

# Cálculo geotécnico de una cimentación superficial en base a la formulación analítica del Código Técnico de la Edificación

<b>Apellidos, nombre</b>	Garzón Roca, Julio (jugarro@upv.es) Torrijo Echarri, F. Javier (fratorec@tr.upv.es)
<b>Departamento</b>	Departamento de Ingeniería del Terreno
<b>Centro</b>	Universitat Politècnica de València

## 1 Resumen de las ideas clave

La forma más habitual de cimentación superficial es mediante el uso de zapatas, elemento tridimensional prismático, normalmente con dos dimensiones algo mayores a la tercera, que se empotra en el terreno para transmitir adecuadamente las cargas de una estructura al terreno.

El diseño geotécnico de una cimentación superficial debe asegurar la integridad de la propia infraestructura cimentada así como su funcionalidad, para lo cual es necesario garantizar que las solicitaciones de la infraestructura puedan ser absorbidas por el terreno y que los asentamientos potenciales no sean excesivos.

No existe una formulación totalmente común en cuanto al cálculo geotécnico de cimentaciones superficiales, de forma que las diferentes normativas y códigos existentes proporcionan formulaciones analíticas que si bien si bien se basan en la misma ecuación original, pueden conducir a resultados ligeramente diferentes. En este artículo se seguirán las directrices básicas presentadas en el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007), norma habitual en España y de obligado cumplimiento en edificación.

## 2 Objetivos

Tras la lectura de este artículo se espera que el lector sea capaz de:

- Identificar los diferentes componentes que entran en juego en el cálculo geotécnico de una cimentación superficial.
- Realizar un cálculo geotécnico sencillo de una cimentación superficial siguiendo las bases fundamentales del Código Técnico de la Edificación.

## 3 Introducción

Todas las infraestructuras transmiten una serie de esfuerzos al terreno que es necesario resistir para asegurar la propia integridad de la infraestructura así como su funcionalidad. Quien recibe las cargas de la infraestructura y las transmite al terreno es la cimentación y con este término se engloba tanto al elemento estructural, generalmente de hormigón armado, que se sitúa en la interfaz infraestructura – terreno, como a la zona más superficial del terreno que con su comportamiento mecánico asegura una base sólida y rígida a la infraestructura.

En general, siempre que es posible se ejecutan cimentaciones superficiales mediante zapatas, pequeños elementos prismáticos de tipo losa (habitualmente cuadrado o rectangulares), con dos dimensiones (largo y ancho) algo mayores a la tercera (espesor, denominado “canto”), que reciben las cargas de los pilares y las transmiten al terreno.

En este artículo se muestran las bases fundamentales para el diseño geotécnico de una cimentación superficial mediante zapatas, siguiendo las directrices básicas presentadas en el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007). Dicho diseño debe asegurar que la cimentación es lo suficientemente resistente para absorber las solicitaciones de la infraestructura así como lo suficientemente rígida como para que no se produzcan asentamientos excesivos.

Es interesante comentar que a pesar de que en general las diferentes normativas y códigos existentes en el mundo se basan en la misma formulación básica (la ecuación de Brinch-Hansen que se verá en la sección siguiente), cada una presenta ligeros matices en cuanto a coeficientes y definición de los diversos factores presentes en la formulación básica, lo que conduce a resultados algo diferentes (aunque del mismo orden de magnitud) según se aplique una normativa u otra.

## 4 Bases del diseño

### 4.1 Carga de hundimiento

La carga de hundimiento de una cimentación de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007) viene dada por la expresión de Brinch-Hansen recogida en la Ecuación 1:

$$q_h = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot i_c \cdot d_c + q_0 \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q \cdot d_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \cdot d_\gamma$$

*Ecuación 1. Formula general de la carga de hundimiento.*

Donde  $c$  es la cohesión del terreno de cimentación,  $q_0$  la carga a nivel del plano de cimentación (usualmente igual al peso específico del terreno multiplicado por el empotramiento de la cimentación en éste),  $\gamma$  el peso específico del terreno y  $B$  el ancho de la cimentación. El resto de elementos son una serie de factores que pueden agruparse como:

- $N_c$ ,  $N_q$  y  $N_\gamma$  son los factores de capacidad de carga (ver sección correspondiente debajo).
- $s_c$ ,  $s_q$  y  $s_\gamma$  son los factores de forma (ver sección correspondiente debajo).
- $i_c$ ,  $i_q$  e  $i_\gamma$  son los factores de inclinación de las cargas (ver sección correspondiente debajo).
- $d_c$ ,  $d_q$  y  $d_\gamma$  son los factores de profundidad, que habitualmente, y del lado de la seguridad se toman iguales a la unidad.

En terrenos granulares donde la permeabilidad es lo suficientemente alta como para permitir que el exceso de sobrepresiones intersticiales producido por las cargas aplicadas se disipe casi de forma instantánea, la carga de hundimiento se define en términos efectivos ( $q'_h$ ), empleando los parámetros resistentes del terreno en valores efectivos ( $c'$  y  $\phi'$ ) y considerando la carga a nivel del plano de cimentación también en términos efectivos.

Para terrenos cohesivos saturados, la carga de hundimiento puede obtenerse (Bowles, 1996) considerando un ángulo de rozamiento interno nulo ( $\phi = 0^\circ$ ) y una cohesión igual a la resistencia a corte sin drenaje ( $c = c_u$ ), y considerando la carga a nivel del plano de cimentación en términos totales.

Para terrenos cohesivos no saturados o en condiciones en que las sobrepresiones intersticiales se han disipado y el proceso de consolidación ha concluido, la carga de hundimiento se calcula en términos efectivos de igual modo que en el caso de terrenos granulares.

## 4.2 Factores de capacidad de carga

Los factores de capacidad de carga sintetizan una parte de la resistencia del terreno y dependen exclusivamente del ángulo de rozamiento de éste ( $\phi$ ).

De forma general los factores de capacidad de carga se definen como se indica en la Ecuación 2 (Ministerio de Fomento, 2007):

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} ; N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi ; N_\gamma = 1,5 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \phi$$

*Ecuación 2. Factores de capacidad de carga (caso general).*

Sin embargo, el uso de la Ecuación 2 no es válido para un ángulo de rozamiento nulo. En tal caso, los factores de capacidad se corresponden con los indicados en la Ecuación 3:

$$N_q = 1 ; N_c = \pi + 2 ; N_\gamma = 0$$

*Ecuación 3. Factores de capacidad de carga para un ángulo de rozamiento nulo.*

## 4.3 Factores de forma

Los factores de forma tienen en cuenta la geometría de la zapata (su forma), dado que está comprobado que la respuesta mecánica de un material geotécnico ante una sollicitación depende de la forma del elemento físico que interactúa con él.

Así, para una zapata circular los factores de forma presentan los siguientes valores (Ministerio de Fomento, 2007):

$$s_q = 1,2 ; s_c = 1,2 ; s_\gamma = 0,6$$

*Ecuación 4. Factores de forma para una zapata circular.*

Por su parte, para zapatas cuadradas y rectangulares los factores de forma presentan los valores recogidos en la Ecuación 5 (Ministerio de Fomento, 2007):

$$s_q = 1 + 1,5 \cdot \tan \phi \cdot \frac{B}{L} ; s_c = 1 + 0,2 \cdot \frac{B}{L} ; s_\gamma = 1 - 0,3 \cdot \frac{B}{L}$$

*Ecuación 5. Factores de forma para una zapata cuadrada o rectangular.*

Donde  $B$  es el ancho de la zapata (lado de menor dimensión),  $L$  es el largo de la zapata (lado de mayor dimensión) y  $\phi$  el ángulo de rozamiento del terreno de cimentación. Puede comprobarse que para el caso de una zapata corrida (de longitud teórica infinita) los tres factores de forma son iguales a la unidad.

## 4.4 Factores de inclinación de las cargas

Los factores de inclinación de las cargas tienen en cuenta la posibilidad de que junto con el esfuerzo axial vertical transmitido por el pilar a la zapata existan esfuerzos cortantes.

De forma general los factores de inclinación de las cargas se definen como se indica en la Ecuación 6 (Ministerio de Fomento, 2007):

$$i_q = (1 - 0,7 \cdot \tan \delta_B)^3 \cdot (1 - \tan \delta_L) \quad ; \quad i_c = \frac{i_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1} \quad ; \quad i_\gamma = (1 - \tan \delta_B)^3 \cdot (1 - \tan \delta_L)$$

*Ecuación 6. Factores de inclinación (caso general).*

Donde  $N_q$  es el factor de capacidad de carga correspondiente definido según la Ecuación 2 y  $\delta_B$  y  $\delta_L$  son dos ángulos definidos de acuerdo con la Ecuación 7:

$$\delta_B = \frac{V_B}{N} \quad ; \quad \delta_L = \frac{V_L}{N}$$

*Ecuación 7. Valores de los ángulos  $\delta_B$  y  $\delta_L$ .*

Siendo  $V_B$  el cortante transmitido por el pilar a la zapata según una dirección paralela al ancho de la cimentación,  $V_L$  el cortante transmitido por el pilar a la zapata según una dirección paralela al largo de la cimentación y  $N$  el axil total en el plano de la cimentación. Es importante señalar que dada la naturaleza de la definición de los ángulos  $\delta_B$  y  $\delta_L$ , éstos debe introducirse en la Ecuación 6 en radianes.

Por otra parte, el factor de inclinación de las cargas  $i_c$  definido por la Ecuación 6 no es válido para un ángulo de rozamiento nulo. En tal caso, debe emplearse el factor  $i_c$  indicado en la Ecuación 8 (que puede comprobarse que será igual a la unidad en el caso de zapatas corridas).

$$i_c = 0,5 \cdot \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{N}{B \cdot L \cdot c}} \right)$$

*Ecuación 8. Factor de inclinación  $i_c$  para un ángulo de fricción nulo (los factores  $i_q$  e  $i_\gamma$  tiene la misma formulación que para el caso general).*

## 4.5 Influencia de la excentricidad de las cargas verticales

Además de esfuerzos axiles y cortantes, un pilar puede también transmitir momentos flectores a la cimentación. La influencia de la excentricidad de las cargas verticales es importante pues las tracciones inducidas por los flectores reducen el área efectiva de la cimentación.

Dicha reducción se puede tener en cuenta fácilmente en los cálculos de una cimentación sin más que considerar el ancho y largo de una cimentación con sus valores reducidos, tal y como se define en la Ecuación 9:

$$B = B_0 - 2 \cdot e_B \quad ; \quad L = L_0 - 2 \cdot e_L \quad ; \quad e_B = \frac{M_B}{N} \quad ; \quad e_L = \frac{M_L}{N}$$

*Ecuación 9. Factores de inclinación para un ángulo de fricción no nulo.*

Donde  $B_0$  y  $L_0$  son el ancho (menor dimensión) y largo (mayor dimensión), respectivamente, reales de la zapata;  $e_B$  y  $e_L$  son las excentricidades de la carga vertical según el ancho y largo de la zapata, respectivamente;  $N$  es el axil total en

el plano de la cimentación; y  $M_B$  y  $M_L$  los momentos flectores actuando ortogonalmente al ancho y largo de la zapata, respectivamente.

Es importante indicar que en todas las formulaciones presentadas en este documento se asume que siempre se utilizan los valores de ancho y largo equivalentes ( $B$  y  $L$ ), nunca los valores reales.

## 4.6 Influencia del nivel freático

La existencia del nivel freático tiene influencia en el peso específico del terreno a considerar en la Ecuación 1.

Así, si el nivel freático se localiza a una profundidad mayor al ancho de la cimentación ( $B$ ) debe tomarse el peso específico aparente; por el contrario, si el nivel freático se localiza en el plano de cimentación o por encima de éste, debe tomarse el peso específico sumergido.

Para una situación intermedia, es decir, para un nivel freático localizado entre el plano de cimentación y una profundidad menor al ancho de la cimentación, se interpolar linealmente entre los dos casos anteriores.

## 4.7 Factor de seguridad y carga admisible

La carga admisible de una cimentación es la máxima carga que puede asumir en términos resistentes el terreno sin que ello comprometa la seguridad. La carga admisible de una cimentación superficial se obtiene aplicando la Ecuación 10:

$$q_d = \frac{q_h - q_0}{F} + q_0 = \frac{q'_h - q'_0}{F} + q'_0$$

*Ecuación 10. Carga admisible.*

Siendo  $q_h$  y  $q'_h$  la carga de hundimiento en términos totales y efectivos, respectivamente,  $q_0$  y  $q'_0$  la carga a nivel del plano de cimentación en términos totales y efectivos, respectivamente, y  $F$  un factor de seguridad, usualmente igual a 3 (Ministerio de Fomento, 2007).

Es interesante darse cuenta de que el factor de seguridad reduce el valor de la carga de hundimiento neta, esto es, el resultado de sustraer la carga a nivel del plano de cimentación a la carga de hundimiento obtenida con la Ecuación 1. Una vez aplicado el factor de seguridad, la carga admisible se obtiene sumándole la carga a nivel del plano de cimentación, pues dicho valor de carga ya era soportado por el terreno en sus condiciones naturales

## 4.8 Asiento

Además de no superar la resistencia del terreno una cimentación debe ser lo suficientemente rígida para que la infraestructura cimentada sea funcional y no aparezcan patologías por deformaciones diferenciales entre sus diferentes miembros

El asiento ( $s$ ) de una zapata puede calcularse a partir de la Teoría de la Elasticidad suponiendo que el terreno es un espacio elástico e isótropo de acuerdo con la Ecuación 11 (Ministerio de Fomento, 2007):

$$s = \frac{q_{t,net} \cdot B \cdot (1 - \nu^2)}{E} \cdot K$$

Ecuación 11. Asiento.

Donde  $q_{t,net}$  es la tensión neta transmitida al terreno,  $B$  es el ancho (equivalente) de la zapata,  $E$  y  $\nu$  son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson del terreno, respectivamente, y  $K$  es un coeficiente de forma, igual a 1,0 para zapatas rígidas circulares, igual a 0,88 para zapatas rígidas cuadradas, igual a 1,22 para zapatas rígidas rectangulares con relación de lados 2:1, e igual a 1,61 para zapatas rígidas rectangulares con relación de lados 4:1 (para valores intermedios puede interpolarse).

Este procedimiento para el cálculo de asientos es el más aceptado mundialmente. No obstante, en el caso de que una infraestructura se cimente en un terreno arcilloso blando saturado, debe considerarse adicionalmente el fenómeno de la consolidación, que puede producir asientos mayores a largo plazo.

La tensión neta transmitida al terreno se calcula como el resultado de sustraer la carga a nivel del plano de cimentación a la carga por unidad de superficie que llega a dicho plano. Así, puede emplearse la Ecuación 12:

$$q_{t,net} = \frac{N + W}{B \cdot L} - q_0$$

Ecuación 12. Tensión neta transmitida al terreno.

Donde  $N$  es el esfuerzo axial transmitido por el pilar a la zapata,  $W$  es el peso de la zapata,  $q_0$  es la carga en totales a nivel del plano de cimentación, y  $B$  y  $L$  son el ancho y el largo del encepado, respectivamente.

## 5 Ejemplo de diseño y ejercicios

### 5.1 Ejemplo

El dimensionamiento de una cimentación superficial puede llevarse a cabo de diferentes formas. Aquí seguiremos la formulación del Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007).

Sea un terreno granular con las características recogidas en la Tabla 1 y en el que no se ha registrado la presencia del nivel freático. Sobre dicho terreno se plantea el diseño geotécnico de una cimentación superficial para un pilar que recibe un esfuerzo axial centrado de 1200 kN.

Terreno	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$E$ (kPa)	$\nu$
Arena limosa	20	30	10	40000	0,3

**Notación:**

$\gamma$ : peso específico;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento;  $c'$ : cohesión efectiva;  $E$ : módulo de Young;  $\nu$ : coeficiente de Poisson.

Tabla 1. Características del terreno.

La distancia entre pilares habitual en cualquier estructura de edificación es de unos 5 m. Por tanto, una zapata cuadrada de 2 m de lado sería una buena solución en términos geométricos (pues dejaría unos 3 m de espacio libre entre zapatas). Suponemos un canto de la zapata de 1 m, por lo que el plano de cimentación se localizaría 1 m por debajo de la superficie del terreno.

Puesto que el pilar sólo transmite cargas verticales (el axil de 1200 kN) no existe excentricidad de las cargas ni se tienen esfuerzos cortantes en el plano de cimentación. Por tanto, el ancho y largo a emplear en las formulaciones vistas en la sección anterior es el ancho y largo real de la zapata propuesta (2 m) y los factores de inclinación de las cargas serán iguales a la unidad.

A partir de estos supuestos y con las características del terreno indicadas en la Tabla 1, se pueden emplear las Ecuaciones de 1 a 9 para determinar la carga de hundimiento del terreno, que operando oportunamente resulta ser de aproximadamente 1260 kN. A continuación, aplicando la Ecuación 10 puede obtenerse la carga admisible de la cimentación, igual a 433 kN. Finalmente empleamos la Ecuación 11 para determinar el asiento esperable, que resulta de alrededor de 1 cm.

La Tabla 2 resume el procedimiento seguido. Debe notarse que dado que no existe nivel freático, las tensiones efectivas son iguales a las totales.

Concepto		Valor
Factores de capacidad de carga	$N_q$	30,1
	$N_c$	18,4
	$N_\gamma$	15,1
Factores de forma	$s_q$	1,2
	$s_c$	1,8
	$s_\gamma$	0,7
Factores de inclinación de las cargas	$i_q$	1,0
	$i_c$	1,0
	$i_\gamma$	1,0
Carga a nivel del plano de cimentación	$q_0$	20,0 kN/m <sup>2</sup>
Carga de hundimiento	$q_h$	1259,4 kN/m <sup>2</sup>
Carga admisible	$q_d$	433,1 kN/m <sup>2</sup>
Carga transmitida por el pilar*	$q_t$	300,0 kN/m
Asiento	$s$	1,2 cm
* Carga transmitida por unidad de superficie, resultado de dividir el axil transmitido por el pilar a la zapata entre la dimensión en planta de ésta		

Tabla 2. Resumen del proceso de cálculo geotécnico de una cimentación superficial cuadrada de 2 m de lado y 1 m de canto (empotramiento igual al canto) para un pilar que transmite un axil centrado de 800 kN de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007) en el terreno descrito en la Tabla 1.



Vemos que la carga admisible ( $433 \text{ kN/m}^2$ ) es mayor que la carga por unidad de superficie transmitido por el pilar ( $300 \text{ kN/m}^2$ ), aun sumándole el peso propio de la zapata propuesta ( $100 \text{ kN}$  dividido en un área de  $2 \times 2 \text{ m}$  supone una tensión a transmitir adicional de  $25 \text{ kN}$ ), por lo que la cimentación cumple los requerimientos geotécnicos resistentes. Asimismo, el asiento esperable ( $1,2 \text{ cm}$ ) es inferior a una pulgada ( $2,54 \text{ cm}$ ), valor que típicamente se considera asiento máximo admisible, por lo no es de esperar que la cimentación diseñada induzca patologías debido a asientos en el futuro.

## 5.2 Ejercicios

Se propone como ejercicio para el lector realizar el dimensionamiento geotécnico de una cimentación superficial en el terreno que indica la Tabla 1, obteniendo la carga de hundimiento, carga admisible y asiento, para un pilar que transmite:

- Caso 1: Esfuerzo axial  $1000 \text{ kN}$ , momentos flectores  $150 \text{ kN}\cdot\text{m}$  en las dos direcciones ortogonales a los lados de la zapata.
- Caso 2: Esfuerzo axial  $800 \text{ kN}$ , momentos flectores  $100 \text{ kN}\cdot\text{m}$  en las dos direcciones ortogonales a los lados de la zapata, esfuerzos cortantes de  $150 \text{ kN}$  paralelos a los dos lados de la zapata.

En ambos caso, comenzar el ejercicio estimando una zapata de  $1,5 \text{ m}$  de lado y  $1 \text{ m}$  de canto y de no cumplir los criterios resistentes (carga admisible) o de rigidez (asiento), variar las dimensiones para conseguir cumplirlos (normalmente se varía el ancho y el largo de la zapata, aunque también puede variarse el canto así como el empotramiento en el terreno).

## 6 Conclusiones

En este artículo se han mostrado las bases fundamentales para el diseño geotécnico de una cimentación superficial mediante zapatas siguiendo las directrices básicas presentadas en el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007). Cabe señalar que sólo se han tenido en cuenta los aspectos básicos, no entrando en diferentes cuestiones recogidas por la propia normativa y por otras similares, como sería por ejemplo la consideración de cimentar en un terreno estratificado en superficie o diseñar una zapata cercana a un talud, por considerarlo fuera del alcance de este artículo docente.

Para ampliar la información sobre el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales se pueden consultar los libros de Torrijo y Cortés (2012), Torrijo y Garzón-Roca (2018) o Rodríguez Ortiz *et al.* (1989), así como acudir a normativas y guías que incluyen el diseño geotécnico de estos elementos entre las que se incluyen el propio Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007), la Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera (Ministerio de Fomento, 2009) o las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias ROM0.5 (Ministerio de Fomento, 2005).

## 7 Bibliografía

Bowles, J. E.: "Foundation analysis and design", McGraw-Hill, Singapur, 1996.

Ministerio de Fomento: "Código Técnico de la Edificación. DB-SE Seguridad Estructural", Madrid, 2007.



Ministerio de Fomento: "Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera", Madrid, 2009.

Ministerio de Fomento: "Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias ROM0.5", Madrid, 2005.

Rodríguez Ortiz, J.M.; Serra Gesta, J.; Oteo, C.: "Curso Aplicado de Cimentaciones", Servicio de Publicaciones del Colegio de Arquitectos de Madrid, Madrid, 1989.

Torrijo, F.J.; Cortés, R.: "Cálculo geotécnico de cimentaciones: Alternativas de formulación al CTE", Editorial Académica Española, Madrid, 2012.

Torrijo, F.J.; Garzón-Roca, J.: "Shallow and deep foundations in geotechnical engineering", Editorial Universitat Politècnica de València, Valencia, 2018.