

Método Propuesto para Analizar la Seguridad de Túneles de Poco Techo en Suelos y Roca

Method Proposed to analyze the Security of Tunnels of Little Roof in Soils and Rock

Silvio H. Rojas Gutiérrez
Escuela de Ingeniería Civil, Departamento de Vías
Universidad de Los Andes,
Mérida, 5101,
silviorojas@ula.ve

Resumen

En este artículo se presente el desarrollo de una metodología, en la cual se analiza túneles circulares de 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 del factor de seguridad FS. El análisis está basado en el método de las dovelas, las fuerzas de empuje pasivo y la definición del factor de seguridad a través de la ley de resistencia de Mohr-Coulomb.

Summary

In this article one presents the development of a methodology, in which circular tunnels of little are analyzed roof and projected in soils or rocks. The study is directed to evaluate the safety of the excavation in the advance of the tunnel, across the safety factor FS. The analysis is based on the method of the dovelas, the forces of passive push and the definition of the safety factor across the law of Mohr-Coulomb's resistance.

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 el diámetro del túnel, se requiere un cumplimiento preciso de las condiciones de borde. Sin embargo se debe indicar que es poco lo escrito para este caso no existiendo una presentación explícita en las referencias especializadas en el tema.

A continuación se desarrolla una metodología, en la cual se analiza 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 un valor proporcionado por el factor de seguridad FS. El análisis está basado en el método de las dovelas, las fuerzas de empuje pasivo y la definición del factor de seguridad a través de la ley de resistencia de Mohr-Coulomb.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La fig. 1, muestra la sección circular de un túnel, donde se ha tomado uno de los cuadrante superiores, para el 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 θ medido en el centro del túnel. La definición del ancho de las dovelas se hace por incrementos en el ángulo θ en 10 grados en el centro del túnel, tal como se aprecia en la figura, donde se ve claramente que las dovelas son de ancho diferentes. Las fuerzas que actúan en cada dovela, se muestra en el detalle que está dentro del círculo, donde está presente el peso de la dovela (Δw_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 talud qy. También

se observa que en los planos verticales que pasan por los puntos “a” y “j”, y que son 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 (1,2,3,9) y los extremos de cada dovela están designados por las letras (a, b, c, d,).

Desarrollo de las ecuaciones

- Suma de fuerzas verticales en cada dovela

$$S_{i+1} - S_i = \Delta W_i(1 + Kv) + qy \cdot \Delta x_i + P_y \quad (1)$$

$$\Delta S_i = \Delta w_i(1 + Kv) + qy \cdot \Delta x_i + P_y \quad (2)$$

donde:

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

ΔS_i : Diferencia de las fuerzas cortantes movilizadas en una dovela.

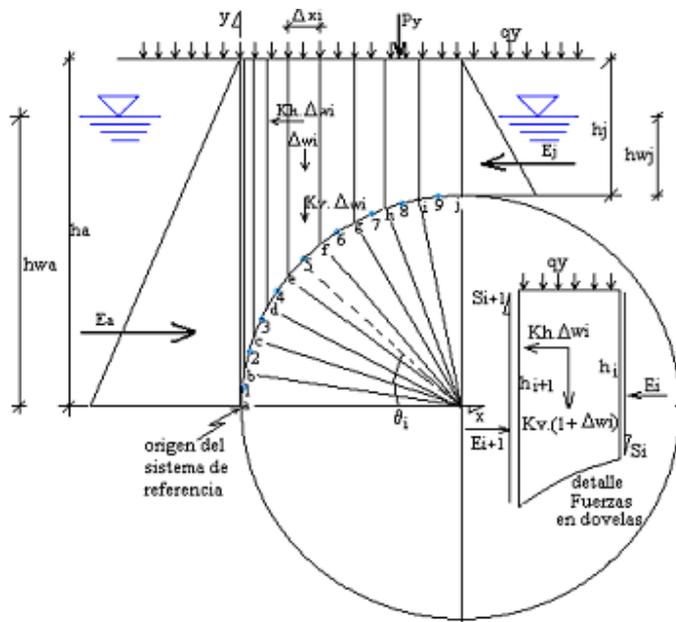


Fig. 1.- Sección circular del túnel con poco techo.

Δw_i : Peso de la dovela.

Kv : Coeficiente sísmico vertical.

Δx_i : Ancho de la dovela.

qy : Sobrecarga en la superficie del túnel.

P_y : Carga puntual que puede actuar en la dovela.

- Resistencia movilizada en las caras verticales de las dovelas

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

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

donde:

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

C_i, ϕ_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 la ec. 3 y 4, en la ec. 2, resulta:

$$(E_{i+1} - E_i) \cdot \tan(\phi_i) = FS(\Delta w_i(1 + Kv) + qy \cdot \Delta x_i + Py) - C_i(h_{i+1} - h_i) \quad (5)$$

$$\Delta E_i = \frac{FS(\Delta w_i(1 + Kv) + qy \cdot \Delta x_i + Py) - C_i(h_{i+1} - h_i)}{\tan \phi_i} \quad (6)$$

donde:

ΔE_i : Diferencia entre los empujes horizontales que actúan en una dovela.

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

$$\sum \Delta E_i = E_a - E_j + \sum Kh \cdot \Delta w_i \quad (7)$$

donde:

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

$\sum Kh \cdot \Delta w_i$: 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 escribe¹:

$$FS = \frac{E_a - E_j + \sum Kh \cdot \Delta w_i}{\sum \left[\frac{\Delta w_i(1 + Kv) + qy \cdot \Delta x_i + Py - C_i(h_{i+1} - h_i)}{\tan(\phi_i)} \right]} \quad (8)$$

Donde los empujes pasivos E_a y E_j , se obtienen a partir de la teoría de Rankine:

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

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot ha^2 \cdot N_\phi + 2 \cdot C \cdot ha \cdot N_\phi^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$E_j = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h_j^2 \cdot N_\phi + 2 \cdot C \cdot h_j \cdot N_\phi^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

donde:

γ : 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_ϕ , se expresa a través como:

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

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

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (ha - hwa)^2 \cdot N_\phi + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (2 \cdot ha \cdot hwa - hwa^2) \cdot N_\phi + 2 \cdot C \cdot ha \cdot N_\phi^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \cdot \gamma w \cdot (2 \cdot ha \cdot hwa - hwa^2) \quad (12)$$

$$E_j = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (h_j - hw_j)^2 \cdot N_\phi + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (2 \cdot h_j \cdot hw_j - hw_j^2) \cdot N_\phi + 2 \cdot C \cdot h_j \cdot N_\phi^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \cdot \gamma w \cdot (2 \cdot h_j \cdot hw_j - hw_j^2) \quad (13)$$

donde:

hwa, hw_j : Alturas de agua que afecta el empuje pasivo en las caras verticales, que pasan por "a" y "j".

γ' : Peso unitario efectivo del material.

¹ La ecuación de factor de seguridad se ha obtenido aplicando el concepto de resistencia movilizada entre las caras de las dovelas, por esa razón la ecuación difiere un poco de la clásica en análisis de taludes.

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

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

$$E_j = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (h_j - h_{wj})^2 \cdot N_\phi + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (2 \cdot h_j \cdot h_{wj} - h_{wj}^2) \cdot N_\phi + 2 \cdot C \cdot h_j \cdot N_\phi^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

APLICACIÓN

La fig. 2, presenta la geometría representativa del túnel de Valencia, así como también los 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 θ_i medidos desde el eje horizontal, hasta el centro de cada dovela

$$\begin{array}{lll} \theta_1 = 5^\circ & \theta_2 = 15^\circ & \theta_3 = 25^\circ \\ \theta_4 = 35^\circ & \theta_5 = 45^\circ & \theta_6 = 55^\circ \\ \theta_7 = 65^\circ & \theta_8 = 75^\circ & \theta_9 = 85^\circ \end{array}$$

- Ancho de cada dovelas

$$\Delta x_1 = r_i (1 - \cos 10)$$

$$\Delta x_2 = r_i (1 - \cos 10 - \cos 20)$$

$$\Delta x_3 = r_i (1 - \cos 20 - \cos 30)$$

$$\Delta x_4 = r_i (1 - \cos 30 - \cos 40)$$

$$\Delta x_5 = r_i (1 - \cos 40 - \cos 50)$$

$$\Delta x_6 = r_i (1 - \cos 50 - \cos 60)$$

$$\Delta x_7 = r_i (1 - \cos 60 - \cos 70)$$

$$\Delta x_8 = r_i (1 - \cos 70 - \cos 80)$$

$$\Delta x_9 = r_i (1 - \cos 80 - \cos 90)$$

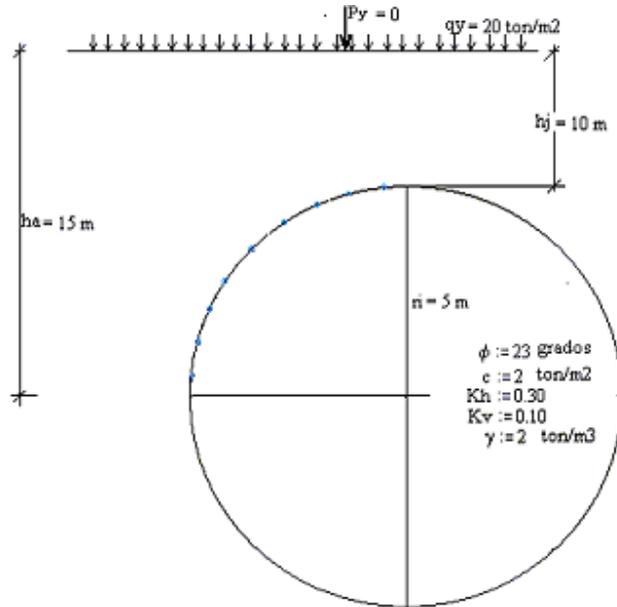


Fig. 2.- Datos del problema correspondiente al túnel del Metro de Valencia.

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= 0,076 & \Delta x_2 &= 0,226 \\ \Delta x_3 &= 0,368 & \Delta x_4 &= 0,5 \\ \Delta x_5 &= 0,616 & \Delta x_6 &= 0,714 \\ \Delta x_7 &= 0,79 & \Delta x_8 &= 0,842 \\ \Delta x_9 &= 0,868 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{t1} &= 0,436 & y_{t2} &= 1,294 \\ y_{t3} &= 2,113 & y_{t4} &= 2,868 \\ y_{t5} &= 3,536 & y_{t6} &= 4,096 \\ y_{t7} &= 4,532 & y_{t8} &= 4,83 \\ y_{t9} &= 4,981 \end{aligned}$$

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

$$y_{t1} = r_i \cdot \text{sen}(\theta_1)$$

$$y_{t2} = r_i \cdot \text{sen}(\theta_2)$$

$$y_{t3} = r_i \cdot \text{sen}(\theta_3)$$

$$y_{t4} = r_i \cdot \text{sen}(\theta_4)$$

$$y_{t5} = r_i \cdot \text{sen}(\theta_5)$$

$$y_{t6} = r_i \cdot \text{sen}(\theta_6)$$

$$y_{t7} = r_i \cdot \text{sen}(\theta_7)$$

$$y_{t8} = r_i \cdot \text{sen}(\theta_8)$$

$$y_{t9} = r_i \cdot \text{sen}(\theta_9)$$

- Ordenadas de la superficie del suelo en la vertical que pasan por el centro de cada dovela.

$$y_{\text{superf}_1} = 15 \text{ m} \quad y_{\text{superf}_2} = 15 \text{ m}$$

$$y_{\text{superf}_3} = 15 \text{ m} \quad y_{\text{superf}_4} = 15 \text{ m}$$

$$y_{\text{superf}_5} = 15 \text{ m} \quad y_{\text{superf}_6} = 15 \text{ m}$$

$$y_{\text{superf}_7} = 15 \text{ m} \quad y_{\text{superf}_8} = 15 \text{ m}$$

$$y_{\text{superf}_9} = 15 \text{ m}$$

- Determinación de los pesos de las dovelas

$$\Delta w_1 = \gamma(y_{\text{superf}_1} - y_{t1}) \cdot \Delta x_1$$

$$\Delta w_2 = \gamma(y_{\text{superf}_2} - y_{t_2}) \cdot \Delta x_2$$

$$y_{ti} = r_i \cdot \text{sen}80$$

$$\Delta w_3 = \gamma(y_{\text{superf}_3} - y_{t_3}) \cdot \Delta x_3$$

$$y_{tj} = r_i \cdot \text{sen}90$$

$$\Delta w_4 = \gamma(y_{\text{superf}_4} - y_{t_4}) \cdot \Delta x_4$$

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

$$\Delta w_5 = \gamma(y_{\text{superf}_5} - y_{t_5}) \cdot \Delta x_5$$

$$y_{\text{superf}_a} = 15 \text{ m}$$

$$\Delta w_6 = \gamma(y_{\text{superf}_6} - y_{t_6}) \cdot \Delta x_6$$

$$y_{\text{superf}_b} = 15 \text{ m}$$

$$\Delta w_7 = \gamma(y_{\text{superf}_7} - y_{t_7}) \cdot \Delta x_7$$

$$y_{\text{superf}_c} = 15 \text{ m}$$

$$\Delta w_8 = \gamma(y_{\text{superf}_8} - y_{t_8}) \cdot \Delta x_8$$

$$y_{\text{superf}_d} = 15 \text{ m}$$

$$\Delta w_9 = \gamma(y_{\text{superf}_9} - y_{t_9}) \cdot \Delta x_9$$

$$y_{\text{superf}_e} = 15 \text{ m}$$

$$\Delta w_1 = 2,213 \text{ ton/m} \quad \Delta w_2 = 6,183 \text{ ton/m}$$

$$y_{\text{superf}_f} = 15 \text{ m}$$

$$\Delta w_3 = 9,493 \text{ ton/m} \quad \Delta w_4 = 12,13 \text{ ton/m}$$

$$y_{\text{superf}_g} = 15 \text{ m}$$

$$\Delta w_5 = 14,131 \text{ ton/m} \quad \Delta w_6 = 15,57 \text{ ton/m}$$

$$y_{\text{superf}_h} = 15 \text{ m}$$

$$\Delta w_7 = 16,538 \text{ ton/m} \quad \Delta w_8 = 17,124 \text{ ton/m}$$

$$y_{\text{superf}_i} = 15 \text{ m}$$

$$\Delta w_9 = 17,398 \text{ ton/m}$$

$$y_{\text{superf}_j} = 15 \text{ m}$$

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

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

$$y_{ta} = r_i \cdot \text{sen}0$$

$$h_a = y_{\text{superf}_a} - y_{ta}$$

$$y_{tb} = r_i \cdot \text{sen}10$$

$$h_b = y_{\text{superf}_b} - y_{tb}$$

$$y_{tc} = r_i \cdot \text{sen}20$$

$$h_c = y_{\text{superf}_c} - y_{tc}$$

$$y_{td} = r_i \cdot \text{sen}30$$

$$h_d = y_{\text{superf}_d} - y_{td}$$

$$y_{te} = r_i \cdot \text{sen}40$$

$$h_e = y_{\text{superf}_e} - y_{te}$$

$$y_{tf} = r_i \cdot \text{sen}50$$

$$h_f = y_{\text{superf}_f} - y_{tf}$$

$$y_{tg} = r_i \cdot \text{sen}60$$

$$h_g = y_{\text{superf}_g} - y_{tg}$$

$$y_{th} = r_i \cdot \text{sen}70$$

$$h_h = y_{\text{superf}_h} - y_{th}$$

$$h_i = y_{\text{superf}_i} - y_{ti}$$

$$h_j = y_{\text{superf}_j} - y_{tj}$$

- 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

- Aplicación de la ec. 8, para la determinación del factor de seguridad al problema planteado.

$$FS = \frac{Ea - Ej - 2 \cdot Kh \cdot \left(\begin{array}{l} \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \\ \Delta w_4 + \Delta w_5 + \Delta w_6 + \\ \Delta w_7 + \Delta w_8 + \Delta w_9 \end{array} \right)}{\left[\begin{array}{l} (1 + Kv) \cdot \left(\begin{array}{l} \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \Delta w_4 + \\ \Delta w_5 + \Delta w_6 + \Delta w_7 + \Delta w_8 + \end{array} \right) \dots + \\ \Delta w_9 \\ qy \cdot \left(\begin{array}{l} \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4 + \Delta x_5 + \Delta x_6 + \\ \Delta x_7 + \Delta x_8 + \Delta x_9 \end{array} \right) + \\ Py + (-1) \cdot C \cdot \left[\begin{array}{l} (ha - hb) + (hb - hc) + (hc - hd) + \\ (hd - he) + (he - hf) + (hf - hg) + \\ (hg - hh) + (hh - hi) + (hi - hj) \end{array} \right] \end{array} \right]}{\tan\left(\phi \cdot \frac{\pi}{180}\right)} \quad (16)$$

La ecuación se reduce a:

⇒

$$FS = \frac{Ea - Ej - 2 \cdot Kh \cdot \left(\begin{array}{l} \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \\ \Delta w_4 + \Delta w_5 + \Delta w_6 + \\ \Delta w_7 + \Delta w_8 + \Delta w_9 \end{array} \right)}{\left[\begin{array}{l} (1 + Kv) \cdot \left(\begin{array}{l} \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \Delta w_4 + \\ \Delta w_5 + \Delta w_6 + \Delta w_7 + \Delta w_8 + \end{array} \right) \dots + \\ \Delta w_9 \\ qy \cdot \left(\begin{array}{l} \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4 + \Delta x_5 + \Delta x_6 + \\ \Delta x_7 + \Delta x_8 + \Delta x_9 \end{array} \right) + \\ Py + (-1) \cdot C \cdot (ha - hj) \end{array} \right]}{\tan\left(\phi \cdot \frac{\pi}{180}\right)} \quad (17)$$

⇒ Para la cohesión del material $c = 2 \text{ ton/m}^2$ y $\phi = 23^\circ$
 **FS = 1.5** (suelo no saturado)

Aparentemente el factor de seguridad indica que la excavación es segura, sin tener ningún tipo de soporte. Sin embargo consideremos que una excavación confiable al avance es aquella hecha en roca, con una cohesión y fricción que proporcione una estabilidad permanente. Veamos ese caso tomando la clasificación geomecánica de Bieniawski (1974), tal como se hace a continuación.

⇒ Veamos cual es el factor de seguridad, si el medio donde se hace la excavación para el túnel es de mayor calidad.

Para la cohesión del material $c = 42 \text{ ton/m}^2$ y $\phi = 45^\circ$ Bieniawski (1974), resulta **FS = 63.15**

Para este factor de seguridad, el túnel no requiere ningún tipo de soporte o de tratamiento².

⇒ Para la cohesión del material $c = 30 \text{ ton/m}^2$ y $\phi = 35^\circ$ Bieniawski (1974)

Un material que proporcione estos parámetros de resistencia, es segura al avance en la excavación del túnel,

² Esta es la recomendación que hace Bieniawski (1974), para una roca que proporcione estos parámetros de resistencia.

donde se pueden tener longitudes hasta de 8 m, sin ningún tratamiento, hasta por 6 meses. El factor de seguridad en este caso resulta **FS = 7.30**

Para este factor de seguridad el avance se puede hacer a sección completa, con bulonaje local en la bóveda y 5 cm de gunitado para la bóveda³.

⇒ Otro tipo de material que entra en la clasificación de Bieniawski (1974) y al cual ya se le debe tener cierta prevención en el avance del túnel.
 $c = 25 \text{ ton/m}^2$ y $\phi = 27^\circ$. Resulta 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.

Aquí se pueden tener hasta 5 m de longitud sin ningún tipo de tratamiento hasta por una semana.

⇒ Veamos un material clasificado por Bieniawski (1974) como mediocre.
 $c = 15 \text{ ton/m}^2$ $\phi = 20^\circ$, en este caso **FS = 1.86**

Para este factor de seguridad, se requiere aplicación de gunita según avanza la construcción, de 10 a 15 cm para la bóveda y 10 cm para los hastiales. Además de un bulonaje sistemático y colocación de cerchas. Vemos pues 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 se debe hacer con una galería en la clave y bataches.

⇒ Por último veamos la última clasificación que hace Bieniawski (1974), la cual la describe como una calidad de material muy mala.
 $c = 9 \text{ ton/m}^2$ $\phi = 14^\circ$. Se obtiene un **FS = 1.06**

Este factor de seguridad indica que para poder hacer los avances en el túnel, es requerido² múltiples galerías de 0.5 a 1 m. Un tratamiento con bulonaje continuo y de 15 a 20 cm de concreto proyectado para la clave y 15 cm para los hastiales, con colocación de cerchas fuertes 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 ton/m² y una fricción de 23°, pero con un techo de 110 m, el factor de seguridad resultante en este caso es de **FS = 13.77**. Lo cual indica alta seguridad al avance. Pero si el túnel tuviera un techo de 40 m, el factor de seguridad resultante será de **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 éste está construido en 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 se 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 realizaría la respectiva evaluación del factor de seguridad al avance.
- Se quiere dejar también la expresión modificada del factor de seguridad, donde no se toma en cuenta el empuje pasivo en el centro del túnel, es decir $E_j = 0$ y donde 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.

$$FS = \frac{Ea - 2 \cdot Kh \cdot \begin{pmatrix} \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \\ \Delta w_4 + \Delta w_5 + \Delta w_6 + \\ \Delta w_7 + \Delta w_8 + \Delta w_9 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} (1 + Kv) \cdot \begin{pmatrix} \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 + \Delta w_4 + \\ \Delta w_5 + \Delta w_6 + \Delta w_7 + \Delta w_8 + \dots + \\ \Delta w_9 \end{pmatrix} + \\ qy \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4 + \Delta x_5 + \Delta x_6 + \\ \Delta x_7 + \Delta x_8 + \Delta x_9 \end{pmatrix} + \\ Py + (-1) \cdot C \cdot (ha - hj) \end{pmatrix} \cdot \tan\left(\phi \cdot \frac{\pi}{180}\right)}$$

³ Estos comentarios son los que presenta Bieniawski (1974) en su clasificación geomecánica.

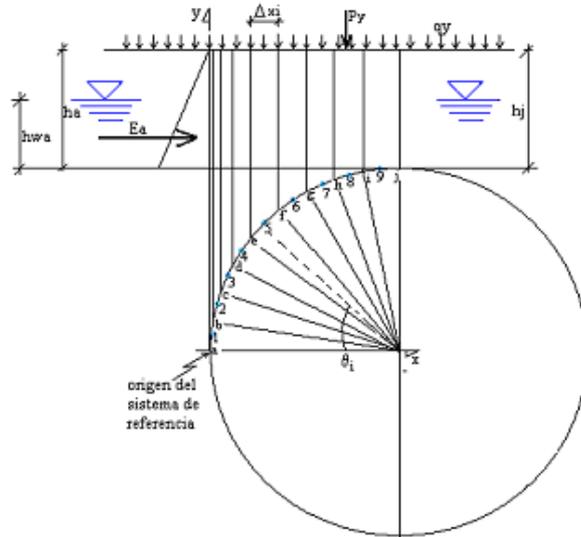


Fig. 3. Sección circular del túnel con poco techo en condiciones más desfavorables

Veamos 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.

⇒ $c = 2 \text{ ton/m}^2$ y $\phi = 23^\circ$ (túnel de Valencia)

Aplicando la ec. 18 y las consideraciones de la fig. 1,
FS = 1.29

Aplicando la ec. 17 y las consideraciones de la fig. 3,
FS = 1.50

⇒ $c = 30 \text{ ton/m}^2$ y $\phi = 35^\circ$ (Clasificación de Bieniawski (1974))

Aplicando la ec. 18 y las consideraciones de la fig. 1,
FS = 6.29

Aplicando la ec. 17 y las consideraciones de la fig. 3,
FS = 7.30

⇒ $c = 42 \text{ ton/m}^2$ y $\phi = 45^\circ$ (Clasificación de Bieniawski (1974))

Aplicando la ec. 18 y las consideraciones de la fig. 1,
FS = 54.41

Aplicando la ec. 17 y las consideraciones de la fig. 3,
FS = 63.15

⇒ $c = 25 \text{ ton/m}^2$ y $\phi = 27^\circ$ (Clasificación de Bieniawski (1974))

Aplicando la ec. 18 y las consideraciones de la fig. 1,
FS = 3.39

Aplicando la ec. 17 y las consideraciones de la fig. 3,
FS = 3.94

⇒ $c = 15 \text{ ton/m}^2$ y $\phi = 20^\circ$ (Clasificación de Bieniawski (1974))

Aplicando la ec. 18 y las consideraciones de la fig. 1,
FS = 1.60

Aplicando la ec. 17 y las consideraciones de la fig. 3,
FS = 1.86

⇒ $c = 9 \text{ ton/m}^2$ y $\phi = 14^\circ$ (Clasificación de Bieniawski (1974))

Aplicando la ec. 18 y las consideraciones de la fig. 1,
FS = 0.91

Aplicando la ec. 17 y las consideraciones de la fig. 3,
FS = 1.06

CONCLUSIONES

- De las estimaciones hechas del factor de seguridad, a través de la formulación que se ha desarrollado, y de la evaluación del mismo considerando la clasificación geomecánica de Bieniawski (1974), vemos como el avance del túnel del Metro de Valencia, puede ser clasificado como inseguro (FS = 1.29) para la construcción del mismo y por tanto exige de 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 a través de esta metodología y tomando en cuenta las sugerencias de Bieniawski (1974), factores de seguridad menores de 2, requieren de las previsiones necesarias de manera de proporcionar la suficiente seguridad inmediata, para poder continuar haciendo los avances de la obra subterránea.
- Se ve como la definición de un material de muy mala calidad, hecha por Bieniawski (1974), coincide con factores menores o iguales a uno ($FS \leq 1$)
- En general puede indicarse que un túnel se considera seguro a su avance, para valores de factores de seguridad mayores a 4.
- Se ha hecho un análisis sencillo, basado en el método de las dovelas, cumpliendo con dos ecuaciones de equilibrio (suma de fuerzas horizontales y verticales), donde se ha considerado las fuerzas sísmicas, para un análisis pseudo - estáticos, 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 o no nivel freático.
- De acuerdo a los resultados presentados, creemos que las estimaciones hechas a través de la ec. 18, son más convenientes para evaluar la estabilidad de la abertura, siendo más exigente en la estimación del factor de seguridad.

BIBLIOGRAFÍA

Bieniawski Z., “Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling”, Proc. 3rd Intl. Cong. Rock Mech., Denver, vol. 11A, 1974.

Kirsch G., “Die theorie der elasticitat un die bedurfnisse der festigkitlehre”, V.D.I., 1898.

Berry P. Y Reid D., “Mecánica de suelos”, McGraw-Hill Interamericana, S.A., 1193.
