

# Carga de hundimiento en macizos rocosos según el criterio de Hoek-Brown modificado

A. SERRANO (\*); C. OLALLA(\*\*); J. GONZALEZ (\*\*\*)

**RESUMEN** Se desarrolla un procedimiento para valorar las cargas que producen el hundimiento en una cimentación superficial, en un medio rocoso altamente fracturado que cumpla con el criterio de Hoek y Brown modificado (1992). Las hipótesis que se realizan y por lo tanto su aplicabilidad son las siguientes; deformación plana, validez del método de las características, medio rocoso homogéneo e isotrópico, sin peso, inexistencia de fuerzas de inercia, etc. Se obtienen unos coeficientes  $N_\beta$ , (es decir una generalización de los coeficientes  $N_c$  y  $N_q$  de Prandtl, clásicos), que dependen del valor del exponente  $n$  que interviene en el nuevo modelo de Hoek y Brown y que permiten calcular la carga de hundimiento, mediante la expresión  $P_h = \beta_n \cdot (N_\beta - \zeta_n)$ .

## ULTIMATE BEARING CAPACITY OF ROCK MASSES BASED ON THE MODIFIED HOEK-BROWN CRITERION

**ABSTRACT** A method for obtaining the ultimate bearing capacity of shallow foundations in highly fractured rock masses is developed for the new failure criterion of Hoek and Brown (1992). The hypotheses, and the validity and applicability of the new method, are; characteristic method, plane strain, weightless mass, without inertial forces, etc.

Values of the  $N_\beta$  factor, (a generalization of the  $N_c$ ,  $N_q$  parameters of the Prandtl's theory), are obtained for different magnitudes of the Hoek and Brown exponent, ( $n$ ), which allow the ultimate bearing capacities to be calculated.

**Palabras clave:** Cimentación superficial; Masa rocosa; Capacidad portante.

## 1. INTRODUCCIÓN

En un artículo anterior [1], se presentó un método para determinar la carga de hundimiento en un macizo rocoso homogéneo e isotrópico utilizando el criterio de rotura de Hoek-Brown [2]. Hoek y al. [3] modificaron su modelo original, para aplicarlo a macizos rocosos extremadamente fracturados ( $RMR < 30$ ), incorporando un nuevo exponente "n" que varía entre 0.5 y 0.65. El valor del exponente igual a  $n = 0.5$  corresponde al criterio original.

En este artículo, se generaliza el método para obtener la carga de hundimiento para el nuevo criterio de rotura. Todas las hipótesis, y por tanto la validez y aplicabilidad de este procedimiento, son las mismas que en el anterior: deformación plana, macizo sin peso, sin considerar las fuerzas de inercia, etc. En consecuencia, este artículo debería ser leído junto con el mencionado anteriormente [1], así como con las aportaciones tenidas posteriormente respecto de los coeficientes de seguridad a utilizar y de la influencia de la anisotropía [4], [5] y [6].

Los nuevos valores del factor  $N_\beta$  se obtienen para distintas magnitudes del exponente, ( $n$ ), que permiten calcular la carga de hundimiento.

## 2. ANÁLISIS DEL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK-BROWN MODIFICADO

El criterio de Hoek y Brown modificado [3], que es válido para masas rocosas extremadamente fracturadas, es el siguiente:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} = \left( m \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^n \quad [2.1]$$

donde  $\sigma_1$  es la tensión principal mayor en rotura,  $\sigma_3$  es la tensión principal menor,  $\sigma_c$  es la resistencia a compresión uniaxial de la roca matriz y  $m$ ,  $s$  son constantes que dependen de las características de la roca y del grado de fracturación. El valor de  $n$  varía entre  $n=0,5$  y  $n=0,65$  y también depende del grado de fracturación [3].

El criterio de rotura de Hoek-Brown modificado expresado mediante los parámetros de Lambe para deformación plana, ( $p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$  y  $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ ) permite un tratamiento simplificado y normalizado de este criterio de rotura. Con estos parámetros, el criterio de rotura de Hoek y Brown modificado es el siguiente:

(\*) E.T.S.I.C.C.P. Univ. Politécnica, Madrid, España

(\*\*) Lab. Geotecnia, CEDEX-MOPTMA. Alfonso XII, 3 y 5, 28014, Madrid, España

(\*\*\*) Ing. del Suelo, S.A., Madrid, España

$$\frac{p}{\beta_n} + \zeta_n = \left[ 1 + (1-n) \cdot \left( \frac{q}{\beta_n} \right)^k \right] \cdot \frac{q}{\beta_n} \quad [2.2]$$

Donde  $k$ ,  $\beta_n$  y  $\zeta_n$  son constantes del macizo rocoso que dependen de  $n$ ,  $m$ ,  $s$  y  $\sigma_c$  de la siguiente forma:

$$k = (1-n)/n; \beta_n = A_n \cdot \sigma_n; \zeta = s/(m \cdot A_n) \quad [2.3]$$

donde

$$A_n^k = m \cdot (1-n)/2^{1/n}$$

En forma adimensional y normalizada, el criterio de rotura pasa a ser:

$$p_0^* \equiv p^* + \zeta_n = \left[ 1 + (1-n) \cdot q^{*k} \right] \cdot q^* \quad [2.4]$$

donde  $p^*$  y  $q^*$  son los parámetros normalizados y adimensionales de Lambe, ( $p_0^* = p/\beta_n + \zeta_n$ ;  $q^* = q/\beta_n$ ).

La envolvente de los círculos de Mohr de rotura,  $\tau = \tau(\sigma)$  se define por:

$$\begin{aligned} \tau &= \cos \rho \\ \sigma &= p - q \sin \rho \end{aligned} \quad [2.5]$$

donde  $\rho$  es el "ángulo de rozamiento instantáneo". Este es el ángulo que la tangente a la envolvente de Mohr-Coulomb, en el punto de tangencia con el círculo de Mohr, forma con el eje de las abscisas.

Este ángulo se define por la expresión:

$$\frac{dq}{dp} = \tan \rho \quad [2.6]$$

Teniendo en cuenta la ecuación (2.4):

$$\tan \rho = \frac{dq^*}{dp_0^*} = \frac{1}{1 + k \cdot q^{*k}} \quad [2.7]$$

Para el mismo criterio de rotura, utilizando las variables de Lambe [Eq (2.4) y (2.7)], se obtienen las ecuaciones paramétricas siguientes:

$$q^* \equiv \frac{q}{\beta_n} = \left[ \frac{1 - \sin \rho}{k \cdot \sin \rho} \right]^{\frac{1}{k}} \quad [2.8a]$$

$$p_0^* \equiv \frac{p}{\beta_n} + \zeta_n = n \cdot \left[ \frac{1 + k \cdot \sin \rho}{\sin \rho} \right] \cdot \left[ \frac{1 - \sin \rho}{k \cdot \sin \rho} \right]^{\frac{1}{k}} \quad [2.8b]$$

Las ecuaciones paramétricas de la envolvente de Mohr se pueden obtener teniendo en cuenta (2.5) y (2.8):

$$\tau^* \equiv \frac{\tau}{\beta_n} = \left[ \frac{1 - \sin \rho}{k \cdot \sin \rho} \right]^{\frac{1}{k}} \cdot \cos \rho \quad [2.9]$$

$$\sigma^* \equiv \frac{\sigma}{\beta_n} + \zeta_n = (n + \sin \rho) \cdot \left[ \frac{1 - \sin \rho}{\sin \rho} \right] \cdot \left[ \frac{1 - \sin \rho}{k \cdot \sin \rho} \right]^{\frac{1}{k}}$$

La Figura nº1 muestra las ecuaciones (2.9) para  $n = 0.5$  y  $n = 0.65$ , respectivamente.

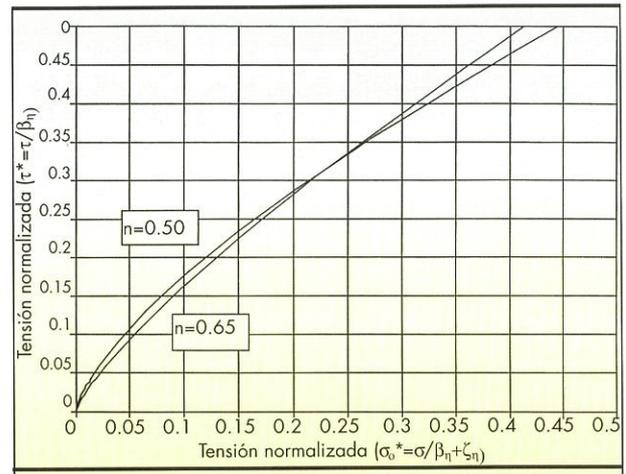


FIGURA 1. Envolventes de Mohr del círculo de tensiones en la rotura, según el criterio de Hoek y Brown modificado (1992)

### 3. OBTENCIÓN DEL INVARIANTE DE RIEMANN

Cuando no existen fuerzas de masa a lo largo de las líneas características, se verifica la siguiente ecuación diferencial [1]:

$$\frac{\cos \rho}{2 \cdot q} dp \pm d\psi = 0 \quad [3.1]$$

Si se tiene en cuenta que  $\tan \rho = dq/dp$ ; junto con (2.8), entonces:

$$\frac{\cot \rho}{2} \cdot \frac{dp}{q} \pm d\psi = 0 \quad [3.2]$$

Teniendo en cuenta (2.8a):

$$\frac{dp}{q} = \frac{1 + \sin \rho}{k \cdot \sin \rho \cdot \cos \rho} \quad [3.3]$$

El invariante de Riemann se define por:

$$I_n(\rho) \equiv \int dI_n(\rho) = \int \frac{\cos \rho}{2 \cdot q} \cdot dp = \int \frac{\cos \rho}{2} \cdot \frac{dq}{q} \quad [3.4]$$

Teniendo en cuenta (3.3)

$$\int dI_n(\rho) = -\frac{1}{k} \cdot \int \frac{1 + \sin \rho}{2 \cdot \sin^2 \rho} \cdot d \quad [3.5]$$

El cambio del invariante de Riemann a lo largo de las líneas características es el cambio de posición del polo en el círculo de Mohr, como expresa la ecuación (3.2). El invariante de Riemann es útil porque, si se conoce el cambio de posición del polo, se puede evaluar el cambio del ángulo de rozamiento instantáneo a través del invariante de Riemann, y por tanto el círculo de Mohr que permite la evaluación de las tensiones.

El invariante de Riemann para el criterio de Hoek-Brown modificado se obtiene, integrando (3.5):

$$I_n(\rho) = \frac{1}{2 \cdot k} \left[ \cot \rho + \ln \left( \cot \left( \frac{\rho}{2} \right) \right) \right] \quad [3.6]$$

El invariante de Riemann para el criterio original es (1):

$$I(\rho) = \frac{1}{2} \left[ \cot \rho + \ln \left( \cot \left( \frac{\rho}{2} \right) \right) \right] \quad [3.7]$$

Entonces

$$I_n(\rho) = \frac{I(\rho)}{k} \quad [3.8]$$

y

$$I_n(\rho) \pm \psi = \text{constante} \quad [3.9]$$

## 4. CARGA DE HUNDIMIENTO

### 4.1. PROCEDIMIENTO

La teoría general de la carga de hundimiento usada en el artículo anterior [1] se puede aplicar también cuando la resistencia del macizo rocoso obedece al criterio de rotura de Hoek-Brown modificado.

A lo largo de una línea característica de la familia  $\alpha$ , (la familia  $\alpha$  es precisamente la que rodea al punto singular), se verifica la siguiente ecuación diferencial, si no hay peso:

$$dI_n(\rho) + d\psi = 0 \quad [4.1]$$

Si se integra esta expresión entre un punto situado en el Contorno 1 y otro situado en el Contorno 2, resulta:

$$I_n(\rho_1) + \psi_1 = I_n(\rho_2) + \psi_2 \quad [4.2]$$

Esta ecuación es la clave de la solución de la carga de hundimiento. Si se conocen los valores de las variables  $\psi_1$  y  $\rho_1$  en el Contorno 1 y la variable  $\psi_2$  bajo la cimentación, se obtiene  $\rho_2$ , que permite determinar la carga de hundimiento mediante la ecuación (2.9).

### 4.2. CONDICIONES DE CONTORNO

En el caso de la carga de hundimiento, los llamados círculos de Mohr máximos y mínimos corresponden a estados de tensiones en los Contornos 1 y 2 respectivamente.

#### 4.2.1. Contorno 1

Cuando se conocen las tensiones tangencial y normal en el Contorno 1 ( $\tau$  y  $\sigma$ ), el "ángulo de rozamiento instantáneo" ( $\rho_1$ ) viene dado por la ecuación que define el círculo de Mohr:

$$\left( \frac{\tau}{\beta_n} \right)^2 + \left( p_0^* - \frac{\sigma_0}{\beta_n} \right)^2 = q^2 \quad [4.3]$$

con

$$\sigma_0 = \sigma + \beta_n \cdot \zeta_n$$

Esta ecuación, junto con la ecuación (2.8) y las tensiones en el contorno ( $\tau$ ,  $\sigma$ ), se puede expresar de la siguiente manera:

$$\left( \frac{\sigma_{01}}{\beta_n} \right) = \cos i_{01} \cdot \left( \frac{1 - \text{sen } \rho_1}{k \cdot \text{sen } \rho_1} \right)^{\frac{1}{k}} \quad [4.4]$$

$$\left[ n \cdot \left( \frac{1 + \text{sen } \rho_1}{\text{sen } \rho_1} \right) \cdot \cos i_{01} - \sqrt{1 - \left( n \cdot \left( \frac{1 + k \cdot \text{sen } \rho_1}{\text{sen } \rho_1} \right) \cdot \text{sen } i_{01} \right)^2} \right] \quad [4.4]$$

donde  $i_{01}$  es el ángulo de inclinación "eficaz" de la carga en el Contorno 1, definido por  $\tan i_{01} = \tau / \sigma_{01}$ . El ángulo  $\rho_1$  se obtiene de esta ecuación.

La inclinación de la tensión principal mayor,  $\psi_1$ , en el Contorno 1 se expresa como sigue:

$$\text{sen } 2 \cdot (\psi_1 + \alpha) = \frac{\tau}{q} \quad [4.5]$$

donde  $\alpha$  es la inclinación del Contorno 1. Operando, queda la siguiente expresión:

$$\psi_1 + \alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \cdot \text{sen}^{-1}$$

$$\left( \text{sen } i_{01} \cdot \left[ n \cdot \left( \frac{1 + \text{sen } \rho_1}{\text{sen } \rho_1} \right) \cdot \cos i_{01} - \sqrt{1 - \left( n \cdot \left( \frac{1 + k \cdot \text{sen } \rho_1}{\text{sen } \rho_1} \right) \cdot \text{sen } i_{01} \right)^2} \right] \right)$$

La ecuación anterior permite obtener la inclinación de la tensión principal mayor en el Contorno 1, ( $\psi_1$ ), en función del ángulo de rozamiento instantáneo ( $\rho_1$ ).

#### 4.2.2. Transmisión del Contorno 1 al Contorno 2

El valor del sumando  $I_n(\rho_2) + \psi_2$  puede obtenerse en el Contorno 2 utilizando el invariante modificado de Riemann:

$$I_n(\rho_1) + \psi_1 = I_n(\rho_2) + \psi_2 \quad [4.2]$$

#### 4.2.3. Contorno 2

Si la carga de hundimiento es normal al Contorno 2 se tiene que  $\psi_2 = 0$  y entonces el valor de  $\rho_2$  se determina de una manera directa con la ecuación (4.2). Si la carga es inclinada,  $\psi_2 \neq 0$ , y  $\psi_2$  no está determinada previamente sino que es resultado del cálculo de la carga de hundimiento. En este caso para su determinación es necesario un proceso iterativo.

La solución correspondiente al círculo mínimo de Mohr para el Contorno 2 se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\left( \frac{\sigma_{02}}{\beta_n} \right)_2 = \cos i_{02} \cdot \left( \frac{1 - \text{sen } \rho_2}{k \cdot \text{sen } \rho_2} \right)^{\frac{1}{k}} \quad [4.7]$$

$$\left[ n \cdot \left( \frac{1 + \text{sen } \rho_2}{\text{sen } \rho_2} \right) \cdot \cos i_{02} + \sqrt{1 - \left( n \cdot \left( \frac{1 + k \cdot \text{sen } \rho_2}{\text{sen } \rho_2} \right) \cdot \text{sen } i_{02} \right)^2} \right] \quad [4.7]$$

La dirección de la tensión principal mayor  $\psi_2$  viene dada por:

$$\text{sen } 2 \cdot \psi_2 = \frac{\tau}{q} \quad [4.8]$$

Teniendo en cuenta (2.8) y (2.9), la ecuación (4.8) queda como sigue:

$$\psi_2 = \frac{1}{2} \cdot \text{sen}^{-1} \left[ \text{sen } i_{02} \cdot \left( n \cdot \left( \frac{1 + \text{sen } \rho_2}{\text{sen } \rho_2} \right) \cdot \cos i_{02} + \sqrt{1 - \left( n \cdot \left( \frac{1 + k \cdot \text{sen } \rho_2}{\text{sen } \rho_2} \right) \cdot \text{sen } i_{02} \right)^2} \right) \right] \quad [4.9]$$

$$\left[ n \cdot \left( \frac{1 + \text{sen } \rho_2}{\text{sen } \rho_2} \right) \cdot \cos i_{02} + \sqrt{1 - \left( n \cdot \left( \frac{1 + k \cdot \text{sen } \rho_2}{\text{sen } \rho_2} \right) \cdot \text{sen } i_{02} \right)^2} \right] \quad [4.9]$$

La inclinación efectiva  $i_{02}$  de la carga de hundimiento se define por:

$$\tan i_{02} = \frac{\tau}{\sigma_0} = \frac{\tan i_2}{1 + \frac{\zeta_n}{\sigma_0 - \zeta_n}} \quad [4.10]$$

El sistema de ecuaciones (4.2), (4.7), (4.9) y (4.10) permite conocer las incógnitas  $\rho_2$ ,  $\psi_2$ ,  $\sigma_0$  y  $i_{02}$ . Este sistema se puede resolver mediante iteraciones. El inicio de la iteración se hace con los valores  $(\psi_2)_{inc}=0$  y  $(i_2)_{inc}=i_{02}$ . De la ecuación (4.2) se obtiene  $(\rho_2)_{inc}$ . Mediante las ecuaciones (4.7) y (4.9) con  $(i_{02}) = i_2$  y  $(\rho_2)_{inc}$  se determina el nuevo valor de  $\psi_2$ . Finalmente la ecuación (4.10) permite obtener el nuevo  $i_{02}$ . Con los nuevos valores de  $\psi_2$  e  $i_{02}$  se continua el proceso iterativo.

### 4.3. CARGA DE HUNDIMIENTO

#### 4.3.1. Caso general

La ecuación que determina la carga de hundimiento  $P_h$  es:

$$P_h \equiv \sigma_2 \equiv \beta_n \cdot (N_\beta - \zeta_n) \quad [4.11]$$

donde  $N_\beta = \sigma_{02}^*$ , es decir

$$N_\beta = \cos i_{02} \cdot \left( \frac{1 - \text{sen } \rho_2}{k \cdot \text{sen } \rho_2} \right)^{\frac{1}{k}} \quad [4.12]$$

$$\left[ n \cdot \left( \frac{1 + \text{sen } \rho_2}{\text{sen } \rho_2} \right) \cdot \cos i_{02} + \sqrt{1 - \left( n \cdot \left( \frac{1 + k \cdot \text{sen } \rho_2}{\text{sen } \rho_2} \right) \cdot \text{sen } i_{02} \right)^2} \right] \quad [4.12]$$

#### 4.3.2. Casos simplificados

**Primero** Si la carga en el Contorno exterior 1 es normal a la superficie,  $i_1=0$ , entonces,  $\psi_1 + \alpha = \pi/2$ , en donde  $\alpha$  es el ángulo de inclinación en el Contorno 1. Particularizando la ecuación (4.4) resulta:

$$\sigma_{01}^* = \frac{\sigma_1}{\beta_n} + \zeta_n = \left( \frac{1 - \text{sen } \rho_1}{k \cdot \text{sen } \rho_1} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \left[ n \cdot \left( \frac{1 + \text{sen } \rho_1}{\text{sen } \rho_1} \right) - 1 \right] \quad [4.13]$$

Esta ecuación permite determinar  $\rho_1$  y el invariante  $(I_n(\rho_1))$ . Se puede “transmitir” al Contorno 2 por medio de la ecuación (4.2).

**Segundo** La carga de hundimiento es también normal a su contorno. Entonces,  $i_2 = 0$ , por lo que  $\psi_2 = 0$ . Por lo tanto:

$$I_n(\rho_2) = I_n(\rho_1) + \frac{\pi}{2} - \alpha \quad [4.14]$$

$$N_\beta = \left( \frac{1 - \text{sen } \rho_2}{k \cdot \text{sen } \rho_2} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \left[ n \cdot \left( \frac{1 + \text{sen } \rho_2}{\text{sen } \rho_2} \right) + 1 \right] \quad [4.15]$$

La ecuación (4.14) permite determinar directamente  $\rho_2$  en función de las cargas en el Contorno 1 y los parámetros  $\zeta_n$  y  $\beta_n$  de la roca.

**Tercero** El Contorno 1 es horizontal. Entonces  $\alpha = 0$ . Si las dos condiciones mencionadas ( $i_2 = 0$ ,  $i_1 = 0$ ) se verifican, el proceso se simplifica enormemente y la solución es inmediata. En este caso la tabla (Tabla n°1) muestra el coeficiente  $N_\beta$  en función de la carga externa normalizada del Contorno 1,  $(\sigma_{01}^*)$ . La Figura n°2 muestra estos resultados en un gráfico.

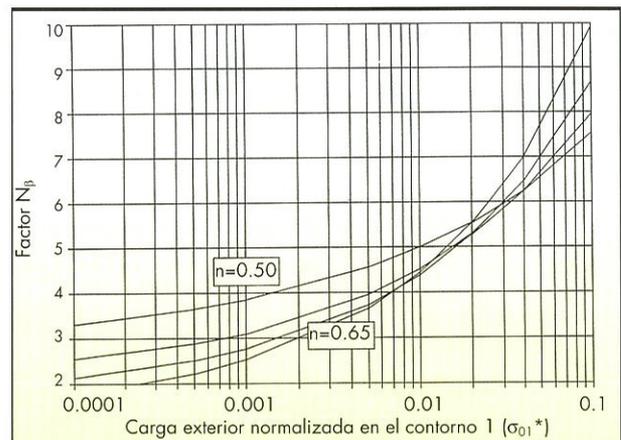


FIGURA 2. Valores del Factor  $N_\beta$  en función de la carga exterior para exponentes 0,50; 0,55; 0,60 y 0,65.

$\sigma_{01}^*$	0.50	0.55	0.60	0.65
0	2.66	2.21	1.66	1.06
10-6	2.89	2.25	1.75	1.24
10-5	3.01	2.34	1.87	1.40
10-4	3.30	2.54	2.13	1.74
5•10-4	3.65	2.88	2.51	2.20
10-3	3.86	3.10	2.77	2.53
5•10-3	4.56	3.96	3.73	3.66
10-2	5.00	4.53	4.39	4.45
2•10-2	5.54	5.27	5.27	5.53
4•10-2	6.26	6.23	6.45	7.01
0.1	7.54	7.96	8.67	9.88
0.2	8.90	9.78	11.07	13.08
0.4	10.77	12.26	14.39	17.62
0.7	12.81	14.97	18.04	22.69
1	14.45	17.14	20.98	26.84

$$^a \sigma_{01}^* = (\sigma_1 / \beta_n) + \zeta_n$$

TABLA 1. Valores del factor  $N_\beta$  para diferentes valores del exponente n (hipótesis de terreno horizontal y carga vertical)

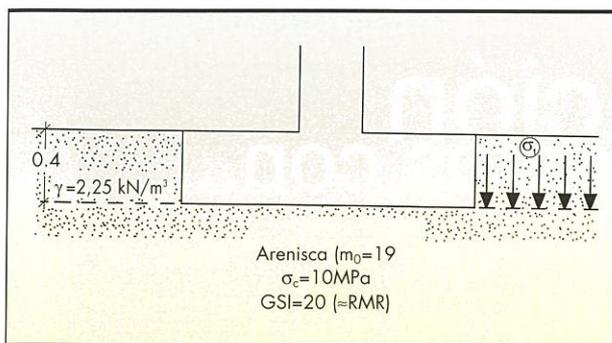


FIGURA 3. Ejemplo

### 5. EJEMPLO

Calcular la carga de hundimiento de la cimentación superficial descrita en Figura n°3.

#### 5.1. PROCEDIMIENTO

A) Parámetros de Hoek-Brown

$$m = m_0 \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) = 19 \cdot \exp\left(\frac{20 - 100}{28}\right) = 1.0912$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) = \exp\left(\frac{20 - 100}{9}\right) = 1.379 \cdot 10^{-4}$$

$$n = 0.65 - \frac{GSI}{200} = 0.65 - \left(\frac{20}{200}\right) = 0.55$$

B) Parámetros intermedios:

$$k = \frac{(1-n)}{n} = \frac{1-0.55}{0.55} = 0.818$$

$$1/k = 1/0.818 = 1.2222$$

$$A_n^k = m \cdot (1-n)/2^{1/n} = 1.09 \cdot (1-0.55)/2^{1/0.55} = 0.1391$$

$$A_n = 0.1391^{1.222} = 0.0898$$

$$\beta_n = A_n \cdot \sigma_c = 0.0898 \cdot 10 = 0.898 \text{ MPa}$$

$$\zeta_n = s/m \cdot A_n = 1.38 \cdot 10^{-4} / (1.091 \cdot 0.0898) = 1.41 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma_1 = 0.4 \cdot 22.5 = 9.0 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{01}^* = \frac{\sigma_1}{\beta_n} + \zeta_n = \frac{9}{898} + 1.41 \cdot 10^{-3} = 0.0114$$

(C) Carga de hundimiento ( $P_h$ ): utilizando la Figura n°2;  $N_{\beta} = 4.6$  para  $\sigma_{01}^* = 0.0114$ . Por lo tanto, el valor de la carga de hundimiento es

$$P_h = \beta_n \cdot (N_{\beta} - \zeta_n) = 0.898 \cdot (4.6) = 4.16 \text{ MPa.}$$

Se puede preparar una hoja de cálculo para su desarrollo.

### 6. CONCLUSIONES

Se ha usado el criterio de Hoek-Brown modificado [3] para calcular la carga de hundimiento en macizos rocosos en base a la teoría de la plasticidad y el método de las características, de la misma manera que se realizó en un artículo anterior [1] con el criterio original de Hoek-Brown [2].

Este procedimiento es válido bajo las hipótesis de deformación plana, homogeneidad, isotropía y para un medio rocoso sin peso.

El criterio de Hoek-Brown modificado formulado en tensiones principales [Eq (2.1)] se puede también expresar de una manera rigurosa mediante la tensión tangencial ( $\tau$ ) y normal ( $\sigma$ ) (tensiones de la envolvente del círculo de Mohr) en forma paramétrica [Eq (2.9) y Figura n°1]. Por tanto, estas fórmulas permiten determinar la evolución del ángulo de rozamiento instantáneo con el nivel de tensiones.

La carga de hundimiento en cimentaciones superficiales se puede calcular utilizando la ecuación (4.11). Para el caso simplificado de superficie horizontal y cargas verticales, se proporciona un gráfico para la obtención del factor  $N_{\beta}$ .

### REFERENCIAS

- [1] SERRANO A; OLALLA C. (1944). *Ultimate bearing capacity of rock masses*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr 31:93-106.
- [2] HOEK E; BROWN E. (1980). "Empirical strength criterion for rock masses". J. Geotech. Eng. Division. American Society of Civil Engineers 106(GT9),1013-35
- [3] HOEK E; WOOD D; SHAH S. (1992). "A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses". In: Hudson JA, editor. Proceedings of the Rock Characteriation Symposium of ISRM: Eurorock 92. London: British Geotechnical Society, pp 209-14.
- [4] SERRANO, A. y OLALLA, C. (1996). "Allowable bearing capacity of rock foundation using a non-linear failure criterion". Ing. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 33, No 4, pp. 327-345.
- [5] SERRANO, A. y OLALLA, C. (1998). "Ultimate bearing capacity of an anisotropic discontinuous rock mass. Part I: Basic modes of failure. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 35, No 3, pp. 301-324.
- [6] SERRANO, A. y OLALLA, C. (1998). "Ultimate bearing capacity of an anisotropic discontinuous rock mass. Part II: Determination Procedure". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 35, No 3, pp. 325-348.