

REFLEXIONES RELATIVAS A LA FORMULACIÓN ANALÍTICA DE LA CARGA DE HUNDIMIENTO PARA CIMENTACIONES SUPERFICIALES DEL EUROCÓDIGO 7

Miguel ORTEGA CORNEJO

Ingeniero de Caminos, C. y P.
IDEAM S.A.

Director de Ingeniería

miguel.ortega@ideam.es

Marta FERNÁNDEZ ESTRADÉ

Ingeniero de Caminos, C. y P.
IDEAM S.A.

Ingeniero proyectista

marta.fernandez@ideam.es

Francisco MILLANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.
IDEAM S.A.

Presidente

general@ideam.es

RESUMEN

El Eurocódigo 7 parte 1 propone, en su Anejo D informativo, una formulación analítica de la carga de hundimiento para zapatas que omite los factores clásicos de profundidad de la cimentación y de la inclinación del terreno, y las expresiones de los factores de inclinación de la carga, tomadas de Vesic, presentan varias contradicciones e incongruencias. Así mismo no parece tener en cuenta la posibilidad de que la zapata pueda romper según un plano paralelo al lado largo (L), olvidando el hecho de que determinados factores puedan llegar a desencadenar antes la rotura en la dirección larga que en la dirección corta (B), tal y como ya analizó Brinch-Hansen en 1970. Los factores que pueden inducir este hecho son: la existencia de un talud inclinado en la dirección del lado largo de la zapata y la existencia de una carga inclinada actuando predominantemente de forma paralela a la dirección larga de la cimentación. En el artículo se describen estas carencias.

PALABRAS CLAVE: Eurocódigo 7, zapatas, carga de hundimiento, factores correctores

1. Introducción

Este artículo es un resumen de la ref. [1] en el que se desarrolla con detalle una comparativa de la formulación de la carga de hundimiento de los autores y referencias citados más adelante.

2. Evolución de la formulación de la carga de hundimiento en cimentaciones superficiales

La formulación de la carga de hundimiento en zapatas ha ido evolucionando mediante las aportaciones de diversos autores con los años, al no existir un modelo matemático exacto para su obtención. Así, cada autor se acerca al problema realizando diversas simplificaciones.

Prandtl (1920) hizo la primera aproximación al problema, basándose en la teoría de la plasticidad, suponiendo el terreno incompresible antes de la rotura y sin considerar su peso propio.

En condiciones drenadas, propuso la expresión: $q_h = c' \cdot N_c + q' \cdot N_q$ (1)

Donde q' es el peso efectivo de las tierras en el entorno de la cimentación sobre la cota de apoyo, c' la cohesión efectiva del terreno y N_c y N_q los factores de capacidad de carga:

$$N_q = tg^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right) e^{\pi \cdot tg \varphi'} \quad (2) \quad \text{y} \quad N_c = cotg \varphi' \cdot (N_q - 1) \quad (3)$$

Para el caso del estudio de la carga de hundimiento en condiciones no drenadas, con ángulo de rozamiento nulo ($\varphi' = 0$) y, de nuevo, peso despreciable, Prandtl llegó a la ecuación 4:

$$q_h = (\pi + 2) \cdot c_u + q \quad (4)$$

Terzaghi (1943) añadió la influencia del peso propio del terreno, llegando a la conocida expresión general de la carga de hundimiento para zapatas corridas de la ecuación 5:

$$q_h = \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot B \cdot N_\gamma + c' \cdot N_c + q' \cdot N_q \quad (5)$$

Donde γ' es el peso específico del terreno y B la dimensión menor de la cimentación. El factor de capacidad de carga N_γ no puede determinarse de forma exacta, por lo que cada autor ha ido definiendo, mediante relaciones empíricas, expresiones diferentes para su obtención.

Aunque la formulación general estaba inicialmente planteada para una cimentación alargada, Terzaghi incluyó el efecto de la forma de la zapata mediante la introducción de unos factores constantes que multiplicaban a las componentes del peso del terreno y de la cohesión.

Meyerhof fue el primero en plantear el problema de forma más general, entre 1951 y 1963, para zapatas de dimensiones finitas, carga inclinada y considerando la profundidad de la zapatas, añadiendo los factores (s_i , i_i y d_i respectivamente). Pero todo ello, estudiando únicamente la rotura paralela al lado corto (B). Para tener en cuenta el caso de cargas excéntricas, propuso modificar el el ancho a un ancho efectivo de valor: $B^* = B - 2 \cdot e$, siendo e la excentricidad de la carga vertical, considerando que una faja del cemento de ancho 2e no contribuye a la capacidad resistente. Realizando lo mismo con el largo de la zapata, cuando la excentricidad se presentaba en ambas direcciones, se llegaba a las dimensiones efectivas B^* y L^* .

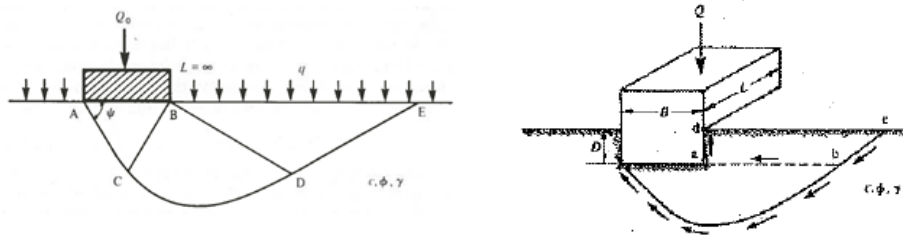


Figura 1. Carga de hundimiento de Prandtl y Terzaghi (izq.), Meyerhof, Brinch-Hansen y Vesic (der.)

Brinch-Hansen [2] estudió con más detalle el problema del hundimiento de una zapata. En 1961, propuso una formulación alternativa, partiendo de la de Terzaghi, multiplicando cada uno de sus términos por los factores de forma, inclinación de carga y profundidad, proponiendo para ellos unas formulaciones propias. En una primera aproximación definió los factores de inclinación para cimentaciones corridas, considerando la inclinación de la carga paralela únicamente al lado menor B, pero al analizar la problemática real, introdujo la posibilidad de la existencia de una cimentación discreta en las dos direcciones, y propuso otras fórmulas para los factores de inclinación teniendo en cuenta que la cimentación podía ser finita. En 1961 afirmó que no era posible dar una solución analítica al caso más general, con un área efectiva con dos dimensiones finitas y con una fuerza inclinada con una componente horizontal H que podía actuar en cualquier dirección (Fig. 2).

En 1970, B.H. planteó una formulación mejorada [3] para el cálculo de la carga de hundimiento incluyendo dos nuevos factores correctores para tener en cuenta que la base de la cimentación podía no ser horizontal (b_i), y que el terreno que podía presentar un cierto talud (g_i). Su gran aportación fue analizar que la carga podría estar inclinada en cualquier dirección y, por lo tanto, tener componentes horizontales en las dos direcciones H_B y H_L , convirtiéndose en el único autor que contempló, hasta entonces, la posibilidad de que ésta pudiera fallar a lo largo tanto del lado corto (B), como del lado largo (L).

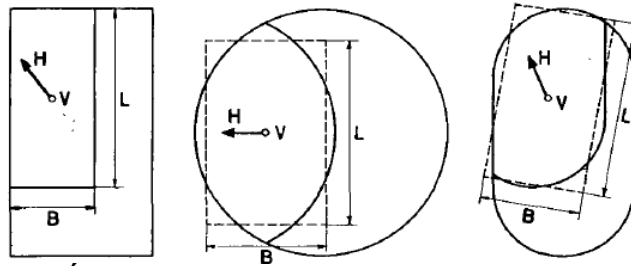


Figura 2. Áreas efectivas en cimentaciones directas. Ref. [2]

Para resolver analíticamente este hecho, diferencié los factores correctores de forma, de inclinación y de profundidad (s_i , i_i , d_i) poniéndoles un subíndice B si se estudiaba la rotura en la dirección paralela al lado corto, y L si, por el contrario, se estudiaba la rotura en la dirección paralela al lado largo, dando lugar a las siguientes ecuaciones, en condiciones drenadas:

$$q_h = \left\{ \begin{array}{l} 1^{er} \text{ término } (\gamma') \quad 2^{o} \text{ término } (q') \quad 3^{er} \text{ término } (c') \\ \frac{1}{2} \gamma' B * N_{\gamma s_{\gamma B} i_{\gamma B} d_{\gamma B} b_{\gamma} g_{\gamma}} + q' N_{q s_{q B} i_{q B} d_{q B} b_{q} g_{q}} + c' N_{c s_{c B} i_{c B} d_{c B} b_{c} g_{c}} \\ \frac{1}{2} \gamma' L * N_{\gamma s_{\gamma L} i_{\gamma L} d_{\gamma L} b_{\gamma} g_{\gamma}} + q' N_{q s_{q L} i_{q L} d_{q L} b_{q} g_{q}} + c' N_{c s_{c L} i_{c L} d_{c L} b_{c} g_{c}} \end{array} \right\} \quad (6)$$

En condiciones no drenadas ($\varphi=0$), Brinch-Hansen afirmó que era más correcto introducir constantes aditivas en lugar de factores multiplicadores, distinguiéndose de nuevo dos casos:

$$q_h = \left\{ \begin{array}{l} (\pi + 2) \cdot c_u \cdot (1 + s'_{cB} + d'_{cB} - i'_{cB} - b'_c - g'_c) \\ (\pi + 2) \cdot c_u \cdot (1 + s'_{cL} + d'_{cL} - i'_{cL} - b'_c - g'_c) \end{array} \right\} \quad (7)$$

En el caso de que las cargas actuantes fueran inclinadas, Brinch-Hansen modificó los factores de forma (s) haciéndolos depender de los factores de inclinación (i), y diferenciando además si la fuerza horizontal tenía componentes paralelas a B, a L o a ambas simultáneamente. Así, primero se deben calcular los factores de inclinación y, con ellos, obtener los factores de forma.

Por último Vesic [4], en 1973, propuso una formulación de la carga de hundimiento semejante a la de Brinch-Hansen, aunque con diferentes expresiones de los factores correctores. La diferencia fundamental es que Vesic emplea siempre B (el lado corto de la zapata) en la ecuación general de carga de hundimiento, incluso cuando la componente horizontal de la carga es paralela al lado largo de la zapata. Por lo tanto, aunque sí trata de incluir la influencia de la dirección de aplicación de la carga no parece contemplar una posible rotura de la cimentación en la dirección L de la zapata, lo cual es a todas luces una limitación en el ámbito de aplicación de su formulación.

3. Formulaciones empleadas en diversas publicaciones españolas

“Geotecnia y Cimientos II” [5] presenta un gran número de ábacos para determinar algunos parámetros de la ecuación de la carga de hundimiento, como la inclinación de la base y el terreno, y varios factores correctores dependientes del peso del terreno. Además admite que la rotura de la cimentación puede suceder en cualquiera de las dos direcciones de la zapata (B ó L), en función de la orientación de la inclinación de la carga.

La Guía de Cimentaciones [6] adopta los factores de forma, profundidad e inclinación de la teoría de Brinch-Hansen [2 y 3] y Vesic [4]. Para los factores de inclinación de la carga emplea unos factores propios que consideran que la componente horizontal de la carga puede actuar en cualquier dirección, pero solo resuelve la rotura en la dimensión corta (B).

La ROM 0.5-05 [7] emplea una formulación muy similar, con pequeñas variaciones en los factores de forma, de inclinación de la base y de inclinación del terreno. Para los factores de inclinación de

la carga, propone las mismas expresiones de [6] matizando que “cuando el problema sea tridimensional (dimensiones finitas de la cimentación) el hundimiento se debe analizar como problema plano en la dirección más desfavorable”, contemplando la rotura en la dirección larga, L.

4. Formulación del Eurocódigo 7 y de la AASHTO

El Anejo D informativo del Eurocódigo 7 parte 1 [8] (EC 7-1), omite en la formulación de la carga de hundimiento los factores de profundidad e inclinación del terreno. No considerar la profundidad de la cimentación resulta conservador (aunque en ocasiones antieconómico), pero ignorar la inclinación del terreno puede quedar del lado de la inseguridad. El Anejo Nacional del Reino Unido propone el empleo de un método alternativo que incluya ambos factores (ver Ref. [9]).

La fórmula para condiciones no drenadas adoptada por el EC 7-1 [8] emplea el factor de forma de Skempton (1951), el factor para la inclinación de la carga de Brinch-Hansen (1961), basado en un ajuste algebraico de solución exacta de Green (1954), y el factor para la inclinación de la base de la zapata de Vesic (1973), mientras que en condiciones drenadas, se emplean los factores de forma de De Beer (1970) y los factores de inclinación de la base de Vesic (1973).

Las ecuaciones para la inclinación de la carga en condiciones drenadas son las propuestas por Vesic (1975) [4], pero obteniendo el exponente m a partir de las dimensiones efectivas B^* y L^* , y no las reales (B y L) como proponía dicho autor.

Otra gran carencia de la formulación del Anejo D del EC 7-1 [8] es que no se aclara que la rotura puede producirse paralela al lado largo de la zapata (L), y parece inferirse que la formulación sólo sería de aplicación para la rotura paralela al lado corto (B).

La AASHTO [10] emplea las expresiones de Vesic [4] para los factores de capacidad de carga, de forma, de profundidad y de inclinación de la carga. La inclinación del terreno la tiene en cuenta mediante una modificación de los factores de capacidad de carga basándose en unos gráficos.

5. Resumen de la formulación polinómica de la carga de hundimiento

La tabla 1 muestra un resumen de los principales autores y referencias más importantes.

AUTOR/PUBLICACIÓN	FORMULACIÓN	
PRANDT (1920)	$q_h = q'N_q + c'N_c$ Si $\varphi = 0 : q_h = (\pi + 2)c_u + q$	
TERZAGHI (1943)	$q_h = \frac{1}{2}\gamma'BN_v + q'N_q + c'N_c$ Si $\varphi = 0 : q_h = (\pi + 2)c_u + q$	
MEYERHOF (1963)	para $\varphi \geq 0 : q_h = \frac{1}{2}\gamma'B^*N_v s_v d_v i_v + q'N_q s_q d_q i_q + c'N_c s_c d_c i_c$	
BRINCH-HANSEN	1961 [2]	$q_h = \frac{1}{2}\gamma'B^*N_v s_v d_v i_v + q'N_q s_q d_q i_q + c' \cdot N_c s_c d_c i_c$ Si $\varphi = 0 : q_h = (\pi + 2)c_u (s'_c d'_c i'_c b'_c g'_c) + q$
	1970 [3]	$q_{hB} = \frac{1}{2}\gamma'B^* N_{\gamma s_{\gamma B}} d_{\gamma i_{\gamma B}} b_{\gamma} g_{\gamma} + q'N_q s_{qB} d_{qB} i_{qB} b_q g_q + c'N_c s_{cB} d_{cB} i_{cB} b_c g_c$ $q_{hL} = \frac{1}{2}\gamma'L^* N_{\gamma s_{\gamma L}} d_{\gamma i_{\gamma L}} b_{\gamma} g_{\gamma} + q'N_q s_{qL} d_{qL} i_{qL} b_q g_q + c'N_c s_{cL} d_{cL} i_{cL} b_c g_c$ Si $\varphi = 0 : q_h = (\pi + 2)c_u (1 + s'_{cB} + d'_{cB} - i'_{cB} - b'_c - g'_c)$ $q_h = (\pi + 2)c_u (1 + s'_{cL} + d'_{cL} - i'_{cL} - b'_c - g'_c)$
VESIC (1973) [4]	$q_h = \frac{1}{2}\gamma'BN_v s_v d_v i_v b_v g_v + q'N_q s_q d_q i_q b_q g_q + c'N_c s_c d_c i_c b_c g_c$	

	$\text{Si } \varphi = 0 : q_h = (\pi + 2)c_u (s'_c d'_c i'_c b'_c g'_c) + q$
Eurocódigo 7 Parte 1 (UNE-EN 1997-1) [8]	$q_h = \frac{1}{2} \gamma' B^* N_\gamma s_\gamma i_\gamma b_\gamma + q' N_q s_q d_q i_q b_q + c' N_c s_c i_c b_c$ $\text{Si } \varphi = 0 : q_h = (\pi + 2) \cdot c_u \cdot (s'_c d'_c i'_c b'_c g'_c) + q$
GUÍA DE CIMENTACIONES [6]	$q_h = \frac{1}{2} \gamma' B^* N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma b_\gamma g_\gamma + q' N_q s_q d_q i_q b_q g_q + c' N_c s_c d_c i_c b_c g_c$ $\text{Si } \varphi = 0 : q_h = (\pi + 2)c_u (s'_c d'_c i'_c b'_c g'_c) + q$
ROM 0.5-05 [7]	$q_h = \frac{1}{2} \gamma' B^* N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma b_\gamma g_\gamma + q' N_q s_q d_q i_q b_q g_q + c' N_c s_c d_c i_c b_c g_c$ $\text{Si } \varphi = 0 : q_h = (\pi + 2)c_u (s'_c d'_c i'_c b'_c g'_c) + q$
AASTHO [10]	$q_h = \frac{1}{2} \gamma' \cdot B^* N_\gamma s_\gamma i_\gamma C_{w\gamma} + \gamma'' \cdot N_q s_q d_q i_q C_{wq} + c' N_c s_c i_c$ <p>Donde: C_{wq} y $C_{w\gamma}$:factores que tienen en el nivel freático D_ϕ es la profundidad el nivel de cimentación</p> $\text{Si } \varphi = 0 : q_h = (\pi + 2)c_u (s'_c d'_c i'_c b'_c g'_c) + q$

Tabla 1. Diferentes formulaciones de la carga de hundimiento

6. Factores correctores de la formulación de la carga de hundimiento

En la ref. [1] se hace una comparación y revisión crítica de las propuestas de cada autor y texto de referencia, para cada factor participante en la formulación de la carga de hundimiento: factores de capacidad de carga (N), la excentricidad de la carga vertical que hace que la carga no esté casi nunca centrada en la cimentación, el plano de rotura de la cimentación, así como los factores de forma (s), de inclinación de la carga (i), de profundidad del plano de la cimentación (d), de inclinación del plano de la cimentación (b), de inclinación del terreno (g), y otros factores como la proximidad de la zapata al borde de un talud, o la posible existencia de una capa rígida situada a escasa profundidad.

Allí se comparan los resultados de las distintas formulaciones, comparando los resultados con los propuestos por el EC 7-1 [8], remarcando las principales carencias o incongruencias presentes en la formulación del Eurocódigo. Por motivos de espacio, resulta imposible incluir en este artículo, aunque fuera de forma resumida, los resultados de la comparación realizada en [1], y por lo tanto, en este artículo se incluyen las principales conclusiones descritas en [1] a modo de resumen.

7. Resumen de la evolución de la carga de hundimiento

No existe una formulación analítica exacta que permita la obtención de la carga de hundimiento en una cimentación superficial. El problema se ha resuelto mediante aproximaciones propuestas por diferentes autores, aunque ninguna formulación resuelve completamente el problema.

Casi todos los autores parten de la expresión general de la carga de hundimiento compuesta por la suma de tres factores que dependen de la cohesión (c'), de la sobrecarga (q') y del peso del terreno (γ'), aunque este principio de superposición sólo permite obtener resultados aproximados.

Las primeras formulaciones de la carga de hundimiento (Prandtl y Terzaghi) analizaron el caso sencillo de una cimentación corrida, con carga vertical centrada y con el plano de la cimentación y del terreno horizontal. A partir de esas primeras expresiones, diferentes autores han ido complicando la formulación incluyendo, en cada término (c' , q' , γ'), una serie de factores que tuvieran en cuenta la influencia de:

- La forma de la cimentación (factores s), ya que las zapatas habituales no son corridas. La única excepción sería el caso de un muro de contención alargado con cimentación corrida.
- El plano de rotura del terreno bajo la cimentación. Muchas formulaciones consideran que la rotura únicamente puede producirse en la dirección paralela al lado menor de la zapata (B), dado que parten de las hipótesis de zapatas corridas. Como es lógico, esto no tiene porqué ser así en una zapata con dimensiones finitas, siempre que se den otros factores (como la excentricidad, la inclinación de la carga o la inclinación del terreno) que puedan desencadenar la rotura en la dirección larga (L), tal y como ya resolvió Brinch-Hansen en 1970 [3].
- La excentricidad de la carga vertical que hace que la carga no esté, en general, casi nunca centrada en la cimentación, y tenga que considerarse un área efectiva.
- La inclinación de la carga (factores i) influida por el efecto de posibles fuerzas horizontales, que además pueden actuar en cualquier dirección.
- La profundidad del plano de la cimentación (factores d).
- La inclinación del plano de la cimentación (factores b).
- La inclinación del terreno adyacente (factores g).
- Otros factores como: la proximidad de la zapata al borde de un talud, o la posible existencia de una capa rígida situada a escasa profundidad.

Cada autor, o texto de referencia, considera alguno o todos estos factores (ver tabla 1), y en ocasiones se combinan de forma que el resultado global se aproxima a la solución del problema.

No pueden entenderse por tanto los factores correctores de un solo efecto, sin considerar en su globalidad la formulación del mismo autor, y probablemente uno de los principales problemas de algunas de las formulaciones que aparecen en diferentes tratados de geotecnia, sea que mezclan en las expresiones generales de la carga de hundimiento factores de diferentes autores.

Brinch-Hansen [3] fue el primer autor en plantear la rotura por hundimiento como un problema tridimensional y podría considerarse como el autor que ha tratado con mayor precisión y rigor el tema, de ahí que en muchos países se conozca la formulación polinómica de la carga de hundimiento con su nombre, aunque no es el único, ni el primer autor que estudió el problema. Su gran aportación fue considerar la influencia de la dirección de aplicación de la carga cuando está inclinada, diferenciando los factores de forma (s) e inclinación de la carga (i) con subíndices que permiten estudiar el fallo del terreno paralelo al lado corto (B), o paralelo al lado largo (L), proponiendo formulaciones explícitas para la rotura en ambas direcciones.

Sus ideas en relación con la rotura en cualquiera de los dos planos principales han sido recogidas de forma parcial en "Geotecnia y Cimientos II" [5] y la ROM 0.5-05 [7], aunque ninguna de ellas es tan clara y explícita como la formulación revisada de Brinch-Hansen [3].

8. Resumen crítico de la formulación del Eurocódigo 7

El EC 7-1 [8] en su Anejo D informativo propone una formulación parcial para la obtención de la carga de hundimiento, en la que se omiten los factores de profundidad y los factores de inclinación del terreno por no considerarse suficientemente contrastados por la experiencia y, por lo tanto, en opinión de sus autores, no ofrecer valores fiables. El no considerar la influencia de la profundidad de la cimentación será en general conservador, pero no tenerlo en cuenta puede llevar a

sobredimensionar las zapatas, ya que en ocasiones su influencia puede ser significativa, en cambio, no considerar la influencia de la inclinación del terreno puede en ocasiones quedar claramente del lado de la inseguridad.

Para el resto de factores, el EC 7-1 [8] propone unas formulaciones que, aunque en su mayoría se adoptan de la teoría de Vesic [4] (incluyendo la fórmula general de la carga de hundimiento), en otros casos se mezclan con expresiones de la teoría de Brinch-Hansen [2 y 3] y otras.

Esta formulación tampoco es del todo congruente a la hora de tomar expresiones pertenecientes al mismo autor en los factores de un mismo efecto, como ocurre con los factores de forma y los factores inclinación de la carga, en los que mezcla las formulaciones de varios autores [1].

En cuanto a la aproximación a la realidad de las expresiones, los factores de capacidad de carga, de forma de la cimentación y de inclinación de la base de la zapata se encuentran dentro del rango habitual de las propuestas por los diferentes autores [1], sin embargo las expresiones empleadas para los factores de inclinación de la carga, adoptadas de Vesic [4], parecen presentar varias contradicciones e incongruencias con las formulaciones de otros autores.

La teoría de Vesic [4] para los factores de inclinación de la carga (i), adoptada en el EC 7-1 [8], está concebida partiendo del caso sencillo de cimentaciones corridas con rotura en la dirección paralela al lado corto de la zapata (B). En su origen, esta formulación no tenía en cuenta la orientación de la carga en planta y la componente horizontal H debía ser obligatoriamente paralela al lado corto de la zapata B. Ante la necesidad de resolver el problema más general, en el que la zapata podía tener dos dimensiones finitas (B y L) y la carga podía actuar en cualquier dirección en planta, Vesic introdujo un exponente m variable en su formulación, que es función tanto de la forma de la zapata (convirtiéndose Vesic en el único autor que tiene en cuenta la forma de la zapata en los coeficientes de inclinación), como de la orientación en planta de la carga.

Las expresiones de los factores de inclinación adoptadas en el EC 7-1 [8] son las siguientes:

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + A^* \cdot c \cdot \cotg \varphi'}\right)^m \quad (8) ; \quad i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan \varphi'} \quad (9)$$

$$i_y = \left(1 - \frac{H}{V + A^* \cdot c \cdot \cotg \varphi'}\right)^{m+1} \quad (10)$$

$$\text{Con: } m_B = \frac{2 + \frac{B}{L}}{1 + \frac{B}{L}} \quad (18), \quad m_L = \frac{2 + \frac{L}{B}}{1 + \frac{L}{B}} \quad (19) \quad \text{y} \quad m = m_L \cos^2 \theta + m_B \sin^2 \theta \quad (20)$$

Siendo el ángulo θ el que forma la resultante horizontal de la carga con la dirección larga L. Si H es paralela a la dirección L, $m = m_L$, y cuando H actúe paralela a la dirección B, $m = m_B$.

Si se analiza la variación del exponente m en función de las dimensiones de la zapata y de la orientación de la carga, se obtiene la tabla 2. Como puede apreciarse, el máximo exponente m coincide con el caso simple de zapata corrida y carga inclinada en la dirección paralela al lado corto B, de valor 2, mientras que otros autores proponen para ese exponente un valor de 3 o incluso 5 (ver ref. [1]).



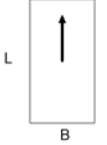
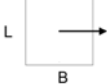

B/L	L/B	m_B	m_L	$\theta=90$ (carga paralela a B) $m=m_B$	$\theta=0$ (carga paralela a L) $m=m_L$
0 (zapata corrida)		2,0	1,0	2,0	1,0
0,5	2,0	1,666	1,333	1,666 	1,333 
1,0	1,0	1,5	1,5	1,5 	1,5 

Tabla. 2. Variación del exponente m de los factores de inclinación de Vesic

Para zapatas con dimensiones finitas en las dos direcciones, se distinguen tres situaciones:

- Para relaciones de B/L entre 0 y 1,0, el exponente m va variando, de forma que, para una relación B/L dada, tomará un valor mayor en el caso de que la carga esté aplicada en la dirección del lado corto, B (obteniendo, como es lógico, un valor menor del factor de inclinación i), y un valor menor en el caso de que la carga esté aplicada en la dirección del lado largo L (obteniendo un valor mayor del factor de inclinación).
- Esto induce a pensar que el estudio de la rotura de la cimentación se está realizando, efectivamente, a lo largo del lado corto, ya que los valores más desfavorables se obtienen cuando la carga se inclina en esa misma dirección.

Como se ha comentado, la formulación de Vesic [4] y del EC 7-1 [8] no parecen contemplar la posible rotura de la cimentación paralela al lado largo L y, por lo tanto, no se podría extrapolar su formulación para este caso, ya que los resultados a los que llevaría serían incongruentes.

- Para B/L=1,0, el exponente m no varía, y toma un valor constante de 1,5 independientemente de la orientación de la inclinación de la carga, lo cual carece de sentido lógico, ya que los resultados deberían ser más desfavorables en el caso de que la carga se aplicara en la misma dirección del estudio de la rotura.

El gráfico de la figura 3 resume con detalle la variación de este exponente m en función de las dimensiones de la zapata y de la orientación de la inclinación de la carga. De la figura 3 se pueden obtener dos conclusiones:

- La variación del exponente m según la dirección de inclinación de la carga es relativamente pequeña, no obteniendo una diferencia muy significativa si, para una relación B/L dada, la carga está inclinada en la misma dirección en la que se estudia la rotura (trazo azul de la fig. 3) o en la perpendicular (trazo verde de la fig. 3).
- Además de ser pequeña, esa variación va disminuyendo a medida que la zapata se va haciendo más cuadrada, adoptando para las cimentaciones cuadradas (con B/L=1,0) un valor único independiente de hacia dónde esté inclinada la carga, lo cual carece de sentido.

Si se suma esto al hecho de que la única forma de considerar la orientación de la carga es mediante el exponente m , y que el valor de H que considera en la formulación es la resultante total de la carga horizontal, independiente de si ésta es paralela o perpendicular al plano de rotura, hace que la formulación de los factores de inclinación del EC 7-1 [8] y Vesic [4] sean cuanto menos cuestionables para zapatas de dimensiones finitas.

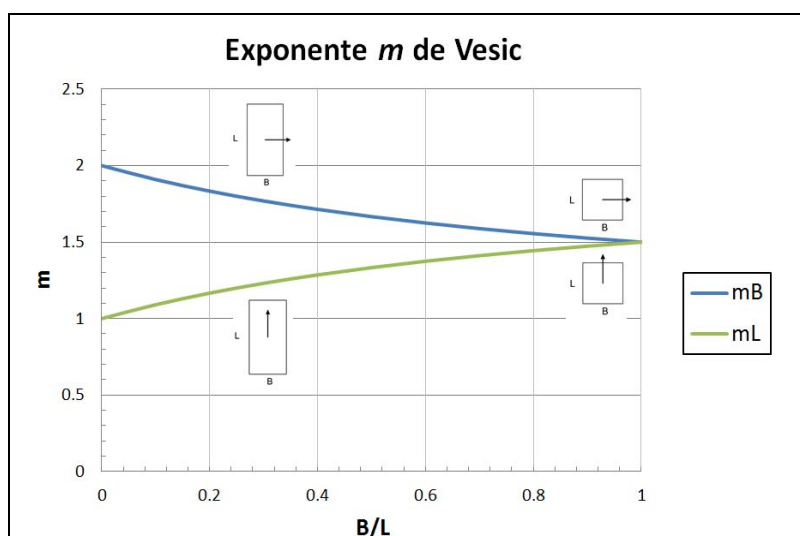


Figura 3. Variación del exponente m en función de las dimensiones de la zapata y la orientación de la inclinación de la carga

Otros autores (Brinch-Hansen [3]) o textos de referencia (Guía [6] y ROM [7]) no cometen este error, y sí diferencian de forma muy clara el valor de los factores de inclinación en función de si la carga actúa paralela o perpendicular al plano de rotura (ver ref. [1]).

Además la formulación de la carga de hundimiento propuesta por el EC 7-1 [8] no parece tener en cuenta la posibilidad de que la zapata rompa según un plano paralelo al lado largo (L), olvidando el hecho de que determinados factores puedan desencadenar la rotura en la dirección larga antes que en la dirección corta, tal y como ya analizó Brinch-Hansen [3] y también comentan “Geotecnia y Cimientos II” [5] y la ROM 0.5-05 [7]. Estos factores condicionantes pueden ser:

- la existencia de un talud inclinado cercano en la dirección paralela al lado largo de la zapata
- y, sobre todo, la existencia de una carga inclinada actuando predominantemente en la dirección larga de la cimentación

9. Conclusiones

La formulación polinómica propuesta en el anejo D informativo del EC 7-1 [8] para la carga de hundimiento, no es del todo congruente al mezclar diferentes factores de distintos autores [1] y, para una zapata de dimensiones finitas, que suele ser el caso más habitual de las cimentaciones de las pilas de puentes, además no parece tener en cuenta que la rotura del terreno pueda producirse paralela al lado largo (L).

A entender de los autores de este artículo, la formulación revisada de J. Brinch-Hansen 1970 [3], es la formulación más completa, que resuelve con detalle toda la problemática y permite realizar el cálculo de las cimentaciones superficiales analizando la rotura del terreno en cualquiera de los dos planos principales de posible rotura, paralela al lado largo (L) o paralela al lado corto (B), en función de los factores que puedan desencadenar la rotura.

El resto de formulaciones de la carga de hundimiento, son sólo formulaciones parciales que funcionan bien para situaciones particulares, como el de las cimentaciones corridas. Este sería el caso de la formulación de Vesic [4], en la que se basa la del EC 7-1 [8], pero que no permiten resolver de forma adecuada la problemática general de una cimentación finita, con posible

inclinación de la carga en cualquier dirección, y con inclinación del terreno, entre otros factores condicionantes.

Con vistas a aclarar y concretar las nuevas verificaciones y los métodos de cálculo acorde con el EC 7-1 [8], la UTE IDEAM S.A.-Fhecor Ingenieros Consultores S.L. está desarrollando para la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, bajo la dirección de Álvaro Parrilla, Jefe de Área de Geotécnica, y Pilar Crespo, Jefa de Área de Estructuras, el “Manual de aplicación del Eurocódigo 7 (UNE-EN 1997) para el proyecto de cimentaciones de obras de carretera” [11], en el que se explica, mediante una serie de ejemplos cómo aplicar el EC 7-1 [8] en España de forma compatible con el Anejo Nacional español [12].

Si bien el Anejo Nacional [12] mantiene el Anejo D del EC 7-1 [8] como informativo, en el Manual de Aplicación [11] se ha propuesto una formulación alternativa a la del citado Anejo para la fórmula polinómica de la carga de hundimiento, extrapolando la formulación de la ROM 0.5-05 [7] generalizando el problema según expuso Brinch-Hansen en 1970 [3], con expresiones explícitas que tengan en cuenta que la rotura puede ocurrir en cualquiera de las dos direcciones principales B y L.

10. Referencias

- [1] ORTEGA M., FERNÁNDEZ M., MILLANES F. “Análisis de la formulación analítica de la carga de hundimiento para cimentaciones superficiales. Incongruencias y carencias de la formulación del Eurocódigo 7”. *Hormigón y Acero*. ACHE. Madrid. (Pendiente de publicación).
- [2] BRINCH-HANSEN J. “Una fórmula general para capacidad de carga”. *GeotekiskInstitut. Bulletin nº11*. Copenhagen 1961
- [3] BRINCH-HANSEN J. “A revised and extended formula for bearing capacity”. *GeotekiskInstitut. Bulletin nº28*. Copenhagen 1970
- [4] Vesic. A.S. “Bearing capacity of shallow foundations”. Chapter 3 of *Foundation Engineering Handbook*, H.F. Winterkorn and H.Y. Fang (Ed.), Van Nostrand Reinhold Company.
- [5] JIMÉNEZ SALAS J.A. et al. *Geotecnia y Cimientos II*. Editorial Rueda. 1981
- [6] *Guía de cimentaciones en obras de carreteras*. Ministerio de Fomento. 2003
- [7] *ROM 0.5-05. Recomendaciones geotécnicas para el proyecto de obras marítimas y portuarias*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente 2005.
- [8] AENOR AEN/CTN 140 (2010): *Eurocódigo 7: “Proyecto geotécnico”. Parte 1: “Reglas generales”*. UNE-EN 1997-1+AC.
- [9] BOND A., HARRIS A. *Decoding Eurocode 7*. Taylor and Francis. 2008
- [10] *AASHTO LRFD BRIDGE. Design Specifications*. Customary U.S. Units 2012
- [11] “Manual de aplicación del Eurocódigo 7 (UNE-EN 1997) para el proyecto de cimentaciones de obras de carretera”. Ministerio de Fomento. (Pendiente de publicación)
- [12] *Anejo Nacional AN/UNE-EN 1997-1:2004 Eurocódigo 7. Proyecto geotécnico Parte 1: “Reglas generales”*.