

# ASIENTOS EN ZAPATAS CORRIDAS. COMPARACIÓN ENTRE TEORÍAS CLÁSICAS Y EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

(SETTLEMENTS UNDER STRIP FOOTINGS. COMPARISON OF CLASSIC METHODS AND F. E. M. METHODS)

María José López Villar; Manuel Guaita Fernández, Profesores del Dpto. de Ingeniería Agroforestal de la Univ. de Santiago de Compostela

Francisco Ayuga Téllez; Ignacio Cañas Guerrero, Profesores del Dpto. de Construcción y Vías Rurales de la U. P. M.

Fecha de recepción: 28-IV-00

422-28

ESPAÑA

## RESUMEN

*Los métodos convencionales para el análisis de cimentaciones consideran el suelo como un material elástico, sin consideración alguna de plasticidad o de rozamiento entre el terreno y la cimentación. Aunque en la práctica está totalmente aceptada, todos somos conscientes de que se trata de una grave simplificación. En este trabajo, se han desarrollado modelos no lineales usando el método de elementos finitos, que nos permiten estudiar el comportamiento elastoplástico del terreno y las interacciones suelo-cimiento. Nos hemos centrado en la comparación de los asentamientos máximos estimados por las teorías clásicas y por los modelos no lineales desarrollados, y se ha estudiado la influencia de diferentes variables, como las cargas o las dimensiones de la zapata. En todos los casos se han considerado modelos en dos dimensiones, por lo que simulamos zapatas corridas. Para acercarnos a una cimentación real, se han tenido en cuenta cargas combinadas de axiles, momentos y cortantes.*

## SUMMARY

*Conventional approaches for the analysis of foundations consider the soil as an elastic material, without any consideration of plastic behavior or friction. Nevertheless, it is widely accepted that this is an over-simplification. In this paper, non-linear models were developed using finite element methods, and considering soil-footing interactions and elasto-plastic behavior. Specifically, we compared maximum settlements estimated by conventional linear methods and by non-linear methods, and the effect of different loads and different footing dimensions has been studied. In all cases only two dimensions were considered (i.e. the footings were assumed to be of infinite length). In this paper, the behavior of strip footings subject to combined vertical, horizontal and moment loading has been studied.*

## 1. Introducción

Las cimentaciones son aquella parte de la estructura encargada de transmitir las cargas al terreno. Por ello, habrá de proyectarse en función de la resistencia del suelo y, en todos los casos, la decisión sobre el tipo de cimentación vendrá condicionada por ella. La interacción suelo-cimiento es importante para el cálculo de la

cimentación y, a su vez, depende fuertemente de las deformabilidades relativas del suelo y del cimiento.

Los métodos clásicos de cálculo de cimentaciones superficiales se basan en la teoría de la elasticidad, pero la realidad de los suelos es diferente. La consideración del comportamiento elástico del suelo no deja de ser una simplificación importante en muchos casos en los que una

ley constitutiva elasto-plástica del tipo Mohr-Coulomb o Drucker-Prager sería más cercana a la realidad. Todas estas hipótesis se pueden estudiar hoy en día y en profundidad con la aplicación de métodos numéricos implementados en ordenadores y, en particular, con la utilización del método de los elementos finitos.

Además coexiste en una sola estructura la interacción de varios materiales. Por una parte, se encuentra el material terreno y, por otra, el hormigón del cimiento y su interacción a través del rozamiento entre ambos. Además está la particularidad añadida de ser el suelo un material elastoplástico, lo que hace especialmente singular y de marcado interés científico el poder conocer, en la medida de lo posible, todos los factores que intervienen en el cálculo de estas importantes estructuras y evaluarlos convenientemente.

Los suelos son materiales relativamente compresibles, que se deforman bajo la acción de las cargas aportadas por la cimentación. Esta deformación ha de ser determinada y limitada para evitar que la estructura superior se vea afectada.

Normalmente, las deformaciones que interesa conocer y limitar, son las verticales, que conocemos con el nombre de *asiento*.

En la práctica se distinguen tres tipos de asientos:

#### *Asiento inmediato o asiento elástico*

Que se produce, casi simultáneamente, con la aplicación de la carga: en rocas y suelos arenosos compactos, la mayor parte de los asientos son de este tipo. En arcillas saturadas corresponde a deformaciones de corte sin drenaje y, por consiguiente, considerando un coeficiente de Poisson de 0,5. El asiento se produce por cambio de forma, aunque no de volumen del suelo.

#### *Asiento de consolidación*

Ocurre a medida que se va perdiendo agua por drenaje, de manera que los poros del suelo se reducen, produciéndose deformaciones volumétricas de forma muy lenta después de aplicada la carga. Es el comportamiento típico de arcillas saturadas.

#### *Asiento de fluencia lenta*

Se produce en algunos suelos después del asiento de consolidación, sin incremento de la carga, sino que se debe a una especie de fluencia viscosa de los contactos entre las partículas del suelo.

Los tres tipos de asientos son típicos de arcillas y limos plásticos saturados, pero en el caso de suelos no saturados

o bien suelos granulares, que drenan de manera instantánea tras la aplicación de la carga, los asientos son muy rápidos y de tipo fundamentalmente elástico o inmediato.

## 2. Métodos para el cálculo teórico de asientos

Los numerosos métodos de cálculo que se emplean en la actualidad, pueden agruparse en cuatro orientaciones:

- Los derivados de la teoría de la consolidación unidimensional de Terzaghi (1925), o de la teoría tridimensional de Biot (1941), entre los cuales se podría citar el método de Skempton-Bjerrum (1957), citado en (TERZAGHI Y PECK, 1973).

- Los que se basan en los resultados obtenidos experimentalmente de la aplicación de cargas a muestras de suelo representativas, como el método de Lambe (LAMBE y WHITMAN, 1972) o el de Ladd y Foote (LADD y FOOTE, 1974).

- Los que simplifican el comportamiento del suelo, considerándolo como un medio elástico.

- Los que parten de ecuaciones constitutivas aproximadas del terreno (Mohr-Coulomb, Drucker-Prager) aplicándola a modelos matemáticos o modelos de elementos finitos, como el método de Cambridge.

De todos ellos, el más utilizado en la práctica por los calculistas -y que nosotros tomaremos como referencia en este trabajo para comparar con los resultados obtenidos del M.E.F.- es el **Método elástico**. Tiene la ventaja de considerar la deformación tridimensional del terreno y ser de muy fácil aplicación. En suelos granulares, se determina el asiento inmediato inicial, usando para ello las soluciones elásticas. La primera aproximación, se corrige con una serie de coeficientes establecidos experimentalmente, que pretenden estimar la influencia de ciertas variables no incluidas en la fórmula inicial.

Según Steinbrenner (1936), citado en (RODRÍGUEZ ORTIZ y otros, 1989), el asiento elástico producido por una carga rectangular (basándose únicamente en la teoría de la elasticidad), sería:

$$\delta = q \times B \times I \times \frac{(1 - \eta^2)}{E}$$

donde I es un factor de influencia que depende de la forma de la zapata (relación L/B), y de si el asiento pretende estimarse en el centro o en la esquina de la cimentación; B es la dimensión menor de la zapata; q la carga aplicada por unidad de superficie; E el módulo de elasticidad del suelo y  $\eta$  su coeficiente de Poisson.

Además se ha propuesto un coeficiente denominado Factor de Fox, que determina la influencia de la profundidad a la que se sitúa el plano de cimentación, con lo cual el asiento inmediato quedaría determinado por la siguiente expresión:

$$\delta = q \times B \times I \times \frac{(1 - \eta^2)}{E} \times F$$

En suelos granulares, la expresión anterior resuelve el problema de forma directa, ya que el asiento es predominantemente inmediato. En suelos encharcados, la determinación del asiento conlleva varios pasos, pero no entraremos en ellos por no ser este tipo de suelos motivo del presente estudio.

### 3. Desarrollo de un modelo de elementos finitos para la evaluación de asientos

Hasta este momento, los métodos descritos, suponen una aproximación lejana a la realidad de una cimentación, tratando el suelo como si de un material elástico se tratase y sin tener en cuenta las interacciones entre los diferentes materiales que componen una cimentación real: suelo y hormigón.

Nuestro propósito será modelizar una situación lo más aproximada a la real que sea posible, introduciendo todos aquellos factores que creemos puedan tener influencia en el comportamiento del suelo bajo la carga de una zapata. Ello nos obliga a la creación de modelos no lineales. La no linealidad puede presentarse, en nuestro caso, bajo dos puntos de vista:

1) no linealidad debido al material: como consecuencia de que el suelo no es un material elástico, es preciso introducir criterios de plasticidad en su comportamiento. En nuestro caso trabajaremos con el criterio elasto-plástico de Drucker-Prager.

2) no linealidad debido a la interacción de diferentes materiales, más claramente, la consideración de rozamiento entre el suelo y el hormigón.

La resolución de modelos no lineales implica que los resultados se alcancen a través de sucesivas iteraciones. En el caso de ANSYS, que es el programa que se utilizará en el presente trabajo, se recurre al método de Newton-Raphson.

Como es de esperar que ambos tipos de no linealidad influyan en los resultados obtenidos, pasaremos a estudiar los problemas por separado, de forma que se permita apreciar cuál de ellas y en qué medida están afectando a los resultados.

En el modelo desarrollado inicialmente, se han simulado tierras sobre el cimiento, ya que en las fórmulas teóricas de estimación de asientos se demuestra que la altura de terreno por encima del plano de cimentación es un factor importante a tener en cuenta. No se simula, sin embargo, el cimiento, puesto que la interacción entre materiales se estudiará en un modelo posterior. Se supone el terreno sin estratificación y se simula una profundidad suficiente para que el efecto del propio suelo no produzca alteraciones en el resultado. La geometría del modelo desarrollado se representa en la figura 1.

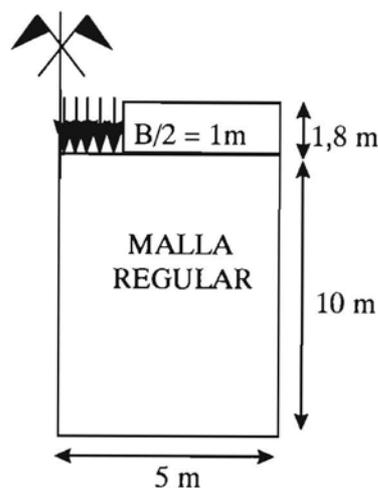


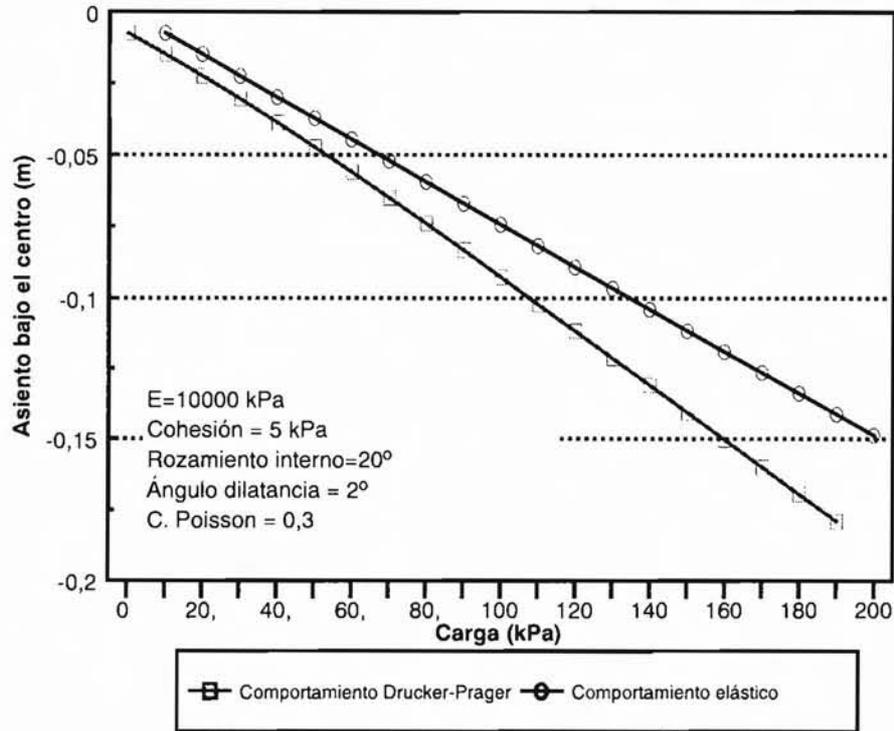
Figura 1

Se han hecho dos simulaciones, con dos tipos de suelos diferentes: un suelo típicamente cohesivo, con módulo de elasticidad 10.000 kPa, ángulo de rozamiento interno 20°, ángulo de dilatación 2°, coeficiente de Poisson 0,3 y cohesión 5 kN/m<sup>2</sup>, valores que se espera produzcan resultados más divergentes con respecto a un análisis donde el suelo se considere elástico. También se estudió un suelo típicamente granular, con módulo de elasticidad 80.000 kPa, coeficiente de Poisson 0,3, ángulo de dilatación 5°, cohesión 0,5 kN/m<sup>2</sup> y ángulo de rozamiento interno 30°. Para ambas simulaciones se obtuvieron valores del asiento en el punto central y en el extremo de la carga frente al valor de la carga aplicada y se comparan con el mismo ensayo pero tomando el suelo como elástico. En los dos casos las mayores diferencias se encontraron en el asiento bajo el punto central de la carga, representado en las gráficas 1 y 2.

Si nos basamos en la definición de profundidad característica (COSTET Y SANGLERAT, 1975) y aceptamos el valor de 20 kPa como aquella tensión a partir de la cual podemos aceptar que su influencia en el suelo es despreciable, podremos considerar que, para cualquier tipo de suelo, el asiento que produce este valor de tensión es el error máximo que podemos admitir,

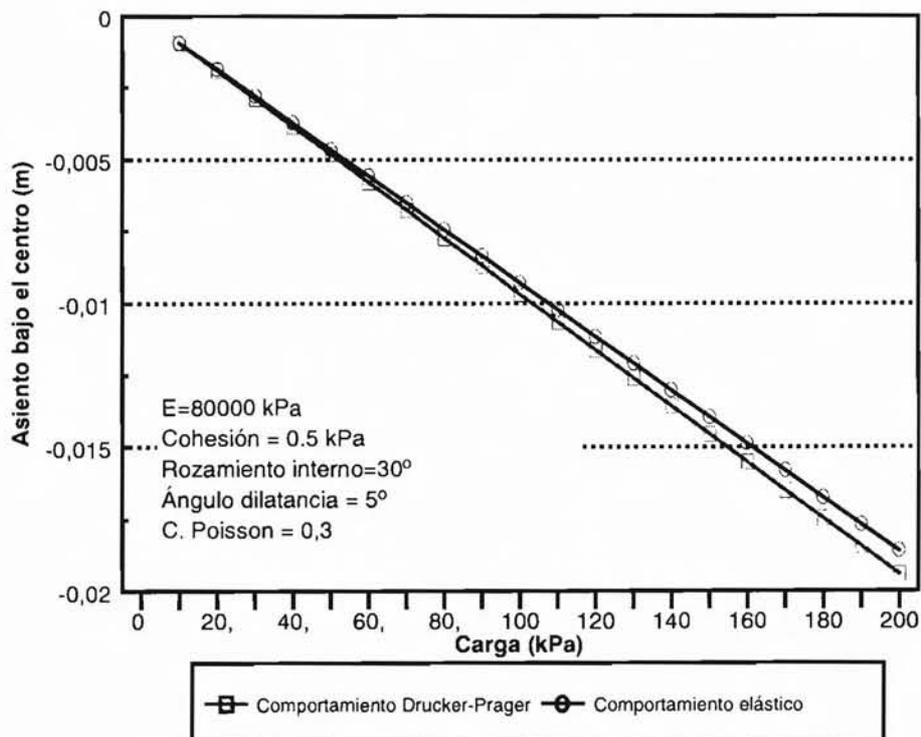
GRÁFICA 1

### ASIENTO PARA DISTINTAS CARGAS Suelo cohesivo



GRÁFICA 2

### ASIENTO PARA DISTINTAS CARGAS Suelo granular



independientemente del valor absoluto de ese asiento o del porcentaje de error que suponga respecto al asiento total alcanzado por el suelo.

Para el suelo cohesivo que estamos estudiando, una carga de 20 kPa produce un asiento vertical de 1,5 cm en el centro de la carga. Es decir, éste será el valor máximo que se admitirá como error al utilizar un modelo lineal para el cálculo de asientos en un material plástico como es el suelo. Si se observa la gráfica 1 es a partir de los 129 kPa de carga aplicada, cuando se supera este valor. Éste es un valor bajo, incluso para edificios de pequeño tamaño.

Como se puede deducir del criterio de plastificación de Drucker-Prager, si el módulo de elasticidad, la cohesión o el ángulo de rozamiento interno aumentan, la carga que se podría aplicar, sin llegar a error inadmisibles, sería mayor. En caso contrario, para ángulos de rozamiento interno, cohesión o módulo de elasticidad menores, habría que trabajar con valores de carga más pequeños, si se quiere prescindir del análisis no lineal con un margen de error razonable.

Para el suelo granular simulado, gráfica 2, el asiento que le corresponde a una carga de 20 kPa es de 0,19 cm, que no se alcanza para 200 kPa (para este valor de carga, la diferencia entre el asiento con deformación plástica y el asiento exclusivamente elástico es 0,08 cm).

El primer paso para acercarnos al estudio del efecto del rozamiento en el análisis de una cimentación, consiste en introducir en el modelo dos materiales diferentes: suelo y hormigón. El modelo anterior suponía que el valor de la carga era uniforme en toda la franja cargada (zapata totalmente rígida), pero ahora, al introducir un nuevo material entre la carga y el suelo (la zapata), las deformaciones que sufra esta última pueden influir en los resultados de asientos y tensiones sobre el suelo.

El valor de la carga que se introducirá en esta nueva simulación será de 100 kPa y el módulo de elasticidad del suelo 80.000 kPa. Como se ha visto en la gráfica 2, la combinación de estos valores evita desviaciones en los resultados derivados de la plasticidad. De este modo aseguramos que las conclusiones obtenidas de los ensayos realizados se deban únicamente al efecto de la introducción de un nuevo material. El siguiente paso es la introducción de efectos de rozamiento entre las superficies del suelo y las superficies de la zapata.

Para simular el rozamiento en un programa de elementos finitos se utilizan elementos especiales, a modo de muelles, que unen entre sí las superficies con elementos no rígidos que permiten el desplazamiento de una sobre otra, pero oponiendo resistencia al mismo: rozando. Un elemento de rozamiento conecta dos nodos, pertenecientes a diferentes áreas, que, inicialmente, se encuentran en

la misma posición, pero, que tras ser sometidos a las cargas, pueden separarse en dirección perpendicular a la línea que une ambos nodos, venciendo una fuerza en contra que depende de las constantes reales del elemento rozamiento.

En un caso real de zapata corrida, por lo general, ésta ha de soportar al mismo tiempo esfuerzos axiales, cortantes y momentos. Tanto el momento como el cortante no admiten la simplificación de un modelo simétrico, por lo que nos vemos obligados a duplicar el volumen de elementos y crear un nuevo modelo sin simetría.

Para que el programa funcionara correctamente fue necesario duplicar el número de áreas, puesto que como la zapata sufrirá flexión, su mitad derecha rozará en sentido contrario que su mitad izquierda. Es decir, cuando la zapata se hunde, el suelo que está bajo su base tiende a escaparse hacia fuera, pero como los ejes están en el centro de la zapata, la mitad del terreno se moverá en sentido negativo y la otra mitad en sentido positivo. Lo mismo ocurre en la cara superior de la zapata, mientras que en los cantos cambia la orientación, por ello tendremos que definir seis elementos de rozamiento diferentes con sus constantes reales diferentes.

También es necesario duplicar el número de áreas y el número de líneas, con lo que cobrarán mucha importancia los comandos de mallado para conseguir que los elementos de diferentes áreas que estén en contacto, tengan nodos coincidentes en cuanto a posición, de forma que sea posible ponerlos en contacto por elementos de rozamiento. La geometría del modelo resultante se representa en la figura 2.

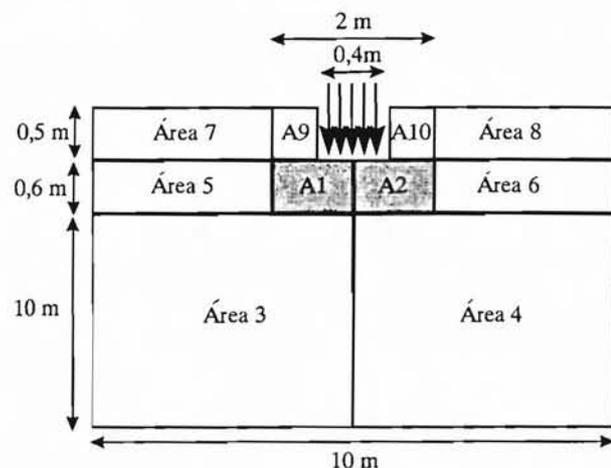


Figura 2

#### 4. Discusión de los resultados obtenidos en la evaluación de asientos con el modelo desarrollado

Partimos en principio, de una zapata típicamente rígida, según EHE, cuyas dimensiones son las siguientes:

- longitud de la base = 2 m
- canto = 0,6 m
- profundidad de cimentación = 1,1 m
- anchura del muro = 0,4 m

Las características elásticas del suelo de cimentación son:

- módulo de elasticidad = 80.000 kPa
- peso específico del suelo = 20 kN/m<sup>3</sup>
- módulo de Poisson = 0,3

Las cargas que se mantienen constantes son:

- axil = 200 kN
- cortante = 20 kN

Estos valores corresponden a edificios pequeños, muy corrientes, pero los resultados obtenidos no pierden generalidad.

Para comparar con las fórmulas clásicas se ha de hacer una corrección en estas cargas:

- el axil total actuante (N) será, el valor introducido como carga más el peso propio de la zapata y el suelo que descansa sobre ella.
- el momento total (M) será, el que figura en la programación, más el valor del cortante multiplicado por

el canto de la zapata.

Manteniendo fijos axil y cortante, se hizo una variación de los momentos, para medir la influencia de la excentricidad en los asientos. Se representa en la gráfica 3.

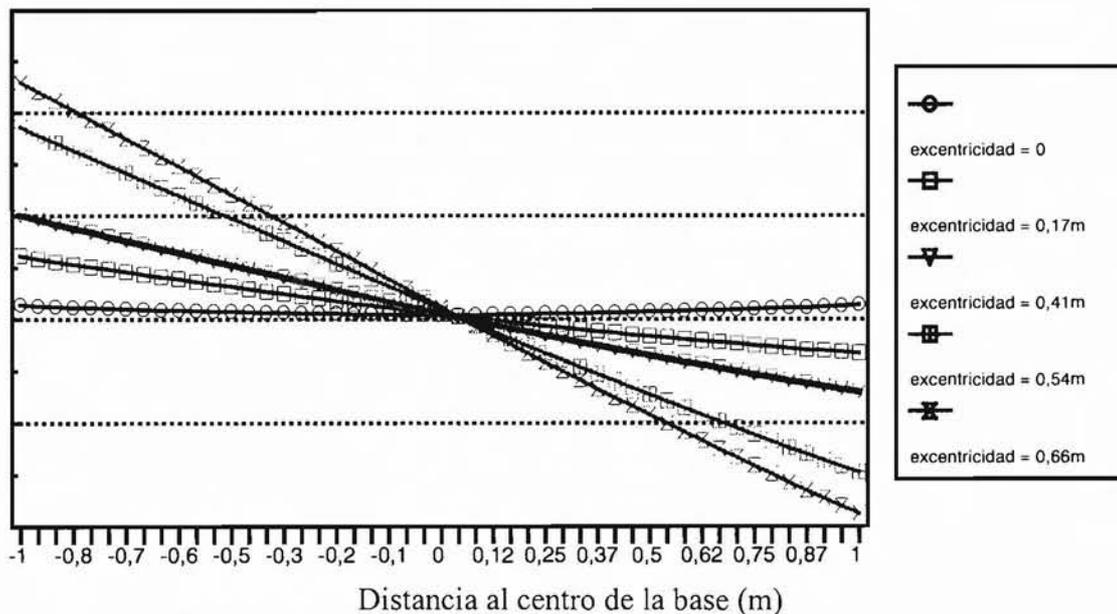
En dicha gráfica, vemos que la distribución de los asientos bajo la base de la zapata son rectas perfectas, es decir, la zapata no flexa y su base permanece totalmente plana. No nos olvidemos que nuestra zapata, es, por su geometría, flexible para asientos y, por ello, las teorías de cálculo de asientos suponen que el asiento será máximo en el centro y mínimo en el extremo. Según los resultados obtenidos de nuestro estudio, no podemos estar totalmente de acuerdo, puesto que la cimentación no flexa y, aunque aparecen diferencias entre los asientos en el centro y en los extremos, el asiento máximo se encuentra bajo el extremo, y no por flexión, sino por giro.

En la gráfica 4, podemos ver que el asiento sí se ve afectado por la excentricidad, variable que las teorías clásicas desprecian, siendo, además, el valor del asiento obtenido del modelo, considerablemente mayor que el esperado teóricamente.

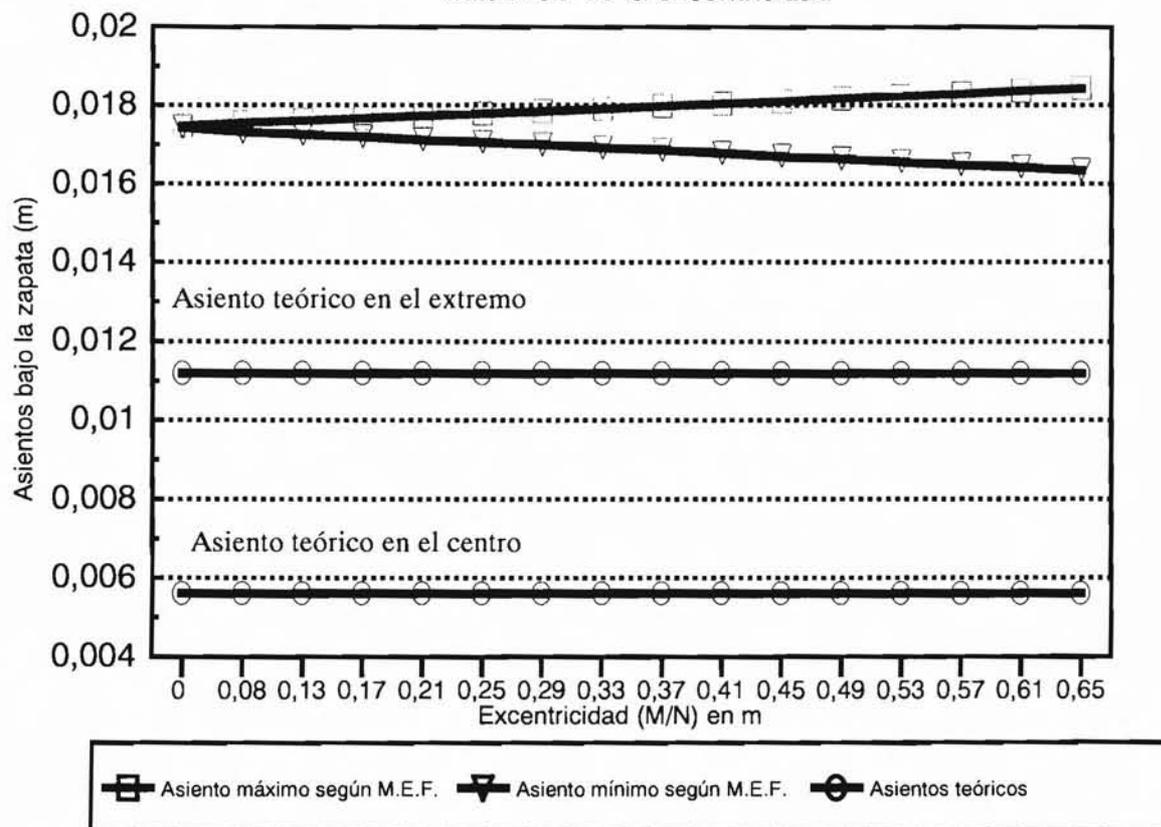
Si se realiza un análisis de regresión, ajustando la relación a una recta donde el asiento máximo es el término dependiente y la excentricidad el término independiente, tendremos:

GRÁFICA 3

### ASIENTOS BAJO LA CIMENTACIÓN Influencia de la excentricidad



GRÁFICA 4  
**ASIENTOS BAJO LA CIMENTACIÓN**  
 Influencia de la excentricidad



- número de observaciones = 15
- grados de libertad = 13
- coeficiente de correlación = 0,997
- recta resultado del ajuste:  $ASIENTO\ MÁXIMO = 0,0174 + 0,00156 \times excentricidad$

Los resultados obtenidos suponen diferencias muy importantes con los resultados que se obtendrían aplicando las teorías de cálculo clásicas. Y no sólo los resultados finales, sino que están en total desacuerdo con los propios fundamentos de las teorías. Por ejemplo, en las teorías clásicas no se considera el efecto del giro y la distinción teórica entre zapatas rígidas y flexibles no se ajusta a los resultados obtenidos. Todo ello se ha estudiado únicamente para una zapata concreta, por lo que nos parece interesante poder extrapolar estas posibles conclusiones a zapatas con geometría diferente. Por ello, se resolvieron una serie de nuevos modelos, estudiando las principales variables que pensamos podrían influir claramente en las conclusiones finales.

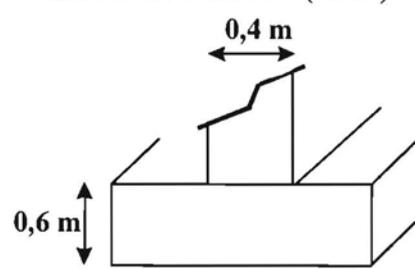
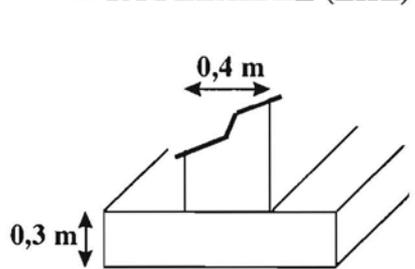
En todos los modelos se ha tratado de mantener constante el efecto de las cargas, de forma que la carga por unidad de longitud de base no varíe. Es decir, cuando se cambia la dimensión de la base, se ajusta el axil introducido, de manera que la suma del peso propio de la zapata, más el

peso de las tierras que gravitan sobre ella, más el propio axil introducido como carga, permanezca constante para la unidad de superficie de base. De la misma manera, cuando es la dimensión del canto la que varía, se corrige el momento introducido, para que la excentricidad se mantenga constante; es decir, el momento introducido más el momento aportado por el cortante mantiene invariable su relación con el axil.

Para facilitar la comprensión de los resultados y al mismo tiempo poder compararlos entre sí y con los resultados teóricos, los datos más significativos del ensayo se resumen en la tabla 1.

La columna marcada como “% de diferencia”, estima el porcentaje de la diferencia entre ambos valores (resultados obtenidos del modelo y método clásico), frente al valor teórico. De este modo, cuando el resultado es negativo, indica que el valor teórico es inferior al obtenido por M.E.F. Sólo se han calculado asentamientos teóricos en los ejemplos de zapatas sometidas a excentricidad de 0,54 m, puesto que es, en estos casos, donde la diferencia con el modelo desarrollado se hace más patente. Esto se debe a que para el método teórico el valor del asiento es el mismo, independientemente del valor de la excentricidad

TABLA I

		<b>ZAPATA RÍGIDA (EHE)</b>				<b>ZAPATA FLEXIBLE (EHE)</b>			
									
		<b>ASIENTO MÁXIMO</b>		<b>ASIENTO MÍNIMO</b>		<b>ASIENTO MÁXIMO</b>		<b>ASIENTO MÍNIMO</b>	
<b>Excentricidad</b>		<b>0,54</b>	<b>0,17</b>	<b>0,54</b>	<b>0,17</b>	<b>0,54</b>	<b>0,17</b>	<b>0,54</b>	<b>0,17</b>
<b>BASE</b>		<b>m</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>m</b>
	<b>2 m</b>	0,0182	0,0176	0,0165	0,0172	0,0180	0,0173	0,0159	0,0166
	<b>1,8 m</b>	0,0179	0,0174	0,0163	0,0169	0,0177	0,0170	0,0156	0,0164
	<b>1,6 m</b>	0,0176	0,0171	0,0160	0,0166	0,0175	0,0168	0,0154	0,0161
		<b>ASIENTO MAX. INMEDIATO (m)</b>			<b>ASIENTO MAX. INMEDIATO (m)</b>				
		<b>SEGÚN M.E.F.</b>	<b>TEÓRICO</b>	<b>% de Diferencia</b>	<b>SEGÚN M.E.F.</b>	<b>TEÓRICO</b>	<b>% de Diferencia</b>		
<b>Excentricidad</b>		<b>0,54</b>			<b>0,54</b>				
<b>BASE</b>									
	<b>2 m</b>	0,0182	0,0095	-91,3	0,018	0,0095	-89,19		
	<b>1,8 m</b>	0,0179	0,0085	-109,4	0,0177	0,0085	-106,71		
	<b>1,6 m</b>	0,0176	0,0076	-132,2	0,0175	0,0076	-129,92		

y, en nuestro ensayo, el asiento máximo crece con la excentricidad.

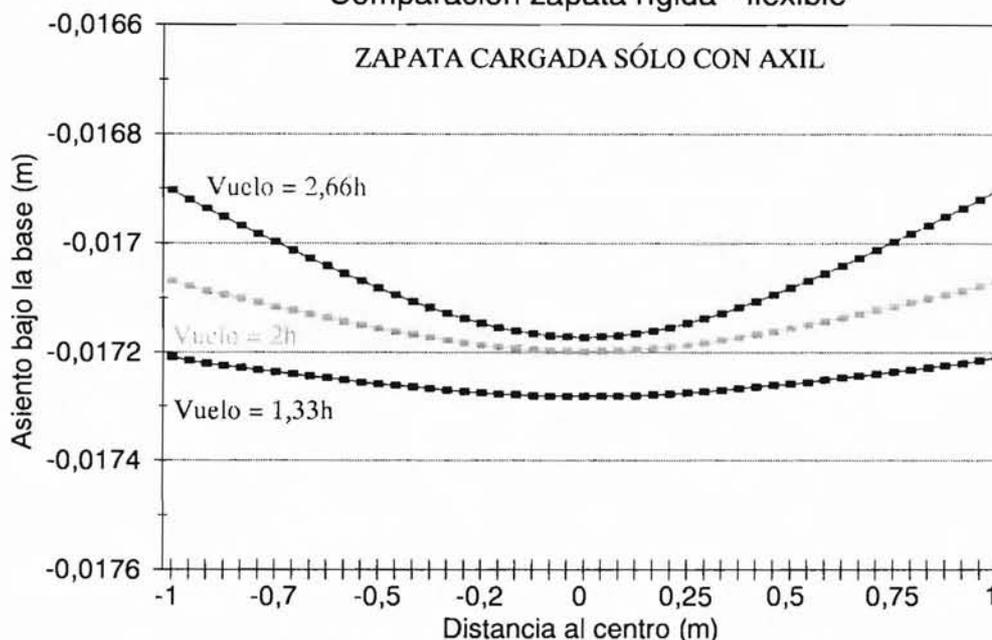
La reducción de la base tiene el mismo efecto sobre los asientos que el que suponen los métodos clásicos: una reducción de la anchura de la base, supone una reducción del asiento, en todos los casos, incluso en los valores extremos de zapatas flexibles, aunque la influencia de la dimensión de la base no es tan alta, según nuestros datos, como suponen las citadas fórmulas. Para zapatas rígidas, esto nos parece lógico; si recordamos la gráfica 4, donde podemos ver que la distribución de los asientos bajo la base de la zapata son rectas perfectas y la base permanece totalmente plana. Por ello, la diferencia entre los asientos extremos, depende únicamente del giro que produce la excentricidad en la estructura, por tanto el asiento máximo sería directamente proporcional al valor de la excentricidad. Por el contrario, las zapatas flexibles, sufren flexión, de forma que la base no permanece plana. De este modo, al efecto del giro habría

que sumar el efecto de la flexión, que disminuye el asiento bajo los extremos de la cimentación. Así, los asientos extremos en zapatas flexibles, tendrían que ser menores que en zapatas rígidas, aunque las cargas aplicadas por superficie de base son exactamente las mismas y las tensiones extremas considerablemente mayores. Esto se cumple para todas las combinaciones que se han estudiado, aunque las diferencias son mínimas, del orden de décimas de milímetro, por lo que se podría decir que, para la combinación de cargas que tenemos, la diferencia en los asientos de una zapata rígida a una flexible, a igualdad de todos los demás condicionantes, es poco significativa.

También salta a la vista que la diferencia entre los valores de asientos extremos es mayor siempre en zapatas flexibles; es decir, el mayor giro, unido a la flexión de la base hacen que, aunque la estructura en conjunto se hunde menos, la diferencia relativa entre los asientos puntuales en los extremos, es mayor.

GRÁFICA 5

### ASIENTOS BAJO LA CIMENTACIÓN Comparación zapata rígida - flexible



Para zapatas flexibles la diferencia entre los valores extremos es mayor que en zapatas rígidas, pero el asiento absoluto es menor. Una estructura que permanece totalmente indeformable (como puede verse en la gráfica 3, la base sólo gira, pero no se deforma), arrastra el suelo que está por debajo de ella, con un efecto de punzonamiento, que hace que el asiento sea mayor. Yendo todavía más lejos, podemos decir, como se ve en la gráfica 5, que cuanto mayor es el canto de la zapata, a igualdad de todos los demás factores, mayor es el asiento:

#### 5. Conclusiones

- Según los resultados obtenidos del modelo, existe una relación lineal entre los asientos que provoca una cimentación y el valor de la excentricidad a que se encuentra sometida y que la diferencia de asiento entre los distintos puntos de la base de la zapata también depende de la excentricidad. Sin embargo, las diferencias en los asientos entre los extremos son muy pequeñas, por lo que tiene sentido hablar de un asiento medio único para toda la cimentación, tal como se está haciendo hoy en la práctica. De todos modos, no se debe olvidar que hay una influencia del momento actuante en el asiento producido.

- Los valores de asientos verticales obtenidos del modelo son mucho mayores que los esperados aplicando los métodos de cálculo que se utilizan en la práctica, y la diferencia se incrementa en zapatas muy excéntricas, puesto que es ésta una variable que en la práctica se desprecia.

- También podemos concluir, que, cuando la dimensión de la base se reduce, independientemente del valor de la excentricidad y de si la zapata es rígida o flexible, los asientos siempre decrecen. En esto se produce acuerdo con las teorías aplicadas en el cálculo teórico.

- Según los resultados de nuestro estudio, los asientos son siempre mayores en zapatas rígidas que en zapatas flexibles, para toda la base. De nuevo encontramos contradicción con las teorías de cálculo clásicas, puesto que para éstas una zapata flexible asienta menos en los extremos que una zapata rígida que se encuentre en las mismas condiciones, por efecto de la flexión; pero, en el centro, el asiento se considera mayor en las flexibles. Y en una estructura flexible, sometida a momento, el asiento más alto no se produce en el centro, como suponen las teorías clásicas, sino en el extremo. Esto se explica porque la diferencia de asiento bajo los distintos puntos de la base de una zapata flexible no se debe únicamente a la flexión, sino también -y en mayor medida- al giro, como ocurría en estructuras rígidas; de hecho, es patente que el efecto de la flexión queda camuflado por el efecto del giro.

- En estructuras con carga totalmente centrada, a medida que el canto crece, el valor de los asientos también crece (ver gráfica 5). Podemos concluir que los resultados obtenidos están mucho más cerca de la norma EHE que de la antigua EH-91, ya que cuando el vuelo supera dos veces el valor del canto, la curvatura de la base se hace más patente. De todos modos, es de destacar que la citada curvatura de la base es prácticamente despreciable para los

casos estudiados, aunque es posible que con cargas axiales más altas la flexión fuese mayor.

- Los valores de los asentamientos extraídos del modelo son mucho más altos que los estimados teóricamente: entre una diferencia máxima de un 132% para una zapata rígida y un mínimo de un 89% en una zapata flexible.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) ANSYS USER'S MANUAL 5.0 (VOLUMEN I, II, III, Y IV) (1994). Swanson Analysis System, Inc. ARGÜELLES ÁLVAREZ, R. (1992) "Fundamentos de elasticidad y su programación por elementos finitos" Ed. Bellisco.
- (2) BRANSBY, M. F.; RANDOLPH, M. F. (1998) "Effect of skirted foundation shape on response to combined V-M-H loadings" Proceedings of the 1998 8<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE, Golden, CO, EE UU. pp. 543-548.
- (3) CALAVERA, J. (1986) "Cálculo de estructuras de cimentación" INTEMAC 2<sup>a</sup> edición.
- (4) CHANDRASHEKHARA, K.; ANTONY J.; MONDAL, D. (1998) "Semi-analytical finite element analysis of a strip footing on an elastic reinforced soil" Applied mathematical modelling. Vol. 22 Nº 4-5 abril-mayo 1998 pp. 331-349.
- (5) COSTET, J.; SANGLERAT, G. (1975) "Curso práctico de mecánica de suelos" Ed. Omega.
- (6) DAL-RE, R. (1994) "Caminos Rurales. Proyecto y Construcción" Ed. MAPA-IRYDA- Mundi Prensa, Madrid.
- (7) DRUCKER, D. C.; PRAGER, W. (1952) "Soil mechanics and plastic analysis on limit design" Quart. Appl. Math. Vol. 10, Nº 2 pp. 157-165.
- (8) ERENAS GODIN, C. (1984) "Ejercicios de Geotecnia y Cimientos" E.T.S.I. Caminos.
- (9) INSTRUCCIÓN EH-91 (1991) MOPU.
- (10) INSTRUCCIÓN EHE. (1999) "Instrucción de hormigón estructural" Ministerio de Fomento.
- (11) JIMÉNEZ SALAS, J.A.; JUSTO ALPAÑES, J.L. (1975) "Geotecnia y Cimientos. Propiedades de los suelos y de las rocas" Ed. Rueda, 2<sup>a</sup> edición, Madrid.
- (12) JIMÉNEZ SALAS, J.A.; CAÑIZO L. y otros (1980) "Geotecnia y Cimientos III. Cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia" Ed. Rueda, Madrid.
- (13) LADD, C.C.; FOOTE, R. (1974) "New design procedure for stability of soft clays" Asce, GT 7.
- (14) LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. (1972) "Mecánica de suelos" Ed. Limusa Wiley, México.
- (15) MANOHARAN, N.; DASGUPTA, S.P. (1995) "Consolidation analysis of elasto-plastic soil" Computers & structures Vol. 54 Nº 6 pp. 1005-1021.
- (16) MANOHARAN, N.; DASGUPTA, S.P. (1997) "Collapse load computation for high-friction soil" Computers & structures Vol. 62 Nº 4 pp. 681-684.
- (17) OÑATE, E. (1992) "Cálculo de Estructuras por el método de Elementos finitos. Análisis elástico lineal." Ed. CIMNE.
- (18) RODRÍGUEZ ORTIZ, J.M.; SERRA GESTA, J.; OTEO MAZO, C. (1989) "Curso aplicado de cimentaciones" 4<sup>a</sup> edición. COAM.
- (19) SERRA, J.; OTEO, C.; GARCÍA, A.M.; RODRÍGUEZ, J.M. (1986) "Mecánica del suelo y cimentaciones" Escuela de la Edificación. UNED.
- (20) TERZAGHI, K.; PECK, R.B. (1973) "Mecánica de suelos en la ingeniería práctica" Ed. El Ateneo, Buenos Aires.
- (21) UNED. (1994) "Curso de Especialización Superior en Teoría y Aplicación Práctica del Método de los Elementos Finitos" Manuales del Curso, 1994/95.
- (22) WOODWARD, P. K.; GRIFFITHS, D. V. (1998) "Observations on the computation of the bearing capacity factor  $N_{\text{sub } \gamma}$  by finite elements" Geotechnique. Vol. 48, Nº 1, pp. 137-141.
- (23) ZIENKIEWICZ O.C. (1977) "El método de elementos finitos" 3<sup>a</sup> edición. Ed. Reverté.

\*\*\*