

Diploma de Postítulo Geomecánica Aplicada al Diseño Minero

Diseño geotécnico de taludes Análisis equilibrio límite

Javier Vallejos

Octubre 2024



Diploma de Postítulo en Geomecánica Aplicada al Diseño Minero

Componentes geométricas de un talud minero

- Cada una de estas componentes debe ser diseñada por separado
- Diferentes modos de falla dominaran a escalas distintas





Parámetros de diseño





Parámetros de diseño

Banco simple





Metodología de diseño





- Superficie de falla debe ser estimada o asumida.
- Basado en una comparación entre fuerzas/momentos resistentes con fuerzas/momentos deslizantes.
- La deformación del material no se considera.
- La resistencia al corte es movilizada completamente a lo largo de la superficie de falla en el momento de la falla.





Determine una expresión para el FS al deslizamiento debido a la carga gravitacional del bloque. Analice el caso c=0, FS=1



Factor de seguridad (FS):

$$FS = \frac{Fuerzas resistentes}{Fuerzas solicitantes}$$

Si *F*S > 1.0 la condición es estable

Esfuerzo normal en la superficie de deslizamiento:

$$\sigma_n = \frac{(W \cos \alpha)}{A}$$

Esfuerzo corte disponible: \longrightarrow Fuerza de corte resistente:

 $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$

 $R = cA + W \cos \alpha \tan \phi$

Wsind

W

ά

R

Wcosα

 $= c + \frac{W \cos \alpha}{A} \tan \phi$

Solicitación:

 $S = W \sin \alpha$



Si FS > 1.0 la condición es estable





Figure 4-25 Surface failure (mobilized zone) in a granular material close to its angle of repose (after Wavrin, 2000).



Ángulos de fricción y cohesión



Resultados del back-análisis de falla de taludes en una variedad de condiciones geológicas, estimando los parámetros de resistencia ϕ , *c* en la falla (Wyllie and Mah, 2004)

Añadiendo puntos adicionales en esta figura para condiciones geológicas locales, es posible desarrollar un gráfico de resistencia del macizo rocoso aplicable a fallas por corte





Resultados del análisis retrospectivo de taludes estables e inestables en pórfido cuprífero, Rajo Atalaya, Rio Tinto, España, sugieren que FS ≥ 1,30 parece razonable.

Hoek (1969)



Análisis Pseudo-Estático



$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W$$
 ; $F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W$

Donde:

- a_h y a_v : Aceleraciones pseudo estáticas horizontales y verticales, respectivamente.
- *g*: Constante de aceleración gravitacional (9.81 m/s²).
- *W*: Peso de la dovela (para método de equilibrio límite).

La razón a/g representa un coeficiente adimensional "k", asociado al concepto de coeficiente sísmico. Los coeficientes k_h y k_v , corresponden a los coeficientes sísmicos pseudo – estáticos horizontales y verticales, respectivamente.



Probabilidad de falla

- Se incluye la variabilidad en las variables que afectan a los resultados del análisis:
 - Calidad macizo rocoso
 - o Resistencia roca intacta
 - o Resistencia estructuras geológicas
 - o Condición hidrogeológica
 - o Geométricas
 - \circ Otras
- Se debe tener especial cuidado con variables correlacionadas.
- Existe varios métodos. Se explica el de MonteCarlo para el caso de bloque deslizante.



Probabilidad de falla



Ejemplo:

- A=71 m²
- W=3375 tons
- α=45 °
- Cohesión:
 - $\,\circ\,$ Distribución normal, c= 0.1 ± 0.03 MPa=10 ± 3 ton/m²
- Fricción:
 - Constante: $\phi = 40^{\circ}$

Factor de seguridad (FS):

 $FS = \frac{\text{Fuerzas resistentes}}{\text{Fuerzas solicitantes}}$

$$FS = \frac{cA + W\cos\alpha \tan\phi}{W\sin\alpha} = \frac{10 * 71 + 3375\cos45\tan40}{3375\sin45} = 1.14$$



Probabilidad de falla



Ejemplo:

- A=71 m²
- W=3375 tons
- α=45 °
- Cohesión:
 - $_{\odot}~$ Distribución normal, c= 0.1 ± 0.03 MPa=10 ± 3 ton/m²
- Fricción:
 - \circ Constante: $\phi = 40^{\circ}$





Tabla 7.1 PROBLEMAS TÍPICOS, PARÁMETROS CRÍTICOS, MÉTODOS DE ANÁLISIS Y CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD GEOTÉCNICA PARA TALUDES (modificada de *Hoek (1991)*)

Situación o Caso		Situación o Caso	Problemas Típicos	Parámetros Críticos	Métodos de Análisis	Criterios de Aceptabilidad	
AL ESTRUCTURAL	CAIDAS	Deslizarmiento, rodado, caida y rebote de piedras y bíoques de roca sueltos en el ta- lud.		Geometría del talud Presencia de piedras y bloques sueltos Coeficientes de restitución de los materiales que forman el talud Presencia de obras para contener o limitar la calda y rebote de piedras y bloques	El calculo de las trayectorias de caída y rebote, basado en cambios de velocidad asociados a cada impacto, resulta generalmente adecuado. Análisis de Monte-Carlo considerando muchas trayectorias y variaciones en la geometría y propiedades del talud son útiles	La localización de la zona de caída de matenal, considerando un número suficientemente grande de casos, permite evaluar la gravedad del proble- ma y diseñar adecuadamente las medidas de esta- bilización (maltas y zarjas de atrape, etc.).	
NINGUN CONTRO		$\overline{2}$	Falla compleja a lo largo de una superficie de deslizamiento curva (usualmente sin o con poco control estructural), que puede afectar no sólo el macizo rocoso y/o suelos presentes, sino que también estructuras geológicas o zonas de debilidad.	Presencia de fallas geológicas importantes Resistencia al corte de los materiales afec- tados por el deslizamiento Aguas subterráneas y su respuesta a lluvias y/o presencia de aguas en el pie del talud Solicitación sísmica	Métodos de equilibrio límite que incluyan superfi- cies no circulares de deslizamiento (para evaluar el efecto de cambios en las condiciones de borde). Métodos numéricos (elementos finitos o diferencias finitas, para evaluar mecanismos de falla e historia de desplazamientos)	El valor absoluto del factor de seguridad tiene poco significado, pero sus cambios pueden utilizarse para evaluar el efecto de las medidas correctivas. La instrumentación y auscultación de largo plazo es en realidad el único medio efectivo para evaluar el comportamiento del talud.	
TOTAL CONTROL ESTRUCTURAL PARCIAL POCO	THIDIMENSIONALES	Deslizamiento según una superficie cuasi- circular, que define una masa inestable en forma de "cucharada" en el talud de suelos o roca muy fracturada.		Altura e inclinación del talud Resistencia al corte de los materiales afec- tados por el deslizamiento Aguas subterráneas y su respuesta a lluvias y/o presencia de aguas en el pie del talud. Solicitación sísmica	Métodos de equilibrio límite bidimensionales que incluyan la búsqueda automática del círculo crítico, pueden utilizarse para análiais paramétricos de la estabilidad. Análisis probabilisticos, métodos tridi- mensionales de equilibrio límite y/o de análisis nu- mérico se utilizan algunas veces en el caso de pro- blemas poco usuales y/o de especial importancia.	FS > 1.3 para taludes "temporales" y cuya eventual talla no tendria mayores consecuencias. FS > 1.5 para taludes "permanentes" y cuya eventual falla podría tener consecuencias. Cuando los despla- zamientos son criticos en general resulta necesa- río utilizar mayores valores de FS y desarrollar nu- merosos análisis por métodos numéricos. En mine- ría se usan probabilidades de talla del 5% al 10%.	
	DESUZAMIENTOS PLANOS Y		Destizamiento según una superficie definida en parte por estructuras y en parte a través de un macizo rocoso de maia calidad geo- técnica, típicamente en la pata o parte inte- nor del talud.	Altura e inclinación del talud Rumbo, manteo y resistencia de las estruc- turas. Fracturamiento y resistencia del macizo roccso en la pata del talud. Aguas subterráneas y su respuesta a lluvias y/o presencia de aguas en el pie del talud. Solicitación sísmica y/o tronaduras	Métodos de equilibrio límite bidimensionales o tri- dimensionales, pueden utilizarse para análisis pa- ramétricos de la estabilidad. Análisis probabilisticos y/o análisis numéricos se utilizan algunas veces en el caso de problemas poco usuales y/o de especial importancia.	FS > 1.3 para taludes "temporales" y cuya eventual falla no tendría mayores consecuencias. FS > 1.5 para taludes "permanentes" y cuya eventual falla podría tener consecuencias. Cuando los despla- zamientos son críticos en general resulta necesa- rio utilizar valores mayores de FS y desarrollar nu- merosos análisis por métodos numéricos. En mine- ría se usan probabilidades de falla del 5% al 10%.	
			Destizamientos planos y/o de cuñas, a lo largo de una estructura geológica o bien según la línea de intersección de 2 estructu- ras,	Altura, inclinación y orientación del talud Rumbo, manteo y resistencia de las estruc- turas Aguas subterráneas y su distribución Solicitación sismica y/o tronaduras Secuencia de excavación e instalación del soporte (si se instala)	Análisis por equilibrio límite para determinar los modos de desizamiento tridimensional, son utiliza- dos para estudios paramétricos del factor de segu- ridad. Análisis probabilisticos, basados en la dis- tribución de la orientación de las estructras y de su resistencia al corte, son útiles en algunos casos.	FS > 1.3 para taludes "temporales" y cuya eventual talia no tendría mayores consecuencias. FS > 1,5 para taludes "permanentes" y cuya eventual falla podría tener consecuencias. Probabilidades de talia del 10% al 15% pueden ser aceptables en de caso de taludes de rajos mineros, cuando el costo de remoción y despeja es menor al costo de estabi- lización.	
	VOLCAMIENTOS		Volcamiento de columnas de roca que se separan del macizo, delimitadas por estruc- turas subverticales que mantean hacia "ce- rro adentro",	Altura, inclinación y orientación del talud Rumbo y manteo de las estructuras Aguas subterráneas y su distribución Solicitación sismica y/o tronaduras	Análisis muy simples por equilibrio límite de mode- los simples de bloques, son útiles para estimar el potencial de volcamiento y/o da deslizamiento. Modelos de elementos discretos con geometrías simplificadas del talud pueden utilizarse para inves- tigar los mecanismos de volcamiento.	No hay un criterio de aceptabilidad general para este tipo de problemas, aunque el potencial de vol- camiento generalmente resulta obvio. El monitoreo de los desplazamientos del talud es el único medio efectivo para determinar el comportamiento del talud y las potenciales medidas de estabilización que se requerirían.	





(Wyllie and Mah, 2004)





Supuestos del análisis de equilibrio limite:

- La grieta de tracción es vertical con un nivel de agua (z_w)
- El agua entra desde la grieta y fluye a través del plano de deslizamiento
- La posición de la grieta de tracción es conocida (cara o parte superior del talud)
- V, U, W actúan en el centro de masa del bloque deslizante: no hay momentos
- Plano de deslizamiento tienen resistencia al corte Mohr-Coulomb ($\tau = c + tan\phi\sigma_n$)
- Análisis realizado por unidad de ancho
- Macizo rocoso impermeable





- H : altura del talud
- z : grieta de tracción ubicada a b de la cresta
- $z_{\rm w}$: altura de agua en la grieta de tracción,
- $\Psi_{\rm s}$: dip talud sobre la cresta
- $\gamma_{\rm w}$: peso específico del agua
- $\gamma_{\rm r}$: peso específico de la roca
- A : área plano de deslizamiento

$$FS = \frac{\text{Fuerzas resistentes}}{\text{Fuerzas solicitantes}} = \frac{cA + \sum N \tan \phi}{\sum D}$$

$$\sum N = W \cos \Psi_{\rm p} - U - V \sin \Psi_{\rm p}$$
$$\sum D = W \sin \Psi_{\rm p} + V \cos \Psi_{\rm p}$$

FS -	$cA + \left(W\cos\Psi_{\rm p} - U - V\sin\Psi_{\rm p}\right)$)tan ø
<i>I</i> '5 –	$\overline{W\sin\Psi_{\rm p}+V\cos\Psi_{\rm p}}$	

 c, ϕ : cohesión y fricción del plano de deslizamiento



(a) Grieta de tracción en talud superior



$$z = H + b \tan \Psi_{s} - (b + H \cot \Psi_{f}) \tan \Psi_{p}$$

$$W = \frac{\gamma_{r}}{2} (H^{2} \cot \Psi_{f} X + bHX + bz)$$

$$X = 1 - \tan \Psi_{p} \cot \Psi_{f}$$

$$A = (H \cot \Psi_{f} + b) \sec \Psi_{p}$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_{w} z_{w} A$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_{w} z_{w}^{2}$$

$$FS = \frac{cA + (W\cos\Psi_{p} - U - V\sin\Psi_{p})\tan\phi}{W\sin\Psi_{p} + V\cos\Psi_{p}}$$



(b) Grieta de tracción en la cara



$$z = (H \cot \Psi_{\rm f} - b)(\tan \Psi_{\rm p} - \tan \Psi_{\rm p})$$
$$W = \frac{\gamma_r}{2} H^2 \left[\left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 \cot \Psi_p \left(\cot \Psi_p \tan \Psi_f - 1 \right) \right]$$
$$A = (H \cot \Psi_f - b) \sec \Psi_p$$
$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w A$$
$$V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2$$

$$FS = \frac{cA + (W\cos\Psi_{p} - U - V\sin\Psi_{p})\tan\phi}{W\sin\Psi_{p} + V\cos\Psi_{p}}$$



Tipos de empujes de agua

La descarga de agua en el talud se "tapa" por congelamiento.



Nivel freático bajo la grieta de tracción



 $U = \frac{1}{2} \frac{z_w}{\sin \psi_p} h_w \gamma_w$

h_w: altura de agua estimada en el punto medio de la porción saturada del plano de deslizamiento



Equilibrio límiteFalla planaUbicación y profundidad de la grieta de tracción



- Grieta de tracción visible en la superficie de un talud indica que la falla por corte se ha iniciado dentro del macizo rocoso
- No es siempre fácil de mapear (ej. puede haber capa de suelo sobre la cresta del talud)
- Es necesario su ubicación y profundidad para el diseño



Equilibrio límite Falla plana Ubicación v profundidad o

Ubicación y profundidad de la grieta de tracción



Grieta de tracción en la parte superior del talud

Si se asume talud seco ($z_w=0$, U=V=0):

$$FS = \frac{cA}{W\sin\Psi_{\rm p}} + \cot\Psi_{\rm p}\tan\phi$$

Minimizando esta ecuación con respecto a z/H:

$$\frac{z_c}{H} = 1 - \sqrt{\cot \Psi_f \tan \Psi_p}$$
$$\frac{b_c}{H} = \sqrt{\cot \Psi_f \cot \Psi_p} - \cot \Psi_f$$



Inclinación del plano de deslizamiento crítico

Si existe una discontinuidad persistente y la inclinación de esta discontinuidad satisface las condiciones de falla plana, la estabilidad del talud queda controlada por esta estructura

Si la discontinuidad no existe, la inclinación de un potencial plano de deslizamiento se puede encontrar minimizando:





Equilibrio límiteFalla planaEjemplo 1: bloque plano sin grieta de tracción y condición seca





Ejemplo 2: bloque plano con grieta de tracción



(a) Calcule el factor de seguridad cuando $z_w=0$.



Ejemplo 2: bloque plano con grieta de tracción



(b) Evalué el efecto de una lluvia fuerte y prolongada en la estabilidad del talud

En este caso U y V dependen de la altura de agua en la grieta de tracción (z_w)

$$U = \frac{1}{2} \gamma_{w} z_{w} A$$
$$V = \frac{1}{2} \gamma_{w} z_{w}^{2}$$

A y W quedan iguales





Ejemplo 1 en ROCPLANE



$$\begin{split} \Psi_{\rm f} &= 45^{\circ} \\ \Psi_{\rm p} &= 35^{\circ} \\ H &= 600 \ {\rm ft} = 183 \ {\rm m} \\ c &= 300 \ {\rm psi} = 43200 \ {\rm p/ft^2} \\ &= 2.1 \ {\rm MPa} = 211 \ {\rm t/m^2} \\ \phi &= 30^{\circ} \\ \gamma_r &= 150 \ {\rm p/ft^3} = 2.4 \ {\rm t/m^3} \end{split}$$

Deterministic Input Data	? 🔺 X	Oeterministic Input Data	? . X
Geometry Strength Forces		Geometry Strength Forces	
Shear Strength Model		Sept	Falue Para
Nohr-Coulomb • t = c	+ $\sigma_y \tan \varphi$	Angle (deg): 45 Hwight (n) 183	Angle (deg) 35 Waxtheax (deg): 0
Finction Angle (deg): 30	Cohesion @/m2); 211	Unit Weight (/m3): 2.4	* Wavness × [Avg. Angle] - [Min. Angle]
	Safety Factor + 7.64594	Tension Catch Arrige Ding: FG Polyanan PS Location Control Dearby-Location Dearby-Location Dearby-Location	Upper Face Angle (deg) 0 200 T Bench Analysis whom mr (70.3511 Carlety Factor - 7.54554
Distance in meters Force in Tannee (1000 kg)	Wedge Weght = 17205 Stornee.ht Nome Force = 18094 2 tonces.ht Resisting = 75657 conces.ht Driving = 9058 9 tonnes.ht	Distance in metans Force in Tonnes (1000 kg)	Nomal Force + 1024 Stormer in Residing + 75457 tornes in Driving + 3868 Stormes in
	OK Cancel Apply		OK Cancel Apply





Equilibrio límite Falla por cuña



Iniciación y propagación de una cuña mayor en una mina de open pit, Western Australia. (Harrison and Hudson, 2001)



Cuña removida durante la construcción por pre-splitting de un talud en roca (Harrison and Hudson, 2001)



Falla por cuña (Wyllie and Mah, 2004)



Equilibrio límite Falla por cuña

Comúnmente encontradas en:

- bancos
- pequeños taludes
- cortes para carreteras, etc.

Cuñas individuales pueden ser:

soportadas
removidas
Depende de las circunstancias

En minas de open pit, el soporte de cuñas es generalmente impractico, por lo que los taludes deben ser diseñados para acomodar la falla de cuñas



Deslizamiento es resistido solo por fricción - gráficos de estabilidad

Fricción distintas en ambos planos de deslizamiento, condición seca



Plano A: El menos inclinado de los dos planos

 $FS = A \tan \phi_A + B \tan \phi_B$

Los factores adimensionales *A* y *B* Dependen del dip y dipdirection de los planos que forman los planos de deslizamiento de la cuña.

Los valores de estos dos factores son presentados en una serie de gráficos.













set	Fricción	Dip	DipDir
Set 1=plano A	fa	40	165
Set 2	fb	70	285
		30	120























Deterministic Input Data	7 🔺 X	Deterministic Input Data	? • ×	Deterministic Input Data	7 . ×
Sope Jawia Forma		Slope Joints Factors		Stope Jones Forces	
Signe Upper Face If Tension CP Dia timigit 45 (2) Dia timigit 0 (2) Dia timigit 45 (2) Dia timigit 0 (2) Dia timigit 0 (2) Dia timigit 0 (2) <t< th=""><th>NAK</th><th>Joint 1 Die Hegt 40 (1) Die Diestion Hegt 165 (1) Wahrens Hegt 0 Steer Steruft Notel</th><th>Jane 2 Der Hag) 70 (1) Der Densten Heg) 215 (1) Warrens Heg) 0 Shear Strength Model (Metry Coulors) (*)</th><th>Weber Pressure Unit Science (Science) Variation (Science) Variation (Science)</th><th>Eternal Forces Number of Esternal Forces: 0 0</th></t<>	NAK	Joint 1 Die Hegt 40 (1) Die Diestion Hegt 165 (1) Wahrens Hegt 0 Steer Steruft Notel	Jane 2 Der Hag) 70 (1) Der Densten Heg) 215 (1) Warrens Heg) 0 Shear Strength Model (Metry Coulors) (*)	Weber Pressure Unit Science (Science) Variation (Science) Variation (Science)	Eternal Forces Number of Esternal Forces: 0 0
Rock Properties Unit Weight Em 2: 2.6 Distance units in netters and face unit	a in tormes (1000 kg)	$\tau = c + \sigma_{\phi} \tan \phi$ c # m d = 0 Problem 15	$\tau = \theta + \sigma_A \tan \theta$ c kins2) 0 Pri (deg) 20	Transi Carbona D Danim Hosi, Kanan Tierat +	
Import From Dps OK. Cano	et Apply	Wopot From Dips	OK Canodi Acoly	(Import From Date	OK Carcal Acate

Ejemplo previo en SWEDGE



Deterministic Analysis Factor of Safety: 1.3041 Wedge Data Volume: 94594.399 m3 Weight: 245945.44 tonnes Area (joint1): 8298.93 m2 Area (joint2): 3268.52 m2 Area (slope): 6558.29 m2 Area (upper face): 2837.83 m2 Normal Force (joint1): 192078.06 tonnes Normal Force (joint2): 91803.10 tonnes Normal Stress (joint1): 23.14 t/m2 Normal Stress (joint2): 28.09 t/m2 Shear Strength (joint1): 16.21 t/m2 Shear Strength (joint2): 10.22 t/m2 Driving Force: 128756.92 tonnes Resisting Force: 167908.10 tonnes Mode: Sliding on joints 1&2

Line of Intersection

Plunge: 31.57 deg Trend: 207.92 deg Length: 191.02 m

Trace Length Joint1: 155.63 m Joint2: 144.13 m

Persistence Joint1: 191.02 m Joint2: 191.02 m



Diploma de Postítulo en Geomecánica Aplicada al Diseño Minero

Este tipo de falla es común en materiales tipo suelo pero también puede ocurrir en:

- Rocas alteradas
- Macizos altamente fracturados
- Macizos con orientaciones aleatorias de fracturas
- En materiales altamente alterados o fracturados un patrón estructural bien definido ya no existe y el deslizamiento se produce a través de la línea de resistencia mínima al corte. Observaciones sugieren que esta superficie de deslizamiento toma la forma de un circulo
- Falla circular ocurre cuando las partículas o bien el plano de debilidad es pequeño en relación al talud



El método más común de análisis es el de equilibrio limite en 2D que divide al volumen de falla en una serie de rebanadas verticales



La solución del sistema de fuerzas/momentos ($\Sigma F_x=0$, $\Sigma F_y=0$, $\Sigma M=0$) es estáticamente indeterminada, ya que existen más incógnitas que ecuaciones de equilibrio

Para resolver el sistema es necesario hacer algunos supuestos. Diferentes métodos hacen supuestos distintos:

- *Simple:* el efecto de las fuerzas entre rebanadas en despreciado
- *Complejo:* fuerzas entre rebanadas es incluido
- Riguroso: todas las condiciones de equilibrio estático son satisfecha (aún tienen algunos supuestos)

Algunos métodos permiten solo una falla circular, mientras que otros permiten formas no-circulares





Equations	Condition				
n	Moment equilibrium for each slice				
2 <i>n</i>	Force equilibrium in two directions (for each slice)				
n	Mohr–Coulomb relationship between shear strength and normal effec- tive stress Total number of equations				
4n					
Unknowns	Variable				
1	FOS				
n	Normal force at base of each slice, N'				
n	Location of normal force, N'				
n	Shear force at base of each slice, S_m				
n-1	Interslice force, Z				
n-1	Inclination of interslice force, θ Location of interslice force (line of thrust)				
n-1					
6n - 2	Total number of unknowns				



• Equilibrio de momentos en torno al centro de rotación O:

$$\int_{V} r \sin(\alpha) \gamma dV = \int_{A} R \tau dA$$

- r : radio a un elemento típico in la masa deslizante
- γ : peso especifico de la masa deslizante
- R : radio del circulo deslizante
- *V* : volumen de la masa deslizante
- A : área de la superficie de falla (longitud del arco circular multiplicado por el espesor b)
- Para evaluar la integral de la derecha se requiere conocer la distribución de esfuerzos en la superficie de falla



Método de Bishop - falla rotacional del talud



Reemplazando la integral por una sumatoria:

$$\sum_{i=1}^{n} R\sin(\alpha_i) W_i = \sum_{i=1}^{n} RT_i (\text{stress}) = \sum_{i=1}^{n} RT_i (\text{strength}) / \text{fs}_i$$

 fs_i : factor de seguridad local rebanada *i*

Circular arc slope failure and subdivision into slices. Slices are numbered 1, 2, ..., n.

Si el factor de seguridad de todas las rebanadas es el mismo fs_i = constante = FS, y asumiendo un criterio de falla Mohr-Coulomb:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^{n} RT_i(\text{strength})}{\sum_{i=1}^{n} R\sin(\alpha_i)W_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[c_i A_i + N_i^{'} \tan(\phi_i)\right]}{\sum_{i=1}^{n} Ws_i}$$

 N_i : fuerza normal efectiva de la rebanada *i*



Método de Bishop - falla rotacional del talud



Slice free body diagram.

La fuerzas normales efectivas (N_i) se estiman del análisis de equilibrio limite de las rebanadas (ver figura).

Despreciando las fuerzas laterales, la fuerza normal total es simplemente la componente normal del peso de la rebanada (W_n) .

La fuerza normal efectiva (N') es la componente normal del peso (W_n) menos la fuerza del agua (P).

$$N' = W_n - P$$

El factor de seguridad queda dado por:

$$FS = \frac{\sum_{i} [(W_n - P)\tan(\phi) + cA]}{\sum_{i} W_s}$$



Método de Bishop - falla rotacional del talud

Ejemplo 1: Considere un talud de 45°, 150ft de altura con una superficie potencial de falla de forma circular (ver figura). Asuma: $\phi = 25^\circ$ y c = 1.440 psf, $\gamma = 100$ pcf, y nivel de agua bajo el pie del talud. Determine el factor de seguridad utilizando cinco rebanadas de ancho de 30 ft.



Origin is at the slice toe. Slice width ∆x = 30 ft.



Diploma de Postítulo en Geomecánica A

Length of side h is distance between slope face and slip circle.
Average length is the mean of the side lengths, the height of the midplane.

Método de Bishop - falla rotacional del talud

Ejemplo 1: Considere un talud de 45°, 150ft de altura con una superficie potencial de falla de forma circular (ver figura). Asuma: $\phi = 25^\circ$ y c = 1.440 psf, $\gamma = 100$ pcf, y nivel de agua bajo el pie del talud. Determine el factor de seguridad utilizando cinco rebanadas de ancho de 30 ft.

$$FS = \frac{\sum_{i} \left[(W_n - P) \tan(\phi) + cA \right]}{\sum_{i} W_s}$$

rebanada i



Table 2.4 Slice volume, weight, and force data

Slice	Volume (ft ³)	Weight (lbf)	Angle (°)	W _n (lbf)	Ws (Ibf)	Ntan(φ) (lbf)	cLb (lbf)
Ι	404.54	40,454	5.74	40,251	4,045	18,769	43,418
2	1,116.70	111,670	17.46	06,526	33,501	49,674	45,286
3	1,612.16	161,216	30.00	139,617	80,608	65,105	49,883
4	,800.00	80,000	44.43	28,546	26,000	59,942	60,492
5	900.00	90,000	64.16	39,230	81,000	18,293	99,108
Total	5,833.4	583,340			325,154	211,783	298,186

Slices are b = 1 ft thick into the page. Volume = $h(ave)b\Delta x$. $W_n = W \cos(\alpha)$. $W_s = W \sin(\alpha)$.

$$FS = \frac{\sum_{i} [(W_n - P)\tan(\phi) + cA]}{\sum_{i} W_s} = \frac{211.783 + 298.186}{325.154} = 1,568$$



Diploma de Postítulo en Geomecánica Aplicada al Diseño Minero

fcfm

Método de Bishop - falla rotacional del talud

Ejemplo 2: Considere los datos del ejemplo 1 y suponga que el nivel del agua se encuentra presente en la cresta del talud y sigue la cara del banco hasta el pie del talud. Determinar el nuevo factor de seguridad de la superficie de deslizamiento dada.



50

Método de Bishop - falla rotacional del talud

Ejemplos anteriores utilizando programa SLIDE con 25 rebanadas





Diploma de Postítulo en Geomecánica Aplicada al Diseño Minero

Comparación entre distintos métodos de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes

Methods	Circular	Non-cir.	$\sum M = 0$	$\Sigma F = 0$	Assumptions for T and E	
Ordinary	V	-	\checkmark	-	Neglects both E and T	c
Bishop simplified	\checkmark	(*)	\checkmark	(**)	Considers E, but neglects T	
Janbu simplified	(*)	\checkmark	-	\checkmark	Considers E, but neglects T	
Janbu GPS	\checkmark	\checkmark	(***)	\checkmark	Considers both E and T, act at LoT	Ordinary method Bishop's simplified of slices method
Lowe-Karafiath	-	\checkmark	-	\checkmark	Resultant inclines at, $\theta = \frac{1}{2}(\alpha + \beta)$	
Corps of Engrs.	-	\checkmark	-	\checkmark	Resultant inclines at, $\theta = \frac{1}{2}(\alpha_1 + \alpha_2)$	constant variable
Sarma	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	Interslice shear, $T = ch + E \tan \phi$	
Spencer	\checkmark	(*)	\checkmark	\checkmark	Constant inclination, T =tanθ E	
MorgenstPrice	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	Defined by $f(x)$, $T = f(x)$. λ .E	ied Spencer's Morgenstern and method Price method

E y T fuerzas entre rebanadas normal y de corte respectivamente

- (*) Can be used for both circular and non-circular failure surfaces,
- (**) satisfies vertical force equilibrium for base normal force, and
- (***) satisfies moment equilibrium for intermediate thin slices (Janbu 1957, Grande 1997)







Comparación entre distintos métodos de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes

- *Bishop* y *Jambu* son los mas populares ya que el FS puede ser estimado de manera rápida para la mayoría de las superficies.
- Para superficies de falla circular, $FS_{Bishop} > FS_{Janbu}$
- El FS de *Bishop* esta dentro de un 5% del FS calculado con otros análisis mas rigurosos.
- Para análisis de superficie de falla circulares se recomienda en método de *Bishop*
- El método de Janbu es mejor para la evaluacion del FS en superficie no circulares



Superficie crítica

- Inicialmente la ubicación de la superficie critica no es conocida
- La metodología más común es utilizar una búsqueda de grilla con círculos de distintos radios para posteriormente contornear los FS
- Si el contorneado es cerrado, entonces se obtiene un FS mínimo. Si el contorneado es abierto, es necesario entonces aumentar/mover la grilla
- La mayoría de los códigos tienen un generador automático de búsqueda de la superficie circular critica
- En general, es importante tener una idea del modo de falla y la superficie de falla posible de manera que el análisis sea confiable



Superficie crítica





Supericie crítica

 $FS_{GLE/Morgenstern-Price} = 2.65$

 $FS_{GLE/Morgenstern-Price} = 0.90$





Gráficos de falla circular de Hoek and Bray (1981)

- Proveen un método rápido de estimar la estabilidad de taludes donde se anticipa una superficie de falla circular.
- Útiles para taludes en materiales tipo suelo, incluyendo taludes en roca altos bien fracturados (la escala hace que los bloques sean como partículas de suelo).
- Útiles para evaluar la sensibilidad del FS al cambio de algunos parámetros claves: condición de agua, ángulo de talud, etc.
- Supuestos:
 - Falla circular pasa por el pie del talud
 - Material es homogéneo
 - La resistencia del material está dada por Mohr-Coulomb.
 - Grieta de tracción puede ocurrir en la parte superior o en la cara del talud.



Gráficos de falla circular de Hoek and Bray (1981)











- Gráfico de falla circular para la condición de agua número 1 (seco)
- Diseño: H=500 m, ángulo talud=50 grados
- Macizo rocoso
 - C=0.5 MPa
 - F=40'grados
 - Peso específico, g=0.027 MPa/m



















Gráficos de falla circular de Hoek and Bray (1981)

Pasos para encontrar el factor de seguridad utilizando los gráficos de falla circular



- 1. Escoger el gráfico correspondiente a la condición de agua del problema.
- 2. Calcular la razón adimensional $c/(\gamma H \tan \phi)$. Encontrar este valor en el circulo exterior del grafico.
- 3. Seguir la línea radial del valor encontrado en el paso 2 hasta la intersección con la curva que corresponde al ángulo del talud que se esta analizando.
- 4. Encontrar el valor correspondiente en el eje horizontal o vertical y de este calcular el FS.



Gráficos de falla circular de Hoek and Bray (1981)

Condiciones de agua esperada del grafico numero 3. Si la densidad de la roca es 2.7 gm/cm³, la altura del pit 500 m y el factor de seguridad 1,3, calcular el ángulo máximo del talud.

La resistencia del macizo queda dado por: $\sigma_1 = 5.0 + 4.5\sigma_3$

<u>Solución</u>

Ecuación de resistencia:

 $\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3$ donde: σ_{cm} = es la resistencia la compresión del macizo rocoso $k = (1 + \sin \phi)/(1 - \sin \phi)$ ϕ = ángulo de fricción

Resolviendo:

$$k = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi) = 4.5 \Rightarrow \phi = 39.5^{\circ}$$
$$c = \frac{\sigma_{cm} (1 - \sin \phi)}{2 \cos \phi} = 1.18 \text{ MPa}$$

También:

$$\rho = 2.7 \frac{gm}{cm^3} = 2700 \frac{\text{kg} - \text{f}}{\text{m}^3}$$
$$\gamma = \rho g = 0.027 \frac{\text{MPa}}{\text{m}}$$





La intersección de estos dos factores ocurre para un talud de 55°

