

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

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

1 Resumen de las ideas clave

La forma más habitual de cimentación profunda es el pilote, elemento longitudinal que se introduce en el terreno por hincado o mediante perforación y que normalmente no trabaja aislado sino conformando grupos de pilotes unidos entre sí por un elemento rígido denominado encepado.

El diseño geotécnico de una cimentación profunda debe asegurar la integridad de la 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 completa común en cuanto al cálculo geotécnico de cimentaciones profundas, de forma que las diferentes normativas y códigos existentes proporcionan formulaciones analíticas que si bien obtienen resultados similares en términos de orden de magnitud, son 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 profunda.
- Realizar un cálculo geotécnico sencillo de una cimentación profunda 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) que reciben las cargas de los pilares y las transmiten al terreno. Sin embargo en ocasiones no es posible cimentar superficialmente, siendo necesario emplear cimentaciones profundas.

La forma más habitual de cimentación profunda es el pilote, elemento longitudinal que se introduce en el terreno por hincado (el elemento puede ser metálico, de madero o de hormigón) o se construye directamente en él (realizando una perforación y posteriormente rellenándola con hormigón). Los pilotes resisten tanto por punta (elemento final del pilote que se apoya en el terreno a determinada profundidad) como por fuste (el desarrollo lineal del pilote en sí, y que añade resistencia a la cimentación por el rozamiento existente entre el pilote y el terreno).

En este artículo se muestran las bases fundamentales para el diseño geotécnico de una cimentación profunda mediante pilotes, 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 sollicitaciones de la infraestructura así como lo suficientemente rígida como para que no se produzcan asentamientos excesivos.

4 Bases del diseño

4.1 Resistencia por fuste

La resistencia por fuste de un pilote (Q_f) en un estrato determinado, limitado por sendas cotas z_1 y z_2 , viene dada por la expresión recogida en la Ecuación 1:

$$Q_f = \int_{z_1}^{z_2} r_f \cdot \pi \cdot D \cdot dz$$

Ecuación 1. Resistencia por fuste.

Donde r_f es la resistencia unitaria por fuste y D el diámetro del pilote; en el caso de secciones no circulares se debe emplear el valor del diámetro equivalente que generaría una sección circular de igual perímetro que la sección considerada.

El valor de la resistencia unitaria por fuste depende del tipo de terreno (granular o cohesivo) y las diferentes normativas y códigos existentes en el mundo proporcionan formulaciones analíticas que si bien obtienen resultados similares en términos de orden de magnitud, son diferentes.

En el caso del Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007), para los estratos granulares (gravas y arcillas) se propone emplear la Ecuación 2:

$$r_f = f \cdot \sigma'_v \cdot K_f \cdot \tan \phi'$$

Ecuación 2. Resistencia unitaria por fuste en terrenos granulares de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007).

Donde f y K_f son unos coeficiente de valor 1,0 y 0,75 respectivamente, para pilotes perforados, y 0,9 y 1,0 para pilotes hincados, σ'_v es la tensión efectiva a lo largo del fuste en el estrato granular considerado y ϕ' el ángulo de rozamiento del material granular. Dado que la tensión efectiva variará a lo largo del estrato, la resistencia unitaria por fuste en materiales granulares no es constante a lo largo del estrato.

En los terrenos cohesivos (arcillas y limos), normalmente se asume que la situación más desfavorable se da para condiciones sin drenaje. Para dicho caso, el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007), propone emplear la Ecuación 3:

$$r_f = \frac{100 \cdot s_u}{100 + s_u}$$

Ecuación 3. Resistencia unitaria por fuste en terrenos cohesivos de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007).

Siendo s_u la resistencia a corte sin drenaje del material cohesivo. Como puede comprobarse, a diferencia de los materiales granulares, en un terreno cohesivo la resistencia unitaria por fuste es constante en todo el estrato.

4.2 Resistencia por punta

La resistencia por punta de un pilote (Q_p) en un estrato determinado viene dada por la expresión recogida en la Ecuación 4:

$$Q_p = r_p \cdot A_p$$

Ecuación 4. Resistencia por punta.

Donde r_p es la resistencia unitaria por punta y A_p el área de la punta del pilote.

De forma similar al caso de la resistencia unitaria por fuste, el valor de la resistencia unitaria por punta depende del tipo de terreno (granular o cohesivo) y las diferentes normativas y códigos existentes en el mundo proporcionan formulaciones analíticas diferentes aunque con resultados similares en términos de orden de magnitud.

En el caso del Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007), para los estratos granulares (gravas y arcillas) se propone emplear la Ecuación 5:

$$r_p = f_p \cdot \sigma'_v \cdot N_q$$

Ecuación 5. Resistencia unitaria por punta en terrenos granulares de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007).

Donde f_p es un coeficiente de valor 2,5 para pilotes perforados y 3,0 para pilotes hincados, σ'_v es la tensión efectiva en el terreno al nivel de la punta del pilote y N_q es un factor de capacidad de carga función del ángulo de rozamiento (ϕ') del material granular (Ecuación 6).

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \cdot e^{\pi \cdot \tan \phi'}$$

Ecuación 6. Factor de capacidad de carga N_q .

Para terrenos cohesivos, el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007) propone emplear la Ecuación 7:

$$r_p = s_u \cdot N_c$$

Ecuación 7. Resistencia unitaria por punta en terrenos cohesivos de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007).

Siendo s_u la resistencia a corte sin drenaje del material cohesivo y N_c un factor de capacidad de carga que normalmente adopta un valor de 9,0.

4.3 Carga de hundimiento, carga de diseño y carga de trabajo

La carga de hundimiento de un pilote (Q_h) es igual a la suma de la resistencia por fuste (Q_f) y por punta del pilote (Q_p), tal y como se muestra en la Ecuación 8.

$$Q_h = Q_f + Q_p$$

Ecuación 8. Carga de hundimiento.

La carga de diseño de un pilote (Q_d) se obtiene al minorar las resistencias por fuste y por punta mediante un factor de seguridad (Ecuación 9), que puede ser el mismo o diferente para la punta y el fuste, y cuyo valor depende de la normativa o código seguido. Habitualmente, el factor de seguridad para la punta (F_p) tiene un valor de 3,0, mientras que el factor de seguridad para el fuste (F_f) suele oscilar entre 1,5 y 2,0.

$$Q_d = \frac{Q_f}{F_f} + \frac{Q_p}{F_p}$$

Ecuación 9. Carga de diseño.

Finalmente, debe considerarse el peso propio del pilote. Sustrayendo a la carga de diseño dicho valor se tiene la carga de trabajo del pilote (Q_{pilote}), es decir, el máximo valor axil que puede ser aplicado sobre la cabeza del pilote en términos de resistencia geotécnica.

4.4 Tope estructural

El tope estructural de un pilote es máximo valor axil que puede aplicarse a un pilote desde el punto de vista estructural. Es por tanto un factor limitante de la carga de trabajo del pilote, que nunca podrá superar el valor del tope estructural.

El tope estructural (Q_{tope}) se calcula normalmente como:

$$Q_{tope} = \sigma_{max} \cdot A$$

Ecuación 10. Tope estructural.

Donde σ_{max} es la tensión máxima a que puede ser sometido el pilote y que generalmente es un valor proporcionado por la normativa o código seguido (y que puede depender de diversos aspectos tales como el tipo de terreno o la tipología del pilote) y A es el área del pilote.

4.5 Grupos de pilotes

De forma habitual la cimentación profunda de un pilar no se resuelve con un solo pilote sino con un grupo de ellos, unidos entre sí por un elemento rígido (normalmente de hormigón) denominado encepado. Si los pilotes en el encepado se encuentran muy juntos se producirá una interacción entre ellos que reducirá su eficiencia. Esto supone reducir la carga de hundimiento de los pilotes (y por tanto su carga de diseño y su carga de trabajo) en un porcentaje que normalmente oscila en torno al 20%.

No obstante, se considera que dicha interacción no ocurre si la separación entre los ejes de los pilotes es mayor o igual a 3 veces su diámetro (en caso de pilotes no circulares, debe emplearse el diámetro equivalente obtenido como el diámetro de un círculo que lleva a un área de igual valor a la sección del pilote considerado). Si se da esta condición, se puede asumir que cada uno de los pilotes del grupo trabaja con una eficiencia de 100%.

4.6 Asiento

Una vez realizado el cálculo geotécnico de los pilotes de un grupo, teniendo en cuenta el valor del tope estructural, se debe comprobar que el asiento del grupo de pilotes no es excesivo.

El asiento (s) de un grupo de pilotes puede calcularse de acuerdo con la Ecuación 11 (Ministerio de Fomento, 2007):

$$s = \frac{q_t \cdot B_{eq} \cdot (1 - \nu^2)}{E} \cdot K$$

Ecuación 11. Asiento.

Donde q_t es la tensión transmitida al terreno por el encepado que conforma el grupo de pilotes, B_{eq} es el ancho equivalente del grupo de pilotes, K es un coeficiente de forma, igual a 0,88 para encepados cuadrados, y E y ν son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson del terreno, respectivamente. En el caso de terrenos estratificados en los que el encepado apoye sobre un material cohesivo, normalmente queda del lado de la seguridad asumir como valores del terreno el módulo de Young y el coeficiente de Poisson de dicho estrato.

El ancho equivalente del grupo de pilotes (B_{eq}) se obtiene a partir de la Ecuación 12:

$$B_{eq} = B_{grupo} \cdot (1 - \alpha) \cdot l \quad ; \quad \alpha = \frac{1}{Q_h} \cdot (0,5 \cdot Q_f + Q_p)$$

Ecuación 12. Ancho equivalente.

Siendo B_{grupo} el ancho del grupo de pilotes, medido como la distancia entre los dos planos tangentes exteriores a los pilotes extremos del grupo, en la dirección correspondiente al ancho del encepado; l la longitud del pilote dentro del terreno; y Q_h , Q_f y Q_p la carga de hundimiento, resistencia por fuste y resistencia por punta, respectivamente, del pilote característico del grupo.

La tensión transmitida al terreno por el encepado puede calcularse según la Ecuación 13:

$$q_t = \frac{N}{B \cdot L}$$

Ecuación 13. Tensión transmitida al terreno.

Donde N es el esfuerzo axial total en el encepado (el cual debe considerar el peso del encepado y calcularse en términos netos, sustrayendo el peso de tierras excavado) y B y L son el ancho y el largo del encepado, respectivamente.

Cabe señalar que en el caso de que un encepado esté formado por un solo pilote (sistema pila-pilote) las anteriores expresiones no son válidas para calcular el asiento, debiéndose emplear otras normalmente recogidas por las normativas y códigos habituales.

5 Ejemplo de diseño y ejercicios

5.1 Ejemplo

El dimensionamiento de una cimentación profunda puede llevarse a cabo de diferentes formas. Aquí mostraremos una basada en aprovechar al máximo los pilotes como elementos estructurales disponiendo el menor número posible de ellos por encepado, y seguiremos la formulación del Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007).

Sea un terreno constituido por una alternancia de materiales granulares y cohesivos del cual se conocen las características de los primeros estratos de acuerdo con lo indicado en la Tabla 1, y en el que no se ha registrado la presencia del nivel freático.

En dicho terreno se pretende dimensionar una cimentación profunda para una estructura de hormigón armado muy rígida, con una separación entre apoyos de 10 m, sabiendo que en cada uno de ellos el axial transmitido es de 2750 kN y que el canto estimado para el encepado es de 1 m.

Terreno	Profundidad (m)	γ (kN/m ³)	ϕ' (°)	s_u (kPa)	E (kPa)	ν
Tierra vegetal	0 – 1	17	-	-	-	-
Arcillas limosas	1 – 6	19	-	125	30000	0,3
Arenas limosas	6 – 16	20	28	-	48500	0,3
Arcillas blandas	16 – 17	17	-	90	32500	0,3
Arenas limosas	17 – ?	19	32		62580	0,3

Notación:
 γ : peso específico; ϕ' : ángulo de rozamiento efectivo; s_u : resistencia a corte sin drenaje; E : módulo de Young; ν : coeficiente de Poisson.

Tabla 1. Características del terreno.

Para comenzar con el dimensionamiento debemos en primer lugar decidir la tipología de los pilotes. Para este ejemplo se emplearán pilotes perforados circulares de 0,5 m de diámetro.

Con estos datos podemos determinar el tope estructural de los pilotes. Acudiendo al Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007) se tiene que para pilotes perforados y en un terreno seco la tensión máxima a compresión a que se puede someter un pilote (σ_{max}) es de 4 MPa. Operando adecuadamente haciendo uso de la Ecuación 10, se tiene que el tope estructural es de 785 kN.

El axil transmitido por cada pilar del edificio es de 2750 kN, lo que significa que en cada encepado deberemos disponer un número de pilotes tal que sean capaces de absorber dicho valor. Puesto que el tope estructural es de 785 kN, necesitaremos al menos 4 pilotes ($2750 / 785 = 3,5$).

Si estos pilotes están separados una distancia igual o mayor a 3 veces su diámetro, esto es 1,50 m, no tendremos problemas de interacción entre ellos y su eficiencia será del 100%. Planteamos pues una cimentación profunda de 4 pilotes separados 1.5 m (Figura 1). Consecuentemente cada pilote deberá resistir una carga de trabajo de 687,5 kN ($2750 / 4$).

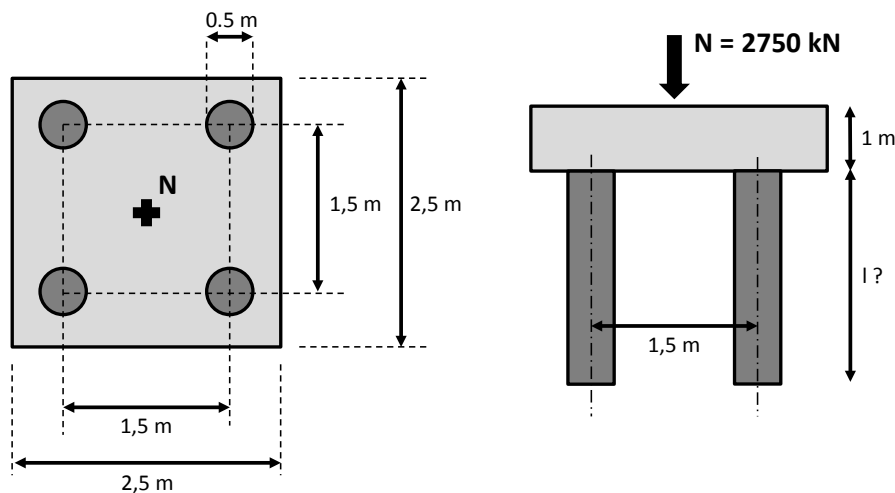


Figura 1. Esquema de la cimentación profunda planteada.

Debemos ahora determinar la longitud de cada pilote para poder resistir dicha carga. Este proceso podemos hacerlo por prueba y error. Puesto que la longitud habitual de un pilote es como mínimo de 6 m, vamos a considerar que esa es la longitud de nuestro pilote y vamos a comprobar si es suficiente para resistir la carga que lo solicita.

El canto del encepado se indica que se será de 1 m. Para realizar la construcción de la estructura tendremos que retirar el terreno vegetal (1 m), y podemos considerar que la solera de dicha construcción se localizará por lo menos a dicha cota. Por tanto, los encepados se localizarán por debajo, por lo que puede estimarse el que el plano de cimentación se situará en la cota -2 m. Así, los pilotes de 6 m tendrán 4 m de fuste en las de arcillas limosas y 2 m de fuste y su punta en el primer estrato de arenas limosas.

Operando adecuadamente de acuerdo con las Ecuaciones de la 1 a la 8 se tiene que para dicha longitud la carga de hundimiento del pilote (Q_h) es de aproximadamente 1308 kN. Dado que el Código Técnico de la Edificación

(Ministerio de Fomento, 2007) no diferencia entre factor de seguridad por la punta y el fuste sino que indicar reducir directamente la carga de hundimiento con un factor de seguridad de 3, la carga admisible del pilote (Q_d) será de 436 kN.

Restando a este valor el peso del pilote obtenemos el valor de la carga de trabajo (Q_{pilote}), igual a unos 407 kN. El proceso descrito se resume en la Tabla 2.

Concepto			Valor (kN)
Tope estructural (Q_{tope})			785,0
Fuste	Resistencia unitaria (r_f)	Arcillas ⁽¹⁾	55,6
		Arenas ⁽¹⁾	$30,3 + 8 \cdot z$
	Resistencia por fuste total (Q_f)		469,7
Punta	Resistencia unitaria (r_p)	Arenas	4268,8
	Resistencia por punta total (Q_p)		838,2
Carga de hundimiento ($Q_h = Q_f + Q_p$)			1308,0
Carga admisible ($Q_d = Q_h / \text{factor de seguridad}$)			436,0
Peso del pilote (W_{pilote})			29,5
Carga de trabajo del pilote ($Q_{pilote} = Q_d - W_{pilote}$)			406,5
⁽¹⁾ Notar que en las arcillas el valor de r_f es constante, mientras que en las arenas es variable y debe dejarse en función de la coordenada "z" para aplicar correctamente la Ecuación 1.			

Tabla 2. Resumen del proceso de cálculo geotécnico de un pilote perforado de hormigón armado de 0,5 m de diámetro y 6 m de longitud según el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2007) en el terreno descrito en la Tabla 1.

Vemos que la carga de trabajo (407 kN) es menor que aquella a la que estará sometido el pilote en el encepado (687,5 kN) por lo que debemos variar la dimensión del pilote. En este ejemplo incrementaremos su longitud (también sería válido aumentar su diámetro o incluso ambas dimensiones).

Si probamos con una longitud de pilote de 10 m, manteniendo el diámetro de 0,5 m, se llega a que la resistencia por fuste (Q_f) es de 861 kN y la resistencia por punta (Q_p) de 1416 kN, por tanto la carga de hundimiento del pilote (Q_h) será de unos 2277 kN. Así, la nueva carga de trabajo (Q_{pilote}) tendrá un valor de unos 710 kN (se deja al lector la realización de los cálculos oportunos como ejercicio). Comprobamos que ahora la carga de trabajo es mayor que aquella a la que se encontrará sometido el pilote (687,5 kN) y que dicho valor es inferior al tope estructural, por lo que damos la longitud de 10 m por válida.

Para terminar con el dimensionamiento estimamos el asiento esperable. Para ello aplicamos las Ecuaciones de 11 a 13, considerando las dimensiones indicadas en la Figura 1. Se obtiene así que el asiento esperable es de unos 4,5 cm.

5.2 Ejercicios

Se propone como ejercicio para el lector realizar el dimensionamiento geotécnico de una cimentación profunda en el terreno que indica la Tabla 1, obteniendo la carga de trabajo, tope estructural y asiento, para una estructura de hormigón armado muy rígida, con una separación entre apoyos de 6 m, sabiendo que el canto estimado para el encepado es de 1 m, y que el axil transmitido en cada uno de ellos es de:

- Caso 1: 2250 kN
- Caso 2: 3500 kN

6 Conclusiones

En este artículo se han mostrado las bases fundamentales para el diseño geotécnico de una cimentación profunda mediante pilotes 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 y más habituales, no entrando en diferentes cuestiones recogidas por la propia normativa y por otras similares, como sería por ejemplo la consideración de un estrato blando bajo la punta del pilote o el rozamiento negativo, por considerarlo fuera del alcance de este artículo docente.

Para ampliar la información sobre el diseño geotécnico de cimentaciones profundas se pueden consultar los libros de Torrijo y Cortés (2012) o Torrijo y Garzón-Roca (2018), así como acudir a normativas y guías que incluyen el diseño geotécnico de pilotes como 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

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.

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.