

# INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA EN UN GRUPO DE EDIFICIOS CIMENTADOS SOBRE PILOTES EN SUELO EXPANSIVO

J. L. JUSTO (\*)  
A. DELGADO (\*\*)  
A. JARAMILLO (\*\*\*)  
J. L. MANZANARES (\*\*\*\*)

**RESUMEN.** Un grupo de 176 viviendas adosadas, cimentadas en un suelo probablemente expansivo, ha sufrido daños en los muros de ladrillo y tabiques. Se ha aplicado un método de elementos finitos tridimensional al conjunto suelo-pilotes-vigas de cimentación para encontrar la relación entre el hinchamiento del terreno y las tensiones en varios elementos estructurales.

**ABSTRACT.** A group of 176 residential houses, on a soil, probably expansive, has suffered damage in brick walls and partitions. A three-dimensional finite element method has been applied to the set soil-piles-foundation beams to find out the relationship between swelling and stresses in several structural elements.

## INTRODUCCION, ESTRUCTURA Y CIMENTACION

Un grupo de 176 viviendas adosadas, en Sevilla, ha sufrido daño en los muros y tabiques.

Las viviendas, de dos plantas, tienen estructura reticulada y cerramientos de ladrillo. Hay juntas de dilatación cada tres o cuatro viviendas.

Se suponía que el terreno era expansivo y se eligió una cimentación sobre pilotes (fig. 1). El forjado de planta baja, separado 30 cm del terreno, está apoyado en vigas, de 60 cm de canto, hormigonadas parcialmente dentro del terreno y cimentadas sobre pilotes. Los encepados están unidos en dirección perpendicular a estas vigas mediante vigas de arriostamiento, de 40 cm de canto, también hormigonadas parcialmente en el interior del terreno. Hay un piloteje por encepado, excepto

bajo las juntas de dilatación, en las que hay dos pilotes, uno a cada lado de la junta, por cada encepado. El diámetro de los pilotes es de 45 cm, excepto al final de cada fila de viviendas y en las juntas de dilatación, en que son de 35 cm. La profundidad de los pilotes es de 10,5 m y la profundidad de la armadura de 8 m.

Al final de la construcción existían ya grietas que han aumentado con el tiempo. Hay grietas hasta de 15 mm de anchura.

Las nivelaciones y el esquema general de las grietas corresponden a un levantamiento del eje de simetría de cada grupo de 3 a 4 viviendas adosadas respecto a la junta de dilatación o al final de cada fila. Este levantamiento puede alcanzar hasta 55 mm, y las distorsiones angulares medidas en la dirección de la fachada principal oscilan entre 1/100 y 1/300.

## PROPIEDADES DEL SUELO

La tabla 1 recoge algunas propiedades de las capas del suelo y los módulos de elasticidad usados en los cálculos. El nivel freático aparece alrededor de los 6,5 m de profundidad. El coeficiente de Poisson usado en los cálculos fue de 0,3.

Los ensayos de hinchamiento se han llevado a cabo en muestras tomadas una vez establecido el daño. Estas muestras dan hinchamiento pequeño o nulo, pero ello

(\*) Catedrático del área de Ingeniería del Terreno. Director del Departamento de Mecánica de Medios Continuos. Universidad de Sevilla.

(\*\*) Profesor asociado del Departamento de Mecánica de Medios Continuos. Universidad de Sevilla.

(\*\*\*) Profesor titular del Departamento de Mecánica de Medios Continuos. Universidad de Sevilla.

(\*\*\*\*) Catedrático del área de Mecánica de Medios Continuos. Universidad de Sevilla.

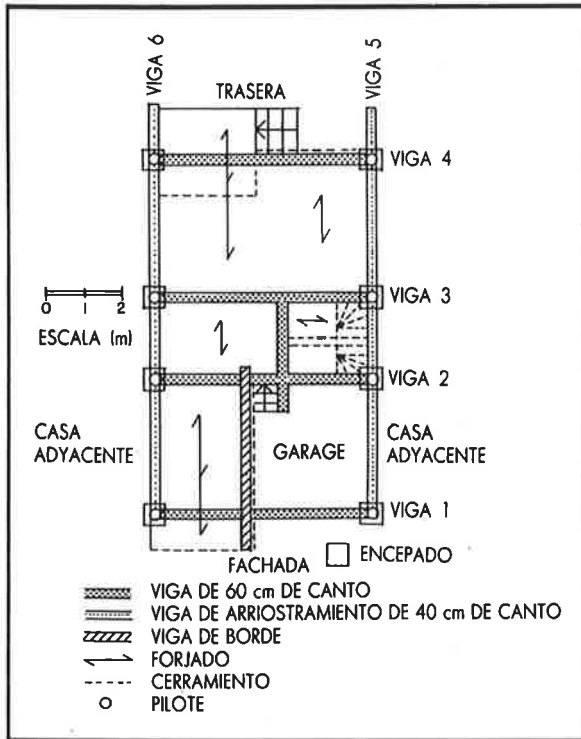


FIGURA 1. Cimentación y estructura de planta baja de una vivienda.

puede deberse a un incremento en su humedad respecto a su estado anterior a la construcción. Por otro lado, la retracción es muy importante, y el hinchamiento posterior a la retracción es importante en muchos casos.

**METODO DE ELEMENTOS FINITOS**

El análisis de la interacción suelo-estructura se ha llevado a cabo mediante un método de elementos finitos desarrollado por Justo et al. (1983, 84 y 85) para el estudio de cimentaciones sobre suelo expansivo.

Delgado (1986) ha demostrado en su tesis doctoral que, si los datos de entrada son correctos, la diferencia entre los desplazamientos medidos y los calculados por este método son inferiores al 25 %.

Los fundamentos del método han sido presentados por Justo et al. (1983 y 84) y Delgado (1986). Como resumen puede decirse que el suelo se modela como un sólido elástico, isótropo, no-lineal y heterogéneo, sometido a cargas gravitatorias y cambios de volumen, y se sigue una trayectoria de las tensiones simplificada, equivalente.

**CALCULOS**

La tabla 2 indica los diferentes casos estudiados.

El suelo está en contacto con la cara inferior de la viga en todos los casos, excepto en el G, en el cual la viga está separada y el E, en el que está completamente embebida.

CAPA	TIPO DE SUELO	PROF. m	w <sub>L</sub>	q <sub>v</sub> kPa	N <sub>B</sub> GOLPES/20 cm	E (MPa)	
						I	II
1	Arcilla marrón	1,0	58	50	12	10	5
2	Arcilla rojiza	5,5-6,5	46	210	29	16	10
3	Arcilla limosa	8,5	31		108	80	22,5
4	Grava arenosa	12,5			R	80	160

TABLA 1. Propiedades de los suelos.

q<sub>v</sub> = Resistencia a compresión simple.  
R = Rechazo.

CASO	DISCRETIZACION		MODULO DE ELASTICIDAD (TABLA 1)	PROFUNDIDAD DE SUELO EXPANSIVO (m)
	TIPO	PROF. (m)		
CIMENTACION COMPLETA	I	8,50	I	5,5
CIMENTACION PARCIAL	A	II	I	5,5
	B	III	I	5,5
	C	II	I	5,5
	D	II	II	5,5
	E	II	II	6,5
	F	IV	II	5,5
	G	II	12,50	I

TABLA 2. Parámetros de los diferentes casos estudiados.

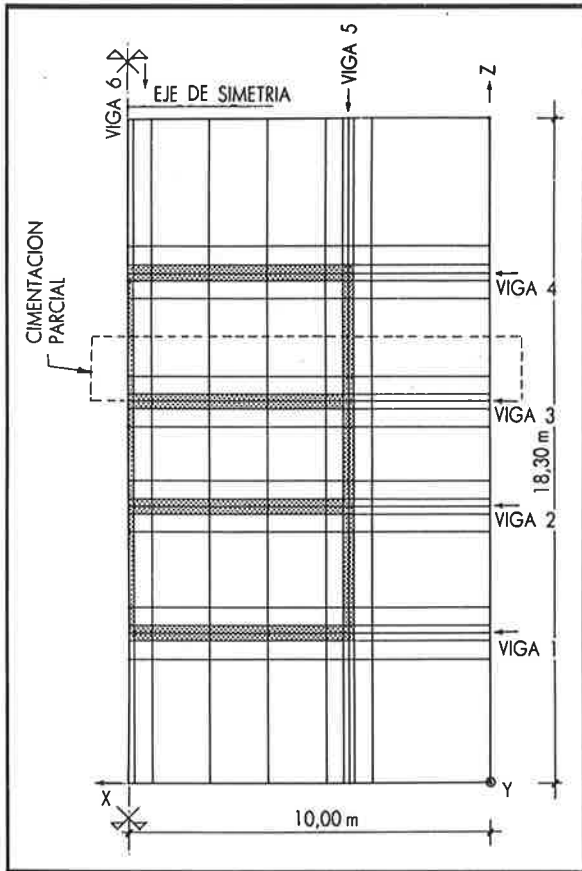


FIGURA 2. Plantas de discretización de cimentación completa y cimentación parcial.

**Discretización.** El tipo I (tabla 2) corresponde a la cimentación completa de una casa, incluyendo los elementos de la cimentación (pilotes) y los de la estructura (vigas que soportan el forjado de planta baja y vigas de arriostramiento). Como las tensiones en las vigas de la 1 a la 4 son muy parecidas, en los tipos del II al IV sólo se ha considerado la parte de cimentación alrededor de la viga 3 indicada en la figura 2 (donde las tensiones son ligeramente mayores).

En la discretización tipo I se ha supuesto un plano de simetría a lo largo de la viga 6 (como si sólo estuvieran unidas dos viviendas). En los tipos II al IV se ha añadido un plano de simetría a lo largo de la viga 3.

La discretización tipo II es la básica correspondiente a la cimentación parcial. Los tipos III y IV tienen una discretización más densa; en el tipo IV el espesor de los elementos de suelo que rodean al pilote es de 10 cm frente a 50 cm en el tipo II.

**Hinchamiento del terreno.** Debido a las razones indicadas en el epígrafe de «Propiedades de los suelos», se desconoce la verdadera expansividad del suelo, que es probablemente pequeña.

Por esta razón, se han considerado varios hincha-

mientos pequeños del perfil libre del suelo (bajo peso propio).

Los casos A y B (v. tabla 2) se han calculado bajo hinchamientos de 0, 0,6 y 1,0 %. Por interpolación se ha encontrado el hinchamiento que produce la rotura de la viga, que es 0,37 %. Este hinchamiento se ha aplicado a los casos A, y C a G.

**RESULTADOS**

A partir de las tensiones calculadas en el centro de cada elemento, se han hallado el momento flector, y esfuerzos cortante y normal en los diversos elementos de pilotes y vigas de cimentación (v. fig. 3).

La tabla 3 muestra los máximos esfuerzos de tracción en las zonas armada y sin armar del pilote.

Un aumento en la densidad de la discretización produce un pequeño incremento en las tensiones cortantes de las vigas y esfuerzos de tracción en los pilotes (paso del caso D al F en la tabla 3).

En los casos de cimentación completa, y en los de cimentación parcial A y B (v. tabla 2), se han supuesto los

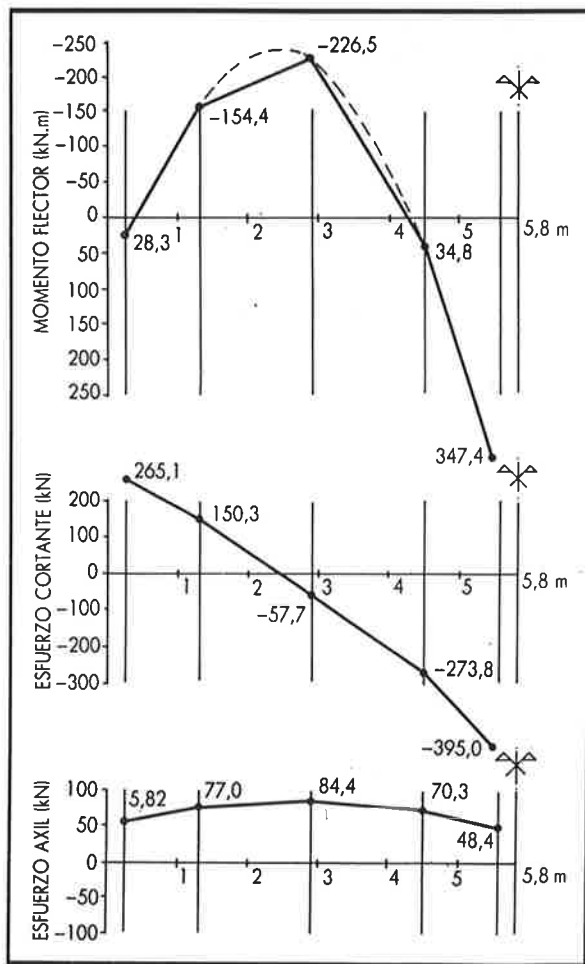


FIGURA 3. Momentos flectores, esfuerzos cortantes y esfuerzos axiales en viga 3 de la cimentación completa (v. fig. 2). Hinchamiento 0,6 %.

CASO	ZONA ARMADA	ZONA NO ARMADA
A	606	210
C	571	206
D	255	105
E	368	216
F	394	219
G	208	68

**TABLA 3.** Máximos esfuerzos de tracción (kN) en los pilotes con un hinchamiento del 0,37 %.

pilotes empotrados en la parte superior de la capa 4 (tabla 1). En los casos restantes se ha discretizado esta capa y se ha considerado la longitud real de los pilotes. Puede verse en la tabla 3 que el paso del caso A al C produce sólo una pequeña disminución de las tensiones, lo que quiere decir que el empotramiento debido a la capa de grava es importante. El desplazamiento vertical de los pilotes es del orden de 1 mm.

Como era de esperar, la relación entre el momento flector o las fuerzas axiles y el hinchamiento es lineal (fig. 4). A partir de estas relaciones y conociendo la resistencia de los materiales, es posible encontrar el hinchamiento que produce rotura en diversos elementos (tabla 4).

La disminución del módulo de elasticidad de las capas expansivas produce un descenso importante de las tensiones en suelo y hormigón (v. tabla 3). Así pues, para que se produzca la rotura, necesitamos un hinchamiento mayor en el caso D que en los casos A y C (v. tabla 4).

El empotramiento de las vigas en el terreno produce un aumento importante en las tensiones (tabla 3, casos D y E), mayor en los pilotes que en las vigas.

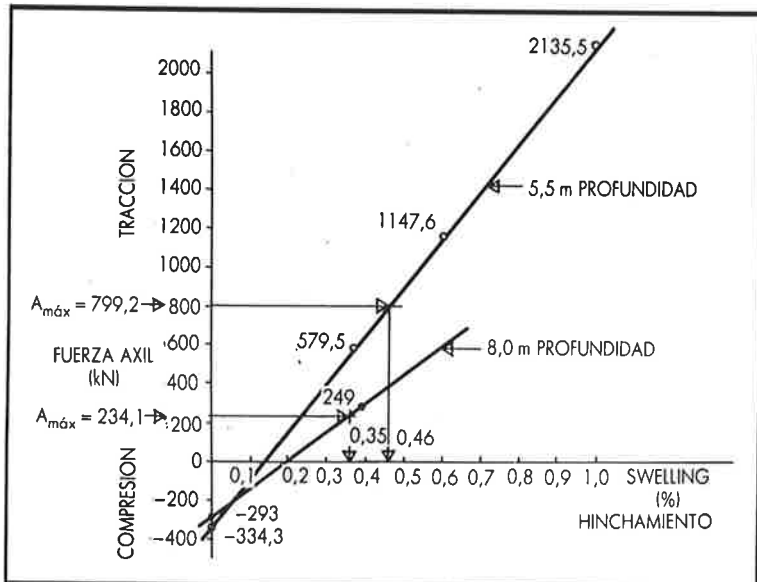
Si la viga está separada del terreno, las tensiones disminuyen (tabla 3, casos C y G). Las tensiones en el pilote serían unas tres veces más pequeñas (fig. 5). Así pues, el problema de los pilotes de este edificio estriba principalmente en que no se liberaron las vigas del terreno.

**CONCLUSIONES**

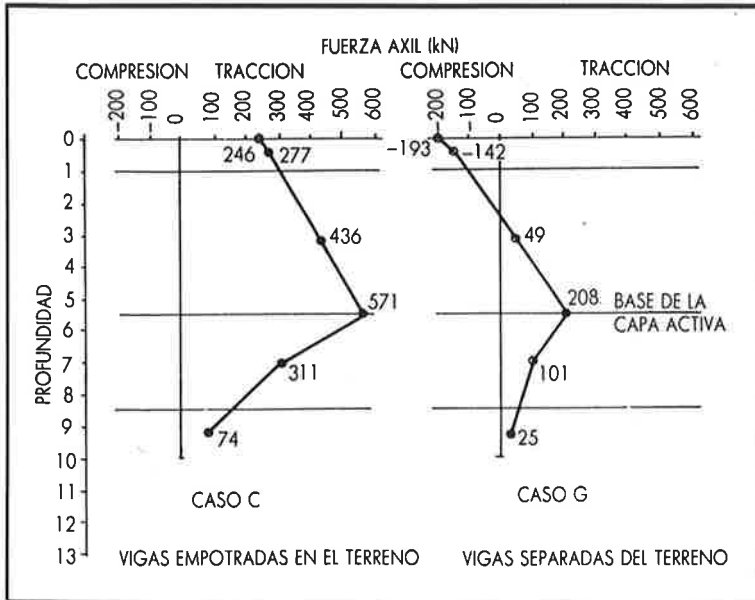
1. El método de elementos finitos es un procedimiento valioso para resolver problemas de interacción suelo-estructura. Como resultado del cálculo se obtienen las tensiones y corrimientos, y es fácil establecer la influencia de cualquier parámetro.
2. Un hinchamiento muy pequeño produce la rotura de pilotes y vigas de cimentación cuando éstas no están separadas del terreno (tabla 4).
3. El máximo hinchamiento calculado cuando se produce la rotura de los pilotes es del orden de 3 mm. Como en este caso se han medido levantamientos diferenciales de 55 mm, los pilotes deberían estar rotos a una profundidad de unos 8 m.

SECCION	HINCHAMIENTO (%)	
	CASOS A Y B	CASO D
Pilote de 35 cm, zona sin armar	0,29	0,43
Pilote de 45 cm, zona sin armar	0,35	0,56
Pilote de 35 cm, zona armada	0,36	0,66
Extremo de viga de carga	0,37	0,65
Centro de viga de carga	0,44	0,76
Pilote de 45 cm, zona armada	0,46	0,95
Viga de arriostamiento	0,58-0,66	0,95

**TABLA 4.** Hinchamiento que produce la rotura en diversos elementos de la cimentación.



**FIGURA 4.** Máximos esfuerzos de tracción en pilotes de 45 cm en función del hinchamiento (caso A).



**FIGURA 5.**  
Esfuerzos axiales en pilote de 35 cm para un hinchamiento del 0,37 %.

**REFERENCIAS**

DELGADO, A. (1986). Influencia de la trayectoria de las tensiones en el comportamiento de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno. Ph. D. Thesis, University of Seville, Spain.

JUSTO, J. L.; SAURA, J., y DELGADO, A. (1983). «Aplicación del método de elementos finitos al estudio de cimentaciones sobre arcillas expansivas». II Cong. Nac. Ing. Mec., Sevilla.

JUSTO, J. L.; SAURA, J.; RODRIGUEZ, J. E.; DELGADO, A., y JARAMILLO, A. (1984). «A finite element method to design and calculate pier foundations in expansive-

collapsing soils». Fifth Int. Conf. Expansive Soils, Adelaide, 119-123.

JUSTO, J. L.; SAURA, J.; JARAMILLO, A., y DELGADO, A. (1985a). «Un método de elementos finitos para el proyecto y cálculo de cimentaciones por pozo sobre suelos durante la expansión, retracción o colapso». 1.º Cong. Iberoamericano de Métodos Computacionales en Ingeniería, Madrid, Vol. 2.

JUSTO, J. L.; SAURA, J.; JARAMILLO, A.; DELGADO, A., y GENTIL, P. (1985b). «Prediction and performance for seasonal swelling-shrinkage of buildings on expansive clay». Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, 4:2199-2204.