

## Cálculo simplificado de taludes de excavaciones temporales

---

Se presentan ábacos para evaluación de estabilidad no drenada de taludes temporales de excavación, incluyendo sobrecargas y geometrías arbitrarias. Adicionalmente se incluye la metodología para su desarrollo.

---

**ALVARO J. GONZALEZ G.**  
Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería.  
Universidad Nacional de Colombia.  
Director Investigación de Deslizamientos. UN - MOPT.  
Consultor Geotécnico - Bogotá, Colombia.

### INTRODUCCION

En la evaluación de estabilidad taludes para excavaciones temporales abiertas es usual encontrar geometrías diferentes a la de un talud simple, sobrecargas verticales y aún cargas verticales ascendentes. La estabilidad de estos taludes, dado su tiempo de permanencia limitado, normalmente se evalúa con condiciones no drenadas ( $\phi_u = 0$ ). Dado que las ayudas rápidas de cálculo tan solo existen para taludes simples (figura 1), no es fácil evaluar rápidamente las condiciones de estabilidad con las condiciones cambiantes en obras con este tipo de excavaciones. En el presente artículo se presenta un método simplificado de evaluación de estabilidad no drenada para incluir diversas geometrías de talud y el efecto de sobrecargas verticales positivas o negativas, incluyendo ábacos para la rápida evaluación de este tipo de taludes, ayudas que no se conoce estén disponibles en la literatura técnica actual.

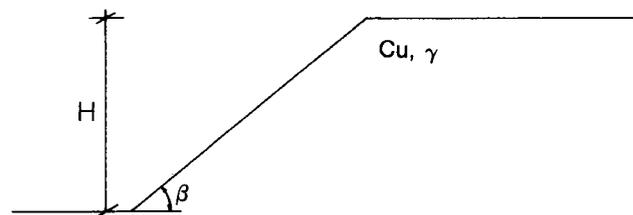


FIGURA 1. Talud simple

### CALCULO GENERAL DE ESTABILIDAD NO DRENADA

Con base en la metodología desarrollada por el autor para cálculo de estabilidad en talud infinito, (González, 1983), con análisis limite se plantea un modelo de cálculo general en la siguiente forma (figura 2).

- Se asume un material homogéneo, isotrópico, con peso unitario  $\gamma$  y resistencia no drenada  $C_u$ .
- El talud es simple con ángulo  $\beta$  y altura  $H$ .
- El modo de falla es circular con la cuerda principal

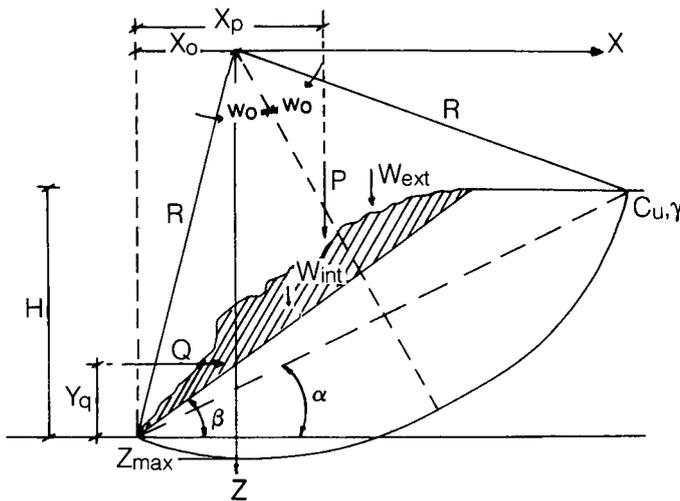


FIGURA 2. Talud compuesto y/o con cargas externas.

haciendo un ángulo  $\alpha$  con la horizontal, ángulo central  $2w_0$  y radio  $R$ . La falla es por el pie del talud.

- d) El centro de coordenadas  $X, Z$  coincide con el centro el círculo y es móvil, principal artificio de cálculo.
- e) Hay sobrecarga vertical ( $P$ ), actuando a una distancia  $X_p$  del pie del talud y sobrecarga horizontal ( $Q$ ), actuando a una distancia  $Y_q$  sobre el pie del talud. El sentido positivo es el indicado en la figura 2.

Con estas variables y la metodología anterior (1983) se pueden plantear las siguientes expresiones:

$$H = 2R \text{sen} w_0 \text{sen} \alpha \quad (1)$$

$$X_0 = H/2 (\text{cot} w_0 - \text{cot} \alpha) \quad (2)$$

el cálculo de momentos actuantes da como resultado:

$$\begin{aligned} M_{act} &= \frac{\gamma H^3}{12} [A \cdot \text{cot} w_0 \text{cot} \alpha + (\text{cot} w_0 - \text{cot} \alpha) + C] \\ &= \frac{\gamma H^3}{12} M \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{en donde: } A = 3 - n_q \quad (4)$$

$$B = n_p - 3 \text{cot} \beta \quad (5)$$

$$C = 1 + 2m n_p - 2 \text{cot}^2 \beta + n_q (2e - 1) \quad (6)$$

$$y \quad n_p = 6P/\gamma H^2 \quad m = X_p/H \quad (7)$$

$$n_q = 6Q/\gamma H^2 \quad e = Y_q/H \quad (8)$$

e! momento resistente para condición no drenada viene dado por

$$M_{resist} = \frac{C_u H^2}{2} \frac{w_0}{\text{sen}^2 w_0 \text{sen}^2 \alpha} \quad (9)$$

de donde el factor de seguridad viene dado por:

$$F_{su} = \frac{M_{resist}}{M_{act}} = \frac{6C_u}{\gamma H} \frac{w_0}{M \text{sen}^3 w_0 \text{sen}^2 \alpha} \quad (10)$$

para hallar el factor de seguridad mínimo se necesita:

$$dF = \frac{\partial F}{\partial w_0} dw_0 + \frac{\partial F}{\partial \alpha} d\alpha = 0 \quad (11)$$

y entonces se requiere resolver simultáneamente para  $\alpha$  y  $w_0$

$$\frac{\partial F}{\partial w_0} = 0 = \frac{\text{csc}^2 w_0}{M^2} \left[ -w_0 \frac{\partial M}{\partial w_0} + M(1 - 2 w_0 \text{cot} w_0) \right] \quad (12)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0 = -\frac{\text{csc}^2 \alpha}{M^2} \left[ \frac{\partial M}{\partial \alpha} + 2M \text{cot} \alpha \right] \quad (13)$$

de la ecuación (13) es posible hallar

$$\text{cot} \alpha_{crit} = -N + \sqrt{1 + N^2} \quad (14)$$

(con la condición  $\text{cot} \alpha_{crit} \geq m$ )

en donde

$$N = \frac{\beta \text{cot} w_0 + C}{\text{cot} w_0 - B} \quad (15)$$

$$\text{para } A \text{cot} w_0 = B \quad \alpha = \pi/2$$

reemplazando (14) en (12) es posible obtener numéricamente

$$0 \leq w_0 \text{ crit} \leq \pi/2 \quad \text{y } M_{crit} \quad (16)$$

para el mínimo de factor de seguridad. Empleando la expresión (10) y haciendo  $F_{su} = 1$  se obtiene el valor crítico del número de estabilidad dado por

$$N_{sucrit} = \frac{C_{ucrit}}{\gamma H} = \frac{M_{crit} + \text{Sen}^2 w_0 \text{crit} \text{Sen}^2 \alpha_{crit}}{6 w_0 \text{crit}} \quad (17)$$

valor mínimo requerido para estabilidad y entonces el factor de seguridad viene dado por:

$$F_{su} = \frac{N_{su}}{N_{sucrit}} = \frac{C_u}{C_{ucrit}} \quad (18)$$

### CALCULO SIMPLIFICADO DE ESTABILIDAD

Con el fin de reducir el número de variables y facilitar las evaluaciones se apeló a un artificio de cálculo empleando el método de superposición:

a) Se adoptan:

$$\beta = 90^\circ = \pi/2 \quad (\text{cot} \beta = 0) \quad (19)$$

$$n_q = 0 \quad (20)$$

b) Con este artificio se asume un talud básico de 90° y altura H, al cual se le deducen y/o suman los efectos de geometría del talud y sobrecargas verticales, con una resultante Pr actuando a una distancia Xr del pie del talud obteniéndose (Figura 3)

$$n_{Pr} = 6Pr/\gamma H^2 \quad m_r = X_r/H \quad (21)$$

c) Con las simplificaciones de (a) se tiene:

$$A_r = 3 \quad (4a)$$

$$B_r = n_{Pr} \quad (5a)$$

$$C_r = 2m_r n_{Pr} + 1 \quad (6a)$$

$$N_r = \frac{n_{Pr} (2m_r + \cot w_0) + 1}{3 \cot w_0 - n_{Pr}} \quad (15a)$$

d) Con las restricciones

$$\cot \alpha_{crit} \geq m_r \quad (14a)$$

$$0 \leq w_{0crit} \leq 1.11 (\pi/2) \quad (16a)$$

y las ecuaciones (12) a (15) es posible obtener Nsu crítico para los siguientes valores de nPr y mr

$$-30 < n_{Pr} < 30 \quad (22a)$$

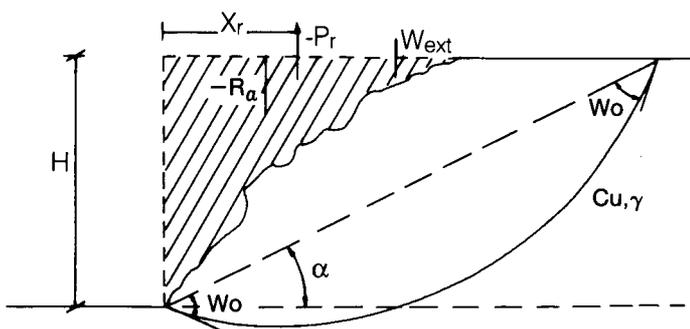


FIGURA 3. Cálculo simplificado de estabilidad

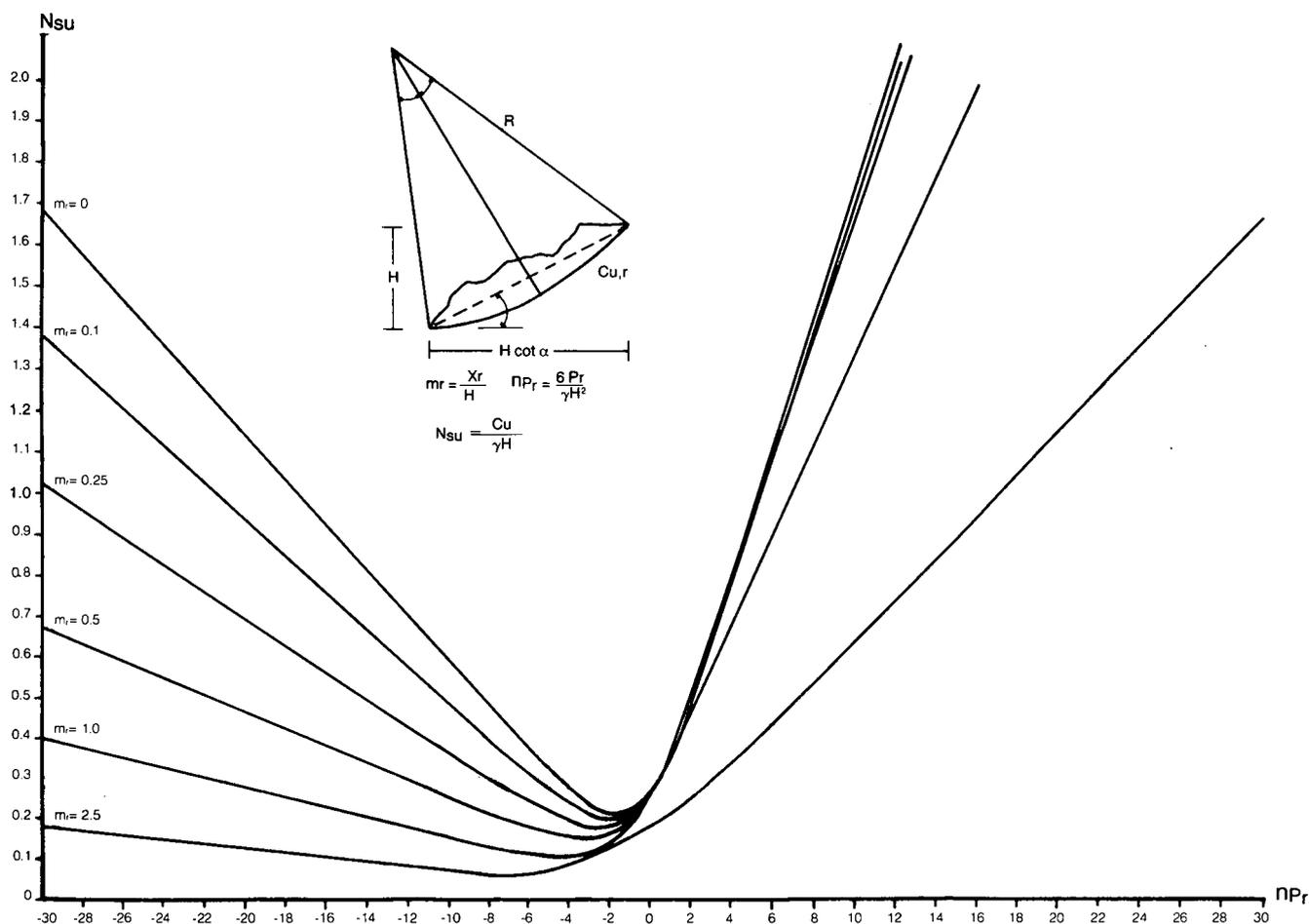


FIGURA 4. nPr vs Nsu Cálculo simplificado de taludes de excavación

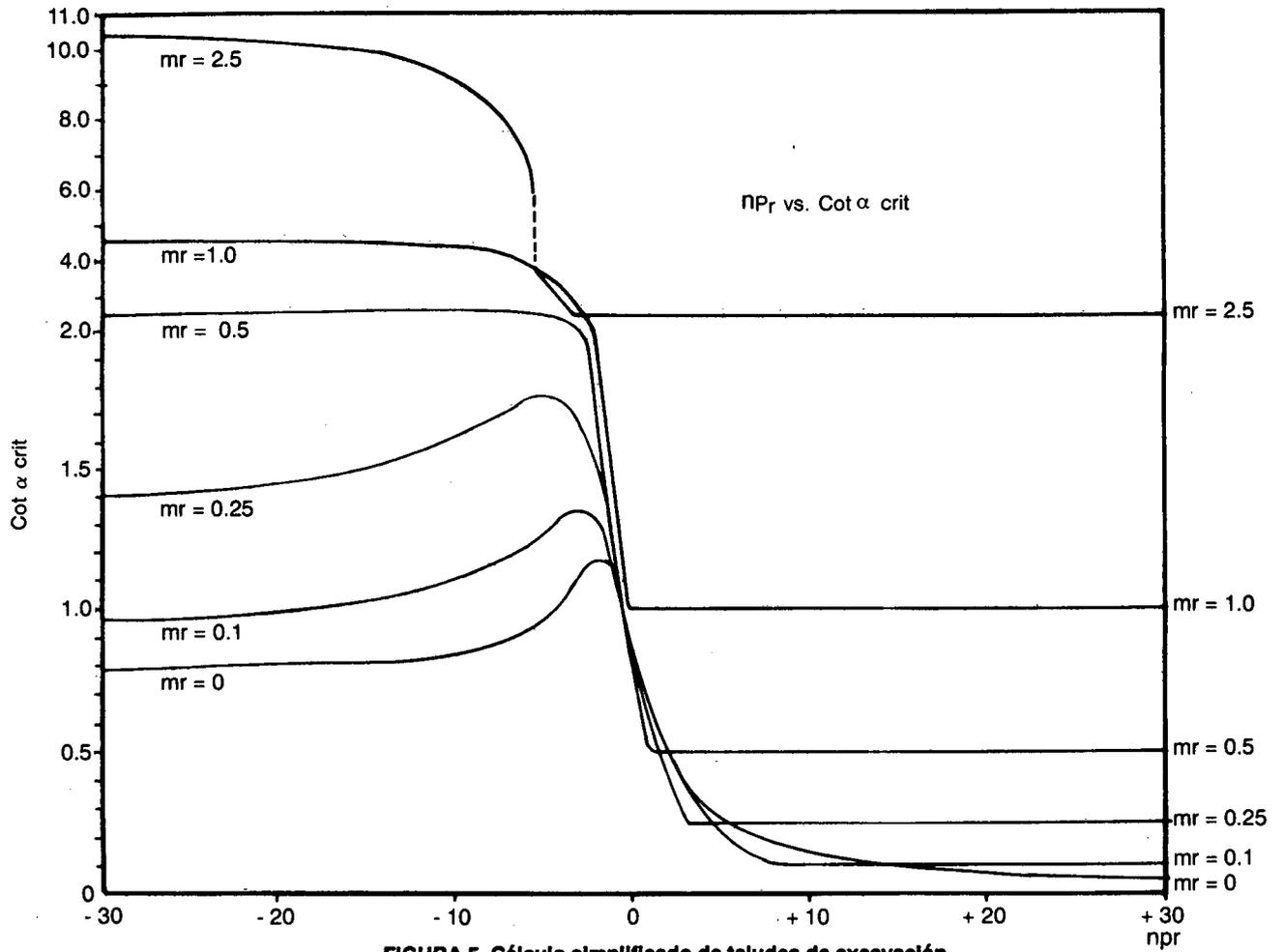


FIGURA 5. Cálculo simplificado de taludes de excavación

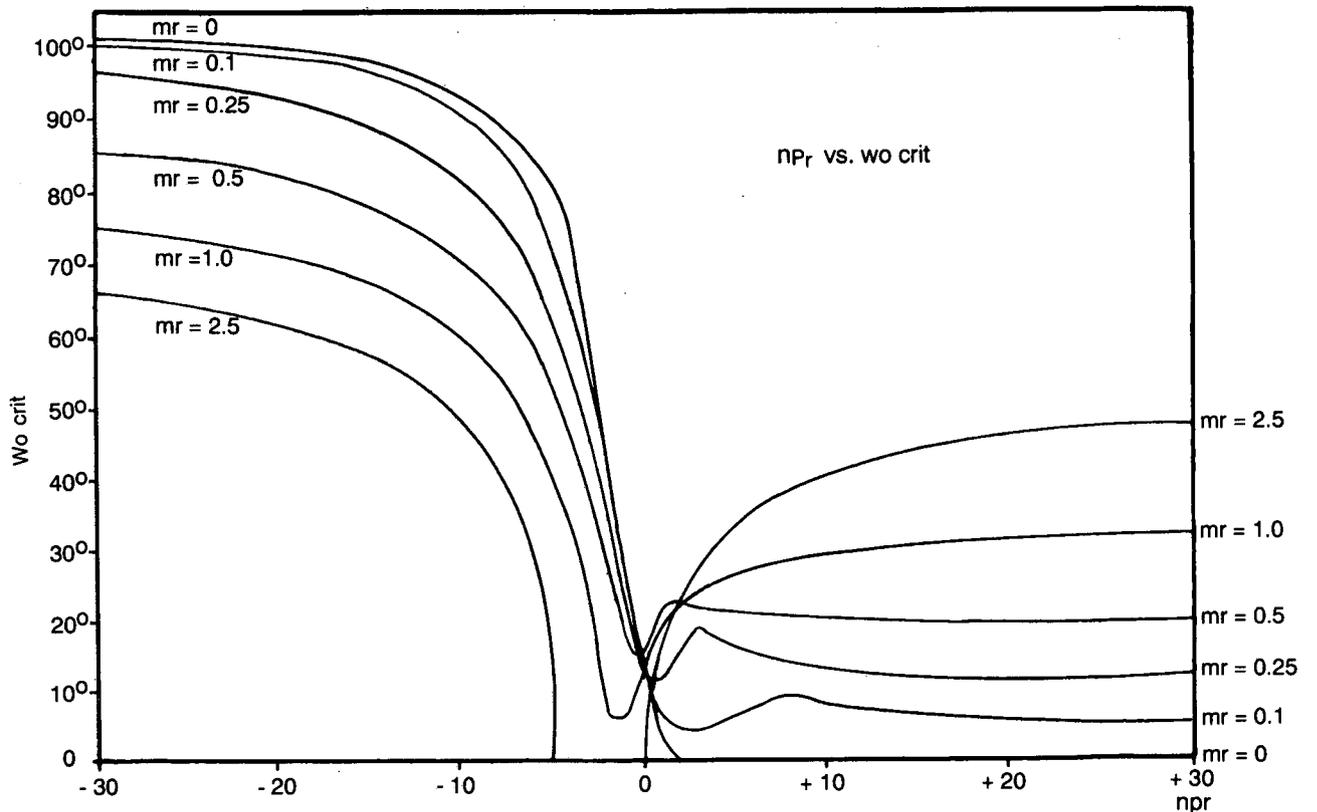


FIGURA 6

$$0 \leq m_r \leq 2.5 \quad (22b)$$

Estos valores se presentan en la figura 4, la cual permite el cálculo de la estabilidad de taludes.

#### e) Restricciones

Para cumplir las ecuaciones (14a) y (16a) se obtuvieron además las figuras (5) y (6) que dan los valores de  $\cot \alpha$  y  $w_{or}$  con las cuales se obtuvieron los valores de  $N_{su}$ . Adicionalmente es recomendable que la longitud  $L$  de toda la geometría adicional al talud de  $90^\circ$  cumpla la condición.

$$0 < L < H \cot(\alpha_{crit}) \quad (23)$$

#### f) Limitaciones

f1) Sólo se considera falla por el pie del talud

f2) En caso de taludes no homogéneos es necesario, como una primera aproximación muy burda, usar:

$$C_u = C_u = \frac{\sum_0^{Z_{max}} C_{ui} \Delta z_i}{\sum_0^{Z_{max}} \Delta z} \quad (24)$$

con  $Z_{max}$  = profundidad del círculo crítico, lo cual se puede resolver por tanteos

f3) No se han considerado cargas horizontales ( $n_q=0$ ), y para este análisis particular es necesario resolver las ecuaciones generales (3) a (18).

f4) Todas las demás de equilibrio límite y análisis no drenado ( $u = 0$ ).

### Agradecimientos

Los resultados presentados en este trabajo se iniciaron a partir de una consulta técnica que la Sociedad Colombiana de Ingenieros absolvió sobre excavaciones temporales para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y en la cual participó activamente el autor, empleando las ecuaciones generales. Posteriormente y dentro de la Investigación de Deslizamientos que la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional adelanta para el Ministerio de Obras Públicas y Transporte se refinó y simplificó el método.

El autor agradece la colaboración del personal de la Investigación de Deslizamientos UN-MOPT para la presentación de este artículo, en especial a la señorita Berenice Guío P. por la mecanografía y a los Sres. Armando Granados y Ramón Garzón por la elaboración de las figuras.

### Referencias

- GONZALEZ, A.J. (1983) - Falla Circular en Talud Infinito. III Jornadas Geotécnicas - SCI - Abril de 1983.