

## Método para analizar la seguridad de túneles de poco techo en suelos y roca

**Rojas, Silvio**

Escuela de Ingeniería Civil, Departamento de Vías  
Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela  
[pgmsilvi@ula.ve](mailto:pgmsilvi@ula.ve)

### Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo de una metodología, con la cual se analizan túneles circulares de techo y proyectados en suelos o rocas. El estudio está dirigido a evaluar la seguridad de la excavación en el avance del túnel, a través del factor de seguridad FS. El análisis está basado en el método de las dovelas, las fuerzas empuje pasivo y la definición del factor de seguridad a través de la ley de resistencia de Mohr-Coulomb.

**Palabras claves:** Túneles, seguridad, suelos.

### A proposed method to assess the safety of thin roof tunnels in soil and rock

### Abstract

This article presents a methodology to analyze circular tunnels of thin roof intended for soils or rock beds. The study is directed to assess in advance the safety of the excavation by means of a safety factor FS. The analysis is based on the method of the dowels, passive thrust forces and the definition of the safety factor according to Mohr-Coulomb's resistance law.

**Key words:** Tunnel, security, soil.

Recibido: 02-05-05 Revisado: 16-05-07

### 1. Introducción

La formulación hecha por Kirsch (1898) es válida para túneles ubicados a profundidades que exceden diez veces el diámetro del túnel. Cuando el techo del túnel está a menos de diez veces del diámetro del túnel, se requiere cumplimiento preciso de las condiciones de borde. Sin embargo se debe indicar que es poco lo escrito para este tema no existiendo una presentación explícita en las referencias especializadas en el tema.

A continuación se desarrolla una metodología, en la cual se analizan túneles circulares con poco techo y proyectados en suelos o rocas. El estudio está dirigido a evaluar la seguridad de la excavación en el avance del túnel, a través de un valor proporcionado por el factor de seguridad FS. El análisis está basado en el método de las dovelas, las fuerzas empuje pasivo y la definición del factor de seguridad a través de la ley de resistencia de Mohr Coulomb.

### 2. Planteamiento del problema

La Fig. 1, muestra la sección circular de un túnel, donde se ha tomado uno de los cuadrantes superiores, para análisis. La masa de suelo entre la superficie del terreno y el perímetro del túnel, se ha dividido en nueve dovelas determinadas por el ángulo  $\theta$  medido en el centro del túnel. La definición del ancho de las dovelas se hace en incrementos en el ángulo  $\theta$  de 10 grados en el centro del túnel, tal como se aprecia en la figura, donde se observa claramente que las dovelas son de anchos diferentes. Las fuerzas que actúan en cada dovela, se muestra en detalle que está dentro del círculo, donde está presente el peso de la dovela ( $\Delta w_i$ ), la fuerza sísmica horizontal ( $K_h \Delta w_i$ ), la fuerza sísmica vertical ( $K_v \Delta w_i$ ), los empujes laterales entre dovelas definidas por las fuerzas ( $E_{i+1}$ ,  $E_i$ ), las fuerzas cortantes en las caras de las dovelas ( $S_{i+1}$ ,  $S_i$ ) y cargas distribuidas actuando en la superficie del túnel ( $q$ ). También se observa que en los planos verticales que pasan por los puntos "a" y "j", que son los bordes de la masa de suelo involucrada en el análisis, actúan las fuerzas pasivas horizontales ( $E_a$ ,  $E_j$ ) producidas por el suelo que rodea el túnel. Los puntos centrales en cada dovela, en el perímetro del túnel están designados como (1,2,3,.....) y los extremos de cada dovela están designados por las letras (a, b, c, d, .....j)

### 3. Desarrollo de las ecuaciones

- Suma de fuerzas verticales en cada dovela  
 $\Delta w_i$ : Peso de la dovela.  
Kv: Coeficiente sísmico vertical.

$\Delta x_i$ : Ancho de la dovela.

$q_y$ : Sobrecarga en la superficie del túnel.

$P_y$ : Carga puntual que puede actuar en la vertical de las dovelas

Resistencia movilizada en las caras

$$S_{i+1} - S_i = \Delta w_i (1 + K_v) + q_y \Delta x_i + P_y \quad (1)$$

$$\Delta S_i = \Delta w_i (1 + K_v) + q_y \Delta x_i + p_y \quad (2)$$

donde:

$S_i, S_{i+1}$ : Fuerzas de corte movilizadas en las caras verticales de cada dovela

$\Delta S_i$ : Diferencia de las fuerzas cortantes movilizadas en una dovela.

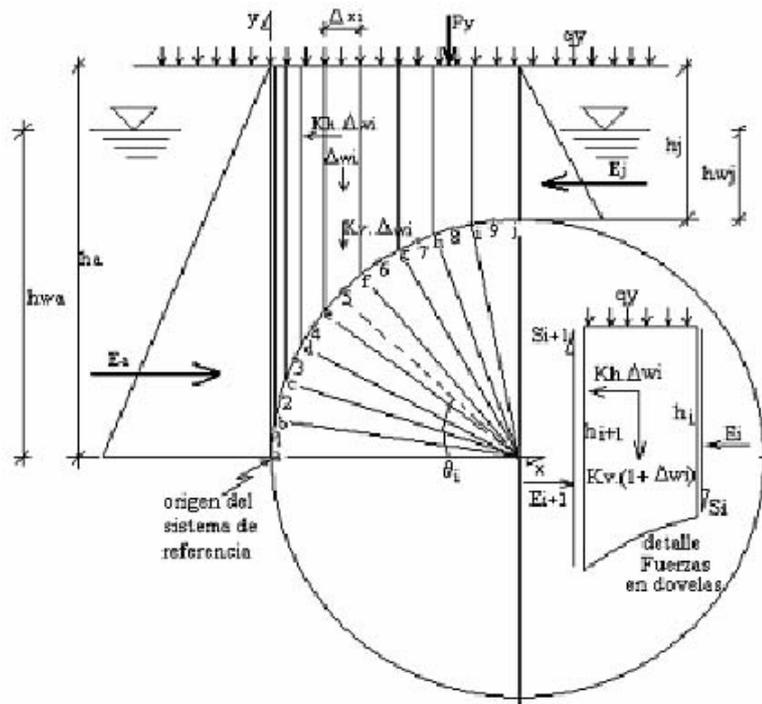


Fig. 1.- Sección circular del túnel con poco techo.

$$S_i = \frac{C_i h_i + E_i \tan \phi_i}{FS} \quad (3)$$

$$S_{i+1} = \frac{C_i h_{i+1} + E_{i+1} \tan \phi_i}{FS} \quad (4)$$

donde:

$E_i, E_{i+1}$ : Empuje horizontal en cada dovela.

$C_i, \phi_i$ : Cohesión y fricción del material donde se desarrolla el túnel.

FS: Factor de seguridad al deslizamiento vertical del material por encima del túnel.

$h_i, h_{i+1}$ : Alturas de las caras verticales de las dovelas.

Sustituyendo las Ecs. 3 y 4, en la Ec. 2, resulta:

$$(E_{i+1} - E_i) \tan \phi_i = FS (\Delta w_i (1 + K_v) + q_y \Delta x_i + P_y) - C_i (h_{i+1} - h_i) \quad (5)$$

$$\Delta E_i = \frac{FS (\Delta w_i (1 + K_v) + q_y \Delta x_i + P_y) - C_i (h_{i+1} - h_i)}{\tan \phi_i} \quad (6)$$

donde:

$\Delta E_i$ : Diferencia entre los empujes horizontales que actúan en una dovela.

- Suma de fuerzas horizontales para toda la masa que entra en el análisis.

$$S\Delta E_i = E_a - E_j + SKh\Delta w_i \tag{7}$$

donde:

$S\Delta E_i$ : Suma de los empujes resultantes de todas dovelas.

$SKh\Delta w_i$ : Suma de las fuerzas sísmicas horizontales que actúan en todas las dovelas.

$E_a, E_j$ : Empuje pasivo en las caras extremas de la masa de suelo que está en análisis.

Sustituyendo la Ec. (6) en la Ec. (7), se tiene:

$$FS = \frac{E_a - E_j + \sum Kh\Delta w_i}{\sum \Delta w_i (1 + K_v) + q_y \Delta x_i + P_y - \frac{C_i (h_{i+1} - h_i)}{\tan \phi_i}} \tag{8}$$

La Ec (8) se ha obtenido aplicando el concepto de resistencia movilizada entre las caras de las dovelas, por razón difiere un poco de la clásica en análisis de taludes.

Los empujes pasivos  $E_a$  y  $E_j$ , se obtienen a partir de la teoría de Rankine:

1. Para el caso en que no existe nivel freático en la masa de suelo analizada

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h_a^2 N_\phi + 2Ch_a N_\phi \frac{1}{2} \tag{9}$$

$$E_j = \frac{1}{2} \gamma h_j^2 N_\phi + 2Ch_j N_\phi \frac{1}{2} \tag{10}$$

donde:

$\gamma$ : Peso unitario del material no saturado.

$h_a, h_j$ : Alturas de las caras verticales donde actúan los empujes  $E_a$  y  $E_j$ .

$C$ : Cohesión del material

$N_\phi$ , se expresa como:

$$N_\phi = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \phi \frac{\pi}{180} \right) \tag{11}$$

2. Para el caso en que existe nivel freático en la masa de suelo analizada

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma (h_a - h_{wa})^2 N_\phi + \frac{1}{2} \gamma (2h_a - h_{wa} - h_{wa}^2) N_\phi + 2Ch_a N_\phi \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \gamma_w (2h_a - h_{wa} - h_{wa}^2) \tag{12}$$

$$E_j = \frac{1}{2} \gamma (h_j - h_{wj})^2 N_\phi + \frac{1}{2} \gamma (2h_j - h_{wj} - h_{wj}^2) N_\phi + 2Ch_j N_\phi \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \gamma_w (2h_j - h_{wj} - h_{wj}^2) \tag{13}$$

donde:

$h_{wa}, h_{wj}$ : Alturas de agua que afecta el empuje pasivo en las caras verticales, que pasan por "a" y "j".

$\gamma'$ : Peso unitario efectivo del material.

Por tratarse de la resistencia al corte, los empujes  $E_a$  y  $E_j$ , deben expresarse como:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma (h_a - h_{wa})^2 N_\phi + \frac{1}{2} \gamma (2h_a - h_{wa} - h_{wa}^2) N_\phi + 2Ch_a N_\phi \frac{1}{2} \tag{14}$$

$$E_j = \frac{1}{2} \gamma (h_j - h_{wj})^2 N_\phi + \frac{1}{2} \gamma (2h_j - h_{wj} - h_{wj}^2) N_\phi +$$

$$+ 2Ch_j N_{\phi}^{\frac{1}{2}} \tag{15}$$

**4. Aplicación**

La Fig. 2, presenta la geometría representativa del túnel del metro de la ciudad de Valencia, así como también coeficientes sísmicos para las fuerzas horizontales y verticales y los parámetros de resistencia del material.

El cálculo se hará tomando en cuenta lo presentado en la Fig. 1:

- Ángulos  $\theta_i$  medidos desde el eje horizontal, hasta el centro de cada dovela:

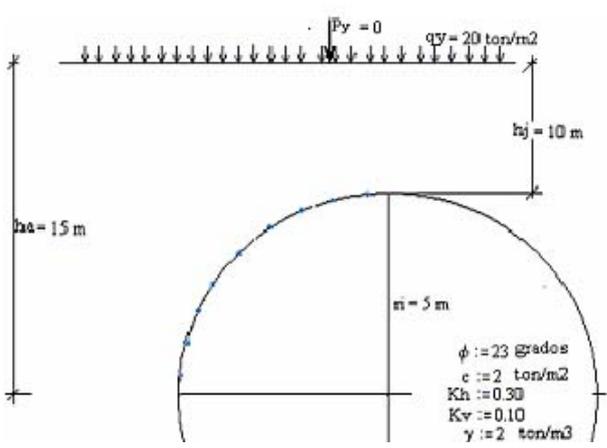
$\theta_1 = 5^\circ$	$\theta_2 = 15^\circ$	$\theta_3 = 25^\circ$
$\theta_4 = 35^\circ$	$\theta_5 = 45^\circ$	$\theta_6 = 55^\circ$
$\theta_7 = 65^\circ$	$\theta_8 = 75^\circ$	$\theta_9 = 85^\circ$

- Ancho de cada dovela:

$\Delta x_1 = r_i (1 - \cos 10^\circ)$	
$\Delta x_2 = r_i (1 - \cos 10^\circ - \cos 20^\circ)$	
$\Delta x_3 = r_i (1 - \cos 20^\circ - \cos 30^\circ)$	
$\Delta x_4 = r_i (1 - \cos 30^\circ - \cos 40^\circ)$	
$\Delta x_5 = r_i (1 - \cos 40^\circ - \cos 50^\circ)$	
$\Delta x_6 = r_i (1 - \cos 50^\circ - \cos 60^\circ)$	
$\Delta x_7 = r_i (1 - \cos 60^\circ - \cos 70^\circ)$	
$\Delta x_8 = r_i (1 - \cos 70^\circ - \cos 80^\circ)$	
$\Delta x_9 = r_i (1 - \cos 80^\circ - \cos 90^\circ)$	
$\Delta x_1 = 0,076$	$\Delta x_2 = 0,226$
$\Delta x_3 = 0,368$	$\Delta x_4 = 0,5$
$\Delta x_5 = 0,616$	$\Delta x_6 = 0,714$
$\Delta x_7 = 0,79$	$\Delta x_8 = 0,842$
$\Delta x_9 = 0,868$	

- Ordenadas de los puntos del centro de cada dovela ubicados en el perímetro del túnel:

$y_{t1} = r_i \text{ sen } \theta_1$	
$y_{t2} = r_i \text{ sen } \theta_2$	
$y_{t3} = r_i \text{ sen } \theta_3$	
$y_{t4} = r_i \text{ sen } \theta_4$	
$y_{t5} = r_i \text{ sen } \theta_5$	
$y_{t6} = r_i \text{ sen } \theta_6$	
$y_{t7} = r_i \text{ sen } \theta_7$	
$y_{t8} = r_i \text{ sen } \theta_8$	
$y_{t9} = r_i \text{ sen } \theta_9$	
$y_{t1} = 0,436$	$y_{t2} = 1,294$
$y_{t3} = 2,113$	$y_{t4} = 2,868$
$y_{t5} = 3,536$	$y_{t6} = 4,096$
$y_{t7} = 4,532$	$y_{t8} = 4,83$
$y_{t9} = 4,981$	



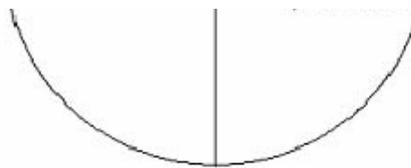


Fig. 2.-Datos geométricos del túnel del Metro de Valencia.

- Ordenadas de la superficie del suelo en la vertical que pasa por el centro de cada dovela:

$y_{\text{superf}_1} = 15 \text{ m}$     $y_{\text{superf}_2} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_3} = 15 \text{ m}$     $y_{\text{superf}_4} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_5} = 15 \text{ m}$     $y_{\text{superf}_6} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_7} = 15 \text{ m}$     $y_{\text{superf}_8} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_9} = 15 \text{ m}$

- Determinación de los pesos de las dovelas:

$Dw_1 = \gamma(y_{\text{superf}_1} - yt_1).Dx_1$   
 $Dw_2 = \gamma(y_{\text{superf}_2} - yt_2).Dx_2$   
 $Dw_3 = \gamma(y_{\text{superf}_3} - yt_3).Dx_3$   
 $Dw_4 = \gamma(y_{\text{superf}_4} - yt_4).Dx_4$   
 $Dw_5 = \gamma(y_{\text{superf}_5} - yt_5).Dx_5$   
 $Dw_6 = \gamma(y_{\text{superf}_6} - yt_6).Dx_6$   
 $Dw_7 = \gamma(y_{\text{superf}_7} - yt_7).Dx_7$   
 $Dw_8 = \gamma(y_{\text{superf}_8} - yt_8).Dx_8$   
 $Dw_9 = \gamma(y_{\text{superf}_9} - yt_9).Dx_9$   
 $Dw_1 = 2,213 \text{ ton/m}$     $Dw_2 = 6,183 \text{ ton/m}$   
 $Dw_3 = 9,493 \text{ ton/m}$     $Dw_4 = 12,13 \text{ ton/m}$   
 $Dw_5 = 14,131 \text{ ton/m}$     $Dw_6 = 15,57 \text{ ton/m}$   
 $Dw_7 = 16,538 \text{ ton/m}$     $Dw_8 = 17,124 \text{ ton/m}$   
 $Dw_9 = 17,398 \text{ ton/m}$

- Ordenadas de los puntos a, b, c, .....j, por donde pasan los planos verticales que definen las caras de las dovelas el perímetro del túnel:

$yt_a = r_i \text{sen } 0^\circ$   
 $yt_a = r_i \text{sen } 10^\circ$   
 $yt_a = r_i \text{sen } 20^\circ$   
 $yt_a = r_i \text{sen } 30^\circ$   
 $yt_a = r_i \text{sen } 40^\circ$   
 $yt_a = r_i \text{sen } 50^\circ$   
 $yt_a = r_i \text{sen } 60^\circ$   
 $yt_a = r_i \text{sen } 70^\circ$   
 $yt_a = r_i \text{sen } 80^\circ$   
 $yt_a = r_i \text{sen } 90^\circ$

- Ordenadas de la superficie del suelo en la vertical que pasa por los puntos a,b,c,.....j:

$y_{\text{superf}_a} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_b} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_c} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_d} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_e} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_f} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_g} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_h} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_i} = 15 \text{ m}$   
 $y_{\text{superf}_j} = 15 \text{ m}$

- Altura de las caras de las dovelas en la vertical que pasa por los puntos a,b,c,.....j:

$ha = y_{\text{superf}_a} - yt_a$   
 $hb = y_{\text{superf}_b} - yt_b$   
 $hc = y_{\text{superf}_c} - yt_c$   
 $hd = y_{\text{superf}_d} - yt_d$

- he = y\_superf\_e - yte
- hf = y\_superf\_f - ytf
- hg = y\_superf\_g - ytg
- hh = y\_superf\_h - yth
- hi = y\_superf\_i - yti
- hj = y\_superf\_j - ytj
- ha = 15,00 m      hb = 14,132 m
- hc = 13,29 m      hd = 12,5 m
- he = 11,786 m    hf = 11,17 m
- hg = 10,67 m      hh = 10,302 m
- hi = 10,076 m     hj = 10 m

• Aplicando la Ec. 8, para la determinar el factor de seguridad al problema planteado, se tiene:

$$FS = \frac{Ea - Ej - 2Kh \left( \begin{array}{l} \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \Delta w_4 + \\ + \Delta w_5 + \Delta w_6 + \Delta w_7 + \Delta w_8 + \\ + \Delta w_9 \end{array} \right)}{\left( (1 + Kv) \left( \begin{array}{l} \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \Delta w_4 + \\ + \Delta w_5 + \Delta w_6 + \Delta w_7 + \Delta w_8 + \\ + \Delta w_9 \end{array} \right) + \right.} \tag{16}$$

$$\left. + qy \left( \begin{array}{l} \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4 + \Delta x_5 + \Delta x_6 + \\ \Delta x_7 + \Delta x_8 + \Delta x_9 \end{array} \right) + \right.$$

$$\left. + Py + (-1)C \left( \begin{array}{l} (ha - hb) + (hb - hc) + (hc - hd) + \\ (hd - he) + (he - hf) + (hf - hg) + \\ (hg - hh) + (hh - hi) + (hi - hj) \end{array} \right) \right)$$

$$\frac{1}{\tan\left(\phi - \frac{\pi}{180}\right)}$$

ecuación que se reduce a:

$$FS = \frac{Ea - Ej - 2Kh \left( \begin{array}{l} \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \Delta w_4 + \\ + \Delta w_5 + \Delta w_6 + \Delta w_7 + \Delta w_8 + \\ + \Delta w_9 \end{array} \right)}{\left( (1 + Kv) \left( \begin{array}{l} \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \Delta w_4 + \\ + \Delta w_5 + \Delta w_6 + \Delta w_7 + \Delta w_8 + \\ + \Delta w_9 \end{array} \right) + \right.} \tag{17}$$

$$\left. + qy \left( \begin{array}{l} \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4 + \Delta x_5 + \Delta x_6 + \\ \Delta x_7 + \Delta x_8 + \Delta x_9 \end{array} \right) + \right.$$

$$\left. + Py + (-1)C(ha - hj) \right)$$

$$\frac{1}{\tan\left(\phi - \frac{\pi}{180}\right)}$$

Para un material con cohesión c = 2 ton/m2 y Φ = 23 ° se encuentra FS = 1.5 (suelo no saturado). Este facto seguridad indica que aparentemente la excavación es segura, sin tener ningún tipo de soporte. Sin emb considerando que una excavación confiable al avance es aquella hecha en roca con una cohesión y fricción proporcione estabilidad permanente, se analizará este caso tomando la clasificación geomecánica de Bienia (1974), lo cual se presenta a continuación.

• Si el medio donde se hace la excavación para el túnel es de mayor calidad:  
 Para un material de cohesión c = 42 ton/m2 y Φ = 45° (Bieniawski, 1974), resulta FS= 63.15. Para este facto seguridad, el túnel no requiere ningún tipo de soporte o de tratamiento.

Para un material de cohesión c = 30 ton/m2 y Φ = 35° (Bieniawski, 1974)

Para un material de cohesión c = 2 ton/m2 y Φ = 23 °. Un material que proporcione estos parámetros de resiste es seguro al avance en la excavación del túnel, pudiéndose tener longitudes hasta de 8 m, sin ningún tratamie hasta por 6 meses. El factor de seguridad en este caso resulta FS = 7.20. Para este facto de seguridad al avance

nasta por 6 meses. El factor de seguridad en este caso resulta  $FS = 7.30$ . Para este factor de seguridad el avance puede hacer a sección completa, con bulonaje local en la bóveda y 5 cm de gunitado para la bóveda.

- Considerando otro tipo de material comprendido en la clasificación de Bieniawski (1974) y al cual ya se le tiene cierta prevención en el avance del túnel: para  $c=25 \text{ ton/m}^2$  y  $\Phi = 27^\circ$ , se obtiene un  $FS = 3.94$ . Este factor de seguridad, ya indica que los avances deben de realizarse con una galería en clave y bataches, con bulonaje sistemático y de 5 a 10 cm de gunita en la bóveda. En este caso se pueden tener hasta 5 m de longitud sin ningún tipo de tratamiento hasta por una semana.

- Para un material clasificado por Bieniawski (1974) como mediocre: para  $c = 15 \text{ ton/m}^2$  y  $\Phi = 20^\circ$ , se obtiene  $FS = 1.86$ . Para este factor de seguridad, se requiere aplicación de gunita según avanza la construcción, de 10 cm para la bóveda y 10 cm para los hastiales. Además de un bulonaje sistemático y colocación de cerchas observa que ya este valor del factor de seguridad exige un tratamiento continuo para el avance. Una vez hecha la excavación, puede estar 10 horas sin ningún tratamiento en una longitud de 2.5 m y donde para hacer el avance debe hacer con una galería en la clave y bataches.

- Para la última clasificación que hace Bieniawski (1974), la cual la describe un material de calidad muy mala este caso para  $c = 9 \text{ ton/m}^2$  y  $\Phi = 14^\circ$  se obtiene un  $FS = 1.06$ . Este factor de seguridad indica que para poder hacer los avances en el túnel, es requerido<sup>2</sup> múltiples galerías de 0.5 a 1 m. Un tratamiento con bulonaje continuo de 15 a 20 cm de concreto proyectado para la clave y 15 cm para los hastiales, con colocación de cerchas fue cada 0.75 m

Si se considera que el túnel de la ciudad de Valencia se construye en el mismo suelo, el cual está caracterizado por una cohesión de  $2 \text{ ton/m}^2$  y una fricción de  $23^\circ$ , pero con un techo de 110 m, el factor de seguridad resultante en este caso es de  $FS = 13.77$  lo que indica alta seguridad al avance. Si el túnel tuviera un techo de 40 m, el factor de seguridad resultante sería  $FS = 5.18$ , valor que también se puede interpretar como seguro. Sin embargo, se puede considerar que cualquiera que sea la profundidad a la cual se ubica el túnel, si está construido con un material como el que rodea el túnel del metro de Valencia, se puede decir que el avance es inseguro. Por tanto, en estos casos debe tener presente, que para poder aplicar el método de análisis propuesto, es necesario definir la zona plástica alrededor del túnel, dentro de la cual se realizara la respectiva evaluación del factor de seguridad al avance.

La expresión modificada del factor de seguridad, cuando no se toma en cuenta el empuje pasivo en el centro del túnel, es decir  $E_j = 0$  y cuando además el empuje pasivo  $E_a$ , es considerado hasta la profundidad del techo del túnel (ver Fig. 3), o hasta el centro del túnel, tal como se indicó en la Fig. 1, es:

$$FS = \frac{E_a - 2Kh \left( \begin{array}{l} \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \Delta w_4 + \\ + \Delta w_5 + \Delta w_6 + \Delta w_7 + \Delta w_8 + \\ + \Delta w_9 \end{array} \right)}{\left( (1 + Kv) \left( \begin{array}{l} \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \Delta w_4 + \\ + \Delta w_5 + \Delta w_6 + \Delta w_7 + \Delta w_8 + \\ + \Delta w_9 \end{array} \right) + \right.} \quad (18)$$

$$\left. + qy \left( \begin{array}{l} \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4 + \Delta x_5 + \Delta x_6 + \\ \Delta x_7 + \Delta x_8 + \Delta x_9 \end{array} \right) + \right. \\ \left. \frac{Py + (-1)C(h_a - h_j)}{\tan\left(\frac{\pi}{180}\right)} \right)$$

Los valores de los factores de seguridad, que se obtienen aplicando esta última expresión, donde los empujes pasivos han sido limitados por la abertura del túnel, son:

- Para  $c = 2 \text{ ton/m}^2$  y  $\Phi = 23^\circ$  (túnel de Valencia):  
Aplicando la Ec. 17 y las consideraciones de la Fig. 1,  $FS = 1.29$   
Aplicando la Ec. 18 y las consideraciones de la Fig. 3,  $FS = 1.50$
- Para  $c = 30 \text{ ton/m}^2$  y  $\Phi = 35^\circ$  según la clasificación de Bieniawski (1974):  
Aplicando la Ec. 17 y las consideraciones de la Fig. 1,  $FS = 6.29$   
Aplicando la Ec. 18 y las consideraciones de la Fig. 3,  $FS = 7.30$
- Para  $c = 42 \text{ ton/m}^2$  y  $\Phi = 45^\circ$  según la clasificación de Bieniawski (1974):  
Aplicando la Ec. 17 y las consideraciones de la Fig. 1,  $FS = 54.41$   
Aplicando la Ec. 18 y las consideraciones de la Fig. 3,  $FS = 63.15$
- Para  $c = 25 \text{ ton/m}^2$  y  $\Phi = 27^\circ$  según la clasificación de Bieniawski (1974):  
Aplicando la Ec. 17 y las consideraciones de la Fig. 1,  $FS = 3.39$

Aplicando la Ec. 18 y las consideraciones de la Fig. 3,  $FS = 3.94$

• Para  $c = 15 \text{ ton/m}^2$  y  $\Phi = 20^\circ$  según la clasificación de Bieniawski (1974):

Aplicando la Ec. 17 y las consideraciones de la Fig. 1,  $FS = 1.60$

Aplicando la Ec. 18 y las consideraciones de la Fig. 3,  $FS = 1.86$

• Para  $c = 9 \text{ ton/m}^2$  y  $\Phi = 14^\circ$  según la clasificación de Bieniawski (1974):

Aplicando la Ec. 17 y las consideraciones de la Fig. 1,  $FS = 0.91$

Aplicando la Ec. 18 y las consideraciones de la Fig. 3,  $FS = 1.06$

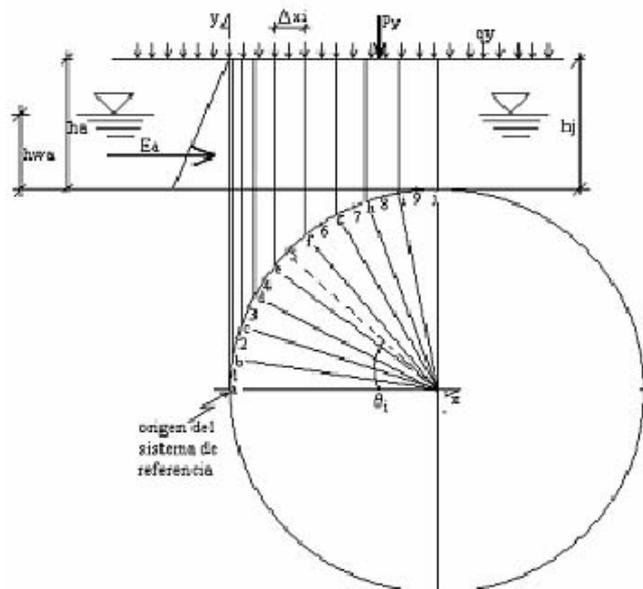


Fig. 3. Sección circular del túnel con poco techo en las condiciones más desfavorables

## 5. Conclusiones

• De las estimaciones hechas del factor de seguridad, a través de la formulación que se ha desarrollado, y c evaluación del mismo considerando la clasificación geomecánica de Bieniawski (1974), se observa como el avance túnel del Metro de Valencia, puede ser clasificado como inseguro ( $FS=1.29$ ) para su construcción y por tanto e un tratamiento continuo e inmediato luego de cada fase, tal como se está realizando.

• De acuerdo a los valores de los factores de seguridad obtenidos aplicando esta metodología y tomando en cu las sugerencias de Bieniawski (1974), factores de seguridad menores que 2, requieren de las previsiones neces: de manera de proporcionar la suficiente seguridad inmediata, para poder continuar haciendo los avances de la subterránea.

• Se observa como la definición de un material de muy mala calidad, hecha por Bieniawski (1974), coincide factores de seguridad menores o iguales a uno ( $FS \leq 1$ )

• En general puede indicarse que un túnel se considera seguro a su avance, para valores del factor de segur mayores que 4.

• Se ha hecho un análisis sencillo, basado en el método de las dovelas, cumpliendo con dos ecuaciones de equil (suma de fuerzas horizontales y verticales), donde se han considerado las fuerzas sísmicas, para un análisis seu estático, lo cual permite evaluar el factor de seguridad en túneles de poco techo construidos en suelos o roca.

• En el análisis se ha aplicado la definición de análisis límite a través de la ley de Mohr- Coulomb.

• Se han presentado dos ecuaciones para estimar el factor de seguridad en túneles de poco techo, cuando exista nivel freático.

• De acuerdo a los resultados obtenidos se cree que las estimaciones hechas a través de la Ec. 16, son convenientes para evaluar la estabilidad de la abertura por ser más exigente la estimación del factor de seguridad

## Referencias

1. Bieniawski Z, 1974, Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling, Proc. 3rd I Cong. Rock Mech., Denver, Vol. 11A.

2. Kirsch G, 1898, Die theorie der elasticitat un die bedurfnise der festigkitlehre, V.D.I.
3. Berry P y Reid D, 1993, Mecánica de suelos, McGraw-Hill Interamericana, S.A.