

Análisis gráfico y tipificación de cimentaciones en 3D

María Belén. Prendes Gero; Celestino. González Nicieza; María Belarmina. Díaz Aguado; Martina Inmaculada. Álvarez Fernández.

Departamento de Construcción e Ingeniería de la Fabricación.

Área de Expresión gráfica.

E.U.I.T. de Minas de Mieres

Reinero García, s/n, 33600 Mieres.

Email: belen@mieres.uniovi.es

Tfno: 34 98 5458018

1. Resumen

El diseño de cimentaciones se basa fundamentalmente en una serie de cálculos clásicos, relativamente complejos y de uso limitado en tres dimensiones. El trabajo desarrollado pretende discretizar geoméricamente un conjunto de cimentaciones tipo, para modelizar su comportamiento frente a esfuerzos de cortante, momentos flectores y de torsión, aspecto este último, que en la actualidad no se considera en el cálculo normalizado de las cimentaciones. Este estudio realizado en tres dimensiones permite la zonificación geométrica de los elementos estructurales en función de los esfuerzos a que se ven sometidos, identificando las zonas más débiles que pueden estar dimensionadas por debajo de sus necesidades, y diferenciándolas de las zonas que presentan una mayor resistencia, y se encuentran, por tanto, sobredimensionadas. Todo ello es posible gracias al desarrollando de un entorno gráfico que permite la visualización de las zonas de fallo así como la posterior elaboración gráfica de los planos de la cimentación. Los desarrollos futuros pretenden analizar, no sólo cimentaciones cuadradas o rectangulares bajo la acción de un pilar, sino también el efecto de varios pilares, y su interacción con los pilotes y losas de cimentación.

2. Abstract

Design foundation is based basically on a serial of classical calculations quite complex and with a limited use for three dimensions. The developed work tries to discretize in a geometric way a type foundation set, to modelize its behaviour in relation to the efforts of incisive, bending and torsion moments. Nowadays, the last point is not considered for the normalized calculation of foundation. This three dimensions study allows geometric zoning of structural elements proportionally to the efforts to which they are subjected, identifying the weakest zones which can be dimensioned bellow their needs, and distinguishing them from a bigger resistance zones, and so they are over-designed. All this is possible because of the development of a graphic environment, which allows the visualization of failure zones, and also the posterior graphic elaboration of foundation maps. The future developments try to analyse, not only square or rectangular foundations under the action of a pillar, but also the effect of several pillars, and their interaction with foundation piles and rafts.

3. Introducción

Cuando se habla de cimentaciones se habla también de la parte más importante de una construcción y en la cual no debe ahorrarse ni materiales ni cuidados, pues a su deficiencia se deben siempre las grietas producidas al recibir aquellas una carga superior a sus cualidades resistentes. Constituye un grave error el reducir con miras económicas las dimensiones, calidad y proporciones de los materiales a emplear en las fundaciones por cuanto será muy costoso el pretender subsanar los defectos originados por estas deficiencias, esto no se conseguirá sin recurrir al refuerzo de los cimientos construidos defectuosamente, con el consiguiente quebranto económico que ello supone.

Una primera clasificación de las cimentaciones las divide en dos grandes grupos que son las cimentaciones superficiales y cimentaciones profundas. Muchos de los autores seguidos consideran un tercer grupo denominado cimentaciones semiprofundas, donde se incluyen aquellas que por su naturaleza es difícil englobarlas en uno de los dos grupos anteriormente citados. La variación de su geometría se deberá sobre todo al espacio existente y a las cargas que sobre la cimentación se van a aplicar.

Este estudio se centra en las cimentaciones superficiales y dentro de ellas las cimentaciones aisladas cuadradas o rectangulares caracterizadas por el encuentro con un único pilar o soporte centrado metálico, denominadas zapatas centradas o más habitualmente zapatas aisladas.

La zapata aislada debe ser capaz de asegurar una correcta transmisión de cargas al terreno, para que las tensiones en el plano de apoyo no superen los valores admisibles. Además se trata de un elemento estructural más, dentro del conjunto del edificio que, como tal, debe resistir unas determinadas acciones. Todo ello condiciona tanto su tipología, como el dimensionado en planta y cálculo estructural.

A continuación se exponen los pasos seguidos en el cálculo de zapatas aisladas según la teoría clásica sometida a momentos flectores en las dos direcciones principales y aplicados en la realización del programa ZAP. Posteriormente se indicarán los parámetros geométricos necesarios para la ejecución del módulo de dibujo dentro del programa ZAP, capaz de realizar planos de las zapatas calculadas a escala. Estos resultados serán comparados con el módulo de elementos finitos desarrollado para la obtención de las tensiones que actúan sobre una zapata trabajando en tres dimensiones.

4. Teoría

4.1. Predimensionamiento de la zapata

En la base de la zapata se produce una distribución de tensiones producida por una parte por los esfuerzos aplicados sobre la zapata y por otra por el peso propio de la zapata. En zapatas sometidas exclusivamente a compresión, la distribución de tensiones es uniforme; en zapatas sometidas a compresión y a un momento flector en una de las dos direcciones principales, la distribución de tensiones pasa a ser trapezoidal cuando la excentricidad provocada por el momento se encuentra dentro del núcleo central de la zapata y triangular en caso contrario; por último en zapatas sometidas a compresión y a momentos en ambas direcciones la distribución pasa a ser una combinación de las dos anteriores. En este último caso, la planta de la zapata se divide en varias zonas, función del punto de aplicación de la resultante de los esfuerzos aplicados sobre la zapata. Tradicionalmente se han venido considerando tres zonas; en este estudio se ha considerado una cuarta zona siguiendo el estudio de R. Irlés y F. Irlés¹. Estas zonas se indican en la Fig. 1. El predimensionamiento de la zapata también será función de la zona donde se encuentre dicha resultante, la fórmula aplicada en dicho predimensionamiento se refleja en la Ec. 1.

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante.

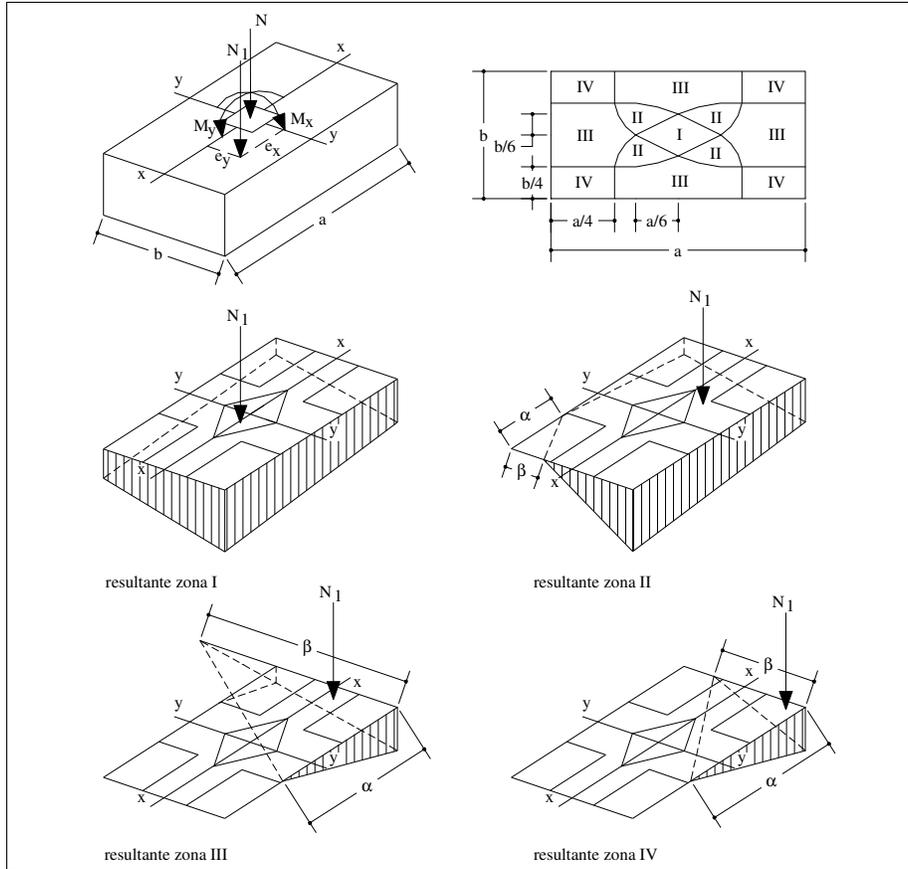


Fig. 1 – Distribución de tensiones.

<p>Zona I - carga dentro del núcleo central. Cuatro esquinas están tensionadas.</p>	$\sigma_{adm} \geq \frac{N_1}{a \cdot b} + \frac{6 \cdot e_x \cdot N_1}{a^2 \cdot b} + \frac{6 \cdot e_y \cdot N_1}{a \cdot b^2} = \sigma_{max}$
<p>Zona II - cuña de presiones piramidal. Tres esquinas tensionadas.</p>	$\sigma_{adm} \geq \frac{2 \cdot N_1 \cdot \alpha \cdot \beta}{a \cdot b \cdot \left(\alpha + \beta - 2 \cdot \alpha \cdot \beta + \frac{\alpha^2 \cdot \beta^2}{3} \right)} \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} - 1 \right) = \sigma_{max}$
<p>Zona III - carga fuera del núcleo central. Dos esquinas tensionadas.</p>	$\sigma_{adm} \geq \frac{6 \cdot N_1 \cdot \left(\frac{\beta}{b} \right)^2}{\alpha \cdot b \cdot \left[\left(\frac{\beta}{b} \right)^3 - \left(\left(\frac{\beta}{b} \right) - 1 \right)^3 \right]} = \sigma_{max}$
<p>Zona IV - carga fuera del núcleo central. Una esquina tensionada.</p>	$\sigma_{adm} \geq \frac{3}{2} \cdot \frac{N_1}{(a - 2 \cdot e_x) \cdot (b - 2 \cdot e_y)} = \sigma_{max}$

Ec. 1– Predimensionamiento de zapatas.

Donde:

σ_{adm} = tensión admisible del terreno.

N_1 = esfuerzo de compresión incluido el peso de la zapata.

a = dimensión del lado mayor de la zapata.

b = dimensión del lado menor de la zapata.

α = dimensión paralela al lado mayor de la zapata.

β = dimensión paralela al lado menor de la zapata.

e_x = excentricidad paralela al lado x de valor M_y/N_1 .

e_y = excentricidad paralela al lado y de valor M_x/N_1 .

σ_{max} = tensión máxima aplicada sobre el terreno.

A partir de las expresiones indicadas en la Ec. 1 quedan definidos los lados de la zapata mayorados a múltiplos de 5 cm.

4.2.Comprobación al deslizamiento

Se comprueba que los esfuerzos favorables al deslizamiento (composición de esfuerzos cortantes mayorados con el coeficiente de seguridad al deslizamiento de valor 1,8) sean menores que los esfuerzos desfavorables al deslizamiento (rozamiento entre zapata y terreno más empuje pasivo si existe). En el caso de que no se cumpliera esta condición, la zapata podría deslizarse por su base, para evitar esto será necesario aumentar el canto inicial de partida y comenzar el cálculo de la zapata.

4.3.Comprobación al vuelco

Se ha de verificar que el momento mayorado desestabilizador provocado por los esfuerzos cortantes y momentos aplicados, es menor que el momento estabilizador constituido por los esfuerzos aplicados y el peso de la zapata. En caso de no verificarse esta desigualdad será necesario aumentar los lados de la zapata y comenzar de nuevo el cálculo.

4.4.Determinación de la tensión de cálculo

Una vez comprobado que la tensión que soporta el terreno está por debajo de la tensión admisible, se calcula la tensión de cálculo de la zapata donde no se tendrá en cuenta el peso propio de la zapata, debido a que este peso se ve contrarrestado por el terreno. Las expresiones para obtener la tensión de cálculo son similares a las reflejadas en la Ec. 1 sustituyendo N_1 (suma del esfuerzo de compresión y el peso de la zapata) por N (esfuerzo de compresión de la zapata). En este punto se calcularían las nuevas excentricidades sin tener en cuenta el peso de la zapata.

4.5.Determinación de vuelos

Los vuelos en ambas direcciones se calcularán como la distancia entre el punto medio definido por la placa de anclaje y la cara del soporte o pilar y el extremo de la zapata en ambas direcciones.

4.6.Determinación del canto útil de la zapata (comprobación a esfuerzo cortante y punzonamiento)

En general, y salvo casos muy singulares, en zapatas no suele disponerse armadura para absorber el esfuerzo cortante, por lo cual, la sección de la misma (su canto), tiene que ser suficiente para que el hormigón resista el esfuerzo cortante máximo. En este apartado se calcula dicho canto y se compara con el canto actual. Si el canto mínimo es mayor, será necesario comenzar el cálculo de la zapata con dicho valor, en caso contrario se continuará con el cálculo de la zapata.

4.7.Determinación de vuelos

Los vuelos en ambas direcciones se calcularán como la distancia entre el punto medio definido por la placa de anclaje y la cara del soporte o pilar y el extremo de la zapata en ambas direcciones.

4.8.Comprobación de la compresión localizada sobre la cara superior de la zapata

Aunque habitualmente esta situación no suele ser crítica en proyecto, puede serlo en casos particulares cuando la resistencia del hormigón de la zapata es muy inferior a la del material del pilar e incluso en hormigones de muy baja calidad, el riesgo de hendimiento sólo aparece, en los terrenos habituales, con zapatas cuyo ancho supere diez veces el canto; hormigones con los que es prácticamente imposible de construir, por razones de corte y punzonamiento. Con las relaciones normales de ancho a canto, el riesgo sólo aparece prácticamente para cimentaciones en roca. Si no se cumple (lo que es muy raro), no puede afirmarse que la armadura de emparrillados en toda la altura sea necesaria, con lo que el paso a realizar será el aumento del canto de la zapata y el comienzo del cálculo de la zapata con el nuevo canto.

4.9.Determinación de las armaduras a flexión

En el cálculo de la armadura de una zapata se parte del momento flector mayorado (M_d) calculado en la sección de referencia (punto medio entre la cara del pilar y el extremo de la placa base), que será el momento que ha de cubrir la armadura. A partir de este momento flector se deduce el momento reducido y la cuantía mecánica de cálculo en dicha sección que será comparada con la cuantía límite deducida de la Norma tomando la mayor de ambas. Con este valor se calcula la capacidad mecánica de la cual se deduce la sección de acero mínima necesaria. El mismo proceso se realiza en la sección ortogonal. Las ecuaciones utilizadas en el proceso se reflejan en la Ec. 2.

$\mu = \frac{M_d}{b \times d^2 \times f_{cd}}$	$\varpi = \mu \times (1 + \mu)$	$U = \varpi \times b \times d \times f_{cd}$	$A_s = \frac{U}{f_{yd}}$
Momento reducido	Cuantía mecánica	Capacidad mecánica	Sección de acero

Ec. 2 - Cálculo de la sección de acero

Donde:

d = canto útil de la zapata.

f_{cd} = resistencia de cálculo del hormigón a compresión.

f_{yd} = resistencia de cálculo del acero a compresión.

Conocida la sección de acero se deduce el número de redondos a colocar y la separación entre sus ejes. Se estudian cinco diámetros distintos que van desde 10 mm hasta 25 mm que suele ser el mayor diámetro colocado en una zapata. La separación entre ejes debe oscilar entre 10 y 30 cm, en caso contrario se elimina el diámetro pertinente.

Las comprobaciones realizadas a continuación afectan exclusivamente a la armadura. Cuando no se cumpla alguna de ellas para un diámetro de redondos determinado se elimina dicho diámetro. De esta manera se van seleccionando los diámetros válidos hasta llegar a la última comprobación donde se selecciona aquel diámetro que presente la separación entre ejes de redondos más próxima a 15 cm.

4.9.1. Comprobación de cuantías mínimas

Se calcula la cuantía geométrica real como la relación entre la sección de acero a la sección de hormigón y se compara con la cuantía geométrica mínima dada por la Norma, eliminando aquellos diámetros cuya cuantía real sea menor que la mínima.

4.9.2. Comprobación de adherencia de las armaduras

En necesario comprobar que queda garantizada la adherencia suficiente entre la armadura y el hormigón circundante. Para ello la tensión tangencial de adherencia que produce el esfuerzo cortante de cálculo en cada sección debe ser menor que la resistencia de cálculo para adherencia. La sección más desfavorable, es aquella, en que el momento flector es máximo y que corresponde a la sección de referencia anteriormente indicada.

4.9.3. Determinación de la longitud de anclaje de las armaduras

En este caso donde las barras están a tracción, se intentan anclar las armaduras rectas, pudiendo en caso de ser necesario colocar patillas e incluso colocar una armadura levantada, denominándose el anclaje recto, en patilla o curvo respectivamente.

En el cálculo de la longitud de anclaje y su disposición se parte de la longitud de anclaje recto teórico (l_b) de valor el máximo de las expresiones indicadas en Ec. 3.

$$\left(m_1 \cdot \phi^2; \frac{f_{yk}}{200} \cdot \phi; 15 \cdot \text{cm} \right)$$

Ec. 3 - Anclaje recto teórico

Donde:

m_1 = constante deducida de la Norma función de la zona de anclaje y resistencia del acero.

ϕ = diámetro del redondo considerado.

f_{yk} = resistencia característica del acero a compresión.

Para el cálculo del anclaje real se distinguen dos casos en función de que el vuelo de la zapata (v) sea mayor o menor que su canto (h) como refleja la Ec. 4.

$v < h$	Se dispone el anclaje neto (l_{bn}) a partir del punto final de la parte recta de la barra.	$\max\left(\frac{1}{3} \cdot l_b; 10 \cdot \phi; 15\text{cm}\right)$
$v > h$	Se dispone la suma del anclaje recto teórico y un canto útil de la zapata a partir del punto medio entre la cara del pilar y el extremo de la placa de anclaje.	Disposición recta, si se verifica: $v \geq h + l_b$
		Disposición en patillas, si se verifica: $v \geq h + 0.7 \times l_b$
		Disposición en curva, no se verifica ninguna de las comprobaciones anteriores.

Ec. 4 - Anclaje real

5. Programa ZAP

El programa ZAP, basado en la teoría clásica anteriormente explicada, permite el cálculo de zapatas mediante fáciles pantallas de acceso. El manejo y la configuración de éste programa se explica mediante el cálculo de una zapata aislada cuadrada. Al ejecutar el programa, aparece la pantalla reflejada en la Fig. 2 donde se selecciona el tipo de zapata a calcular; posteriormente se activan de forma progresiva los botones situados en la parte inferior de la Fig. 2 y explicados a continuación.



Fig. 2 - Pantalla de arranque del programa ZAP

5.1. Datos de la estructura

Al activar este botón se despliega la pantalla reflejada en la Fig. 3. En ella se han de rellenar todos los campos en blanco. Los campos que presentan a su derecha una flecha permiten la selección de las características requeridas en ese campo mediante desplegados que una vez activados permiten visualizar, a su derecha, propiedades obtenidas función de la selección realizada, pero que no pueden ser modificados, diferenciándose de los modificables por su color gris.

5.2. Datos de la placa base

Se indican las dimensiones del lado mayor y del lado menor de la placa base o placa de anclaje del pilar. En este caso se han considerado 0,70 x 0,60 metros.

5.3. Reacciones

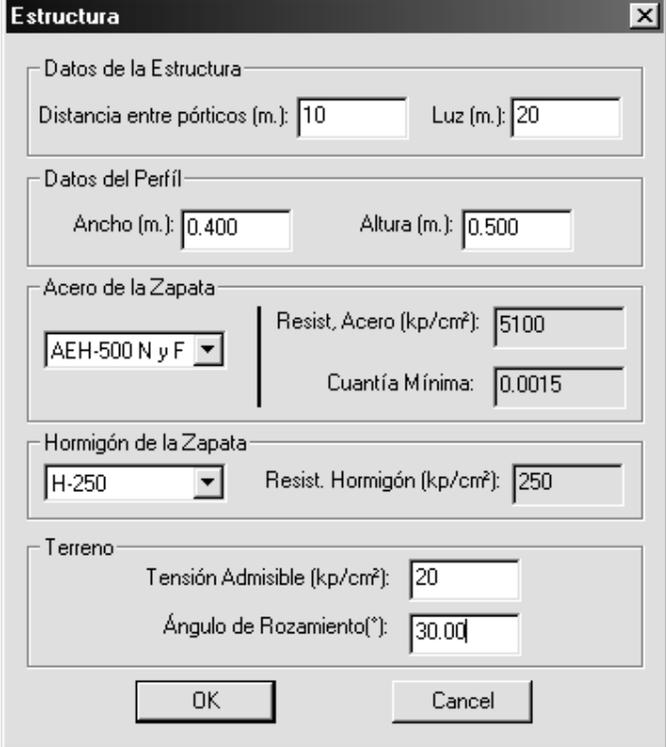
Se preguntan los esfuerzos que actúan sobre la cimentación: esfuerzo axil (100 t), cortante en x (10 t), cortante en y (15 t), momento en x (8 tm), momento en y (12 tm).

5.4. Coeficientes de seguridad

Los coeficientes indicados son los de minoración de la resistencia del hormigón y del acero, y los de mayoración de los esfuerzos que por defecto se toman 1,50; 1,15; 1,60 respectivamente, pero que pueden ser modificados.

5.5. Calcular

Al activar este último botón se despliega la pantalla de resultados reflejada en la Fig. 4. En ella se indican las dimensiones de la zapata y las características de la armadura seleccionada.



Estructura

Datos de la Estructura

Distancia entre pórticos (m.): 10 Luz (m.): 20

Datos del Perfil

Ancho (m.): 0,400 Altura (m.): 0,500

Acero de la Zapata

AEH-500 N y F Resist. Acero (kp/cm²): 5100

Cuantía Mínima: 0,0015

Hormigón de la Zapata

H-250 Resist. Hormigón (kp/cm²): 250

Terreno

Tensión Admisible (kp/cm²): 20

Ángulo de Rozamiento(°): 30,00

OK Cancel

Fig. 3 - Datos de la estructura



Zapata Aislada

Lado Largo (m.): 2,60

Lado Corto (m.): 2,60

Altura (m.): 1,20

Armaduras

	a	b
Diámetro Redondos (cm.):	16	16
Número Redondos:	24	24
Separación Redondos (cm.):	10,8	10,8
Tipo Anclaje:	Curvo	Curvo
Longitud Recta (cm.):	7,20	7,20
Radio Giro Barra (cm.):	5,6	5,6
Longitud Anclaje (cm.):	16	16

Salir

Fig. 4 - Pantalla de resultados

A partir de estos resultados se generan los planos de la zapata y sus detalles a escala. En la Fig. 5 se representa un detalle del plano final en mm.

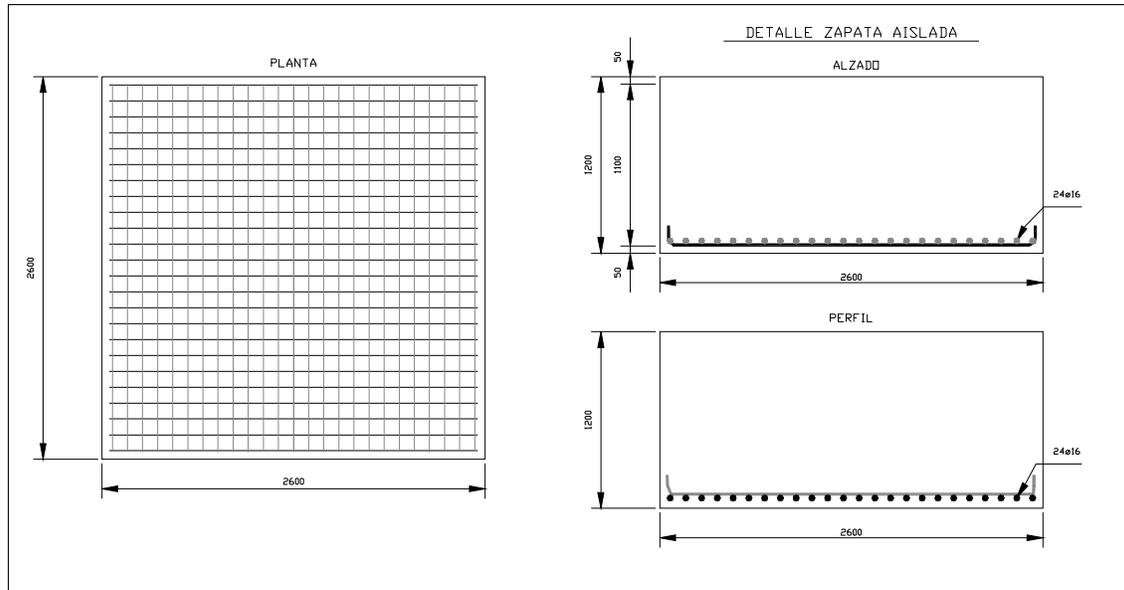


Fig. 5 - Detalle de la zapata calculada

6. Módulo de elementos finitos.

A partir de la zapata obtenida en el programa ZAP, se crea el modelo tridimensional analizado mediante el módulo de elementos finitos. En este modelo tridimensional, la zapata se encuentra inmersa en el terreno lo que permite conocer el efecto que los esfuerzos aplicados en el pilar producen no sólo en la zapata sino también en el terreno. Los resultados más representativos obtenidos gráficamente, se analizan en el plano de corte afectado por la deformación representado en la Fig. 6 donde se observa como la zapata sufre un pequeño hundimiento en el terreno, y el pilar padea ligeramente pero sin llegar a la rotura.

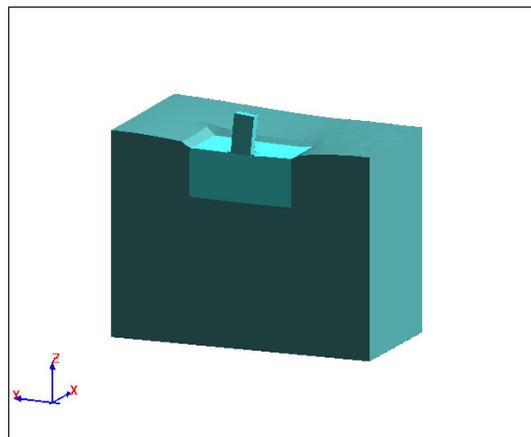


Fig. 6 - Plano de corte y deformada del modelo

Tanto las tensiones YY reflejadas en la Fig. 7 como las tensiones XX, presentan una pequeña tracción en la base de la zapata en el contacto zapata-suelo, y una pequeña compresión en la base del pilar. Esto lleva a suponer que los esfuerzos cortantes aplicados, intentan mover la zapata pero se ven contrarrestados por el rozamiento en dicho contacto. La distribución de tensiones será máxima bajo el punto de aplicación de los esfuerzos cortantes, e irá disminuyendo hacia los extremos de la zapata donde se anula. Por el contrario las tensiones ZZ no son significativas exceptuando una pequeña zona del pilar que pasa de estar comprimida a estar traccionada debido a su pandeo.

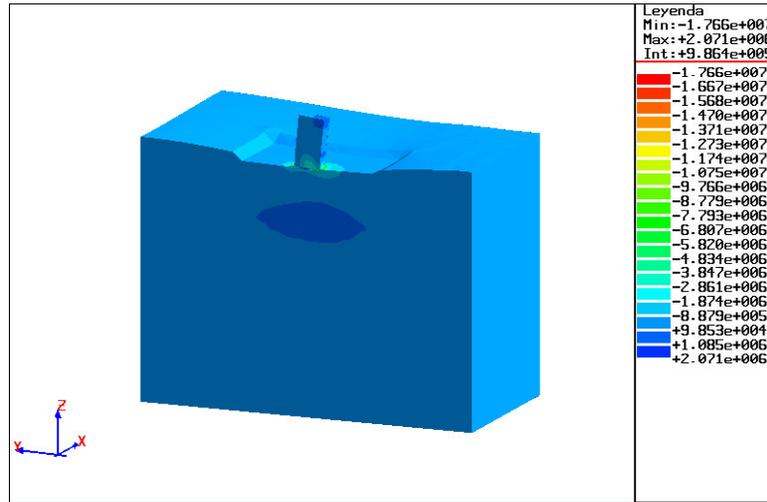


Fig. 7 - Tensiones YY

El estudio de las tensiones a cortante permite reconocer la existencia de una superficie troncocónica desarrollada a partir de las caras del pilar que será positiva a la derecha del mismo y negativa a la izquierda originada por el efecto de levantamiento del pilar.

En las Fig. 8 y Fig. 9 se representan las deformaciones del modelo. En todas ellas se observa como el hundimiento de la zapata, tiende a arrastrar el terreno produciendo levantamientos y hundimientos de dicho terreno tras la zapata.

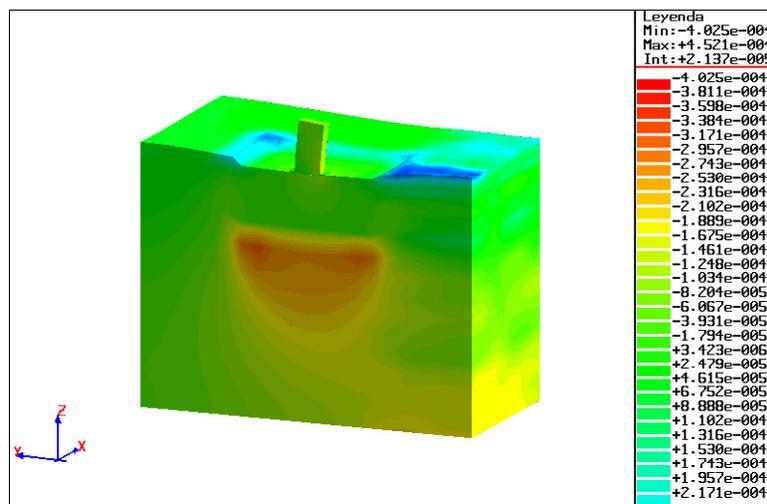


Fig. 8 - Deformaciones ZZ

En la Fig. 8 el terreno bajo la zapata se hunde con ella apareciendo deformaciones negativas, mientras que el terreno colindante en la superficie se eleva originando deformaciones positivas.

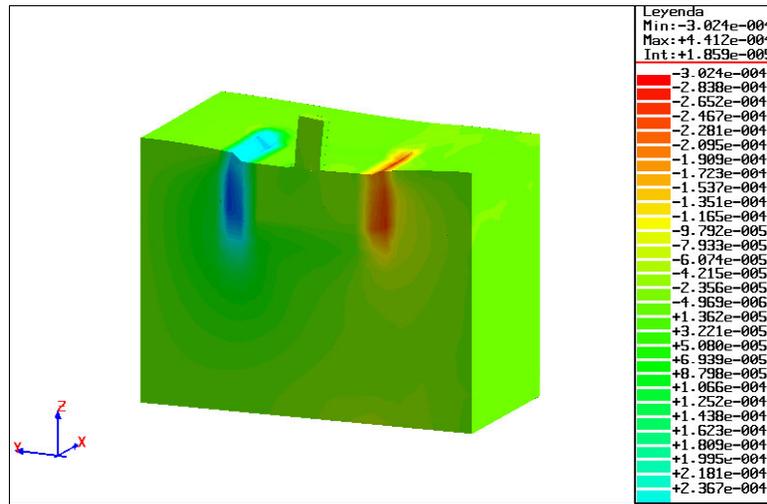


Fig. 9 - Deformaciones YZ

En la Fig. 9 el terreno se eleva en la parte izquierda de la zapata originando deformaciones positivas y se hunde en la parte derecha originando deformaciones negativas.

La Fig. 10 representa el módulo del vector desplazamiento. Se aprecia claramente como el máximo desplazamiento lo sufre la zapata moviendo tras de sí el terreno en capas concéntricas, hasta llegar a una distancia donde el terreno no se ve afectado por dicho efecto.

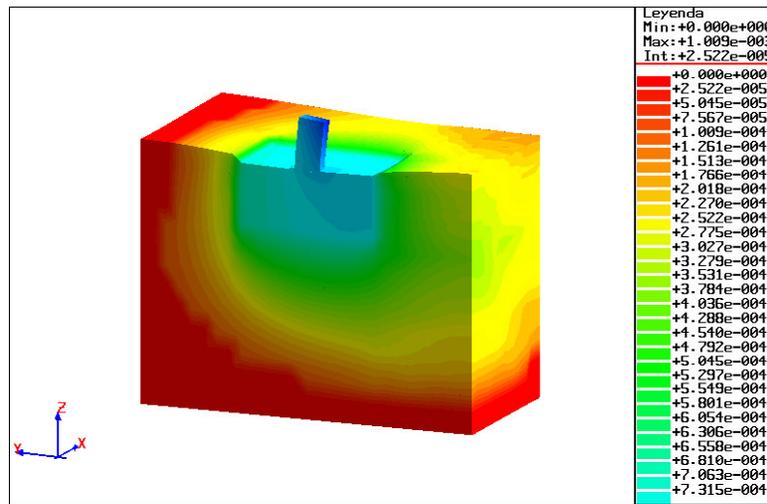


Fig. 10 - Módulo del vector desplazamiento

Por último en la Fig. 11 se representa el estado de fallo en el modelo. Esta figura indica como la zapata en ningún momento presenta estado de fallo, mientras que ante una posible rotura, sería la del terreno más próximo a la zapata, el que rompería.

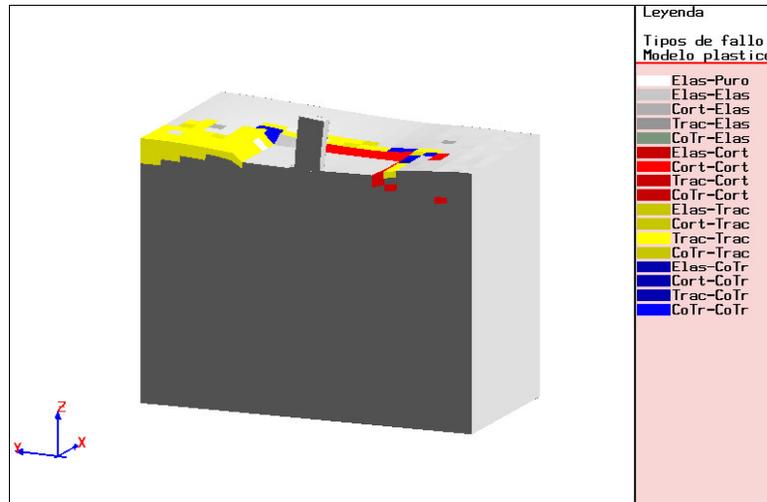


Fig. 11 - Estado de fallo

7. Conclusiones

La comparación de los resultados obtenidos con la modelización por elementos finitos en tres dimensiones con los obtenidos a partir de la teoría clásica permite obtener las siguientes conclusiones:

1. La zapata se encuentra sobredimensionada por lo que la teoría clásica obtiene datos muy conservadores de las dimensiones de la zapata, con el consiguiente aumento de costo de la cimentación.
2. La modelización, refleja como el rozamiento zapata-terreno, no es uniforme a lo largo del suelo de la zapata como supone la teoría clásica, por el contrario es máxima en el punto de aplicación de los esfuerzos y disminuye hacia los extremos de la zapata.
3. Las tensiones cortantes máximas se producen a partir de los extremos del pilar siguiendo una superficie troncocónica al igual que simula la teoría clásica, pero no a lo largo de toda la superficie puesto que cambian de signo y bajo el pilar se anulan.
4. El efecto de la zapata sobre el terreno no es sólo en la base de la misma, sino que sigue capas concéntricas entorno a ella.
5. El estado de fallo puede producirse sobre el terreno y no sobre la zapata, condición que no se contempla en la teoría clásica.