

Rozamiento negativo en pilotes producido por la subsidencia en Murcia

JOSÉ LUIS DE JUSTO ALPAÑÉS (*); NARCISO-JESÚS VÁZQUEZ CARRETERO (**);
ENRIQUE DE JUSTO MOSCARDO (***)

RESUMEN Recientemente la ciudad de Murcia ha sufrido el primer caso de subsidencia registrado en España debido a la extracción de agua desde pozos de riego durante un período de sequía. Se han medido asientos diferenciales de más de 10 cm en los pavimentos de las calles respecto a edificios cimentados con pilotes que llegan hasta las gravas, pero los asientos calculados alcanzan los 25 cm. Se ha desarrollado un método elasto-plástico original para estimar las fuerzas de rozamiento negativo en pilotes resistentes por la punta y flotantes para un suelo subsidente heterogéneo. Se han calculado el asiento y las tensiones producidas por el rozamiento negativo en varios lugares de la ciudad. Los asientos en cabeza calculados varían entre 1 y 20 cm, y el coeficiente de seguridad final baja hasta uno en los casos extremos.

THE NEGATIVE SKIN FRICTION OF PILES PRODUCED BY SUBSIDIENCE IN MURCIA

ABSTRACT *Recently the town of Murcia has suffered the first case of subsidence ever produced in Spain due to water extraction from irrigation wells during a drought period. Differential settlements up to 10 cm have been measured in the street pavement with respect to buildings on piles embedded in the gravel, but the calculated settlements reach up to 25 cm. An original elasto-plastic method to estimate downdrag forces in end bearing and floating piles has been developed by us for a heterogeneous subsident soil. The settlement and stresses produced by negative skin friction in several places in the town have been calculated. The calculated head settlements range from 1 to 20 cm, and the final factor of safety falls in extreme cases down to 1.*

Palabras clave: Rozamiento negativo; Subsidencia; Nivel piezométrico; Altura piezométrica; Asiento; Coeficiente de seguridad; Presión intersticial.

1. INTRODUCCIÓN

LA SUBSIDENCIA EN MURCIA

La subsidencia terrestre es un fenómeno que implica el asentamiento de la superficie de la Tierra en un área extensa debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas (Corapcioglu 1984).

El descenso experimentado por el nivel piezométrico en Murcia, durante la última sequía, ha ocasionado asientos en el subsuelo que han provocado daños de cierta envergadura, tanto por su dimensión como por su extensión. Se trata del primer caso de subsidencia importante registrado en España (Justo y Vázquez 1999).

Los datos de subsidencia en Murcia dan valores superiores a 10 cm, lo que ha originado problemas en edificios, urbanizaciones, instalaciones y obras públicas (Ballesteros 1994 y 1995). Se han medido asientos importantes en los pavimentos de las calles con respecto a edificios cimentados sobre pilotes que llegan a las gravas (figura 1); este asiento ha producido roturas en paramentos que se apoyan en el suelo. Se han observado inclinaciones de edificios cimentados sobre pilotes de rozamiento en las juntas de dilatación. Se han presentado medidas legales contra los arquitectos (Jaramillo 1996, Jaramillo y Ballesteros 1997).

ROZAMIENTO NEGATIVO EN PILOTES

Una de las causas que pueden desencadenar el rozamiento negativo en los pilotes es la consolidación del terreno en el que se cimentan por el fenómeno de la subsidencia. Si el suelo que atraviesa el pilote se ve sometido a un asiento mayor que el de éste, la zona de terreno inmediatamente próxima al fuste intentará descender con respecto al mismo, colgándose de él y apareciendo así unas tensiones tangenciales, de signo contrario al resistente, que originarán una compresión en el pilote, creciente según vaya aumentando el desplazamiento relativo hasta que, para un cierto valor, se produzca la rotura del terreno en la zona cercana al fuste. En este momento los movimientos del suelo alcanzan tal magnitud que se produce un deslizamiento entre el fuste y el terreno. Ese valor es la máxima tensión que se puede aplicar al pilote en ese

(*) Catedrático del Área de Ingeniería del Terreno. Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla.

(**) Profesor Asociado del Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla.

(***) Becario del Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla.



FIGURA 1. Asiento de pavimento en Murcia.

punto debida al rozamiento negativo, aunque también interesa conocer cómo se llega a ella a lo largo del tiempo (Endo et al. 1969, Walker y Darvall 1973).

Un desplazamiento relativo entre el pilote y el terreno de 1-2 cm puede ser suficiente para que se movilice el máximo rozamiento negativo unitario, tanto en los suelos arcillosos como en los arenosos. Indraratna et al. (1992) estudiaron los desplazamientos necesarios para movilizarlo en la arcilla de Bangkok, llegando a la conclusión de que éstos eran muy pequeños, aunque para conseguir completar el máximo valor posible de la fricción se requieren asientos del terreno de una magnitud considerable. Observaron, además, que la longitud del pilote tenía una influencia importante en éste último factor.

2. MÉTODO DE CÁLCULO

MÉTODO ELASTO-PLÁSTICO PARA EL CÁLCULO DE PILOTES

Se ha empleado para el cálculo de pilotes sometidos a carga axial en un suelo elástico y estratificado un método simple, incremental, elasto-plástico, que considera la continuidad del terreno, basado en la aproximación de Steinbrenner (Steinbrenner 1934) y en las ecuaciones de Mindlin.

El método permite considerar la influencia de cargas que cambian de sentido y se ajusta aceptablemente a los resultados de ensayos de carga sobre pilotes.

Se consideran las siguientes hipótesis:

1. El terreno se asimila a un semiespacio indefinido, lineal-elástico, isótropo y con estratificación horizontal.
2. Se supone que el material del pilote es lineal-elástico y homogéneo.
3. Se admite la existencia de unas tensiones iniciales, tanto en el fuste como en la punta, producidas, por ejemplo, por la hincada del pilote.
4. En cada escalón de cálculo el sistema se resuelve para un incremento de carga, lo que permite la variación de las constantes elásticas.

Las dos últimas hipótesis permiten considerar diferentes valores del módulo de elasticidad en las fases de carga, descarga o recarga (Alonso et al. 1984).

5. Se admite la plastificación de los contactos pilote-terreno (Alonso et al. 1984, Lee 1993, Wong y Teh 1995).
6. Se supone que la distribución de tensiones para las cargas transmitidas por el pilote al terreno viene dada por las ecuaciones de Mindlin para suelo homogéneo y elástico, con el coeficiente de Poisson correspondiente al punto en el que aparece la tensión, a pesar de la existencia de la estratificación.

Por lo tanto la plastificación se reduce al contacto suelo-pilote. Según Mindlin las tensiones no dependen del módulo de elasticidad, por lo que el efecto de una variación de dicho módulo debe ser de segundo orden. Davies y Banerjee (1978) han encontrado que el asiento provocado por una capa vertical concentrada en la interfase entre dos capas con diferentes módulos de elasticidad depende fundamentalmente del módulo de elasticidad de la capa interior.

Por otra parte, en estudios de pilotes basados en la teoría elástica (Mattes y Poulos 1969, Jiménez Salas et al. 1980) se observa que la influencia del coeficiente de Poisson es moderada, incluso para cambios tan grandes como de 0 a 0,5.

7. Se desprecia la influencia de las tensiones radiales en el fuste y tangenciales en la punta transmitidas por el pilote al terreno.

El pilote se divide en particiones conectadas con el terreno hasta que se plastifica el contacto, obteniéndose como resultados el asiento y las tensiones actuantes sobre el pilote. El fuste se divide en n partes y la punta en N , en el centro de cada cual se coloca un nodo. El terreno que rodea y que se encuentra debajo del pilote se divide en los estratos que haya, considerándose sus propiedades mecánicas: módulo de elasticidad en carga y recarga, coeficiente de Poisson, máxima tensión cortante y máxima tensión normal que admiten.

Entre las ecuaciones derivadas de la compatibilidad de corrimientos entre pilote y terreno y la ecuación de equilibrio tenemos un sistema de tantas ecuaciones como incógnitas que, puestas de forma matricial, quedan:

$$[M_{uv}]\{\Delta\tau_v\} = \frac{\Delta P_0}{SE_h}\{z_u\} \quad (1)$$

donde $[M_{uv}]$ = matriz de rigidez; $\{\Delta\tau_v\}$ = vector de los incrementos de tensión tangencial en los elementos activos; ΔP_0 = incremento de carga en cabeza; S = sección del fuste del pilote; E_h = módulo de elasticidad del pilote; y $\{z_u\}$ = vector de profundidades de los nodos activos.

Para el pilote se deduce directamente la matriz de flexibilidad en lugar de la de rigidez (Mattes y Poulos 1969, Lee y Small 1991), con lo que se reducen las operaciones con matrices. La solución es:

$$\{\Delta\tau_v\} = [M_{uv}]^{-1} \frac{\Delta P_0}{SE_h}\{z_u\} \quad (2)$$

La salida normal del programa proporciona las tensiones tangenciales en el fuste y las tensiones normales en la punta en valores absolutos y de forma adimensional, la distribución del esfuerzo axil a lo largo del pilote y el asiento en cabeza al final de cada incremento de carga.

INCORPORACIÓN DE LA SUBSIDENCIA

La subsidencia puede simularse usando el presente método elastoplástico. Para ello se necesitan los asientos que se producirían en el centro de los elementos del fuste y en la base del pilote en el tiempo deseado, si el pilote no existiera.

En primer lugar, el programa resuelve el problema del pilote cargado en la cabeza. Con los resultados de tensiones obtenidos y los desplazamientos del terreno, calcula las nuevas tensiones que aparecen y los esfuerzos resultantes en el pilote. El equivalente a la Ecuación 2 será:

$$\{\Delta\tau_v\} = -[M_{uv}]^{-1}\{\Delta s_{ii} - \Delta s_{iif}\} \quad (3)$$

donde $\{\Delta s_{ii} - \Delta s_{iif}\}$ = vector de los incrementos de asiento producidos por la subsidencia entre los nodos i e i_f (último nodo no plastificado) en la iteración k .

3. CÁLCULOS DEL ROZAMIENTO NEGATIVO CÁLCULOS DE SUBSIDENCIA EN MURCIA

Se han escogido como cortes del terreno los que experimentan los asientos de subsidencia más significativos como respuesta a los movimientos del nivel piezométrico, uno de la zona central de la ciudad de Murcia, perteneciente al casco histórico, el S'46, dos de la zona norte, el S'25 y el S1, y uno de la zona sur, el S'16 (Senent 1995). En las Tablas 1 y 2 se exponen los datos del terreno con los que se entra en el cálculo para los sondeos S'25 y S1, por tratarse de dos cortes estratigráficos típicos del casco urbano de Murcia (MIE IGME, Puche y Blanco, 1995).

Tras medir las variaciones experimentadas por el nivel piezométrico en función del tiempo se han calculado los asientos de subsidencia en suelos parcialmente saturados y empleando el método de predictor-corrector (Justo y Vázquez 2000). Se han tenido en cuenta las diferencias de los parámetros del terreno para los estados de carga, descarga y recarga. La Tabla 3 muestra los datos principales sobre la

ESTRATO	PROFUNDIDAD (m)	E^* (kPa)	E_r^* (kPa)	ν	q_s^{**} (kPa)	q_p^{***} (kPa)
ARCILLA LIMOSA	15	5.000	15.000	1/3	38	—
ARCILLA LIMOSA	20,8	15.000	45.000	1/3	58,75	1.058
GRAVA	—	65.650	195.425	1/3	100	20.000

Leyenda:
 * E = módulo de elasticidad, E_r ídem para recarga y descarga.
 ** Resistencia unitaria por el fuste del pilote.
 *** Resistencia unitaria por la punta del pilote.

TABLA 1. Datos del terreno en el sondeo S'25.

ESTRATO	PROFUNDIDAD (m)	E^* (kPa)	E_r^* (kPa)	ν	q_s^{**} (kPa)	q_p^{***} (kPa)
ARCILLA LIMOSA	3,3	3.000	24.630	1/3	23,5	—
LIMO ARENOSO	4,25	2.000	7.820	1/3	17,5	—
ARCILLA LIMOSA	10,9	3.500	34.560	1/3	10,5	—
LIMO ARENOSO	11,85	2.000	7.820	1/3	17,5	158
ARCILLA LIMOSA	13,75	12.500	102.630	1/3	47,58	549
LIMO ARENOSO	14,7	20.000	78.180	1/3	36,9	369
GRAVA ARENOSA	—	40.000	180.000	1/3	100	20.000

Leyenda:
 * E = módulo de elasticidad, E_r ídem para recarga y descarga.
 ** Resistencia unitaria por el fuste del pilote.
 *** Resistencia unitaria por la punta del pilote.

TABLA 2. Datos del terreno en el sondeo S1.

SONDEO	H* (m)	Δh_{max}^{**} (m)	S _{max} ^{***} (cm)
S'25	20,3	7,8	6,04
S'46	10,5	9,4	25,54
S1	13,77	10,8	11,17
S'16	20	9,3	8,77

Leyenda:
 * Espesor del estrato compresible.
 ** Máximo descenso del nivel piezométrico.
 *** Máximo asiento de subsidencia.

TABLA 3. Subsidencia en los puntos más desfavorables de Murcia.

subsidencia y el descenso piezométrico de cada una de las localizaciones.

CÁLCULOS DE ROZAMIENTO NEGATIVO EN PILOTES DEL CASCO URBANO DE MURCIA

Del cálculo de los asientos y las tensiones realizado sobre los cortes del terreno del casco urbano de Murcia más desfavorables en cuanto a la subsidencia, se tienen los datos necesarios para estudiar el comportamiento debido al rozamiento negativo de los pilotes típicos de las cimentaciones de la ciudad y de los micropilotes que suelen usarse como solución de recalce.

DATOS DE LOS PILOTES Y MICROPILOTES

Para estudiar el efecto del rozamiento negativo se ha elegido un pilote típico de las cimentaciones profundas de Murcia, tanto en lo que respecta al tipo, como al diámetro y la carga. Se ha considerado un pilote apisonado de 450 mm de diámetro en el fuste y 900 mm de diámetro en la punta, de hormigón de resistencia característica 17.500 kPa y con una carga inicial de 600 kN, por ser un caso normal de los que podemos encontrarnos actualmente en los edificios del casco urbano de Murcia.

Los micropilotes constituyen una de las técnicas de recalce de las cimentaciones de los edificios de mayor uso en nuestros días. De ahí el interés por comprobar las repercusiones que puede tener un futuro descenso del terreno que los rodea

y la idoneidad de su empleo para el recalce de cimentaciones que hayan sufrido por descensos anteriores. Se suponen realizados con hormigón armado de 25.000 kPa de resistencia característica, mínima marcada por la actual instrucción española.

Se han considerado los supuestos de que los pilotes y micropilotes se empotren en el estrato profundo de gravas y de que se queden flotantes en el de arcillas (Alonso et al. 1984, Endo et al. 1969, Wong y Teh 1995).

En la Tabla 4 se exponen los datos principales de los pilotes y micropilotes sobre los que se han realizado los cálculos de rozamiento negativo.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ROZAMIENTO NEGATIVO

Como resumen de los resultados se puede configurar la Tabla 5.

Como puede deducirse de la Tabla 1 y de la Tabla 3, en el sondeo S'25 los datos de descenso de nivel piezométrico y de asiento del terreno no se encuentran entre los mayores que se tienen en la ciudad, aunque sí el espesor de la capa de arcilla limosa. Esto se debe a que su resistencia es superior a la de otras localizaciones (Puche y Blanco 1995).

En la figura 2 se representan las trayectorias de las tensiones tangenciales en cada uno de los nodos de las particiones en las que se ha dividido al fuste del pilote y en la 3 las tensiones normales transmitidas por los nodos de la punta en función del tiempo transcurrido, ambos para el caso de pilote empotrado en la grava. El axil a lo largo del pilote aparece en la figura 4.

La situación inicial parte de la carga de 600 kN y resultan tensiones aproximadamente constantes en todo el fuste del pilote. El axil es máximo en cabeza y baja linealmente hasta la punta. El valor en cabeza es del orden de 12,85 veces el de la base. El asiento que resulta es de 0,25 cm.

En enero del 84 el nivel piezométrico ha terminado un descenso de 2,5 m. Las tensiones tangenciales a lo largo del fuste disminuyen respecto a los valores iniciales, con una reducción más pronunciada en cabeza, y aumentan en la partición del pilote que se introduce en la grava. Ha comenzado la transferencia de cargas desde las zonas más superficiales del pilote hacia las más profundas debido al rozamiento negativo. En el contacto con la grava la tensión aumenta 2,35 veces. El axil crece en todo el pilote, más

SONDEO	ϕ^* (cm)	TIPO	P ₀ ^{**} (kN)	LONGITUD (m)
S'25	45	EMPOTRADO	600	20,3
S'25	45	FLOTANTE	600	17,4
S'46	45	EMPOTRADO	600	11
S1	45	EMPOTRADO	600	15,2
S1	45	FLOTANTE	600	12,35
S'16	15	EMPOTRADO	200	21
S'16	15	FLOTANTE	150	19
S1	20	EMPOTRADO	300	15,2
S1	20	FLOTANTE	150	13,3

TABLA 4. Pilotes y micropilotes con rozamiento negativo en Murcia.

Leyenda:
 * Diámetro del pilote o micropilote.
 ** Carga inicial.

SONDEO	ASIENTO MÁXIMO		AXIL MÁXIMO		COEFICIENTE DE SEGURIDAD	
	VALOR (cm)	TIEMPO	VALOR (kN)	TIEMPO	Q_r^*	Q_h^{**}
S'25 ^{PE}	1,13	Ene-98	930	Ene-98	2,99	8,96
S'25 ^{PF}	1,72	Ene-98	737	Ene-98	3,78	1,9
S'46 ^{PE}	20	Jul-95	763	Jul-95	3,65	11,52
S1 ^{PE}	6,56	Ene-98	830	Sep-95	3,35	11,15
S1 ^{PF}	12,43	Ene-98	574	Ene-84/Ene-98	4,85	1,05
S'16 ^{ME}	4,97	Ene-98	219	Nov-95	2,01	4,06
S'16 ^{MF}	6,97	Ene-98	167	Ago-95	2,63	1
S1 ^{ME}	7,89	Ene-98	397	Sep-95	1,98	1,88
S1 ^{MF}	8,94	Ene-98	164	Sep-95	4,79	1,01

Leyenda:

- * Tope estructural.
- ** Carga de hundimiento.
- P Pilote.
- M Micropilote.
- E Empotrado.
- F Flotante.

TABLA 5. Resultados de rozamiento negativo en Murcia.

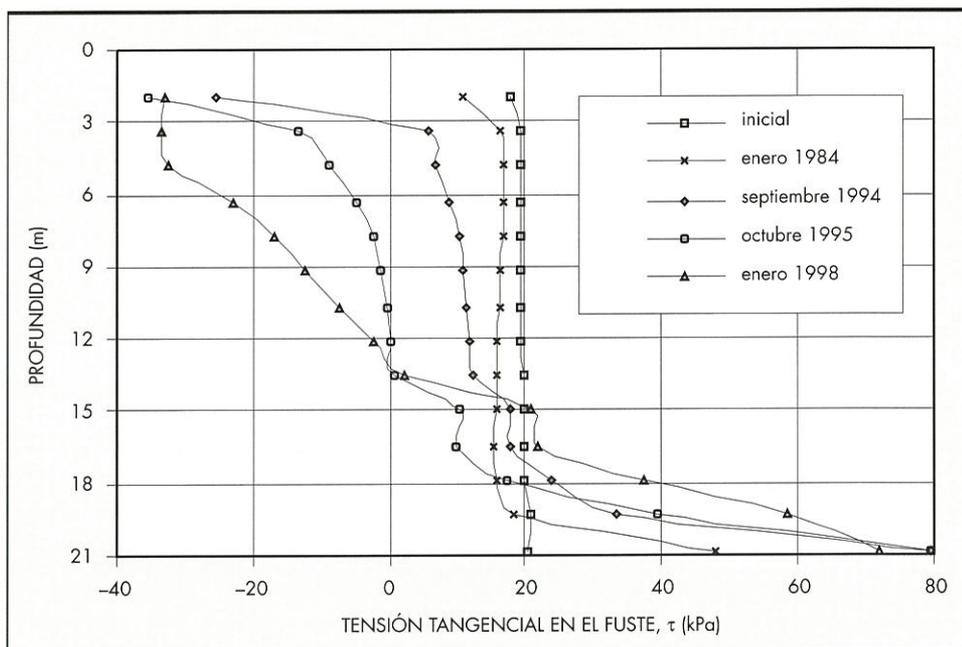


FIGURA 2. Tensión tangencial en el fuste del pilote empotrado. Sondeo S'25.

cuanto mayor es la profundidad y aparece un punto de inflexión da la ley de axiles en la partición más profunda dentro del estrato compresible. El asiento del pilote debido a la subsidencia es de 0,07 cm.

En julio del 92 los 2,5 m que había descendido el nivel piezométrico se han recuperado y después ha habido siete años en los que ha permanecido estable. De julio del 92 a septiembre del 94 ha descendido 4 m. La tensión tangencial en el fuste en cabeza del pilote pasa a ser negativa. Las tensiones tangenciales del fuste disminuyen por la zona más alta y aumentan por la más baja. El elemento más bajo del fuste plastifica. El axil crece. El asiento es de 0,21 cm.

En junio del 95 el nivel piezométrico ha descendido otros 3,8 m. A continuación tenemos una recuperación de 3,5 m, en un mes, y se mantiene estable hasta septiembre del 95. Un mes más tarde ha descendido otros 4,4 m. Vuelve a plastificar el elemento más bajo del fuste. Por encima de él las tensiones tangenciales disminuyen en todo el pilote y por debajo, es decir, las tensiones normales de la punta, aumentan. El axil crece, llegando el valor máximo a una profundidad de entre 9,2 y 13,5 m, y el asiento alcanza los 0,6 cm. El punto neutro alcanza una cota de -13 m.

De octubre del 95 a enero del 98 el nivel piezométrico presenta oscilaciones que llegan a 5,4 m sobre el nivel ante-

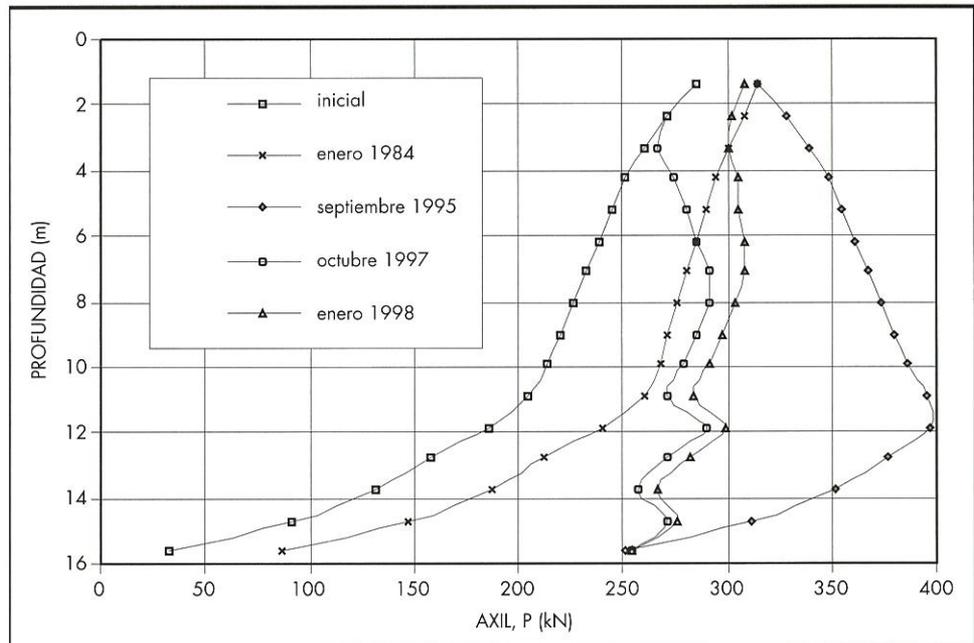


FIGURA 6. Axil en el pilote empotrado. Sondeo S'25.

por tres ramas aproximadamente lineales, con quiebros donde hay cambios significativos en el E de los estratos. El valor en cabeza es del orden de 8,96 veces el de la base. El asiento que resulta es de 0,65 cm.

En enero del 84 el nivel piezométrico consume un descenso de 2,5 m. Las tensiones tangenciales disminuyen respecto a los valores iniciales en la zona superior del fuste y los mantienen a partir de los 11 m de profundidad. De los elementos anteriormente plastificados sólo permanecen los más cercanos a la base del pilote. Crecen las tensiones normales de la punta. El axil aumenta en todo el pilote y la ley tiene una disposición aproximadamente paralela a la anterior. El asiento debido a la subsidencia es de 0,37 cm.

De enero del 84 a julio del 85 el nivel piezométrico ha ascendido 2,5 m. Tanto el axil como el asiento del micropilote se recuperan en la situación de descarga. En julio del 92 todavía mantiene la misma cota y de julio del 92 a septiembre del 95 baja 10,8 m. Las tensiones tangenciales disminuyen en la parte superior y aumentan en la inferior, pasando a ser negativas hasta una profundidad de 12 m, plastificando casi todos los elementos del fuste, por encima del punto neutro con tensiones negativas y por debajo positivas. En la punta se llega a valores 9,18 veces superiores a los del caso del pilote empotrado de 45 mm de diámetro. El axil crece y alcanza su valor máximo, de 397 kN. La ley de axiles mantiene una disposición simétrica en los elementos del fuste que plastifican con tensiones tangenciales negativas, debidas a la subsidencia provocada por los descensos del nivel piezométrico, respecto a la ordenada correspondiente a la carga inicial, de 300 kN, con los valores que se alcanzan cuando plastifican dichos elementos con valores positivos de las tensiones, causados por la carga inicial del micropilote o ascensos del nivel piezométrico. El asiento sube hasta 5,9 cm.

Una recuperación del nivel piezométrico de 7,6 m finaliza en octubre del 97. Las tensiones tangenciales en la zona superficial del estrato se hacen positivas y plastifican esos elementos, a más profundidad las tensiones se hacen negativas, con una zona en la que también plastifican, vuelven a subir y a bajar, oscilando la ley entre los valores positivos y

negativos de plastificación. Las tensiones normales de la punta prácticamente no varían. La ley de axiles se recupera y coincide por arriba con los valores iniciales, oscilando luego conforme aumenta la profundidad. El asiento sube hasta 7,21 cm. El comportamiento es similar al caso del pilote, aunque las tensiones normales en la base son mucho más altas.

Hasta enero del 98 el nivel piezométrico vuelve a bajar 0,5 m y volvemos a tener leyes intermedias entre las anteriores, tanto en lo que respecta a las tensiones tangenciales como a los axiles. Las tensiones normales de la punta no varían. El asiento asciende a 7,24 cm. Después de producirse el máximo descenso, el ascenso del nivel del agua en el terreno se traduce en una recuperación de los valores del axil pero no de los asientos, que siguen creciendo.

En cuanto al asiento, por lo tanto, no hay recuperación por la descarga, con un valor máximo de 7,89 cm en el micropilote empotrado y de 8,94 cm en el flotante. Sí la hay en el axil, y para el máximo disminuye el coeficiente de seguridad un 25% respecto al tope estructural y un 35% respecto a la carga de hundimiento, en el caso de micropilote empotrado, cifras que se convierten en un 10% y un 15%, respectivamente, en el de micropilote flotante.

4. CONCLUSIONES

La subsidencia experimentada en Murcia durante la última sequía ha dado lugar a daños en edificios en los que juega un papel importante el efecto del rozamiento negativo sobre las cimentaciones profundas realizadas con pilotes.

El efecto que tiene el fenómeno sobre la distribución de tensiones, tanto en el fuste como en la punta del pilote, se traduce en un traspaso de la capacidad portante desde la parte más superficial del fuste hacia las más profundas y hacia la propia punta.

Para que se produzca el rozamiento negativo es necesario que el suelo asiente más que el pilote, en caso contrario el rozamiento será positivo. En un caso general habrá un punto neutro por encima del que el rozamiento será negativo y

por debajo, positivo, por lo que las tensiones tangenciales cambian de sentido. En él el suelo y el pilote se mueven juntos. La distribución del esfuerzo axial en el pilote es aproximadamente simétrica respecto al punto neutro, donde toma un valor máximo. En los cálculos realizados la relación entre la profundidad del punto neutro y la longitud del pilote oscila entre 0,64 y 0,82 para el caso de pilote empotrado (Endo et al. 1969, Fukuya et al. 1982, Wong y Teh 1995).

El rozamiento negativo origina unas cargas que, junto con las transmitidas por la estructura, habrán de ser resistidas por los estratos inferiores en los que apoya el pilote. Con ello la capacidad del pilote como cimientado se ve reducida, pues desaparece la resistencia por el fuste en la zona en la que el terreno asienta más que el pilote y la zona del fuste con rozamiento positivo y la punta tendrán que resistir la carga inicial más la provocada por la fricción negativa.

El fenómeno ha de tenerse en cuenta en el diseño y cálculo de las cimentaciones con pilotes en los casos en los que se prevea su aparición, mediante la comprobación de la sección requerida del fuste para soportar las tensiones tangenciales totales que actuarían por encima del punto neutro, y de las condiciones que deben cumplir la punta y la zona del fuste por debajo del punto neutro para que el terreno soporte la carga transmitida. La punta del pilote debe calcularse para ello, aunque también puede emplearse un sistema que aisle al fuste del rozamiento del terreno, para que el pilote trabaje sólo por su punta.

Se han distinguido dos casos en los cálculos, según que el pilote se encuentre empotrado en un estrato rígido o sea un pilote flotante en el estrato compresible.

En el primer caso se trata de un pilote columna, cuya punta se empotra en un estrato de roca, grava o arena muy densa. El asiento del terreno se produce fundamentalmente en las capas compresibles situadas entre la superficie y el fondo rígido y varía desde una cantidad máxima, en superficie, hasta cero, en la base. El rozamiento negativo va decreciendo con la profundidad desde el mayor valor en superficie hasta anularse en un punto cercano al estrato rígido, a partir del cual se hace positivo. La carga del pilote es resistida, entonces, por la punta y la pequeña zona del fuste que tiene rozamiento positivo, entre el punto neutro y el estrato rígido.

En el segundo caso se tiene un pilote flotante, totalmente clavado en un suelo de consistencia media o blanda y que resiste fundamentalmente por rozamiento en el fuste. El desplazamiento del terreno se produce a lo largo de todo el pilote y en los estratos subyacentes, con lo que el asiento crece desde las zonas más profundas hasta la superficie. El rozamiento negativo es máximo en superficie y da lugar a una fuerte compresión en el pilote, lo que provoca un importante asiento del mismo. Esto hace que en su parte inferior el asiento del pilote sea superior al del terreno, con lo que el rozamiento es positivo. El punto neutro aparece en la zona central del fuste y el rozamiento negativo de la parte superior se ve equilibrado con el rozamiento positivo de la inferior, quedando el pilote prácticamente inservible y su resistencia por la punta, si queda algo de ella, es pequeña comparada con la carga de hundimiento inicial, anterior a la subsidencia.

El efecto del rozamiento negativo sobre los pilotes se ve amplificado en el caso de los micropilotes. Al resistirse la misma carga inicial por un número mayor de pilotes de menor sección, la superficie lateral resistente es mayor y, por lo tanto, las acciones de fricción entre pilote y terreno. De ahí que su uso no sea el idóneo para el recalce de las cimentaciones que hayan sufrido daños por el efecto del rozamiento negativo provocado por la subsidencia.

5. REFERENCIAS

- ALONSO, E. E.; JOSA, A.; y LEDESMA, A. 1984. Negative skin friction on piles: a simplified analysis and prediction procedure. *Geotechnique*, 34, No. 3. 341-357.
- BALLESTEROS, J. L. 1994. Informes sobre daños en edificios de Murcia. ASEMAS.
- BALLESTEROS, J. L. 1995. Informe sobre los efectos derivados del rebajamiento del nivel freático en el casco urbano de Murcia. Centro de Asesoramiento Tecnológico. Colegio Oficial de Arquitectos de Murcia.
- CORAPCIOGLU, M. Y. 1984. Land subsidence-a state-of-the-art review. *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. Nijhoff: Dordrecht. 369-444.
- DAVIES, T. G. y BANERJEE, P. K. 1978. The displacement field due to a point load at the interface of a two layer elastic half-space. *Geotechnique*, 28:1. 43-56.
- ENDO, M.; MINOU, A.; KAWASAKI, T. y SHIBATA, T. 1969. Negative skin friction acting on steel pipe piles in clay. *Proc. 7th Int. Conf. in Soil Mech. and Found. Engrg., Mexico*. Vol. 2. 85-92.
- FUKUYA, T.; TODOROKI, T.; y KASUGA, M. 1982. Reduction of negative skin friction with steel tube NF pile. *Proc. 7th Southeast Asian Geotech. Conf., Hong Kong*. Vol. 1. 333-347.
- LEE, C. Y. 1993. Pile groups under negative skin friction. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. Vol. 119, No. 10. 1587-1600.
- INDRARATNA, B.; BALASUBRAMANIAM, A. S.; PHAMVAN, P.; y WONG, Y. K. 1992. Development of negative skin friction on driven piles in soft Bangkok clay. *Can. Geotech. J.*, 29 (3). 393-404.
- JARAMILLO, A. 1996. Efectos del rebajamiento del nivel freático sobre las cimentaciones superficiales. Soluciones. *Jornadas Técnicas sobre la Influencia del Descenso del Nivel Freático sobre los Edificios del Casco Urbano de Murcia*. Colegio Oficial de Arquitectos de Murcia. Abril 1996.
- JARAMILLO, A.; y BALLESTEROS, J. L. 1997. El descenso del nivel freático en Murcia: Influencia sobre los edificios. ASEMAS.
- JIMÉNEZ SALAS, J. A.; CAÑIZO, L.; ESCARIO, B.; FARACO, C.; FORT, L.; JUSTO, J. L.; LLORENS, M.; LORENTE, C.; MARSAL, R.; MOLINA, R.; MUZAS, F.; OTEO, C.; RODRÍGUEZ, J. M.; ROMANA, M.; SERRANO, A.; SORIANO, A.; URIEL, A.; y URIEL, S. 1980. *Geotecnia y Cimientos III*. Editorial Rueda, Madrid.
- JUSTO, J. L. y VÁZQUEZ, N. 1999. Subsidencia en Murcia. I. Soluciones explícitas para el asiento unidimensional. *Ingeniería Civil*, 115. 63-77.
- JUSTO, J. L. y VÁZQUEZ, N. 2000. Aplicación de diversos métodos numéricos para el cálculo de la subsidencia unidimensional en un suelo saturado en el caso de Murcia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Vol. 16, 2. 251-279.
- MATTES, N. S. y POULOS, H. G. 1969. Settlement of single compressible pile. *J. Soil Mech., ASCE, SMI*. 189-207.
- Ministerio de Industria y Energía. Instituto Geológico y Minero de España. Mapa Geotécnico y de Riesgos Geológicos para Ordenación Urbana de Murcia.
- PUCHE, A. y BLANCO, J. 1995. Estudio de las Variaciones de los Niveles Freáticos en el Subsuelo del Casco Urbano de Murcia. Consecuencias Geotécnicas. G-166. Geotecnia y Proyectos, S.L.
- SENET, M. 1995. Informe hidrogeológico sobre los efectos de la sequía en los edificios de la ciudad de Murcia. Universidad de Murcia. Instituto del Agua.
- STEINBRENNER, W. 1934. Tafeln zur setzungberechnung. *Die Strasse*, 1:121.
- WALKER, L. K. y DARVALL, P. L. P. 1973. Dragdown on coated and uncoated piles. *Proc. 8th Int. Conf. in Soil Mech. and Found. Engrg., Moscow*. Vol. 2.1. 257-262.
- WONG, K. S. y TEH, C. I. 1995. Negative skin friction on piles in layered soil deposits. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. Vol. 121, No. 6. 457-465.