ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN CÍCLICA ARENA-PILOTE BAJO CARGAS AXIALES EN CÁMARA DE CALIBRACIÓN

Matías Silva I.
Lab·3SR-UMR5521, Université de Grenoble, Grenoble, Francia
matias.silva@3sr-grenoble.fr

Pierre Foray
Lab·3SR-UMR5521, Université de Grenoble, Grenoble, Francia
pierre.foray@hmg.inpg.fr

Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha
Department of Geotechnical Engineering, University of Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil
chctsuha@sc.usp.br

Zhongxuan Yang
Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Zhejiang, China.
zxyang@zju.edu.cn

Richard Jardine
Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London, UK
r.jardine@imperial.ac.uk

Siya Rimoy
Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London, UK
siya.rimoy05@imperial.ac.uk

RESUMEN
El análisis de la distribución de tensiones a lo largo de un pilote modelo sometido a cargas axiales estáticas y cíclicas en una cámara de calibración es presentado. Una alta instrumentación permite estudiar en detalle las interacciones a nivel de la interfaz arena/pilote. Detallamos los mecanismos que controlan el mejoramiento o degradación en la capacidad de pilotes según la amplitud y tipo de cargas cíclicas aplicadas. Se introduce un nuevo diagrama de estabilidad cíclica.

1. INTRODUCCIÓN. La capacidad axial operacional de pilotes hincados sigue siendo un área de incertidumbre en el diseño de fundaciones profundas, en especial para estructuras offshore. Estos pilotes, instalados en general mediante ciclos de carga-descarga, sufren un severa degradación en su fricción lateral durante su instalación (Jardine et al 1995, Kolk et al, 2005), la cual puede ser compensada en algunos casos con un fenómeno que podríamos denominar de cicatrización en el tiempo (« aging »), según observaciones in-situ por Chow et al. 1998 y Jardine et al. 2006. Además y según su finalidad en el diseño, como en fundaciones offshore o de turbinas eólicas, estos pilotes pueden en seguida ser sometidos a grandes solicitaciones cíclicas durante su vida útil (mareas, vibraciones) que afectan de igual forma su fricción lateral.
La respuesta cíclica de la interfaz suelo-pilote ha sido estudiada en laboratorio con pilotes modelo en cámaras de calibración presurizadas (Chan & Hanna 1980, Al-Douri & Poulos 1994, Chin and Poulos 1996, et Le Kouby et al. 2004). Estos ensayos han mostrado que los esfuerzos de corte a lo largo del fuste decrecen a medida que la amplitud de los desplazamientos tangenciales aumenta. Jardine et al. (2006) han mostrado a partir de ensayos in-situ realizados en Dunkerque, Francia (Chow et al. 1998), que mientras los ciclos de gran amplitud degradan la capacidad en fricción, los ciclos no alternados de baja amplitud aceleran los efectos benéficos del fenómeno de “cicatrización” (aumento de la capacidad en el tiempo). Le Kouby et al. (2004) encontraron resultados similares en un pilote modelo de 20 mm de diámetro.
El estudio aquí presentado tiene por objetivo una mejor comprensión de los resultados encontrados en terreno, midiendo gracias a una instrumentación excepcional de la cámara de

calibración y del pilote modelo, las trayectorias de esfuerzos locales a lo largo de la superficie del pilote y en el interior de suelo durante las diferentes fases de instalación, reposo y solicitaciones estáticas y cíclicas. Este trabajo forma parte de un programa de investigación conjunto entre el Laboratorio 3SR de la Université de Grenoble y el departamento de Geotecnia de Imperial College London. Adicionalmente forma parte de un programa nacional de investigación francés ANR-SOLCYP, sobre la respuesta de pilotes a solicitaciones cíclicas.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

2.1 LA CÁMARA DE CALIBRACIÓN. La cámara de calibración del Laboratorio 3SR esta compuesta de 3 anillos cilíndricos de 50 cm de altura y de un diámetro interior de 1,2 m, sobrepuestos de manera impermeable hasta alcanzar una altura aproximada de 1,5 m. Cada anillo puede ser equipado en su parte interior de una membrana inflable capaz de aplicar y medir una presión de confinamiento (Foray, 1991). Dependiendo del ensayo, estas membranas pueden ser reemplazadas a su vez por una membrana en látex que cubre la totalidad de la superficie interior. Entre esta membrana y las paredes de la cámara de calibración una capa de grasa de silicona permite reducir la fricción entre el suelo y las paredes.

La parte inferior y superior de la cámara de calibración consiste en dos placas rígidas de 10 cm de espesor. Una membrana inflable instalada en la parte interna de la tapa superior permite aplicar las condiciones de tensiones verticales deseadas, en este caso 150 kPa (Figura 1).

El llenado de la cámara se realiza según el método pluviación constante. En 3 niveles de llenado, se disponen delicadamente un conjunto de mini-sensores de tensiones totales a diferentes distancias del eje de la trayectoria del pilote durante su instalación. Se disponen también sensores de temperatura en el suelo y en las paredes exteriores.

Una completa aislación de la cámara así que un sistema de refrigeración permiten minimizar las variaciones de temperatura. Un sistema eléctrico de respaldo permite el funcionamiento continuo del sistema de presurización de las membranas y del sistema de adquisición de datos.

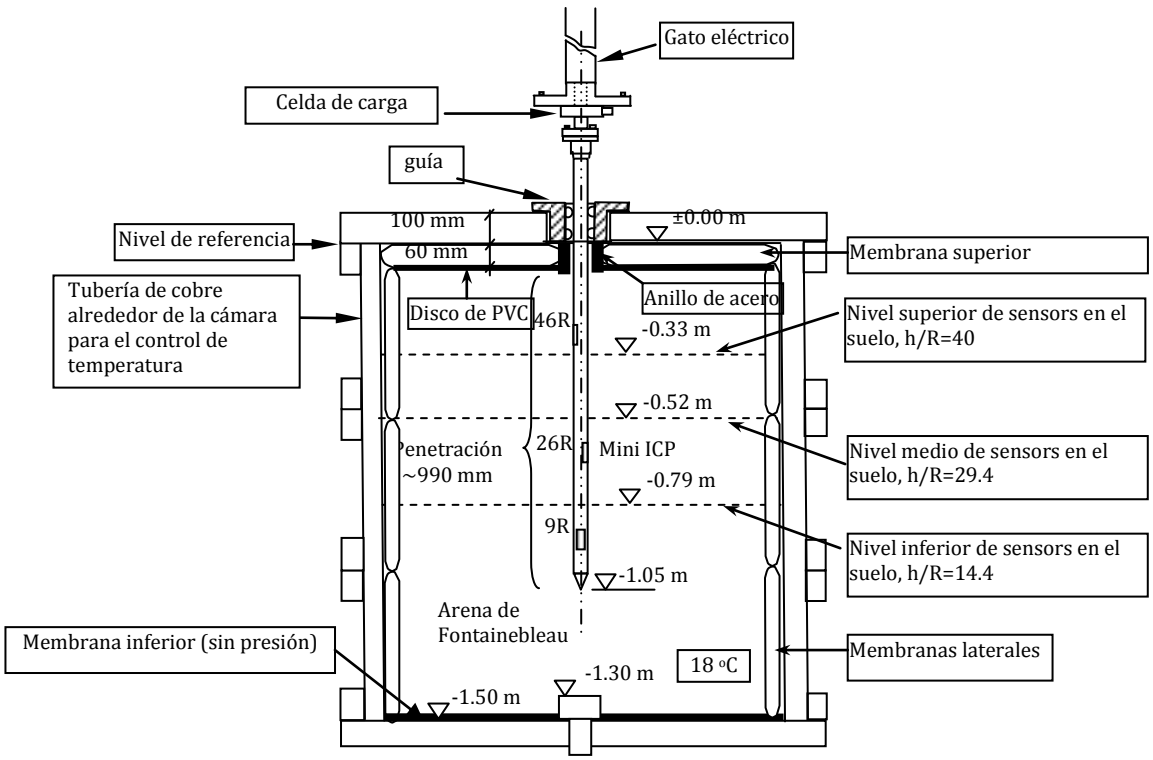


Figura 1: Esquema cámara de calibración laboratorio 3SR julio de 2011

2.2 MATERIAL DE ENSAYO. El material utilizado corresponde a la arena de Fontainebleau NE34 común al conjunto de miembros del proyecto SOLCYP (Tabla 1). Esta arena es caracterizada como bien graduada, uniforme, subangular y con 99.7% de contenido en silice. Para la totalidad de ensayos aquí presentados el índice de densidad relativa alcanzado es de

aproximadamente Dr=~72% (e=0,62). A partir de ensayos de corte directo con esfuerzos normales de 50 a 500 kPa se estimó un ángulo de fricción peak de 35.2º y en estado crítico de 32.8º. Las propiedades índice de esta arena se presentan en la Tabla 1. Yang et al (2010) entregan detalles adicionales sobre las propiedades mecánicas, incluyendo su resistencia al corte de la interfaz arena-pilote ($\delta' = 25\sim28º$, inferior a φ').

Tabla 1: Propiedades índice arena Fontainebleau NE34

Forma de granos	G_S	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	c_u	e_{max}	e_{min}
Sub-angular	2,65	0,15	0,21	0,23	1,53	0,90	0,51

La presión vertical aplicada en la superficie de la arena es de 150 kPa, correspondiente a una resistencia en punta penetrométrica Q_c de 20 a 23 MPa (Figura 2). La instalación inicial del pilote se efectuó hasta una profundidad de aproximadamente 98 cm con ciclos de penetración sucesivos de 5 a 20 mm a una velocidad de 0,5 a 2 mm/s, seguidos de una descarga completa para así simular los efectos del proceso de hincamiento.

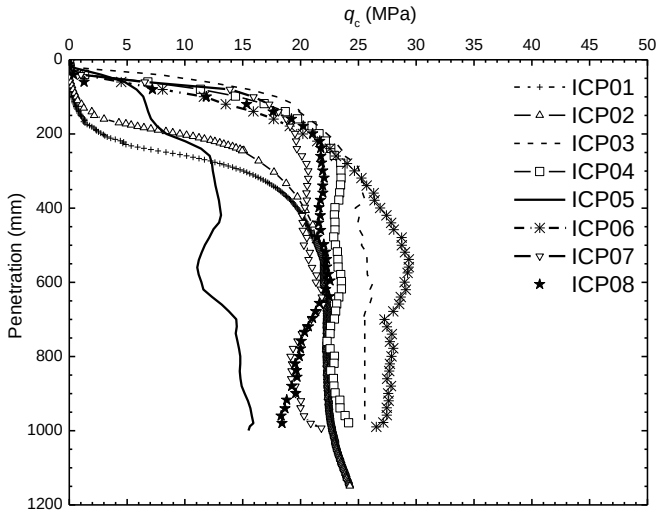


Figura 2: Resumen de Qc resistencia en punta al final de cada ciclo de penetración

2.3 EL PILOTE MODELO MINI-ICP. El pilote modelo utilizado corresponde al pilote modelo Mini-ICP diseñado por Imperial College London (Figura 3), presentado en detalle por Jardine et al. (2009). Tiene un diámetro exterior de 36 mm y puede medir las tensiones radiales y de corte en 3 niveles a lo largo de la superficie del pilote. Los 3 niveles de instrumentación (o clusters) A (leading), B (following) y C (trailing) corresponden en la actualidad a distancias h de la punta del pilote de 9 R, 26 R y 46 R, siendo R el radio del pilote. Cada nivel de instrumentación incluye además un sensor de esfuerzo axial, sensores de inclinación y de temperatura. Para la gran mayoría de ensayos el pilote incluyó un sensor de carga axial en la punta del pilote.
Como preparación a cada serie de ensayos la superficie del pilote es tratada hasta obtener una rugosidad media de R_a=3-4 μm.

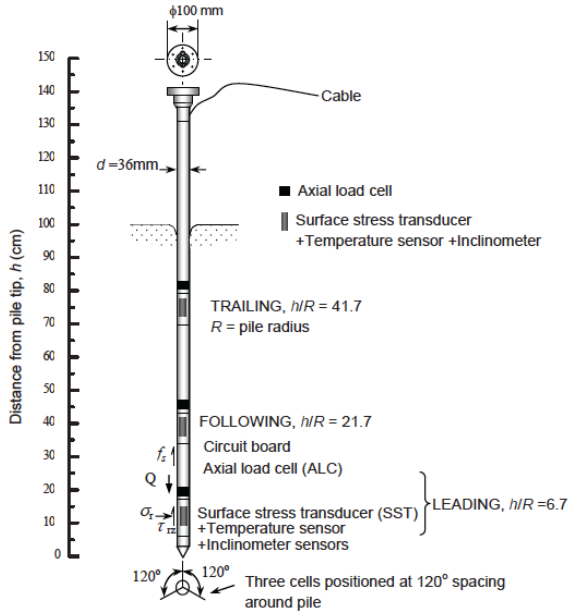


Figura 3: Ejemplo de la instrumentación original pilote modelo Mini-ICP (Jardine et al. 2009)

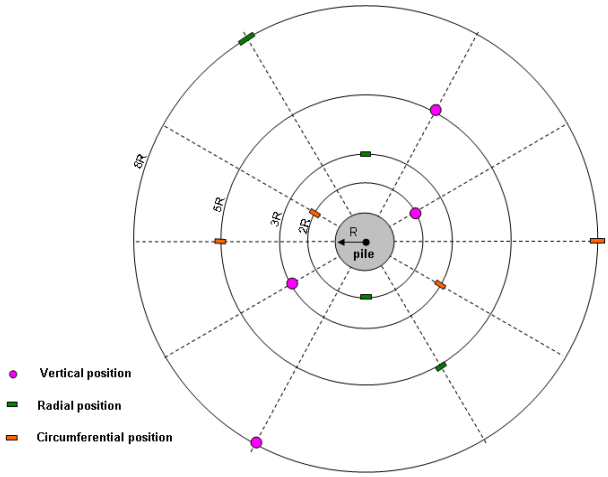


Figura 4: Ejemplo de un nivel de instrumentación ensayo ICP03

2.4 MEDICIÓN DE ESFUERZOS EN EL SUELO. Para conocer la distribución de tensiones al interior de la arena, se instalaron entre 9 y 40 sensores de tensiones totales distribuidos entre 1 y 3 niveles de instrumentación, según se detalla en la Tabla 2. Los sensores corresponden a mini sensores Kyowa (Kyowa electronics Instruments Co.) y TML (Tokyo Sokki Kenkyujo Co.) de capacidades de entre 500kPa y 7MPa según su distancia al pilote. Como se indica en la Figura 4, la distribución de estos sensores permite medir las tensiones verticales, radiales y circunferenciales en círculos concéntricos a distancias de entre 2 y 20 veces el radio del pilote. La calibración de estos sensores siguió el protocolo establecido por Zhu et al (2009), luego del cual la respuesta cíclica de un sensor es representada por una curva lineal de carga, una curva no-lineal para la descarga y una nueva curva lineal para la re-carga.

Tabla 2: Detalle de la instalación de sensores en el suelo

Ensayo	**Profundidad (mm)***	**Posición (r/R)****		
		Radial	**Vertical**	**Circunferencial**
ICP01	190(T), 550(M), 830(B)	2,3,5,8,20	3,5,8	2,3,5,8
ICP02	430(T), 700(B)	2,3,5,8,12,16,20	3,5,8,12,16,20	2,3,5,8,12,16,20
ICP03-05	270(T), 460(M), 730(B)	2,3,5,8	2,3,5,8	2,3,5,8
ICP06***	730(B)	2,3,5,8	2,3,5,8	5
ICP07	285(T) 460 (M), 740 (B)	2,3,5,8 2,3,5,8	2,3,5,8 2,3,5,8	-- 2,3,5,8
ICP08	260 (T) 450 (M), 720 (B)	2,3,5,8 2,3,5,8	2,3,5,8 2,3,5,8	8 2,3,5,8

*: Nivel de sensores según Figura 1. T:Top level, M:Middle level, B:Bottom level.
***r/R* : distancia radial relativa desde el eje del pilote (*R: radio del pilote, r:* distancia desde el eje del pilote)
***Ensayo realizado en condición saturada

La siguiente figura, utilizando la información de todos los sensores de la Tabla 2, muestra los perfiles de tensiones radiales al final de la instalación del pilote para distintos niveles de profundidad en el suelo y a distancias del eje del pilote (h/R=distancia de la punta, r/R= distancia del eje). La distribución de tensiones muestra como el máximo en tensiones radiales se encuentra

a una distancia de entre 3 y 5 veces el radio del pilote. Durante el periodo de reposo tiende a estabilizarse en torno a un máximo cercano a la superficie del pilote.

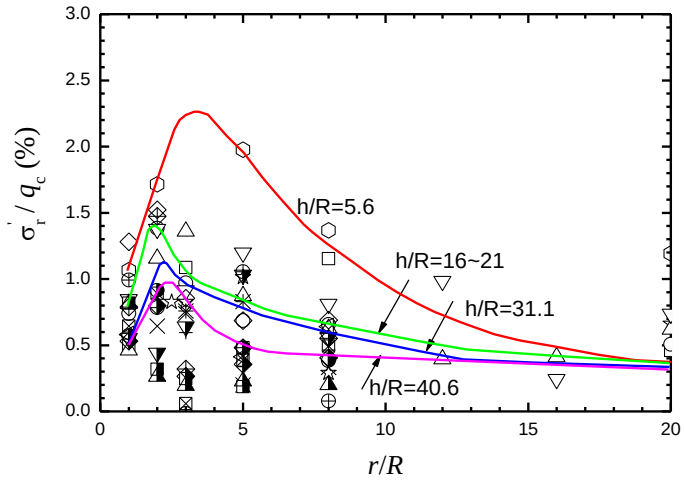


Figura 5: Perfil de distribución de tensiones en el suelo al final de la instalación normalizada por Q_c

2.5 PROGRAMA EXPERIMENTAL. Cada serie de ensayos considera el mismo esquema de trabajo:

1. Llenado de la cámara de calibración por pluviación e instalación de sensores en el suelo.
2. Presurización superior de 150 kPa y condición K0 en paredes laterales, aprox. 63.5 kPa.
3. Instalación mediante ciclos de carga-descarga según se indicó en el punto 2.2.
4. Ensayo de carga estática en el último centímetro de instalación, valor referencial previo al periodo de reposo.
5. Periodo de reposo entre 10 y 70 días (periodo de cicatrización o aging).
6. Ensayo estático de compresión post-aging seguido de un ensayo en tracción (Q_T) de 4 mm (aprox. 10% del diámetro del pilote, definido como criterio de falla para el ensayo). Este ensayo de tracción marca el punto inicial para evaluar el efecto de cargas cíclicas.
7. Ensayo cíclico definido según dos parámetros: amplitud cíclica Q_{cyclic} y carga media Q_{mean}, ambos normalizados por la carga máxima durante el ensayo de tracción estática, Q_T.
8. Ensayo de tracción de 4 mm. Cada ensayo en tracción es comparado con el ensayo precedente. Evaluación del efecto de las solicitaciones cíclicas en la fricción lateral.

En el caso de las condiciones de borde, para los ensayos ICP01 a ICP06 la instalación del pilote se llevo a cabo con condiciones sin deformación. Para esto se utilizó una membrana de látex al interior de la cámara, como indica en el punto 2.1, asumiendo una condición K0 constante en el borde de la cámara. Para los ensayos ICP07 e ICP08 se utilizaron 3 membranas inflables (Figura 1) para trabajar bajo condiciones de volumen constante. Una vez que las membranas se encuentran aplicando la presión equivalente a K0, estas son aisladas durante la penetración del pilote y así medir la presión ejercida por la arena contra las paredes de la cámara de calibración. Los ensayos posteriores toman en cuenta la movilización de tensiones durante las etapas previas. El uso de estas membranas permite tomar en cuenta las observaciones de Huang y Hsu (2005) sobre la simulación en laboratorio de las condiciones reales del terreno durante un ensayo CPT. Permiten un control activo de tensiones radiales durante la instalación y aging, así como una mejor representación de las condiciones de campo libre del suelo.
La Tabla 3 presenta un resumen de las diferentes series de ensayos cíclicos considerados en este artículo.

Tabla 3: Programa de ensayos de carga cíclica

Ensayo	ID*	Fecha	Nº de ciclos	Descripción carga axial	Q_{cyclic}**/Q_T	Q_{mean}/Q_T
ICP01	ICP1-OW1 (LC) ICP1-TW1 (DC)	17/03/08 20/03/08	1000 100	0 a -4,0 kN -4~5 mm	0,22 0,41	0,22 0,06
ICP02	ICP2-OW1 (LC)	08/10/08	1000	0 a -3,0kN	0,12	0,12

Ensayo	ID*	Fecha	Nº de ciclos	Descripción carga axial	Q_{cyclic}**/Q_T	Q_{mean}/Q_T
	ICP2-OW2 (LC)	9-10/10/08	1000	0 a -4,8 kN	0,20	0,20
	ICP2-OW3 (LC)	13/10/08	500	0 a -6,8 kN	0,28	0,28
	ICP2-TW1 (DC)	14/10/08	100	-2,0 ~ 3,0 mm	0,48	0,15
ICP03	ICP3-OW1 (LC)	22/07/09	100	0 a -9,6 kN	0,38	0,38
	ICP3-TW1 (LC)	23/07/09	287	-5,0 a +8,0 kN	0,54	0,08
	ICP3-TW2 (LC)	23/07/09	199	-5,0 a +5,0 kN	0,40	0,06
	ICP3-TW3 (LC)	23/07/09	50	-5,0 a +7,0 kN	0,44	0,02
	ICP3-TW4 (LC)	23/07/09	37	-5,0 a +10,0 kN	0,44	0,02
ICP04	ICP4-OW1 (LC)	15-17/12/09	7000	0 a -3,5 kN	0,15	0,15
	ICP4-TW1 (LC)	18/12/09	600	-4,0 kN a +4,0 kN	0,23	0,06
	ICP4-OW2 (LC)	21/12/09	50	-2,3 kN a -4,6 kN	0,21	0,63
ICP05	ICP5-OW1 (LC)	19/07/10	1050	-0,6 a -2,2 kN	0,22	0,38
	ICP5-TW1 (LC)	20/07/10	300	-1,3 a 0,5 kN	0,26	0,11
	ICP5-TW2 (LC)	21/07/10	1000	-1,1 a 0,2 kN	0,24	0,17
	ICP5-OW2 (LC)	22/07/10	74	-1,9 a -0,2 kN	0,33	0,40
ICP06	ICP6-TW1 (DC)	07/12/10	12000	+0,5 a 0,5 mm	0,732 a 0,129	0,213 a 0
	ICP6-OW1 (LC)	10/12/10	1000	0 a 1,0 kN	0,12	0,12
ICP07	ICP7-OW1 (LC)	20-21/07/11	4040	-4,8 a -7,2 kN	0,091	0,456
	ICP7-TW2 (LC)	21-22/07/11	4760	-1,2 a 1.2 kN	0,087	0
ICP08	ICP8-TW1 (LC)	17-20/10/11	20002	+0,5 a 0,5 mm	0,682 a 0,113	0,22 a 0

*OC: ciclos no alternados (one-way) y TC: ciclos alternados (two-way)
LC: control en fuerza y DC: control en desplazamiento
** $Q_{cyclic}=(Q_{max}-Q_{min})/2$), corresponde a la mitad de la amplitud del ciclo

3. RESULTADOS DE ENSAYOS CÍCLICOS NO ALTERNADOS DE BAJA AMPLITUD

3.1 EVOLUCIÓN DE TENSIONES. La medición de tensiones efectuadas en el interior de la arena y a lo largo del pilote permiten precisar los mecanismos que conducen a un mejoramiento o degradación en su capacidad al arranque. La Figura 6 muestra la evolución de las tensiones radiales en el suelo a diferentes distancias del pilote (r/R). Se constata una degradación de tensiones radiales con el aumento en el número de ciclos, acentuadas para los ciclos de carga alternada. La misma situación se presenta en las tensiones radiales a lo largo del pilote, acentuada durante los grandes ciclos, pero con amplitudes mas importantes. Se constata además que el ensayo de tracción estática realizado entre las dos series de ciclos lleva a un aumento de tensiones en las zonas cercanas al pilote después de los pequeños ciclos (efecto de dilatancia).

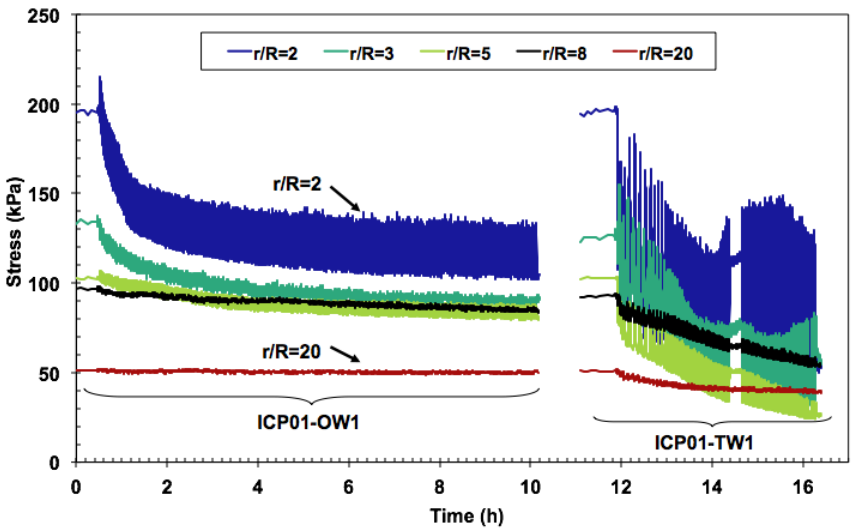


Figura 6: Evolución de tensiones radiales en el suelo para el ensayo cíclico ICP01-OW1 y TW1

La medición simultanea de tensiones radiales y de corte en el fuste del pilote permiten trazar las trayectorias de esfuerzos locales a nivel de la interfaz. Los ensayos cíclicos no alternados, como

aquellos presentados en la Figura 7 para los 3 niveles de instrumentación a lo largo del pilote (según Figura 2), provocan una leve disminución de los esfuerzos radiales estabilizándose a medida que los ciclos aumentan. Esto se traduce en una tendencia a la contractancia de la interfaz y a su densificación local, lo que lleva a una mayor respuesta en dilatancia en solicitaciones posteriores. Cuando la amplitud de estos ciclos no alternados aumenta, los ciclos se aproximan de la línea de ruptura en tracción (Yang et al. 2010).
En el caso de los grandes ciclos alternados (Figura 8), la degradación de tensiones radiales es aún mayor y las trayectorias de esfuerzos atraviesan el equivalente a una «línea de cambio de fase» con una alternancia entre diltatancia/contractancia, llevando a una desorganización del suelo alrededor de la interfaz. Estas trayectorias de esfuerzos (Figura 9 y 10) presentan una forma de « alas de mariposa », similares a aquellas encontradas durante ensayos de corte directo cíclico a volumen constante o a rigidez normal controlada (Fakharian & Evgin 1997, Mortara et al. 2007).

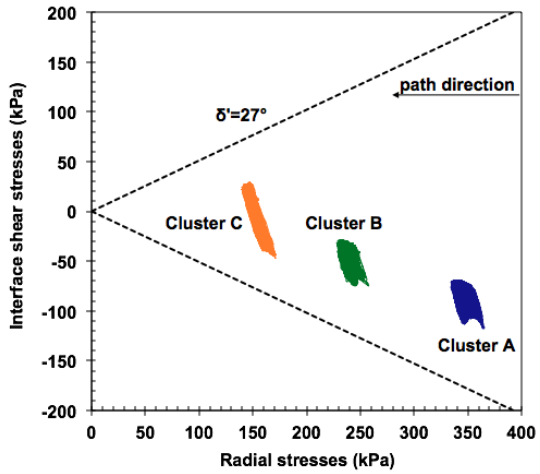


Figura 7: Trayectoria de esfuerzos ICP02-OW1 (comportamiento estable)

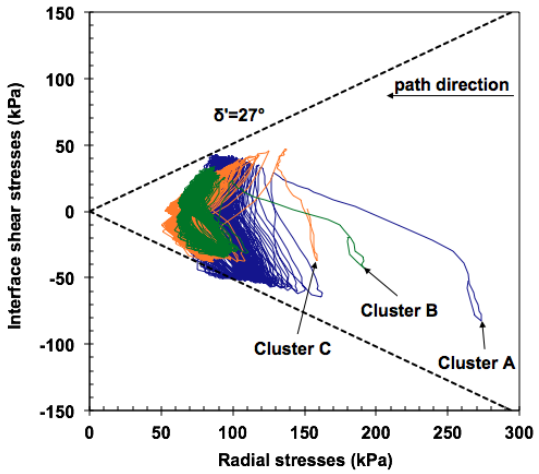


Figura 8: Trayectoria de esfuerzos ICP04-TW1 (comportamiento meta-estable)

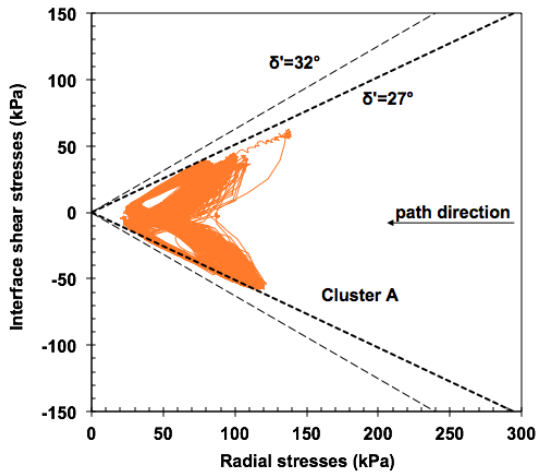


Figura 9: Trayectoria de esfuerzos ICP03-TW1-4 Cluster A cercano a la punta (comportamiento inestable)

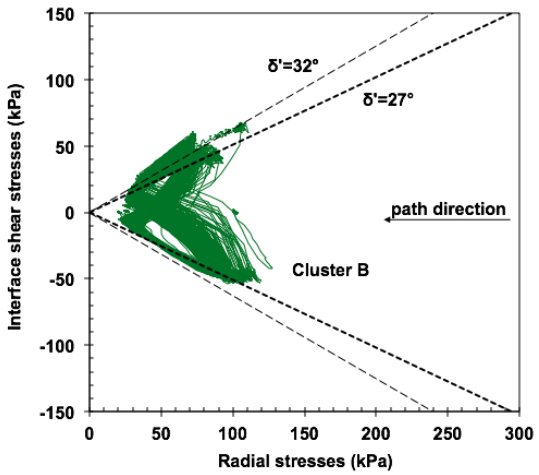


Figura 10: Trayectoria de esfuerzos ICP03-TW1-4 Cluster B cercano a la punta (comportamiento inestable)

3.2 CAPACIDAD AL ARRANQUE POST CÍCLOS. Los ensayos de arranque pre y post solicitaciones cíclicas, presentados en la Figura 11 para la serie de ensayos ICP2, muestran claramente que la aplicación de ciclos no alternados de baja amplitud mejora la capacidad al arranque de los pilotes debido a la densificación de la interfaz, mientras que los ensayos cíclicos de gran amplitud con fases de tracción y compresión producen una fuerte degradación en la capacidad causado por la desorganización de la interfaz. Las Figuras 12, 13 y 14 muestran las trayectorias de esfuerzos para los ensayos de tracción T1, T2 y T5 respectivamente, según se

indica en la Figura 11. Las tensiones locales en ruptura para el ensayo T2 exceden aquellas medidas antes de su aplicación, mientras que las tensiones locales en el ensayo T5 muestran una reducción significativa, consistente con la respuesta global de los ensayos de arranque.

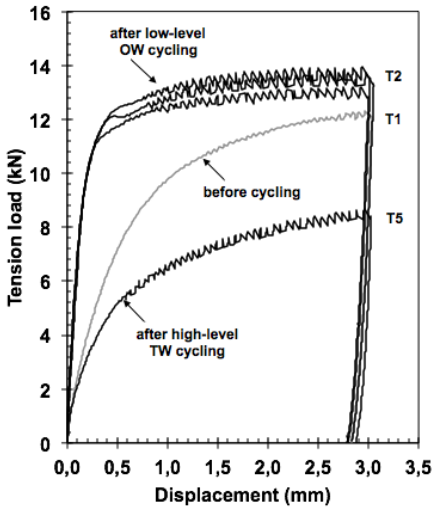


Figura 11 : Curva carga-desplazamiento antes y después de ensayos cíclicos ICP2

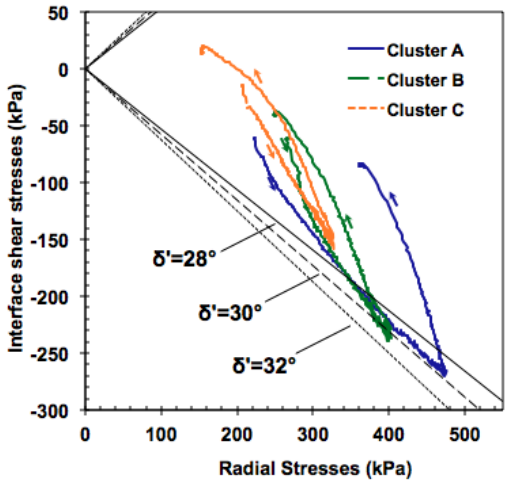


Figura 12 : Trayectoria de esfuerzos ensayo de tracción T1, ICP02

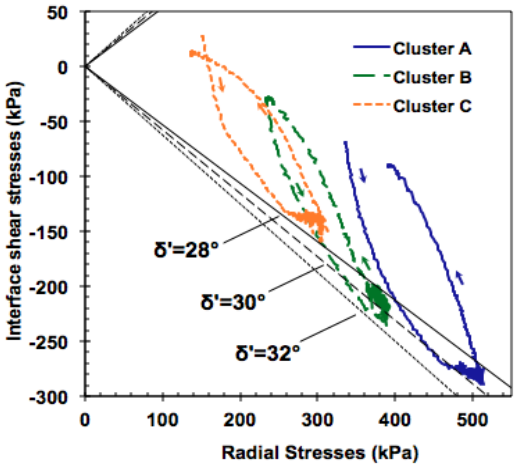


Figura 13 : Trayectoria de esfuerzos ensayo de tracción T2, ICP02

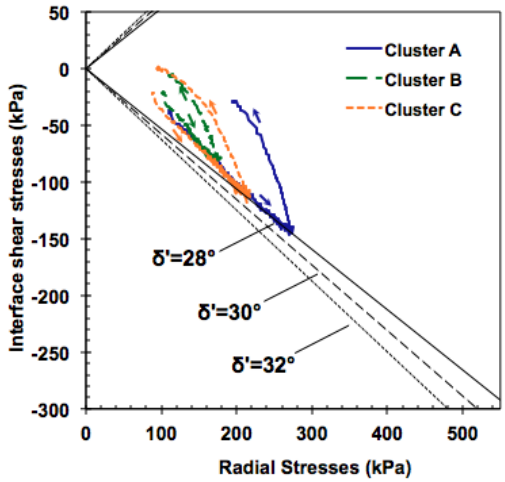


Figura 14 : Trayectoria de esfuerzos ensayo de tracción T5, ICP02

3.3 DIAGRAMA DE ESTABILIDAD CÍCLICA. Una primera parte de los resultados en relación a los ensayos de carga cíclica han sido presentados por Tsuha et al (2012). Se ha analizado la evolución de la fricción lateral de los pilotes y su estabilidad según el numero de ciclos y el tipo de solicitación aplicada (reversible o irreversible), la amplitud y el valor medio de la carga. La Figura 15 muestra el diagrama de estabilidad cíclica establecido a partir de los resultados obtenidos. En relación al comportamiento del pilote es posible identificar 3 tipos de respuesta: estable, meta-estable e inestable (Figuras 7 a 10): estable corresponde a una zona de baja amplitud en carga donde el pilote puede ser sometido a mas de 1000 ciclos sin acumular una deformación permanente importante y sin alcanzar ruptura. Meta-estable es una zona donde la deformación permanente se vuelve importante y donde la ruptura ocurre entre los 100 y 1000 ciclos. Por último, la zona inestable es donde la ruptura se obtiene antes de 100 ciclos. La ruptura se define como un desplazamiento acumulado del 10% del diámetro del pilote (aprox. 3,6 mm) o un incremento fuerte en la tasa de deformación (lento si es menor a 1mm/10^4 ciclos y fuerte si es mas que1mm/100 ciclos).

La Figura 16 presenta la variación en la fricción lateral medida después de ensayos no alternados de baja amplitud. Como se indicó en la sección 3.2, según la amplitud de la carga cíclica, es posible de obtener una aumentación en la resistencia al arranque.

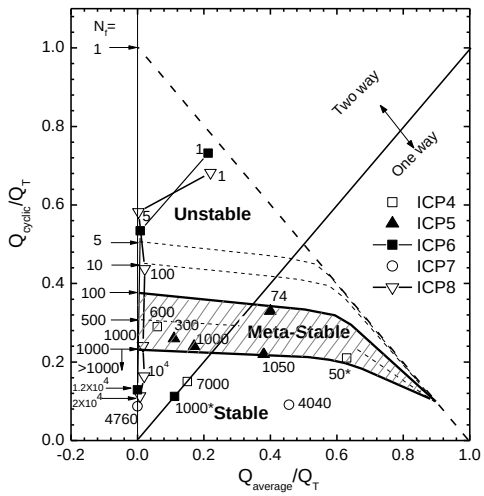


Figura 15 : Diagrama de estabilidad cíclica ICP4-ICP8

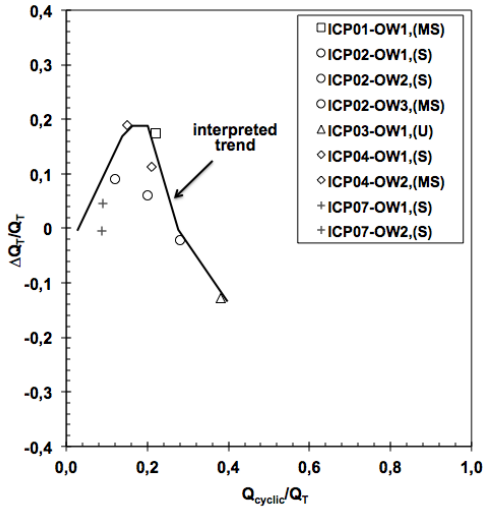


Figura 16: Variación en la fricción lateral en ensayos no alternados de baja amplitud ICP1-8

4. CONCLUSIONES. La medición de las trayectorias de esfuerzo a lo largo de un pilote altamente instrumentado, así como la medición de tensiones en el suelo, permiten un mejor entendimiento de los mecanismos que gobiernan la degradación o el mejoramiento de la fricción lateral durante solicitaciones cíclicas. Permiten en particular relacionar la respuesta global del pilote, según los estados «estable, méta-estable e inestable» del diagrama clásico de estabilidad cíclica, con el comportamiento elemental de la interfaz en relación a su «línea de transformación de fase» o «línea característica».

El conjunto de ensayos realizados a la fecha indican que la aplicación de un gran número de ciclos de leve amplitud no alternados produce una densificación de la interfaz arena-pilote, favoreciendo el desarrollo de dilatancia durante una solicitación posterior llevando a un aumento en la capacidad al arranque. Por el contrario, los grandes ciclos alternados o de gran amplitud producen una desorganización de la interfaz y una disminución en las tensiones radiales llevando a una degradación de la capacidad al arranque.

5. PERSPECTIVAS. Se han definido 3 áreas para la continuación del estudio:

i. En colaboración con el Centro de Estudios de la Nieve de Grenoble (CEN) existe un programa de estudios para el análisis post-mortem de muestras congeladas recuperadas alrededor del fuste del pilote y analizadas en un tomógrafo de rayos X. La Figura 17 muestra un ejemplo de una muestra recuperada y la Figura 18 una sección de una reconstrucción 3D de una muestras donde se aprecia la banda de cizalle vista en gris en la Figura 17.



Figura 17 : muestra recuperada en la interfaz suelo-pilote

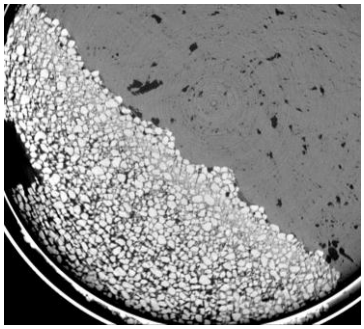


Figura 18: corte de una reconstrucción 3D de una muestra analizada en un tomógrafo de rayos X

ii. Estudio de las condiciones de borde. Como se indicó en el punto 2.5 por el momento se han utilizado condiciones de borde: sin deformación y a volumen constante. Se han reportado una gran diferencia en la respuesta de pilotes modelos en cámaras de calibración para un gran número de ciclos con un aumento significativo en la fricción lateral luego de alrededor 20000 ciclos alternados (Tali, 2011).
iii. Instrumentación de un pilote hincado a instalarse mediante un sistema de instalación manual similar al utilizado para los ensayos SPT.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Douri R, Poulos HG (1994). Cyclic Behaviour of Pile Groups in Calcareous Sediments. *Soils and Foundations* **34**, 49-59.

Chan S. & Hanna T. H. (1980). Repeated loading on single piles in sand. American Society of Civil Engineers, *Journal of the Geotechnical Engineering Division* **106 (2)**, 171-188.

Chin J. T. & Poulos H. G. (1996). Tests on model jacked piles in calcareous sand. *Geotechnical Testing Journal* **19(2),** 164-180.

Chow, F.C., Jardine, R.J., Brucy, F., and Nauroy, J.F., (1998). Effects of time on capacity of pipe piles in dense marine sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **124(3)**, 254–264.

Fakharian K. & Evgin E. (1997). Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **123(12)**, 1096-1105.

Foray P. (1991). Scale and Boundary Effects on Calibration Chamber Pile Test, Calibration Chamber Testing, pag 147-160.

Foray, P., Tsuha, C.H.C, Silva,M., Jardine, R.J. et Yang, Z. (2010). Stress paths measured around a cyclically loaded pile in a calibration chamber, Proc. Int. Conf. on Physical Modelling in Geomechanics, ICPMG 2010, Zurich, Switzerland, June 2010.

Huang A.-B., Hsu H.-H. (2005). Cone penetration tests under simulated field conditions. *Géotechnique* ***55(5),*** 345-354.

Jardine, R.J., Chow F., Overy R. et al., (2005). ICP Design Methods for Driven Piles in Sands and Clays, Thomas Telford.

Jardine, R.J., Standing, J.R. and Chow, F.C., (2006). Some observations of the effects of time on the capacity of piles driven in sand. *Géotechnique* **56(4)**, 227-244.

Jardine, R.J., Zhu, B.T, Foray, P., & Dalton, C.P. 2009. Experimental arrangements for the investigation of soil stresses developed around a displacement pile. *Soil and Foundations* **49(5)**, 661-673.

Kolk, H.J, Baaijens, A.E and Vergobbi, P. (2005): Results of axial load tests on pipe piles in very dense sands: the EURIPIDES JIP Proc. 1st Int. Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, ISFOG 2005, Perth, W.A.,pp. 661- 667.

Le Kouby, A., Canou, J., & Dupla, C. (2004). Behaviour of model piles subjected to cyclic axial loading. Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena: 159-166. Triantafyllidis (ed).

Mortara G., Mangiola, A., Ghionna, V.N. (2007). Cyclic shear stress degradation and post-cyclic behaviour from sand-steel interface direct shear tests. Canadian *Geotechnical Journal* **44(7)**, 739-752.

Tali Tali, B. (2011). Comportement de l'interface sol-structure sous solicitations cycliques; Application au calcul des fondations profondes. These de Doctorat, Université Paris-est, Paris, France.

Tsuha, C.H.C., Foray P., Jardine, R.J., Yang, Z.X., Silva M., Rimoy S. (2012). Behaviour of displacement piles in sand under cyclic axial loading. Soils and Foundations 52(3), 393-410.

Yang, Z.X. Jardine, R.J. Zhu, B.T., Foray P.,& Tsuha, C.H.C. (2010). Sand grain crushing and interface shearing during displacement pile installation in sand. *Géotechnique* **60(6)**, 469–482.

Zhu, B.T., Jardine, R.J. and Foray, P. (2009). The use of miniature soil stress measuring sensors in applications involving stress reversals. *Soils and Foundations* **49(5)**, 675-688.