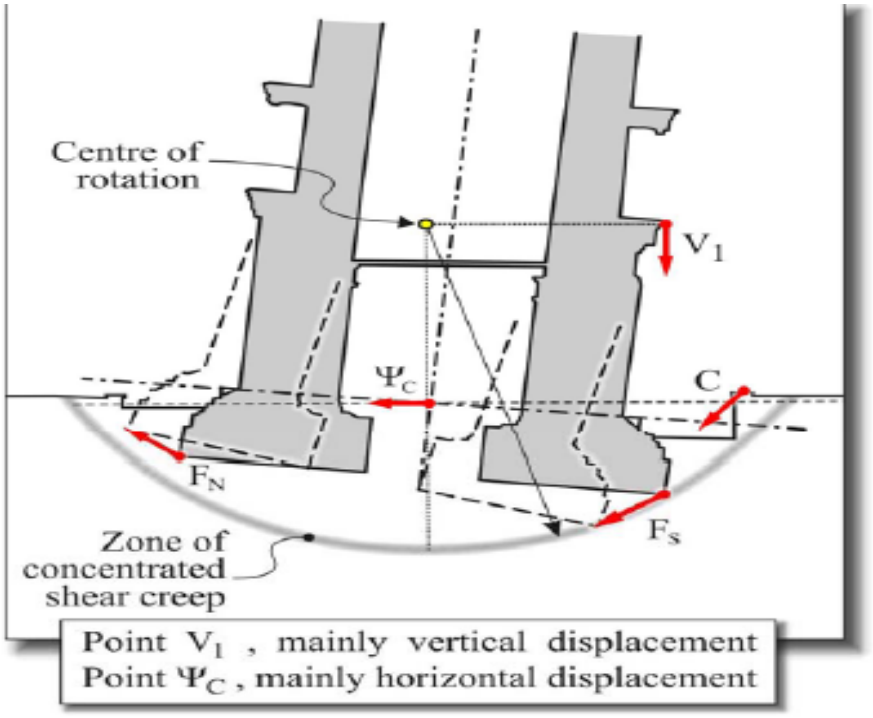
El aspecto que consideraron más detenidamente fue el de la vulnerabilidad sísmica de la torre pues en la región han ocurrido temblores relativamente intensos en el pasado. Determinaron que el esfuerzo medio transmitido al subsuelo es de 49.7 t/m^2, que el periodo fundamental de la torre es 1 Hz mientras que el periodo dominante del subsuelo es de 2.7 a 3 Hz; Como se ve, la Torre no es especialmente vulnerable a los temblores ya que su periodo fundamental se encuentra muy alejado del período dominante del subsuelo y además la dirección del sismo probable es ortogonal a la dirección en la que se inclina la Torre

(Burland, 1992; Jamiolkowsky *et al.,*1993).

TORRE DE PISA

Movimiento de la torre

El descubrimiento fue que el movimiento de la Torre resultó ser crucial en cuatro aspectos:



Kinematically admissible mechanism of ground movement, curvilinear concentrated shear creep zone passing through more plastic layer of horizon A

Figure 5. Motion of Tower foundation during steady creep (gradually accelerates) - Burland, Viggiani (1994).

TORRE DE PISA

Cuatro aspectos cruciales del movimiento de la torre

1. La "inestabilidad de inclinación" de una estructura alta se produce a una altura crítica cuando el momento de vuelco generado por un pequeño aumento en la inclinación es igual o mayor que el momento resistente generado por las fundaciones. No importa cuán cuidadosamente se construya la estructura, una vez que alcanza el punto crítico la altura mínima inducirá inestabilidad de inclinación. Como señaló (Hambly, 1985): "... **la inestabilidad inclinada no es por falta de resistencia del suelo, sino por rigidez insuficiente** ".

2. La observación de que el lado norte había aumentado constantemente llevó directamente a la sugerencia de que la aplicación de un contrapeso de plomo a la mampostería de los cimientos en el lado norte podría ser beneficioso como estabilizador temporal reduciendo el momento de vuelco (Burland et al, 1993).

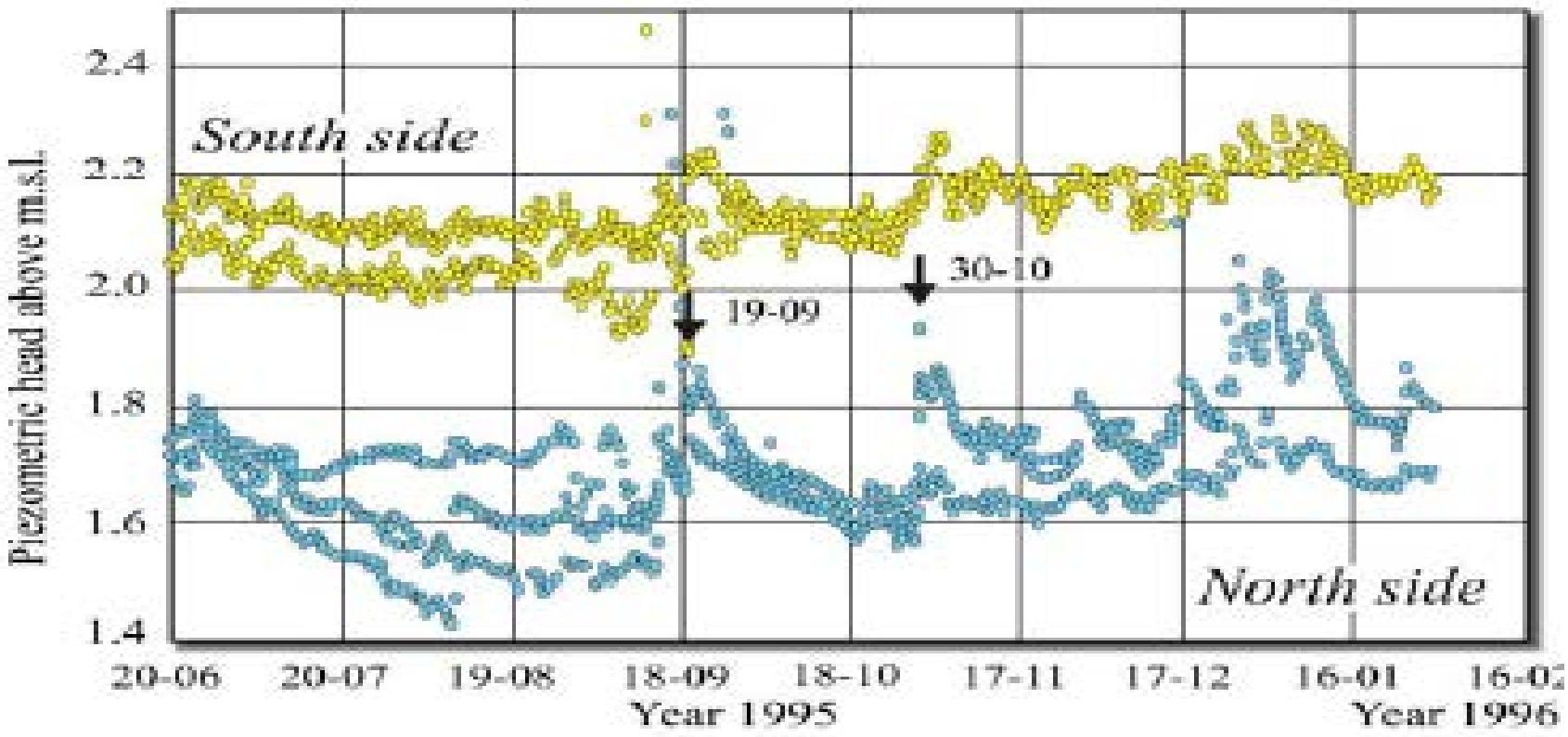
TORRE DE PISA

Cuatro aspectos cruciales del movimiento de la torre

3. El patrón de movimiento del suelo llevó a la importante conclusión de que el asentamiento se encuentra en el Horizonte A y nó dentro de la arcilla marina subyacente como había sido ampliamente asumido en el pasado. Por tanto, se puede concluir que este último estrato debe haber pasado por un período considerable de consolidación desde el final de la construcción. (Burland y Potts, 1994).

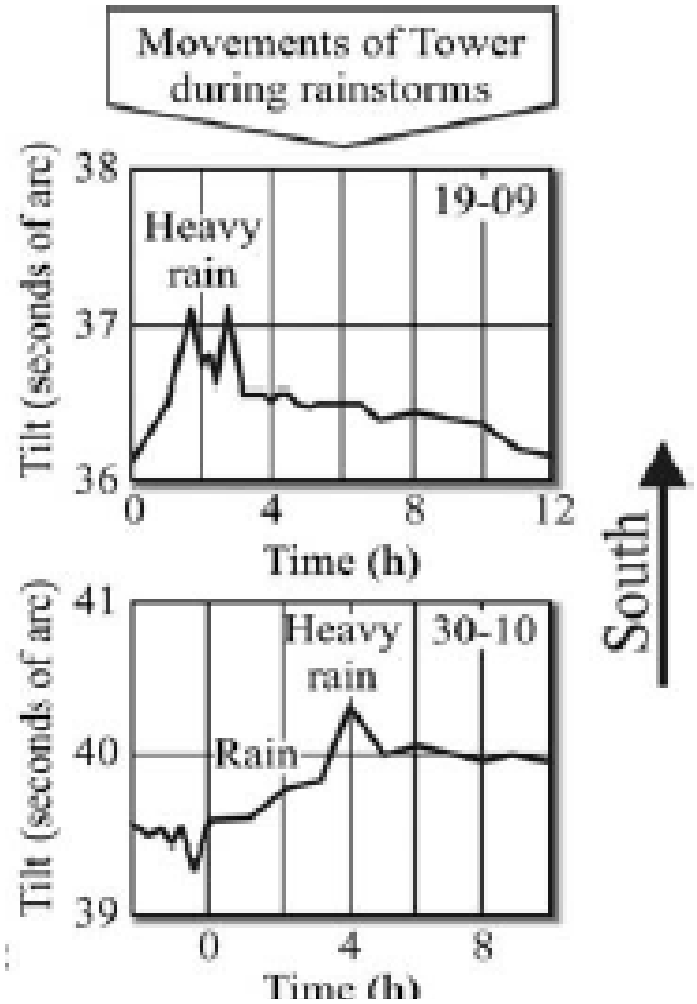
3. Otra causa probable de la progresiva rotación fue **un nivel fluctuante del agua subterránea debido a las fuertes tormentas estacionales** que ocurren entre septiembre y diciembre de cada año. En consecuencia, se instalaron varias tuberías verticales en el Horizonte A alrededor de la Torre. Las mediciones realizadas durante varios años han confirmado esta hipótesis. El inicio de la rotación cada año coincide con aumentos muy bruscos del nivel del agua subterránea en el Horizonte A después de cada fuerte tormenta (Burland et al, 2003).

TORRE DE PISA



La figura muestra las fluctuaciones del nivel del agua subterránea durante un período de tiempo seleccionado en los piezómetros ubicados al Norte y al Sur en las cercanías de la Torre.

TORRE DE PISA



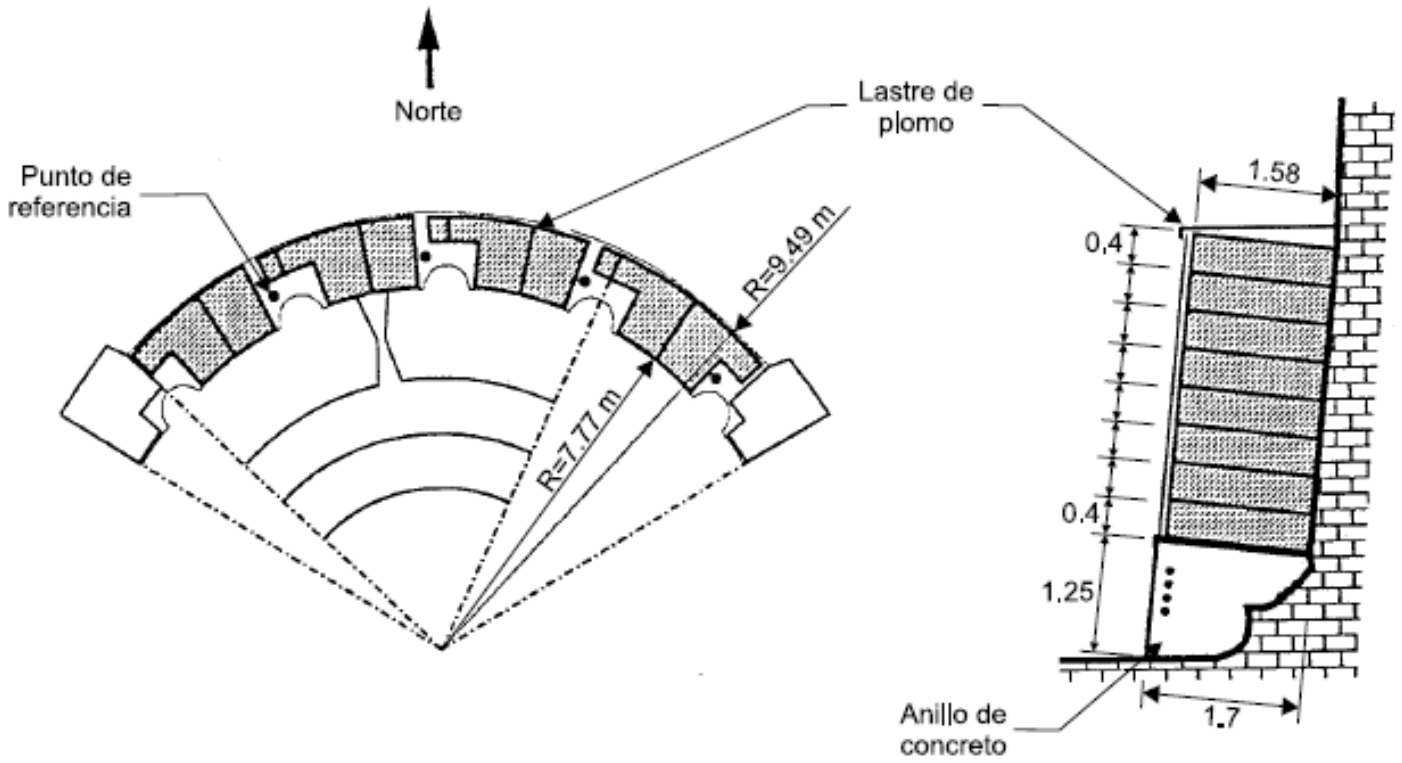
Las figuras muestran los cambios en Inclinación de la Torre en segundos, como resultado de dos fuertes tormentas que ocurrieron en septiembre y octubre de 1995.

Cada uno de estos eventos causó un aumento mayor en la carga piezométrica en el lado norte que en el lado sur de la Torre. Esto resultó en una rotación hacia el sur de aproximadamente un segundo de arco en cada caso, que fue solo parcialmente reversible.

TORRE DE PISA

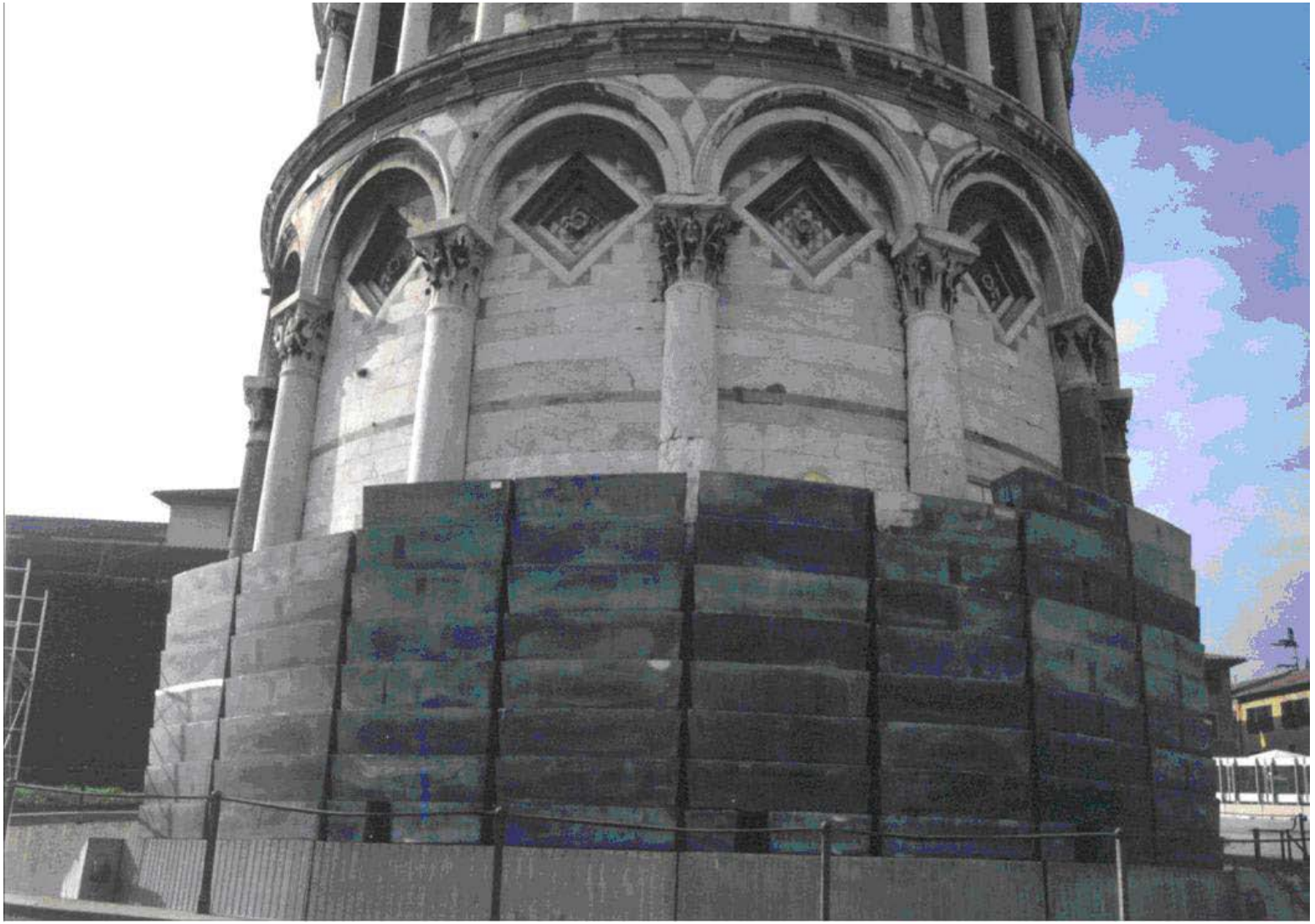
Medidas temporales de estabilización de cimientos

La estabilización temporal de la cimentación se logró durante el segundo semestre de 1993 mediante la aplicación de 600 toneladas de plomo en el lado norte de los cimientos a través de un anillo de concreto removible postensado alrededor de la base de la torre a nivel del zócalo.



TORRE DE PISA

Medidas temporales de estabilización de cimientos



TORRE DE PISA

Medidas permanentes de estabilización de cimientos

La estabilización temporal provocó una reducción en la inclinación de aproximadamente un minuto de arco y, lo que es más importante, redujo el momento de vuelco en aproximadamente un 10%.

En septiembre de 1995 se aumentó la carga a 900 toneladas para controlar el acelerando movimiento hacia el sur de la Torre durante un intento fallido de reemplazar los antiestéticos pesos de plomo con anclajes temporales al suelo (este difícil período durante la actividad del Comité se ha denominado "Septiembre Negro“). El Comité Técnico se vio obligado a aceptar a la subexcavación como la única alternativa siendo que al inicio la consideraban como poco aplicable.

.

TORRE DE PISA

Subexcavación definitiva en Pisa

Comenzó en febrero del año 2000 y terminó en junio del año 2001, con el objetivo de reducir la inclinación de la Torre en medio grado, lo que implicó hacer descender el lado alto 16 cm y con ello garantizar la estabilidad de la Torre por otros 170 años más. El volumen de suelo que se extrajo fue de solamente 37 m^3, a 6 m de profundidad. En la Fig. 14 se muestra el arreglo para la subexcavación.

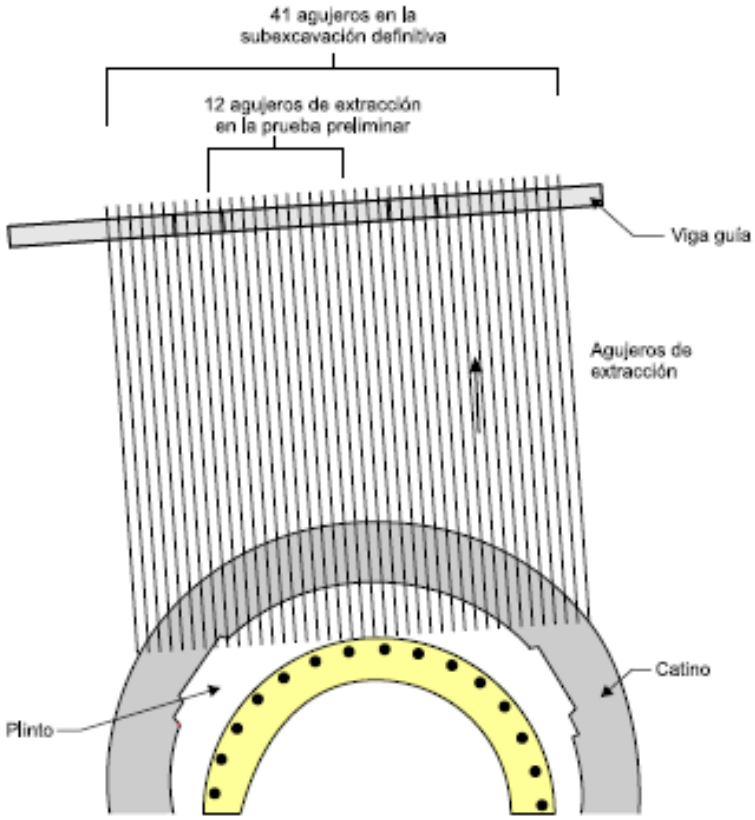


Fig. 14 Arreglo para la subexcavación

TORRE DE PISA

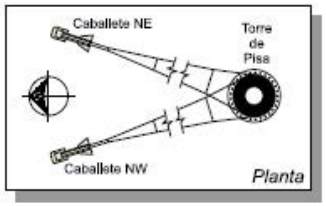
Sistema de seguridad

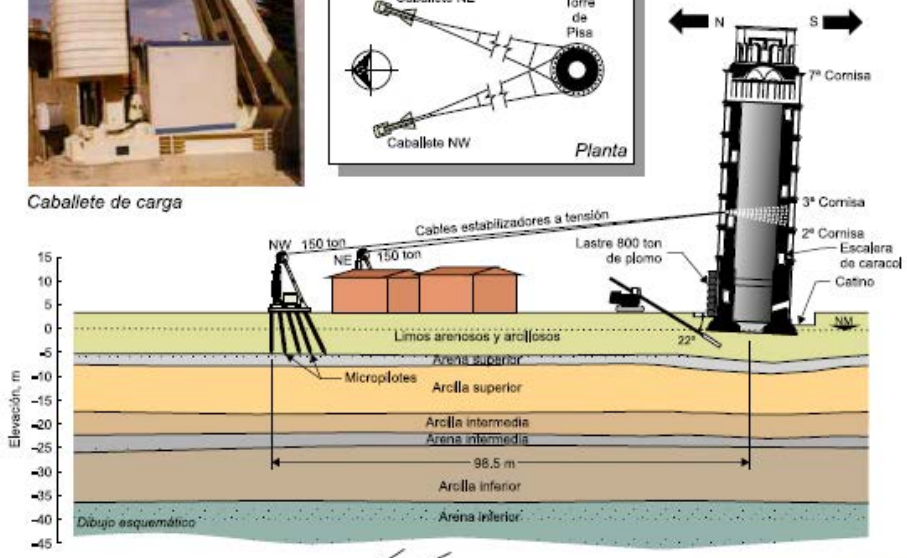
Se colocó un sistema de amarre alrededor de ella, en el nivel de la tercera cornisa, con los cables de atraque fijados fuera de la Plaza de los Milagros. Este sistema está constituído por 15 cables de acero y dos grandes tensores del mismo material ligados a sendas torres de control o caballetes piloteados, provistos con lastre estático y un sistema de actuadores electrohidráulicos para anular las fuerzas inerciales en el caso de que ocurra un temblor.

Caballete de carga

Cable estabilizador

Refuerzo del lado Sur de la escalera en la zona de cables





Máquina para subexcavar

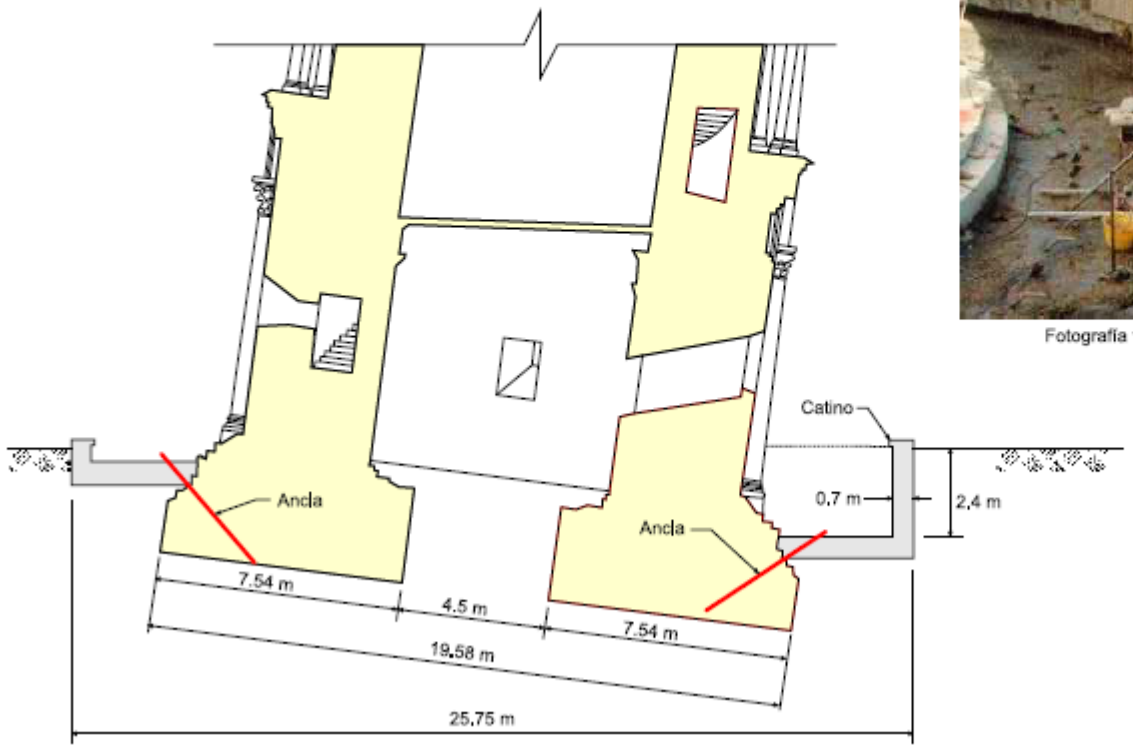
Lastre de plomo

TORRE DE PISA

Acciones complementarias

Se unió estructuralmente mediante anclas la Torre al Catino para incrementar el área de contacto torre suelo, aproximadamente a 504 m^2

Fotografía tomada de Civil Engineering, Marzo 2002



TORRE DE PISA

Técnica de subexcavación

El éxito en los trabajos de Corrección Geométrica de la Torre de Pisa demuestra que la subexcavación ha ganado un lugar en las técnicas de la Ingeniería Civil y que tiene un potencial que puede emplearse para resolver casos similares, aunque subsiste el reto de desarrollar técnicas de menor costo y mayor eficiencia.

TORRE DE PISA

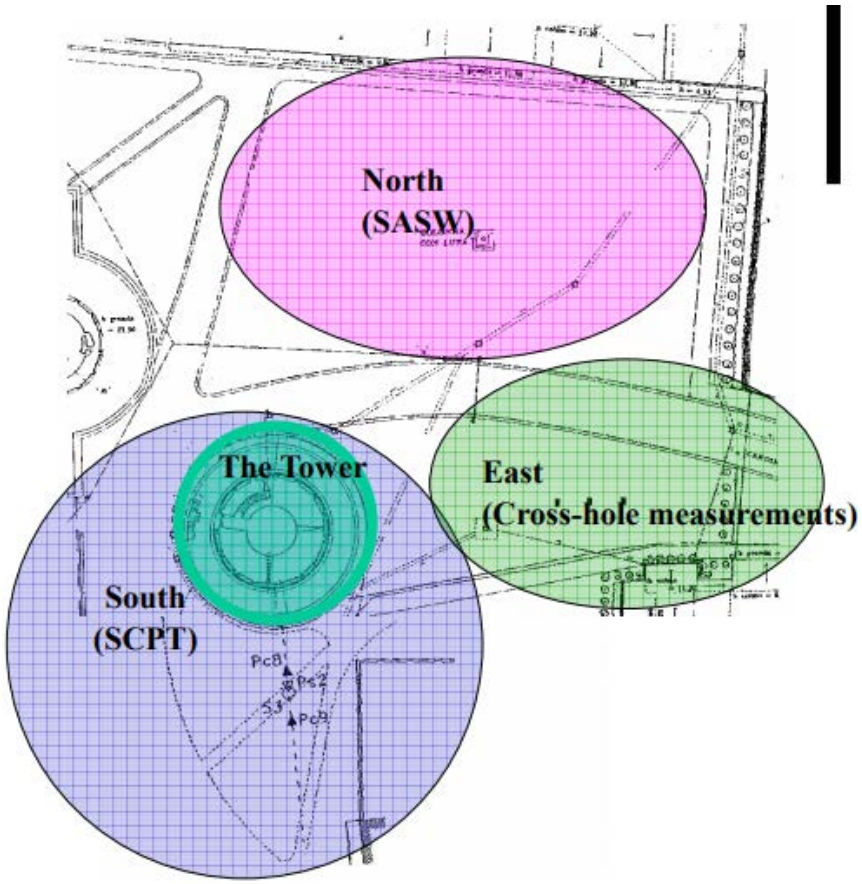
Ensayos geofísicos posteriores

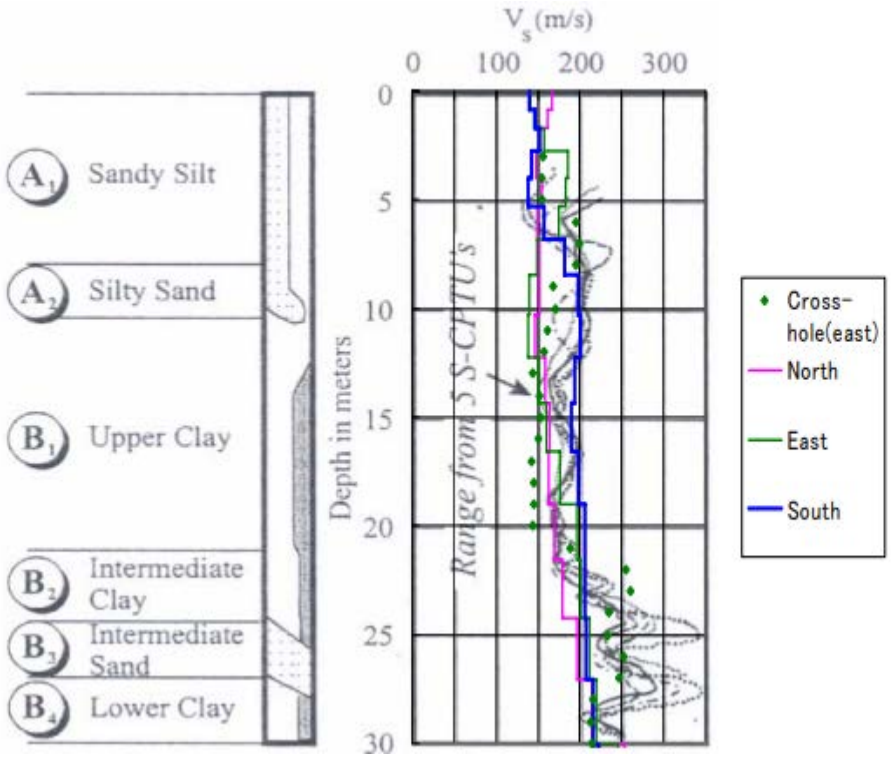
Hayashi (2008) realizó mediciones en los lados sur, norte y este de la Torre de Pisa. Primero realizó un ensayo crosshole para determinar el perfil de velocidades de onda de corte (Vs) , luego ensayos de medición de ondas superficiales por métodos activos y pasivos (MASW y MAM). Posteriormente para verificar la validez de los ensayos de ondas superficiales se hizo una comparación de los perfiles de Vs.

Para el método MASW se emplearon sensores de 4.5 Hz y fueron espaciados de 1 m a 2 m; como fuente activa se usó una comba de 10 kg. Para el método MAM se emplearon sensores de 2 Hz y fueron espaciados a 5 m.

TORRE DE PISA

Ensayos geofísicos

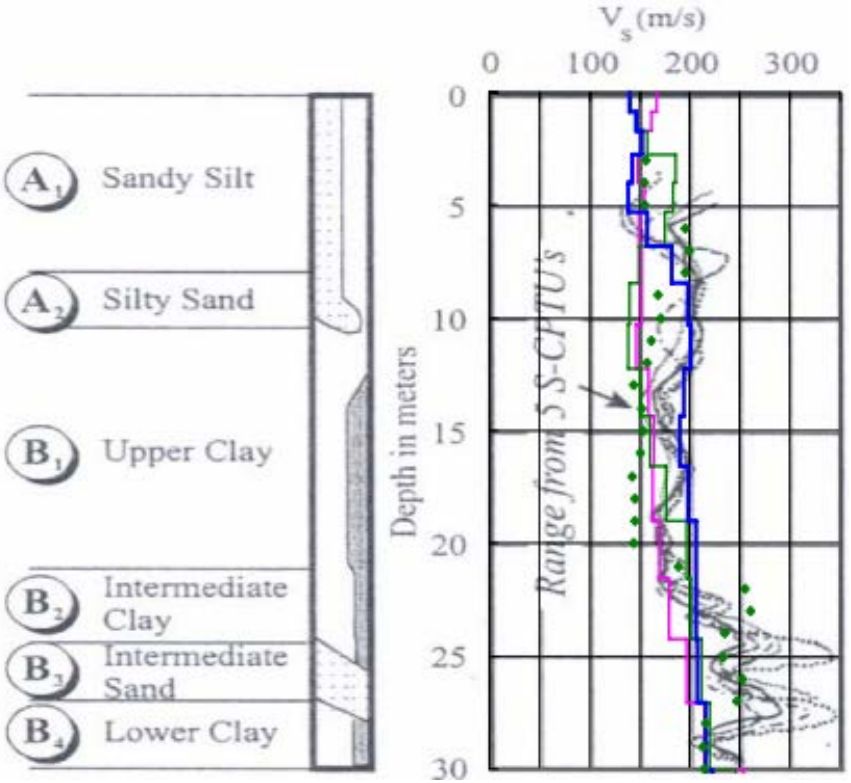


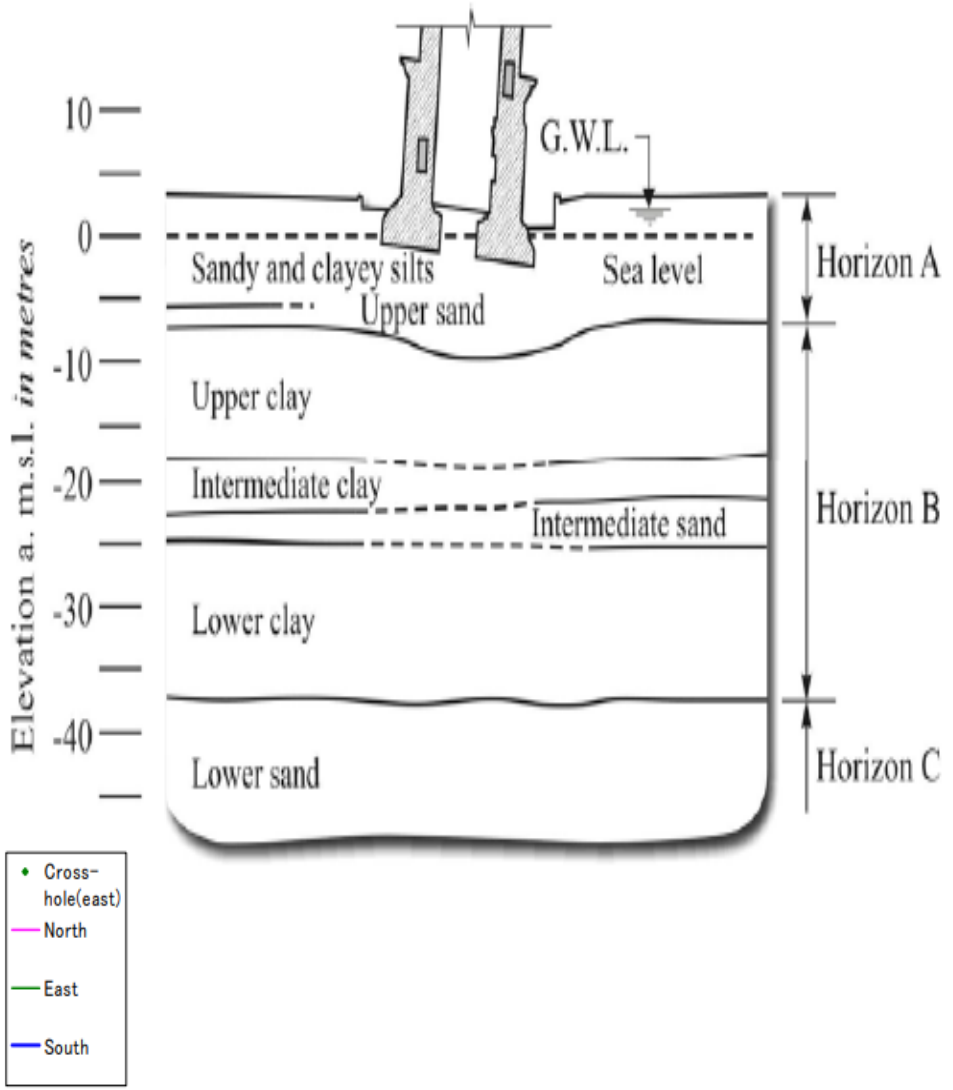


Lado Este - Perfil de Vs (Ensayo Crosshole)

TORRE DE PISA

Comparación de los ensayos geofísicos con el perfil del suelo

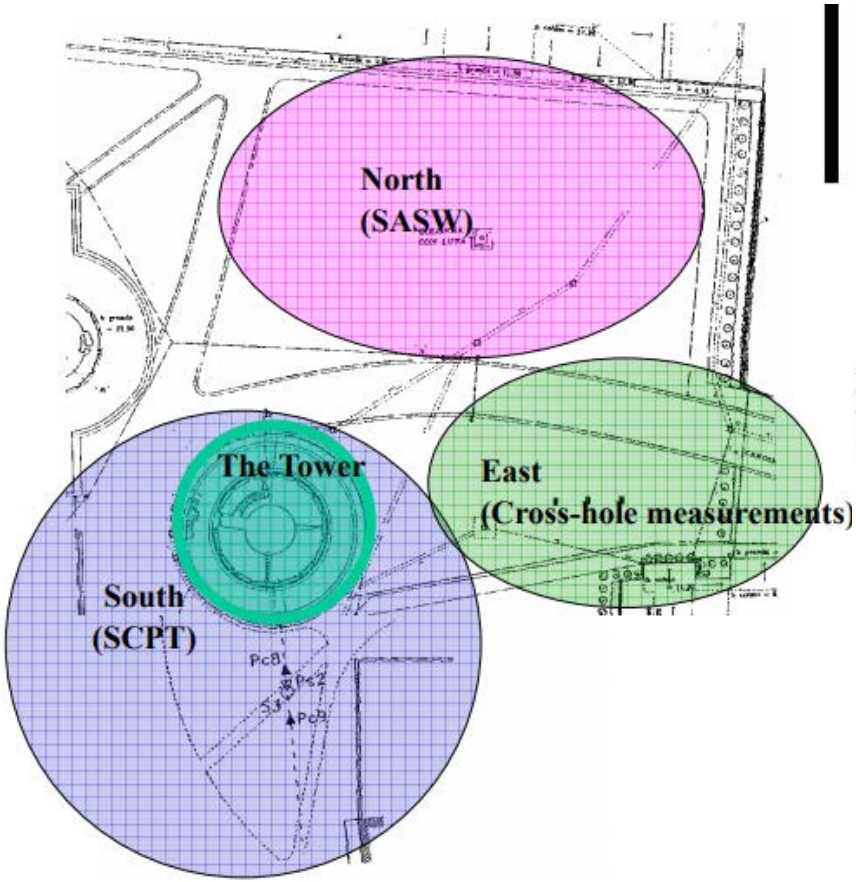


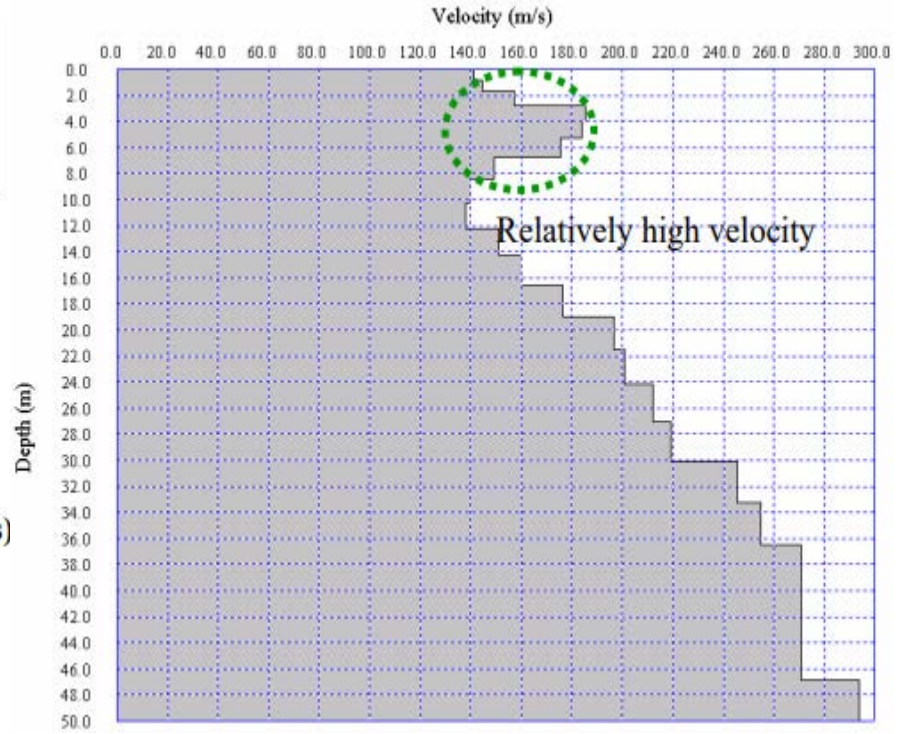


Lado Este - Perfil de Vs (Ensayo Crosshole)

TORRE DE PISA

Ensayos geofísicos

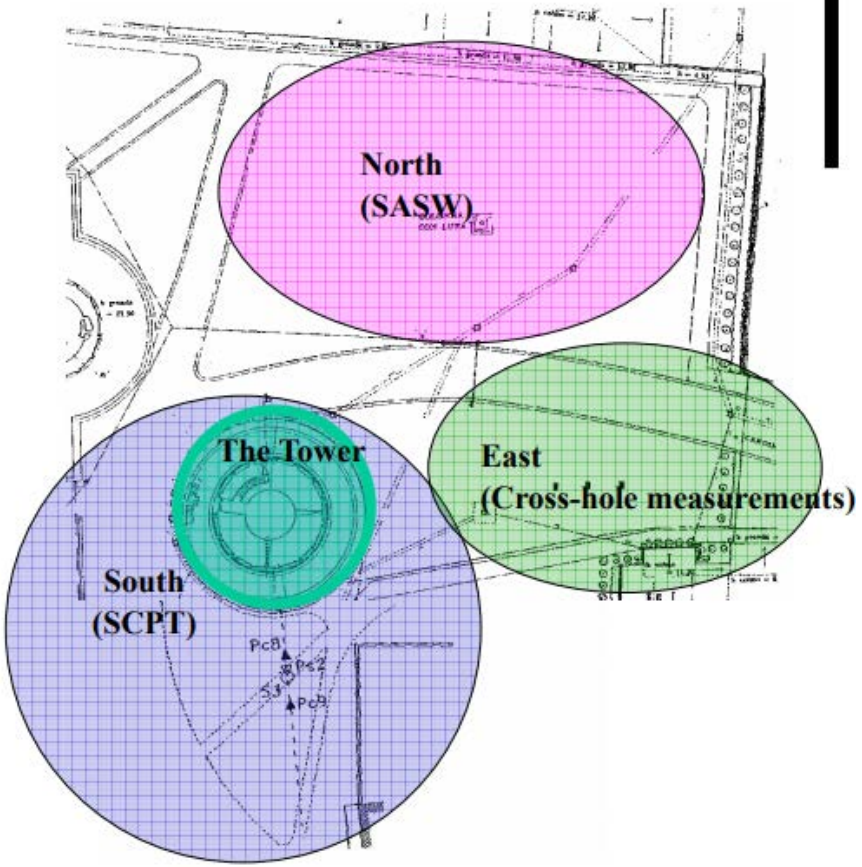




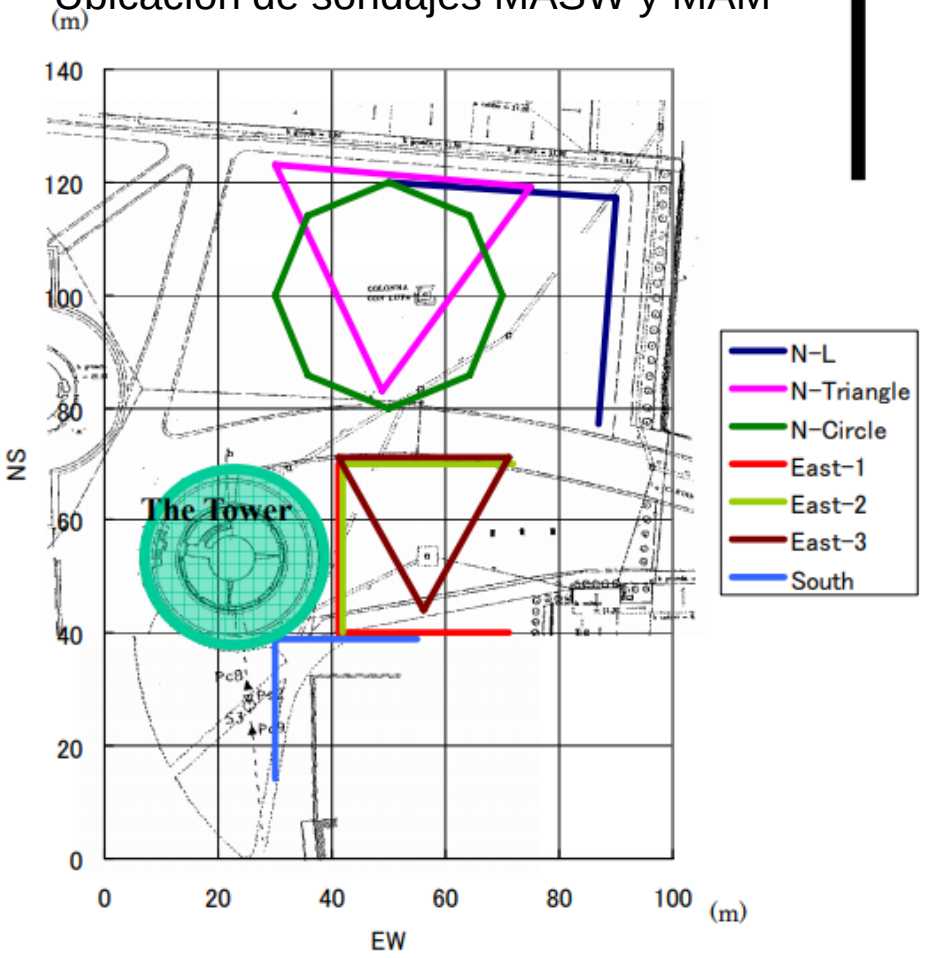
Lado Este - Perfil de Vs (Ensayo MASW)

TORRE DE PISA

Ensayos geofísicos

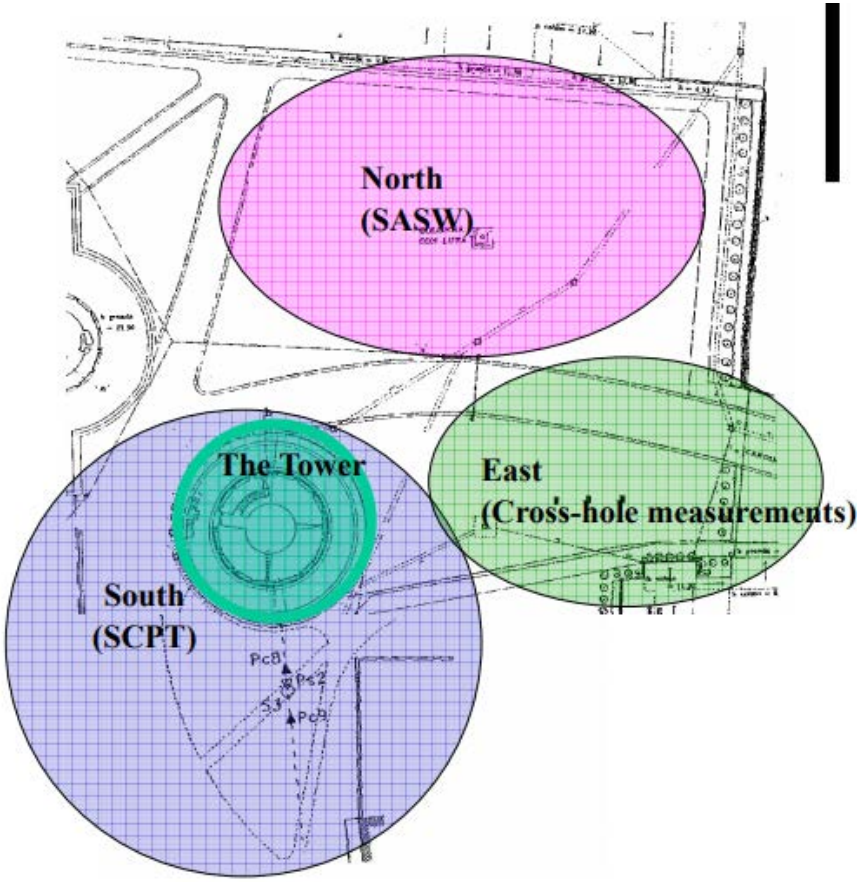


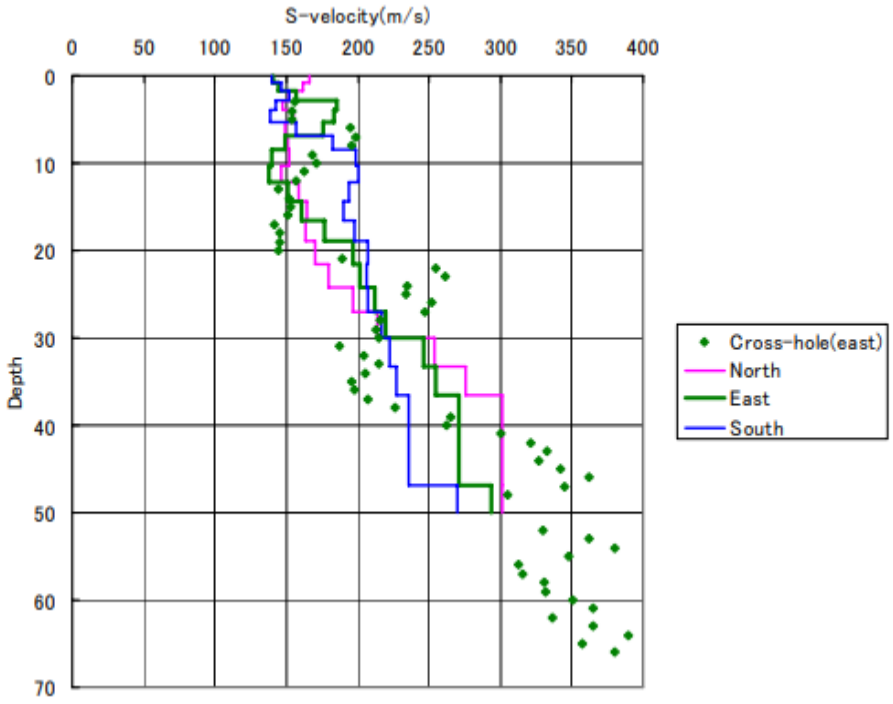
Ubicación de sondajes MASW y MAM



TORRE DE PISA

Ensayos geofísicos

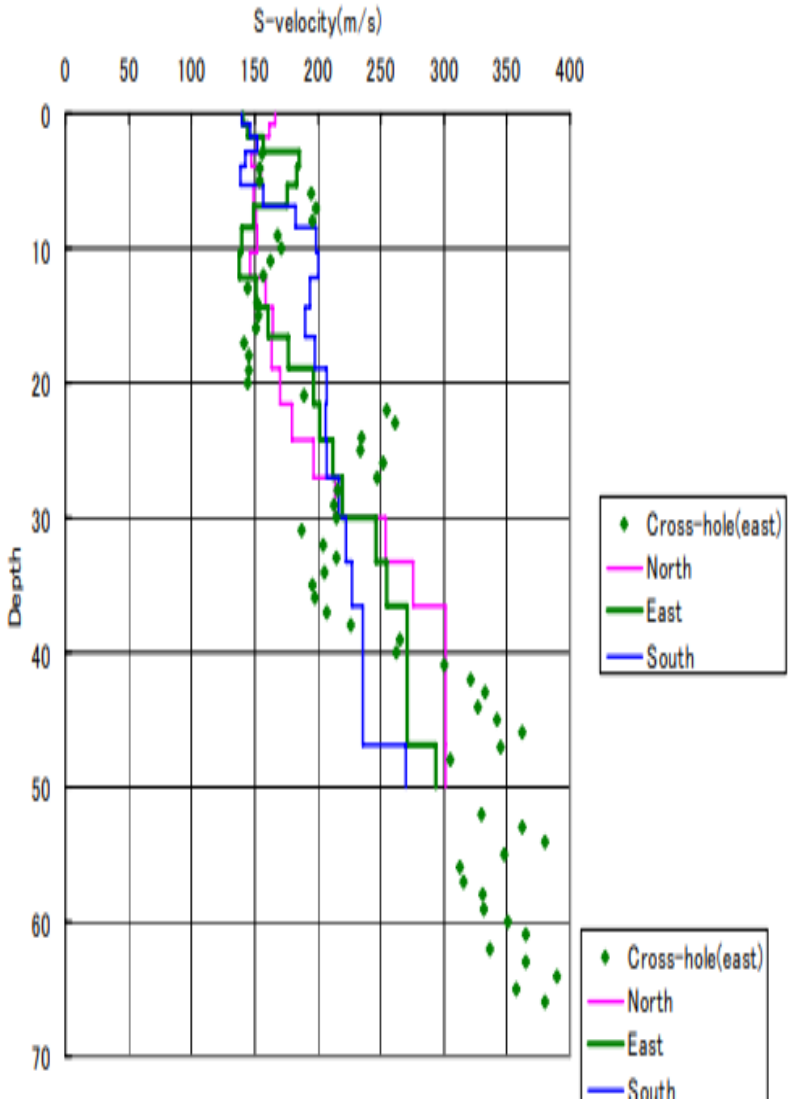


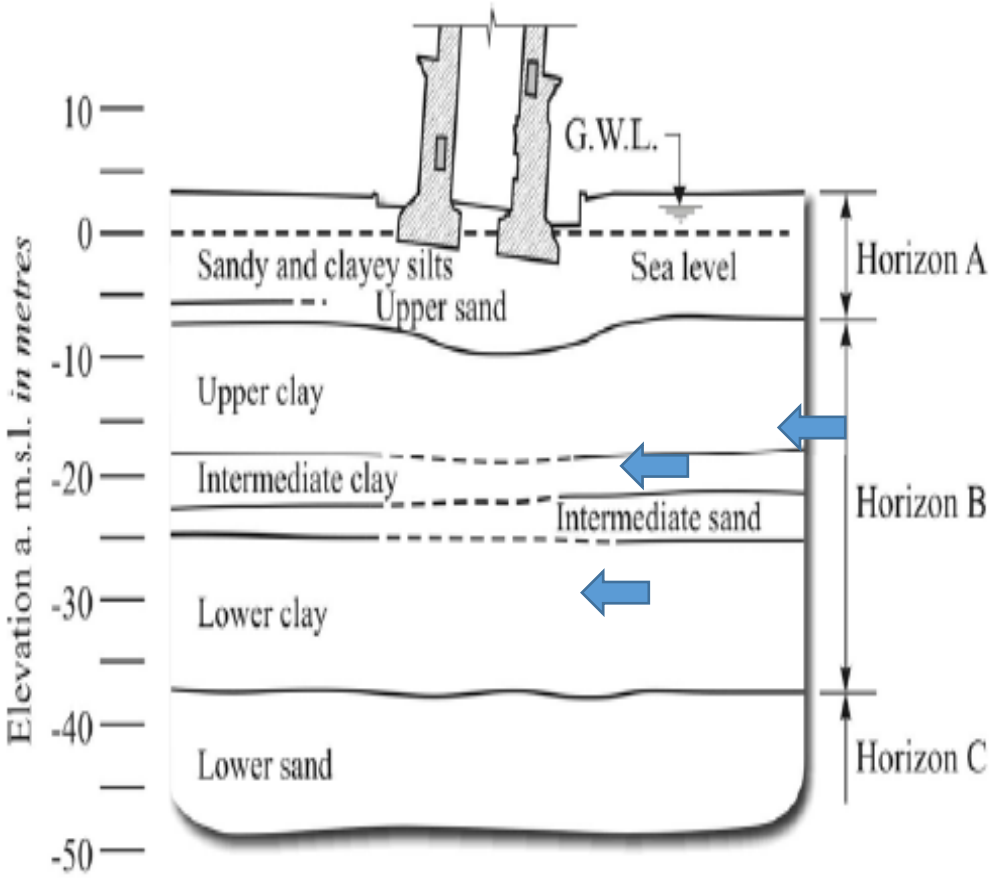


Comparación de los perfiles de Vs obtenidos del MASW+MAM en el lado sur, norte y este con el ensayo crosshole

TORRE DE PISA

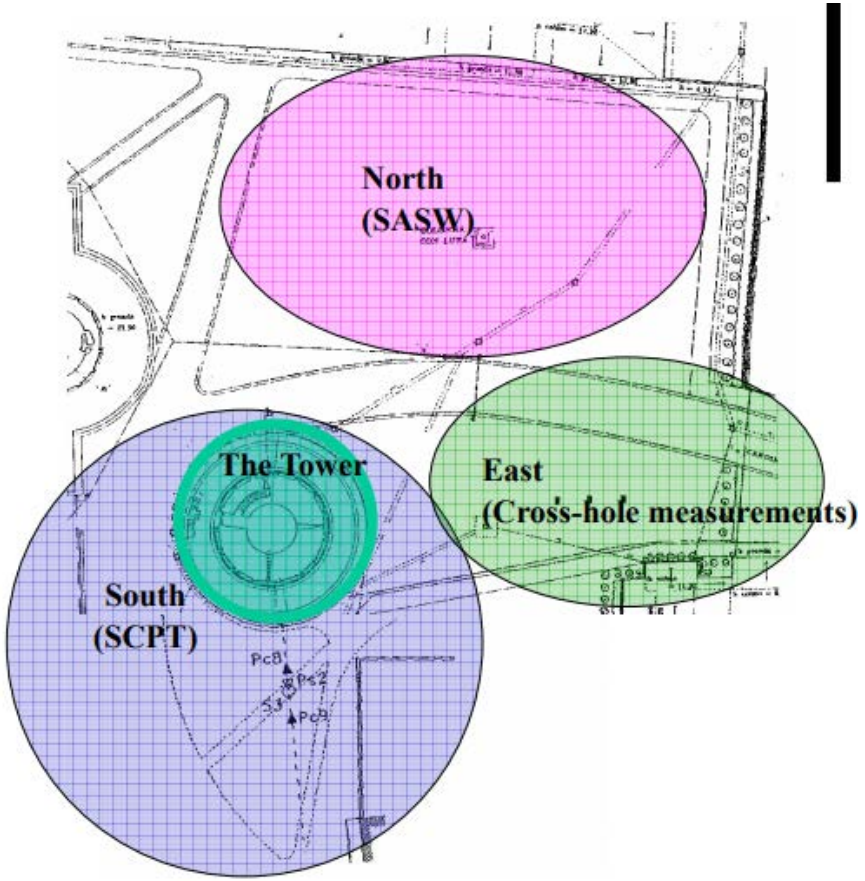
Ensayos geofísicos – Perfil de Vs



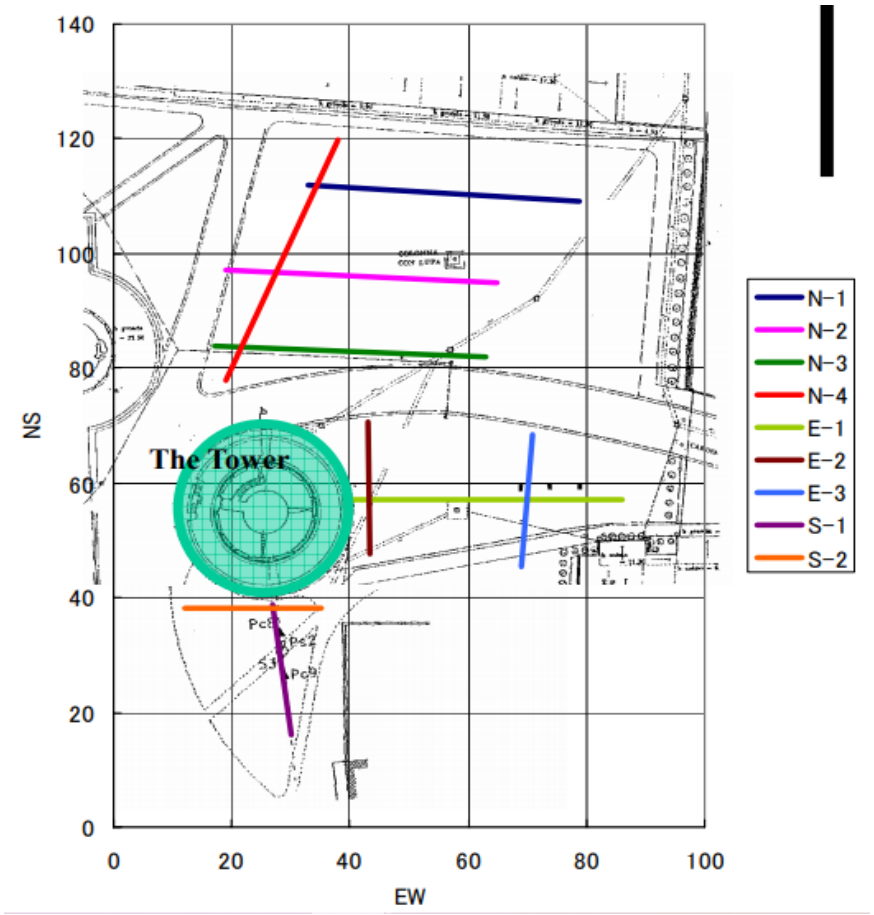


TORRE DE PISA

Ensayos geofísicos

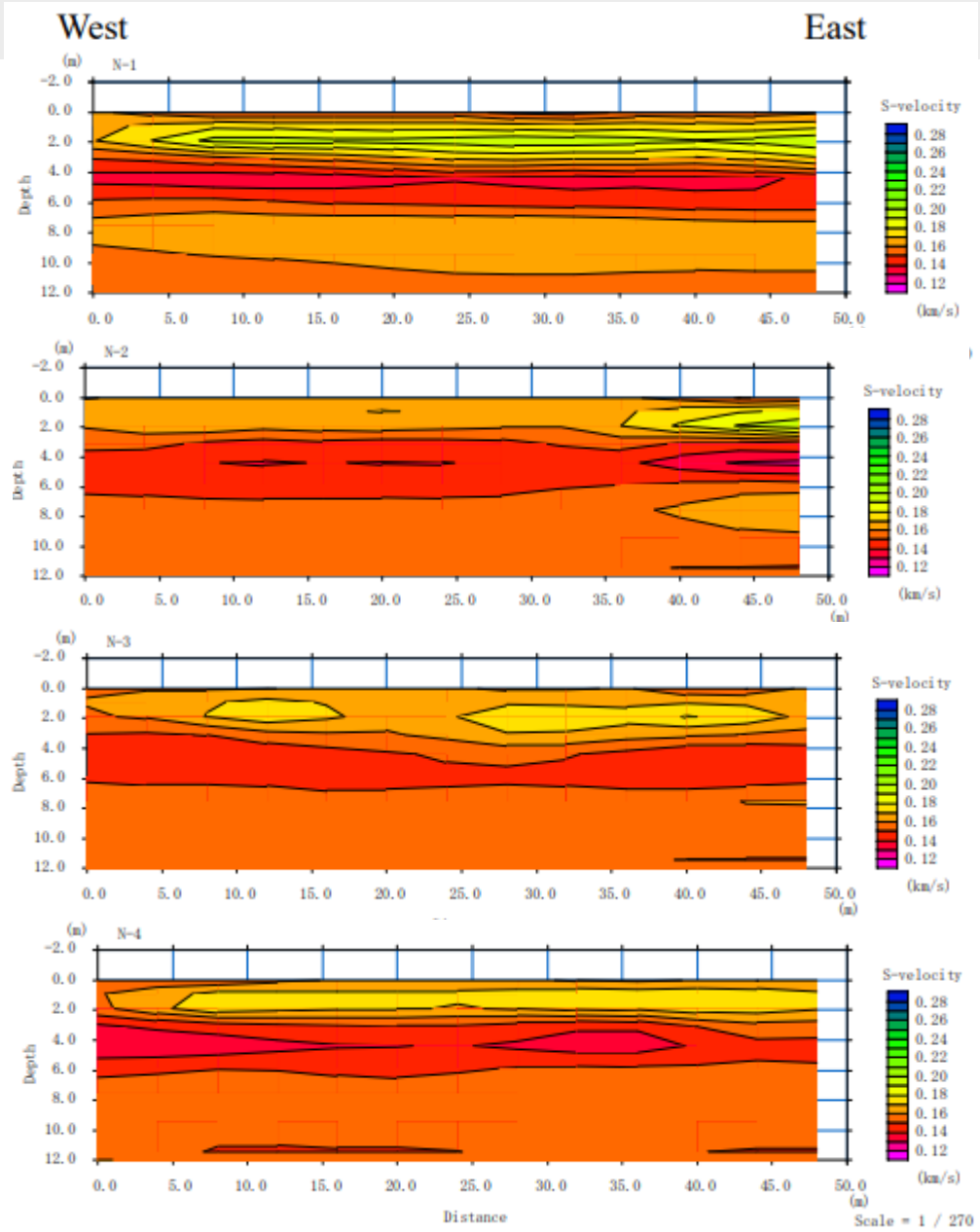


Ubicación de sondajes MASW2D



TORRE DE PISA

Ensayos geofísicos – Perfil de Vs

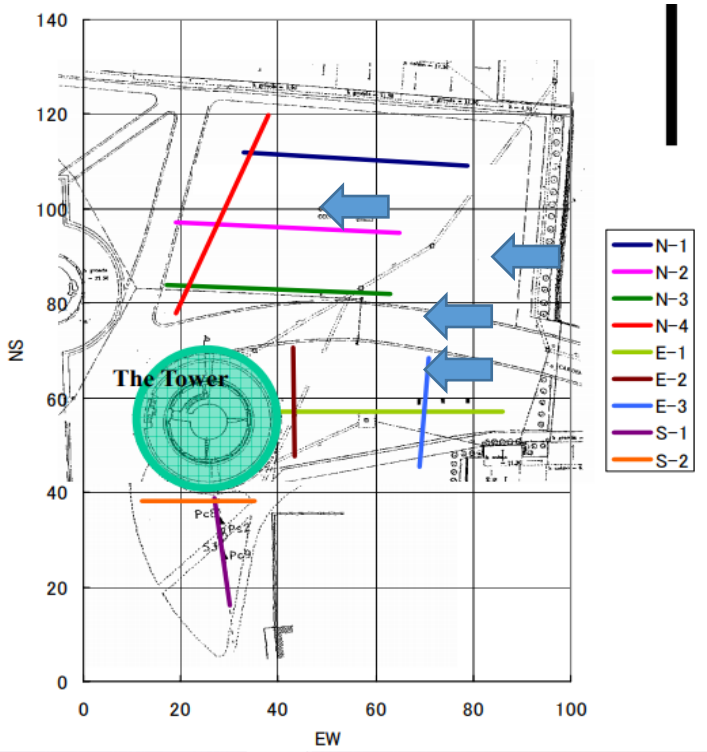


Línea N-1

Línea N-2

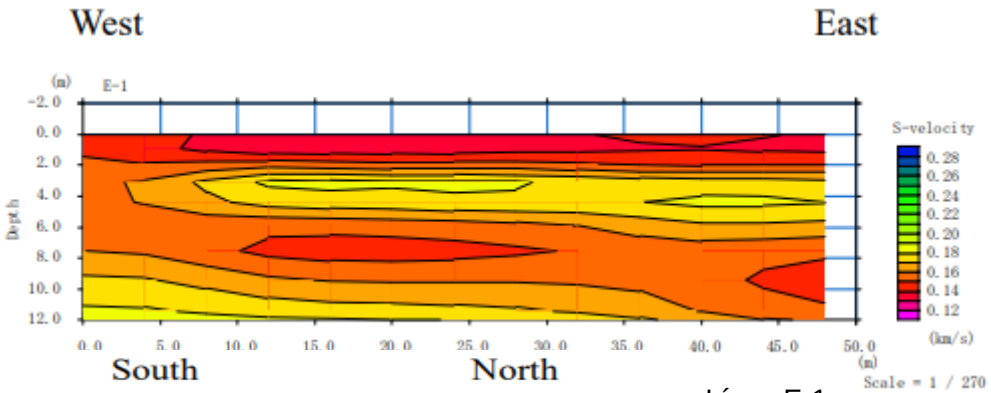
Línea N-3

Línea N-4

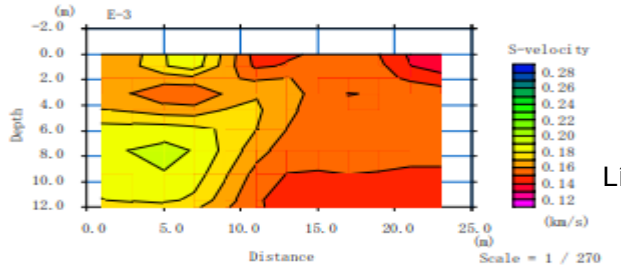


TORRE DE PISA

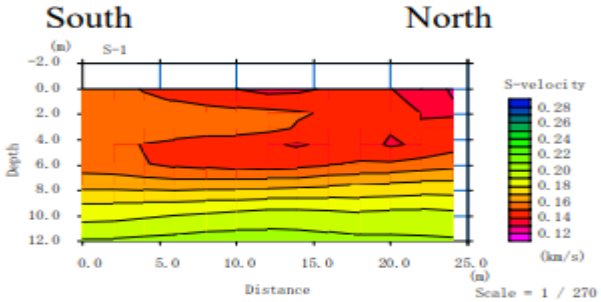
Ensayos geofísicos – Perfil de Vs



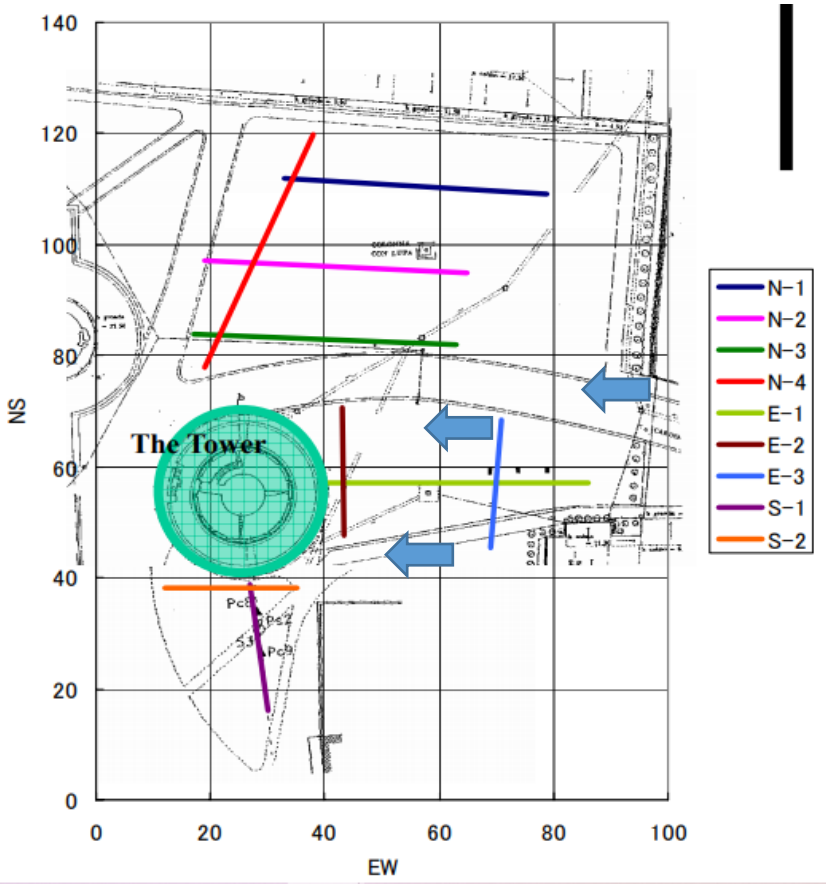
Línea E-1



Línea E-2



Línea S-1



TORRE DE PISA

Resumen de resultados de ensayos geofísicos – Perfil de Vs

De acuerdo a los resultados de los perfiles Vs:

- El perfil de velocidad Vs obtenido con el método MASW es concordante con el perfil de velocidad obtenido por el ensayo crosshole.
- El perfil de velocidad Vs obtenido con el método MASW es concordante con el perfil de velocidad obtenido por el ensayo de penetración de cono sísmico (SCPT).
- El perfil de velocidad varía de 130 m/s a 200 m/s hasta los 20 m de profundidad.
- Superficialmente a los 3 m, el Vs varía entre 180 a 200 m/s en lado norte y disminuye de 120 a140 m/s en lado sur de la Torre.
- A la profundidad de 3 m a 7 m, el Vs varía en el lado este de la Torre de 150 a 180 m/s.
- A la profundidad de 7 m a 20 m, el Vs es de 180 a 240 m/s en lado sur y disminuye de 120 a 140 m/s en el lado norte.

TORRE DE PISA

TORRE DE PISA

Conclusiones

- La Torre de Pisa o Torre Inclinada de Pisa es el campanario de la Catedral de Pisa. Fue construida para que permaneciera en posición vertical pero comenzó a inclinarse tan pronto como se inició su construcción en agosto de 1173.

- Las causas de los problemas presentados en la Torre de Pisa fueron : La mayor compresibilidad del suelo en el lado sur y la mayor presión en el mismo lado. Además del efecto de las presiones de poro por lluvias estacionales.

- Un análisis cuidadoso de las pruebas de penetración permitieron una descripción más refinada del perfil del suelo, permitiendo identificar una capa arcillosa-limosa dentro del Horizonte A.

TORRE DE PISA

Conclusiones

- Se realizaron diferentes medidas de estabilización temporal de la cimentación lográndose parte de la estabilización durante el segundo semestre de 1993 mediante la aplicación de 600 toneladas de plomo en el lado norte de los cimientos.

- El Comité Técnico se vió obligado a aceptar a la subexcavación como la única alternativa, siendo que al inicio la consideraban como poco aplicable. La subexcavación definitiva en Pisa comenzó en febrero del año 2000 y terminó en junio del año 2001.

- El éxito en los trabajos de Corrección Geométrica de la Torre de Pisa demuestra que la sub excavación ha ganado un lugar en las técnicas de la Ingeniería Civil y que tiene un potencial que puede emplearse para resolver casos similares, aunque subsiste el reto de desarrollar técnicas de menor costo y mayor eficiencia

Referencias

- Burland, J.B. 1990. On the compressibility and shear strength of natural clays. Géotechnique, 40(3): 329–378.

- Burland, J.B., Jamiolkowski, M.B., Lancellotta, R. Leonards, G. and Viggiani, C. (1993). The Leaning Tower of Pisa, what is going on? ISSMFE News, Vol. 20, No. 3.

- Burland, J.B. and Potts, D.M. (1994). Development and application of a numerical model for the Leaning Tower of Pisa. Int. Symp. on Pre-Failure deformation characteristics of geomaterials, Sapporo, Japan, Vol. 2; pp. 715-738.

- Burland J. B. 1998 “The Enigma of the Leaning Tower of Pisa”. Sixth Spencer J. Buchanam Lecture, Texas A&M University.

- Burland, J.B., Jamiolkowski, M.B. and Viggiani, C. (2003). The stabilisation of the leaning Tower of Pisa. Soils and Foundations Vol. 43, 5, pp. 63-80.

Referencias

- Burland J. B., Jamiolkowski M. B., Viggiani C. 2009 “Leaning Tower of Pisa: Behavior after Stabilization Operations” International Journal of Geoengineering Case Histories, Vol 1 Issue 3, p. 169.

- Calabresi G. 2013 “The Role of Geotechnical Engineers in saving monuments and historic sites”, Kerisel Lecture, 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.

- Croce A. 1985 “Old Monuments and Cities. Research and Preservation”. Geotechnical Engineering in Italy. Associazione Geot. Italiana.

- González A. 2016 “Análisis y Estudio de Patología Rehabilitación, Recalce y Estabilidad de la Torre de Pisa”, pp 14.

- Gherardesca A. 1838: Sulla pendenza del Campanile della Primaziale Pisana, Considerazioni. Nistri,

Referencias

- Hambly, E.C. (1985). Soil buckling and the leaning instability of tall structures. The Structural Engineer, Vol. 63, 3, pp. 78-85

- Hayashi, K 2008 “Development of the Surface-wave Methods and Its Application to Site Investigations”. Japan

- Kerisel J. 1975 ” Old Structures in Relation to Soil Conditions”; 15th Rankine Lecture, Geotechnique, London 25 No 3.

- Kerisel J. 1991 “ A few hidden errors in medieval architecture” Down to Earth, Foundations Past and Present: The invisble Art of the Builder, A.A. Balkema, Rotterdam.

- Lancellotta, R., and Pepe, C. 1990. Pisa Tower—A preliminary report. Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Torino, Internal Reports No. 2.1–2.2–2.3.

Referencias

- Rampello S., Callisto L. 2011 “ A study on the subsoil of the Tower of Pisa based on results from standard and high-quality samples” ,Canadian Geotechnical Journal, vol 35 pp. 1074-1092.

- Santoyo E., Ovando E. 2002 “ Paralelismo entre La Torre de Pisa y La Catedral de México”, Foundation Engineering in Dificult Soil Conditions, ISSMGE, México.

- Terracina F. 1962 “Foundations of the Tower of Pisa”, Geotechnique, vol 12, p.336.

- Watabe Y., Sassa S., Udaka K. 2013 “ Comparative study of long-term consolidation for subsoils under Kansai Airport and Pisa Tower” 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.