Presentación de clase de geotecnia · Estabilidad de taludes

Estabilidad de taludes: equilibrio límite (dovelas)

Clase: método de las dovelas por equilibrio límite; solución manual detallada de un círculo de deslizamiento y de una dovela, las dovelas restantes y los temas con tablas.

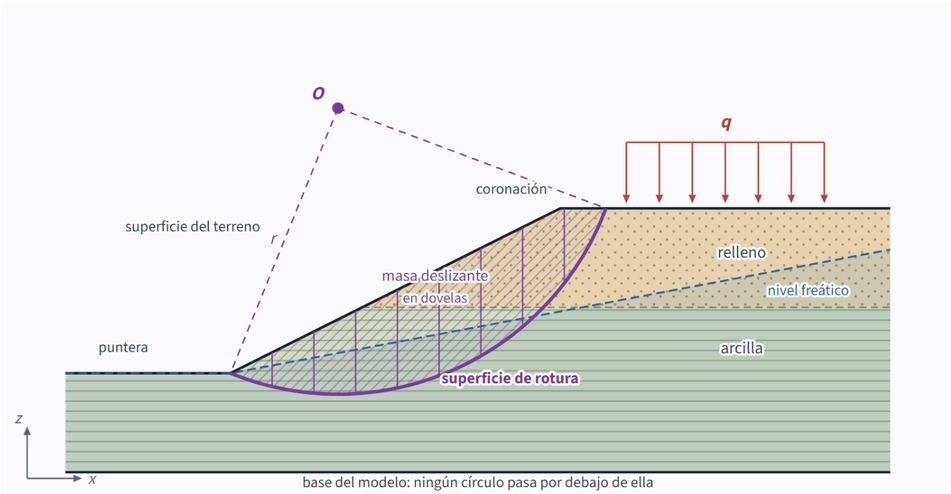
Método de las dovelas

Ordinario · Bishop · Spencer

Círculo crítico

Agua · carga · sismo · grieta

Refuerzo · Hoek–Brown



Se basa en la página de teoría de GeoTerva · geoterva.com

Introducción

¿Qué aprenderemos en esta clase?

La idea del **equilibrio límite**: la masa situada sobre la superficie de rotura es un sólido rígido en el que la resistencia se moviliza en la misma proporción; **FS = resistencia / tensión necesaria**

La división de la masa en **dovelas**: peso W de cada dovela, inclinación de la base α, longitud de la base L, fuerza del agua U

La resolución detallada de los **tres métodos** (ordinario/Fellenius, Bishop simplificado, Spencer) en un único círculo de deslizamiento y en **una única dovela**

Cómo se repite el mismo cálculo en las **32 dovelas restantes** y las tablas de resultados; la búsqueda del círculo crítico

Efectos del agua, de las cargas, del sismo, de la grieta de tracción, de los refuerzos (clavos, anclajes, geomallas) y de la roca (Hoek–Brown)

DESARROLLO DE LA CLASE

Primero la **teoría**, después la **resolución a mano** con un solo círculo y una sola dovela:

1 · **Teoría**: FS, dovela, tres métodos

2 · **Enunciado**: un solo círculo, una sola dovela

3 · **Solución**: dovela 22 a mano; el resto en **tabla**

Modelo: talud 2:1 de 10 m de altura; relleno en la parte superior (γ = 18, c′ = 5, φ′ = 30°), arcilla debajo (γ = 17.5, c′ = 20, φ′ = 18°); sin agua, carga ni sismo. Las fuerzas se expresan por metro de sección (kN/m).

Drenado, sin drenaje, creciente con la profundidad

TEORÍA

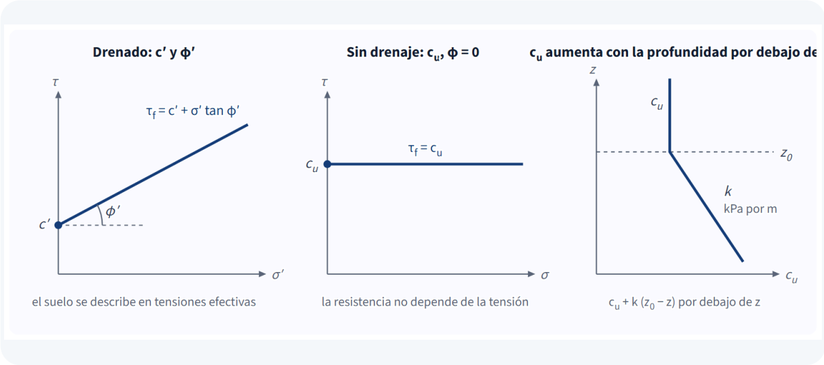
La resistencia al corte de un suelo **drenado** viene dada por la envolvente de Mohr–Coulomb en función de la tensión efectiva σ′ = σ − u y se define con los parámetros c′ y φ′.

En arcilla saturada cargada más rápido de lo que puede producirse el drenaje, la resistencia es la **resistencia sin drenaje** c_u, independiente de la tensión normal, y se toma φ = 0; en muchas arcillas naturales c_u aumenta linealmente con la profundidad.

La resistencia de una dovela se lee a la altura del punto medio de su base; el criterio propio de la roca es independiente, y la elección entre condiciones drenadas o sin drenaje corresponde al ingeniero y constituye la primera hipótesis del análisis.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan\varphi' \qquad \sigma' = \sigma - u \qquad \text{(drenado)}$$

$$\tau_f = c_u \ (\varphi = 0) \qquad c_u(z) = c_u + k\,(z_0 - z) \ \ (z < z_0) \qquad \text{(sin drenaje)}$$



Resistencia / tensión necesaria; momento respecto al centro del círculo

TEORÍA

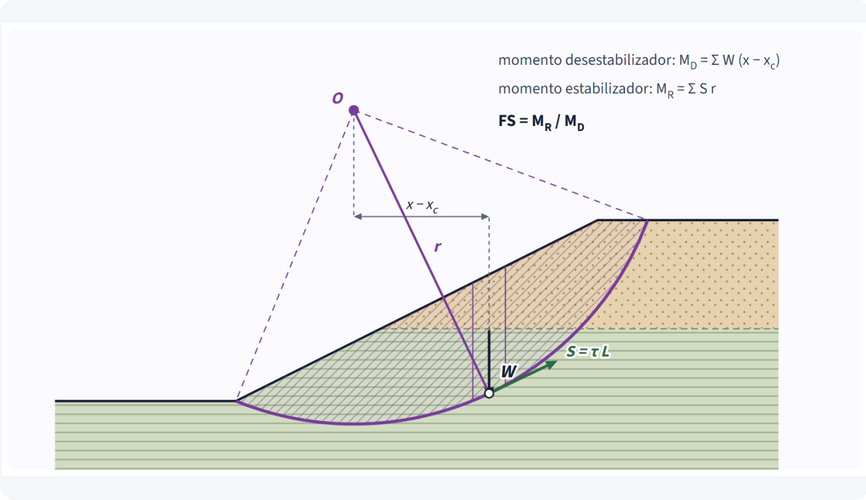
El factor de seguridad (FS) es la relación entre la resistencia al corte que posee el suelo y la tensión de corte necesaria para el equilibrio, y se supone que tiene el mismo valor en todos los puntos de la superficie de rotura.

En una superficie circular, el equilibrio determinante es el de momentos respecto al centro O; dividiendo los momentos por el radio, la relación se escribe FS = ΣR / ΣD, y ambas sumas se expresan en kN/m.

Los tres métodos difieren en cómo se obtiene la fuerza normal efectiva (N′) que actúa en la base de cada dovela: el método ordinario de las dovelas la obtiene solo del peso, Bishop del equilibrio vertical y Spencer tanto del equilibrio de fuerzas como del de momentos.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} \qquad \tau = \frac{c' + \sigma' \tan\varphi'}{FS}$$

$$FS = \frac{M_R}{M_D} = \frac{\sum R}{\sum D} \qquad R = cL + N' \tan\varphi' \qquad D = \frac{M_D}{r}$$



Geometría, peso, fuerzas en la base

TEORÍA

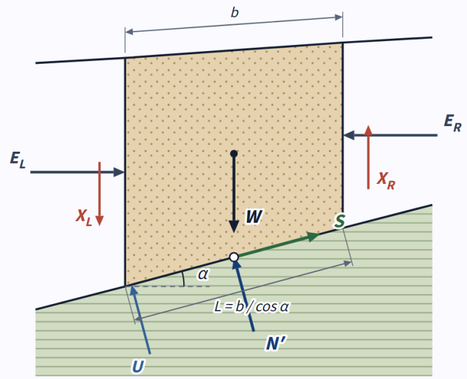
La masa comprendida entre la superficie de rotura y la superficie del terreno se divide en dovelas mediante líneas verticales, según el número de dovelas o el ancho máximo de dovela.

Todo punto de intersección significativo dentro de la masa es un límite obligado de dovela; así, cada base atraviesa un único suelo y cada dovela soporta un único tipo de carga.

En la vertical media de la dovela, la inclinación de la base α se toma positiva en el lado de la coronación del talud con respecto al centro y negativa en el lado del pie del talud.

Fuerza normal efectiva N′ = N − U; una N′ negativa indica que la base trabaja a tracción, y en el método simple de dovelas y en el de Bishop se mantiene N′ igual a cero.

$$\sin\alpha = \frac{x_m - x_c}{r} \qquad L = \frac{b}{\cos\alpha} \qquad W = \sum_i b\, h_i\, \gamma_i \qquad N' = N - U\ ,\ U = uL$$



W	peso de la dovela
N′	fuerza normal efectiva
U = uL	fuerza intersticial en la base
S	fuerza cortante (resistencia utilizada
E, X	fuerzas entre dovelas

Sin fuerzas entre dovelas

TEORÍA

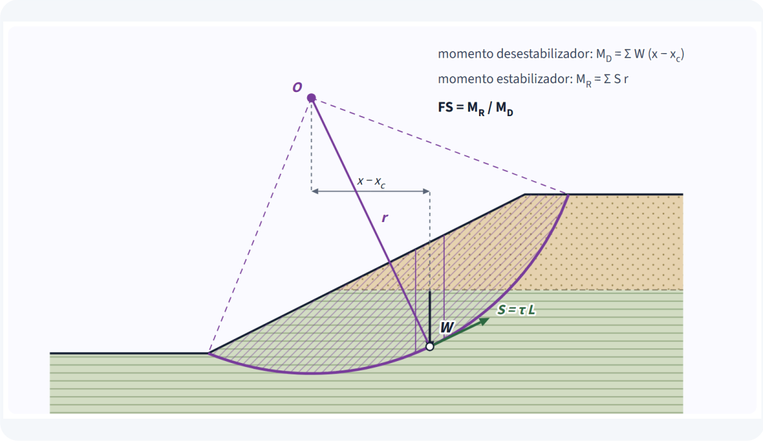
En el método de **Fellenius** (sueco) se desprecian por completo las fuerzas entre dovelas y cada dovela se encuentra en equilibrio únicamente en la dirección normal a su base.

Este equilibrio da la fuerza normal a partir del peso y de las cargas; el factor de seguridad se obtiene de la relación de momentos y, en suelo homogéneo, se reduce a FS = Σ [c b / cos α + W cos α tan φ] / Σ W sin α.

El método es sencillo, estable y queda del lado de la seguridad; su error aumenta con la profundidad del círculo y con la presión intersticial, y en un círculo profundo puede dar un resultado bastante inferior al de los otros dos métodos.

$$N' = W\cos\alpha - uL \qquad R = cL + N'\tan\varphi' \qquad D = W\sin\alpha$$

$$FS = \frac{\sum R}{\sum D} = \frac{\sum \left[cL + (W\cos\alpha - uL)\tan\varphi'\right]}{\sum W\sin\alpha}$$



Equilibrio vertical de cada dovela; solución iterativa

TEORÍA

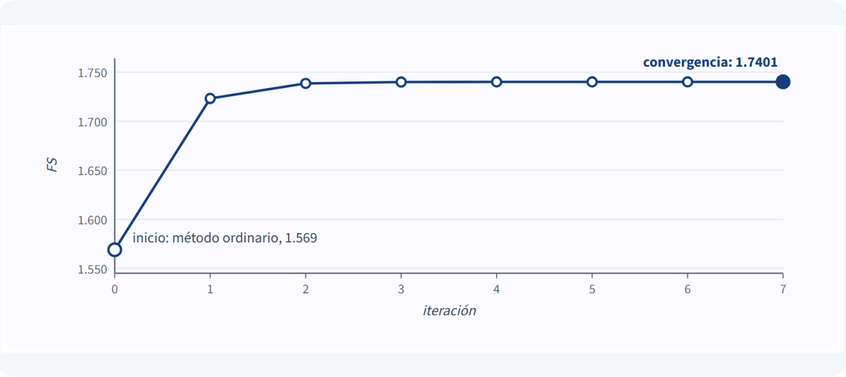
En el método de Bishop simplificado se desprecian los esfuerzos cortantes entre dovelas, pero se satisface el equilibrio vertical de cada dovela y el esfuerzo cortante en la base se toma igual a la resistencia movilizada.

Como FS aparece en ambos miembros de la ecuación, esta se resuelve por iteración, partiendo del valor del método simple de dovelas; bastan unos pocos pasos.

El valor negativo de **N′** se mantiene en cero y no se permite que $\mathbf{m_\alpha}$ baje de 0.2; esta limitación es importante en la zona del pie de los círculos profundos.

$$N' = \frac{W - uL\cos\alpha - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha} \qquad m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$$

$$FS = \frac{\sum [cL + N'\tan\varphi']}{\sum D}$$



Equilibrio de fuerzas y de momentos; fuerzas entre dovelas paralelas

TEORÍA

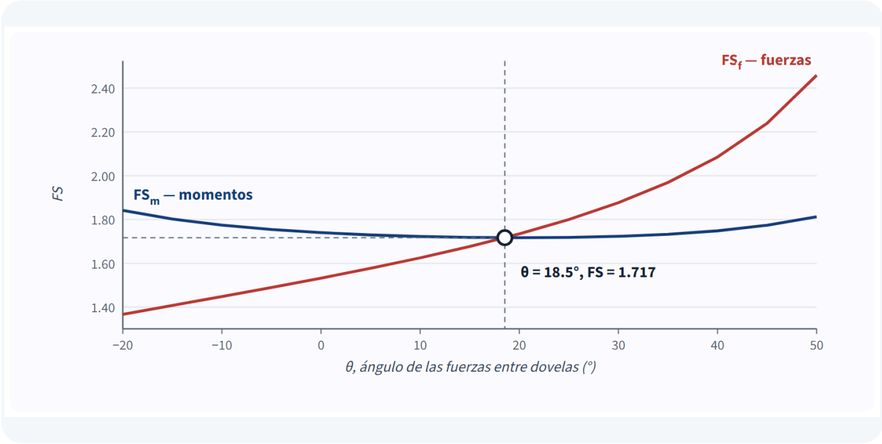
El método de **Spencer** satisface tanto el equilibrio de fuerzas como el de momentos; las fuerzas entre dovelas son paralelas entre sí y la fuerza cortante es una proporción constante de la fuerza normal.

Como las caras laterales en los dos extremos de la masa están libres, ΣΔE = 0 proporciona el equilibrio de fuerzas y se obtiene un factor de seguridad FS_f para cada ángulo θ.

Los momentos respecto al centro del círculo dan un segundo valor: FS_m = Σ[c L + N′ tan φ] / Σ D; $FS_f(\theta)$ y $FS_m(\theta)$ se cortan en un único ángulo, y este constituye la solución.

$$X = E\tan\theta \qquad \Delta E = \frac{cL + \tan\varphi'\,(W\cos\alpha - U) - FS\,W\sin\alpha}{FS(\cos\alpha + \tan\theta\sin\alpha) - \tan\varphi'(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha)}$$

$$N' = W\cos\alpha - U + \Delta E\,(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) \qquad \sum \Delta E = 0 \;\Rightarrow\; FS_f(\theta)$$



Qué satisface y qué desprecia

TEORÍA

Método	Fuerza entre dovelas	Equilibrio de fuerzas	Equilibrio de momentos	Superficie	FS (mismo círculo)
Ordinario (Fellenius)	ninguno	únicamente la normal en la base	✓	círculo	**1.569**
Bishop simplificado	solo normal (sin cortante)	vertical por dovela	✓	círculo	**1.740**
Spencer	paralelo: X = E tanθ	horizontal + vertical	✓	cada superficie	**1.717**

El método ordinario de las dovelas es el método predeterminado, que puede comprobarse con un cálculo manual y es conservador; su resultado es el más bajo de los tres métodos.

El método de Bishop es la elección habitual para superficies circulares; su resultado difiere del del método de Spencer en una superficie circular solo en unos pocos por ciento.

El método de Spencer satisface el equilibrio completo y se emplea para superficies no circulares; es el método con mayor coste de cálculo y, para algunos círculos, no se encuentra solución.

Enunciado

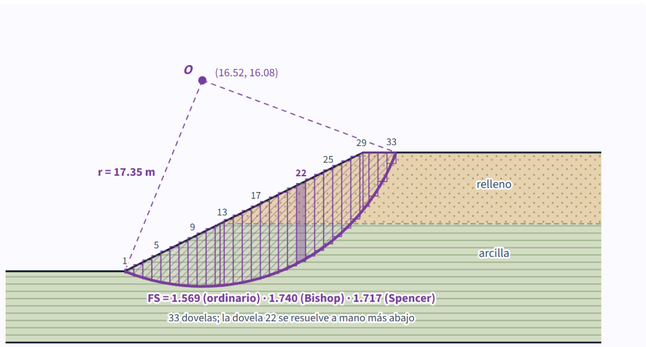
EJEMPLO

Datos

Sección	**superficie del terreno $(0;0)$–$(10;0)$–$(30;10)$–$(50;10)$ m; base $z=-6$ m; por encima de $z=4$ m, relleno; por debajo, arcilla**
Suelos	**relleno $\gamma=18$ kN/m³, $c'=5$ kPa, $\varphi'=30^\circ$; arcilla $\gamma=17.5$ kN/m³, $c'=20$ kPa, $\varphi'=18^\circ$; sin agua, carga ni sismo**
Círculo de deslizamiento	**centro $x_c=16.52$ m, $z_c=16.08$ m; radio $r=17.35$ m (círculo crítico, véase el obtenido en la búsqueda)**

SE PIDE

Los puntos x_a y x_b en que el círculo corta el terreno, su punto más bajo y la **división en dovelas**.



Solución

SOLUCIÓN

1 Intersección del círculo con la superficie del terreno: $(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2$

$$x_a = x_c - \sqrt{r^2 - (z_a - z_c)^2} = 16.518 - \sqrt{301.08 - (0 - 16.080)^2} = \mathbf{10.00}\ \text{m} \quad (z_a = 0)$$

$$x_b = x_c + \sqrt{r^2 - (z_b - z_c)^2} = 16.518 + \sqrt{301.08 - (10 - 16.080)^2} = \mathbf{32.77}\ \text{m} \quad (z_b = 10)$$

2 Punto más bajo y división en dovelas

$$z_{min} = z_c - r = 16.080 - 17.352 = -1.27\ \text{m} \ \ (> -6\ \text{m})$$

$$b = \frac{x_b - x_a}{30} = \frac{22.771}{30} = 0.759\ \text{m} \ \Rightarrow\ 30\ \text{dovela}$$

El círculo corta la masa entre x = 10.00 (pie) y 32.77 m (coronación); los bordes en x = 10, 18 y 30 m dividen otras 3 dovelas: **33 dovelas**.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

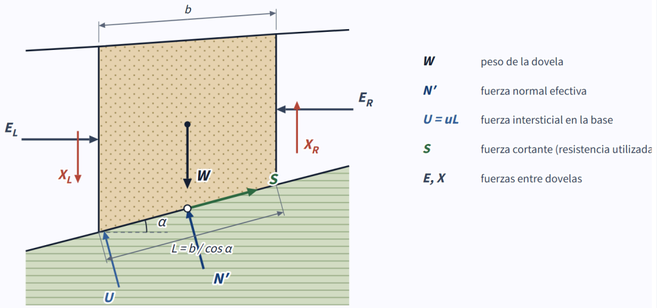
EJEMPLO

Datos

Dovela	**Dovela 22 del círculo del Ejemplo 1: punto medio $x_m = 24.800$ m, ancho $b = 0.759$ m**
Suelo	**relleno $\gamma = 18$ kN/m³ ($z > 4$ m); arcilla $\gamma = 17.5$ kN/m³, $c' = 20$ kPa, $\varphi' = 18°$ (base en arcilla); $u = 0$**

SE PIDE

Valores de **α**, **L**, **W** de la dovela; **N′**, **R** y **D** (método ordinario).



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Pendiente y longitud de la base

$$\sin\alpha = \frac{x_m - x_c}{r} = \frac{24.800 - 16.518}{17.352} = 0.4773 \;\Rightarrow\; \alpha = \mathbf{28.51}^\circ,\ \cos\alpha = 0.8787$$

$$L = \frac{b}{\cos\alpha} = \frac{0.759}{0.8787} = \mathbf{0.864}\ \text{m}$$

2 Altura de la columna y peso (relleno + arcilla)

$$z_{surface} = \frac{x_m - 10}{2} = 7.3998\ \text{m};\quad z_{base} = z_c - r\cos\alpha = 0.8327\ \text{m}$$

$$h_1 = 7.3998 - 4 = 3.3998\ \text{m (relleno)};\quad h_2 = 4 - 0.8327 = 3.1673\ \text{m (arcilla)}$$

$$W = b\,(h_1\gamma_1 + h_2\gamma_2) = 0.7590(3.3998 \cdot 18 + 3.1673 \cdot 17.5) = \mathbf{88.52}\ \text{kN/m}$$

La dovela 22 es **la más pesada** (W = 88.52 kN/m); su base está inclinada 28.5° y queda en la arcilla (c′ = 20 kPa, φ′ = 18°).

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

3 Fuerza normal y resistencia (u = 0)

$$N' = W\cos\alpha = 88.52 \times 0.8787 = \mathbf{77.79}\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = 20(0.864) + 77.79(0.3249) = 17.27 + 25.27 = \mathbf{42.55}\ \mathrm{kN/m}$$

4 Acción desestabilizadora

$$D = W\sin\alpha = 88.52 \times 0.4773 = \mathbf{42.25}\ \mathrm{kN/m}$$

Dovela 22: **R = 42.55** kN/m, **D = 42.25** kN/m. Los valores de R y D de cada dovela se obtienen **con los mismos tres pasos**; el factor de seguridad es el cociente de sus sumas: **FS = ΣR/ΣD** (tabla en las páginas siguientes).

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

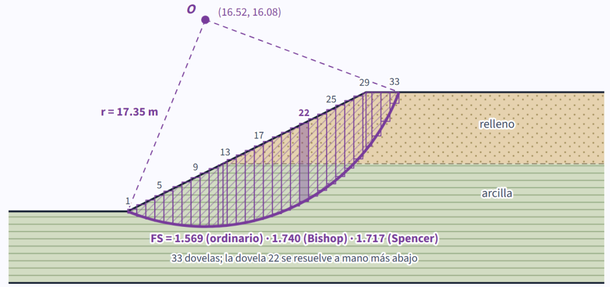
EJEMPLO

Datos

Dovelas	**El círculo del Ejemplo 1, 33 dovelas; cada dovela se resuelve con los tres pasos del Ejemplo 2**
Método	**Ordinario (Fellenius): sin fuerzas entre dovelas**

SE PIDE

Tabla de todas las dovelas: **W, N′, R, D** y sus totales; **FS = ΣR / ΣD**.



Solución (1/3)

SOLUCIÓN

No	x_m (m)	b (m)	α (°)	L (m)	W (kN/m)	c′ (kPa)	φ′ (°)	N′ (kN/m)	R (kN/m)	D (kN/m)
1	10.00	0.001	−22.1	0.001	0.00	20	18	0.00	0.03	−0.00
2	10.38	0.758	−20.7	0.810	4.49	20	18	4.20	17.57	−1.59
3	11.14	0.759	−18.1	0.798	13.08	20	18	12.43	20.01	−4.06
4	11.90	0.759	−15.4	0.787	21.15	20	18	20.39	22.37	−5.63
5	12.66	0.759	−12.9	0.779	28.74	20	18	28.02	24.67	−6.40
6	13.41	0.759	−10.3	0.771	35.84	20	18	35.27	26.89	−6.41
7	14.17	0.759	−7.8	0.766	42.49	20	18	42.10	29.00	−5.74
8	14.93	0.759	−5.2	0.762	48.68	20	18	48.47	30.99	−4.45
9	15.69	0.759	−2.7	0.760	54.42	20	18	54.36	32.86	−2.59
10	16.45	0.759	−0.2	0.759	59.72	20	18	59.72	34.59	−0.23
11	17.21	0.759	2.3	0.760	64.58	20	18	64.53	36.16	2.57
12	17.79	0.411	4.2	0.412	36.85	20	18	36.75	20.19	2.71
13	18.17	0.348	5.5	0.349	32.15	20	18	32.01	17.39	3.07
14	18.73	0.759	7.3	0.765	73.11	20	18	72.51	38.87	9.31
15	19.49	0.759	9.9	0.770	76.77	20	18	75.64	39.98	13.13
16	20.25	0.759	12.4	0.777	79.97	20	18	78.11	40.92	17.18
17	21.00	0.759	15.0	0.786	82.70	20	18	79.89	41.67	21.38

Solución (2/3)

SOLUCIÓN

No	x_m (m)	b (m)	α (°)	L (m)	W (kN/m)	c′ (kPa)	φ′ (°)	N′ (kN/m)	R (kN/m)	D (kN/m)
18	21.76	0.759	17.6	0.796	84.94	20	18	80.97	42.23	25.68
19	22.52	0.759	20.2	0.809	86.67	20	18	81.32	42.60	29.99
20	23.28	0.759	22.9	0.824	87.86	20	18	80.91	42.77	34.25
21	24.04	0.759	25.7	0.842	88.49	20	18	79.74	42.76	38.37
22	**24.80**	**0.759**	**28.5**	**0.864**	**88.52**	**20**	**18**	**77.79**	**42.55**	**42.25**
23	25.56	0.759	31.4	0.889	87.89	20	18	75.02	42.16	45.80
24	26.32	0.759	34.4	0.920	86.56	20	18	71.43	41.60	48.89
25	27.08	0.759	37.5	0.956	84.44	20	18	67.00	40.90	51.38
26	27.84	0.759	40.7	1.001	81.43	20	18	61.72	40.08	53.11
27	28.59	0.758	44.1	1.056	77.34	20	18	55.53	39.17	53.83
28	29.35	0.760	47.7	1.129	72.09	5	30	48.51	33.65	53.33
29	29.87	0.267	50.3	0.418	23.72	5	30	15.15	10.84	18.25
30	30.25	0.492	52.3	0.805	40.15	5	30	24.55	18.20	31.76
31	30.87	0.759	55.8	1.351	50.12	5	30	28.16	23.01	41.46
32	31.63	0.759	60.6	1.545	33.40	5	30	16.41	17.20	29.09
33	32.39	0.759	66.2	1.878	12.72	5	30	5.14	12.36	11.64
Σ					**1,841.11**			**1,613.77**	**1,006.25**	**641.34**

Solución (3/3)

SOLUCIÓN

1 Sumas y factor de seguridad

$$\sum R = 1{,}006.25\ \text{kN/m} \qquad \sum D = 641.34\ \text{kN/m} \qquad \sum W = 1{,}841.1\ \text{kN/m}$$

$$FS = \frac{\sum R}{\sum D} = \frac{1{,}006.25}{641.34} = \mathbf{1.569}$$

Para este círculo, el método ordinario da **FS = 1.569**. En las dovelas del lado del pie (α < 0) la base está inclinada en contra del deslizamiento: D es negativo y reduce ΣD. La dovela 22 es la fila 22 de la tabla y coincide con los valores obtenidos a mano.

ΣR/ΣD: razón entre los efectos **estabilizadores** y los desestabilizadores; si FS > 1, no se espera deslizamiento a lo largo de este círculo.

El método ordinario da el valor más bajo; Bishop y Spencer dan valores más altos sobre el mismo círculo (ejemplos siguientes).

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

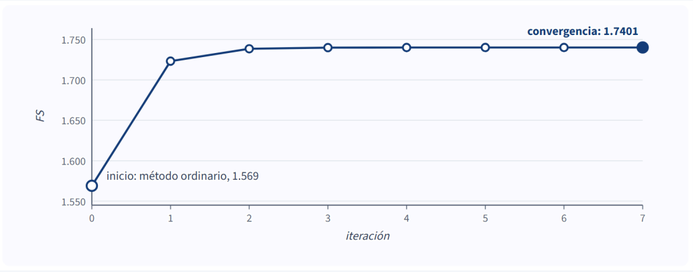
EJEMPLO

Datos

Dovela y círculo	**La dovela 22 del Ejemplo 2 y el círculo del Ejemplo 1; valor inicial $FS_0 = 1.569$ del Ejemplo 3**
Método	$N' = \dfrac{W - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha}$, $m_\alpha = \cos\alpha + \dfrac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$ **(u = 0)**

SE PIDE

Para la dovela 22: **m_α**, **N′**, **R**; para todo el círculo: **iteración** y **FS**.



Solución (1/4)

SOLUCIÓN

1 Primera iteración (FS_0 = valor del método ordinario = 1.5690)

$$m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS_0} = 0.8787 + \frac{0.4773(0.3249)}{1.5690} = 0.9776$$

$$N' = \frac{W - cL\sin\alpha/FS_0}{m_\alpha} = \frac{88.52 - 20(0.864)(0.4773)/1.5690}{0.9776} = 85.17\ \text{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 85.17(0.3249) = 44.95\ \text{kN/m}$$

Solución (2/4)

SOLUCIÓN

2 Con el valor convergido (FS = 1.7401)

$$m_\alpha = 0.8787 + \frac{0.4773(0.3249)}{1.7401} = \mathbf{0.9679}$$

$$N' = \frac{88.52 - 20(0.864)(0.4773)/1.7401}{0.9679} = \mathbf{86.56}\ \text{kN/m}$$

$$R = cL + N' \tan\varphi' = 20(0.864) + 86.56(0.3249) = \mathbf{45.40}\ \text{kN/m} \qquad D = 42.25\ \text{kN/m}$$

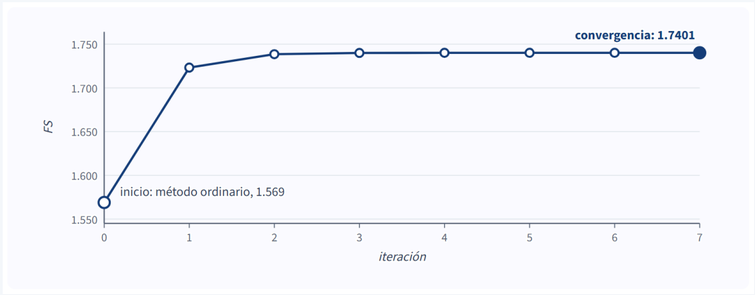
La fuerza normal de la dovela 22 pasa de 77.79 en el método ordinario a **86.56** kN/m (equilibrio vertical entre dovelas); la resistencia, 42.55 → **45.40** kN/m. Los mismos pasos se repiten en 33 dovelas.

Solución (3/4)

SOLUCIÓN

2 En cada iteración se recalcula ΣR, $FS_{k+1} = \Sigma R_k / \Sigma D$

Iteración k	FS_k	Diferencia
0 (ordinario)	1.5690	
1	1.7232	0.1542
2	1.7385	0.0153
3	1.7399	0.0014
4	1.7401	0.0001
5	1.7401	0.0000
6	1.7401	0.0000
7	**1.7401**	0.0000



En 7 iteraciones, **FS = 1.740**; ΣR = 1,115.97, ΣD = 641.34 kN/m. Es un 10.9% superior al del método ordinario (1.569).

Solución (4/4)

SOLUCIÓN

No	α (°)	W	m_α	N′	R
1	−22.1	0.00	0.8566	0.01	0.03
2	−20.7	4.49	0.8693	8.95	19.11
3	−18.1	13.08	0.8928	17.83	21.76
4	−15.4	21.15	0.9141	25.78	24.12
5	−12.9	28.74	0.9333	32.92	26.27
6	−10.3	35.84	0.9505	39.38	28.22
7	−7.8	42.49	0.9656	45.23	30.02
8	−5.2	48.68	0.9788	50.55	31.67
9	−2.7	54.42	0.9900	55.39	33.20
10	−0.2	59.72	0.9993	59.80	34.61
11	2.3	64.58	1.0066	63.81	35.93
12	4.2	36.85	1.0110	36.10	19.98
13	5.5	32.15	1.0133	31.35	17.18
14	7.3	73.11	1.0156	70.88	38.34
15	9.9	76.77	1.0172	73.99	39.45
16	12.4	79.97	1.0168	76.77	40.49
17	15.0	82.70	1.0143	79.24	41.46
18	17.6	84.94	1.0097	81.39	42.37
19	20.2	86.67	1.0028	83.22	43.22
20	22.9	87.86	0.9937	84.71	44.01
21	25.7	88.49	0.9821	85.83	44.74
22	**28.5**	**88.52**	**0.9679**	**86.56**	**45.40**
23	31.4	87.89	0.9508	86.84	46.00
24	34.4	86.56	0.9307	86.59	46.53
25	37.5	84.44	0.9072	85.70	46.98
26	40.7	81.43	0.8798	84.02	47.33
27	44.1	77.34	0.8480	81.24	47.52
28	47.7	72.09	0.9183	75.89	49.46
29	50.3	23.72	0.8941	25.50	16.81
30	52.3	40.15	0.8741	43.83	29.33
31	55.8	50.12	0.8363	56.09	39.14
32	60.6	33.40	0.7803	37.85	29.58
33	66.2	12.72	0.7076	11.00	15.74
Σ		**1,841.11**			**1,115.97**

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

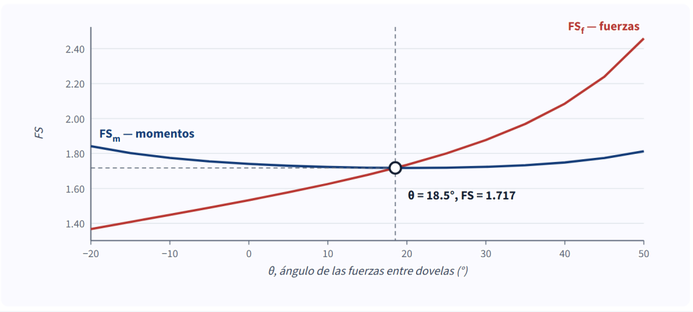
EJEMPLO

Datos

Dovela y círculo	**La dovela 22 del Ejemplo 2, el círculo del Ejemplo 1; fuerzas entre dovelas paralelas,** $X = E \tan\theta$
Ángulo de la solución	$\theta = 18.54°$ **(ángulo en que se cortan las dos curvas siguientes),** $FS = 1.717$

SE PIDE

Para la dovela 22: **ΔE**, **N′**, **R**, **E** y **X**; curvas θ–FS y el círculo completo.



Solución (1/4)

SOLUCIÓN

1 Diferencia de fuerza normal de la dovela ΔE (θ = 18.54°, tan θ = 0.3354, FS = 1.717)

$$\text{numerador} = cL + \tan\varphi' \, W\cos\alpha - FS\, W\sin\alpha = 17.275 + 25.274 - 72.542 = -29.99$$

$$\text{denominador}_1 = FS(\cos\alpha + \tan\theta\sin\alpha) = 1.7837$$

$$\text{denominador}_2 = -\tan\varphi'(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) = 0.0593$$

$$\Delta E = \frac{\text{numerador}}{\text{denominador}_1 + \text{denominador}_2} = \frac{-29.99}{1.8430} = \mathbf{-16.27}\ \text{kN/m}$$

Solución (2/4)

SOLUCIÓN

2 Fuerza normal, resistencia y fuerzas entre dovelas

$$N' = W\cos\alpha + \Delta E(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) = 77.786 + (-16.27)(-0.1826) = \mathbf{80.76}\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = \mathbf{43.51}\ \mathrm{kN/m}$$

$$E_{foot} = 254.69\ \mathrm{kN/m} \quad \Rightarrow \quad E_{top} = E_{foot} + \Delta E = 238.41\ \mathrm{kN/m}$$

$$X_{foot} = E\tan\theta = \mathbf{85.42}$$

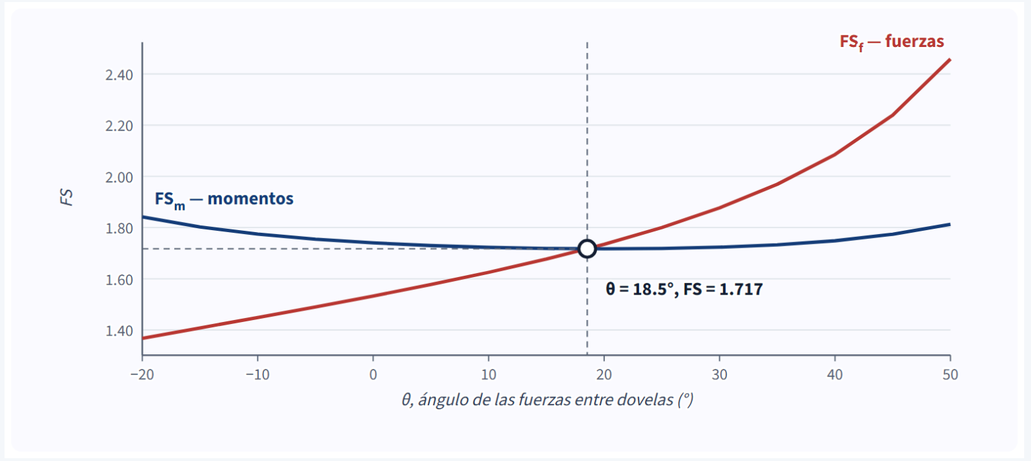
En Spencer, la fuerza normal de la dovela 22 es de **80.76** kN/m (método ordinario, 77.79; Bishop, 86.56); como fuerza entre dovelas, hacia el pie del talud actúa E = 254.69 kN/m.

Solución (3/4)

SOLUCIÓN

3 Para cada θ, FS_f ($\Sigma\Delta E = 0$) y FS_m (momentos); la intersección es la solución

θ (°)	FS_m (momento)	FS_f (fuerza)
-20	1.842	1.367
-15	1.802	1.408
-10	1.774	1.449
-5	1.755	1.490
0	1.740	1.533
5	1.730	1.577
10	1.723	1.625
15	1.718	1.677
20	1.717	1.735
25	1.718	1.800
30	1.723	1.877
35	1.733	1.969
40	1.748	2.085
45	1.774	2.239
50	1.812	2.458
18.54	**1.717**	**1.717**



Solución (4/4)

SOLUCIÓN

No	ΔE	E (pie)	N′	R
1	0.02	−0.00	0.02	0.03
2	17.12	0.02	15.62	21.28
3	21.59	17.14	26.01	24.42
4	24.46	38.73	34.81	27.06
5	26.08	63.19	42.35	29.33
6	26.67	89.27	48.84	31.30
7	26.41	115.94	54.44	33.01
8	25.43	142.35	59.29	34.51
9	23.87	167.78	63.49	35.83
10	21.80	191.65	67.12	36.99
11	19.32	213.45	70.24	38.01
12	9.30	232.78	39.17	20.97
13	7.19	242.08	33.72	17.95
14	13.38	249.26	75.26	39.76
15	10.03	262.64	77.24	40.50
16	6.48	272.67	78.84	41.16
17	2.77	279.15	80.07	41.73
18	−1.03	281.92	80.95	42.23
19	−4.89	280.89	81.47	42.65
20	−8.75	276.01	81.62	43.01
21	−12.57	267.25	81.39	43.29
22	**−16.27**	**254.69**	**80.76**	**43.51**
23	−19.80	238.41	79.67	43.67
24	−23.06	218.61	78.07	43.76
25	−25.94	195.55	75.88	43.79
26	−28.29	169.61	72.98	43.74
27	−29.89	141.32	69.14	43.59
28	−30.84	111.42	64.36	42.80
29	−11.02	80.59	21.27	14.37
30	−19.70	69.57	36.10	24.87
31	−26.62	49.87	45.17	32.83
32	−18.69	23.25	29.61	24.82
33	−4.56	4.56	8.70	14.41
Σ	0.00			**1,101.18**

θ = 18.54°; ΣR = 1,101.18, ΣD = 641.34 → **FS = 1.717**. E_{max} = 281.9 kN/m.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Peso, presión intersticial, agua en el talud

TEORÍA

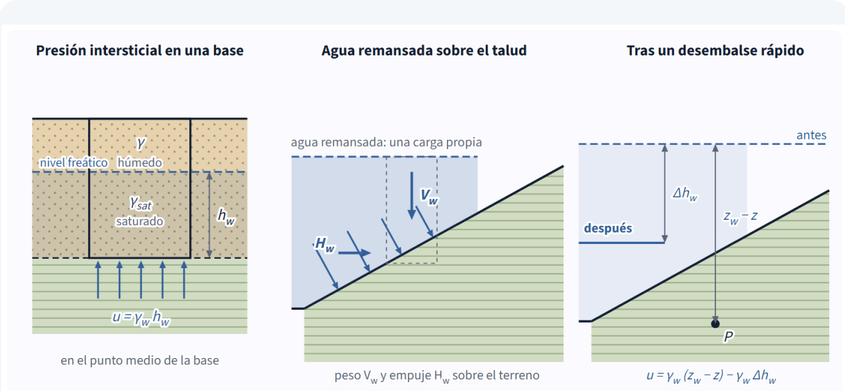
El agua interviene en el análisis de tres formas: el peso del suelo saturado, la presión intersticial que reduce la resistencia en la base de cada dovela y, allí donde se encuentra sobre el talud, como una carga por derecho propio.

Por debajo del nivel freático, la presión intersticial es hidrostática; como no se analiza la filtración, un nivel freático inclinado es una aproximación a una red de flujo, y el peso específico sumergido no se utiliza nunca.

Cuando la presión intersticial se conoce como una fracción de la carga del terreno suprayacente, se asigna al suelo una relación $\mathbf{r_u}$; este caso es válido para un relleno en fase de construcción o para un relleno sobre arcilla blanda.

Como el agua situada delante del talud puede drenar, cuando desciende rápidamente desaparece el apoyo, se conserva la presión intersticial y el factor de seguridad corresponde al valor más bajo, inmediatamente posterior al descenso del agua.

$$u = \gamma_w h_w \qquad u = r_u \frac{W}{b} \qquad H_w = \frac{\gamma_w}{2}\left[(z_w - z_L)^2 - (z_w - z_R)^2\right]$$



Enunciado

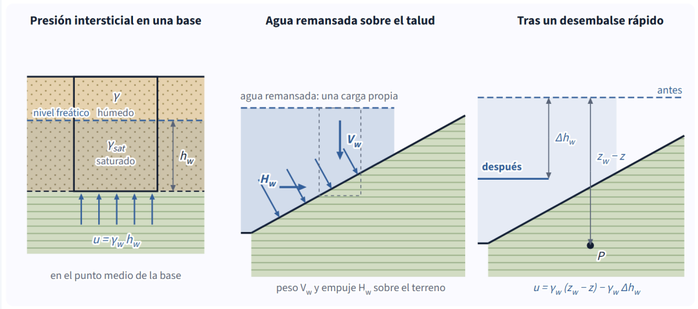
EJEMPLO

Datos

Línea de agua	$(0;0)$–$(20;2.5)$–$(50;7)$ **m, hidrostático;** $\gamma_w = 9.81$ **kN/m³; pesos específicos saturados: relleno 20, arcilla 19.5 kN/m³**
Dovela	**el mismo círculo; la dovela situada a** $x_m = 24.800$ **m (con agua pasa a ser la n.º 24 y no la n.º 33)**

SE PIDE

En la dovela **z_w, h_w, u, U**; los nuevos **W, N′, R, D**; en todo el círculo, **FS**.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Altura del agua y presión intersticial

$$z_w = 2.5 + \frac{24.800 - 20}{30}(4.5) = 3.2199 \text{ m}$$

$$h_w = z_w - z_{base} = 3.2199 - 0.8327 = \mathbf{2.3872} \text{ m}$$

$$u = \gamma_w h_w = 9.81(2.3872) = \mathbf{23.42} \text{ kPa} \qquad U = uL = 23.42(0.864) = \mathbf{20.23} \text{ kN/m}$$

2 Peso: húmedo sobre el nivel del agua, saturado por debajo

$$W = b\left[h_1\gamma_1 + h_{dry}\gamma_{moist} + h_w\gamma_{sat}\right]$$

$$W = 0.7590[3.3998(18) + 0.7801(17.5) + 2.3872(19.5)] = \mathbf{92.14} \text{ kN/m}$$

El agua eleva el peso de 88.52 kN/m (seco) a **92.14** kN/m y, además, genera en la base una fuerza de agua **U = 20.23** kN/m.

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

3 Fuerza normal efectiva, resistencia, acción desestabilizadora (dovela 22)

$$N' = W\cos\alpha - U = 92.14(0.8787) - 20.23 = \mathbf{60.74}\ \text{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 60.74(0.3249) = \mathbf{37.01}\ \text{kN/m} \qquad D = W\sin\alpha = \mathbf{43.98}\ \text{kN/m}$$

4 Círculo completo (36 dovelas, mismo círculo) y comparación con el caso seco

Método	ΣU	ΣR	ΣD	FS (agua)	FS (seco)
Ordinario	476.94	879.96	655.41	**1.343**	1.569
Bishop	476.94	981.07	655.41	**1.497**	1.740
Spencer	476.94	970.22	655.41	**1.480**	1.717

Para el mismo círculo, el agua reduce FS de 1,569 a **1.343** (ordinario); si se vuelve a buscar el círculo crítico con la línea de agua, resulta más superficial y da **1.255 / 1.568 / 1.564** (ordinario / Bishop / Spencer).

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Carga en franja y carga puntual; vertical, perpendicular, inclinada

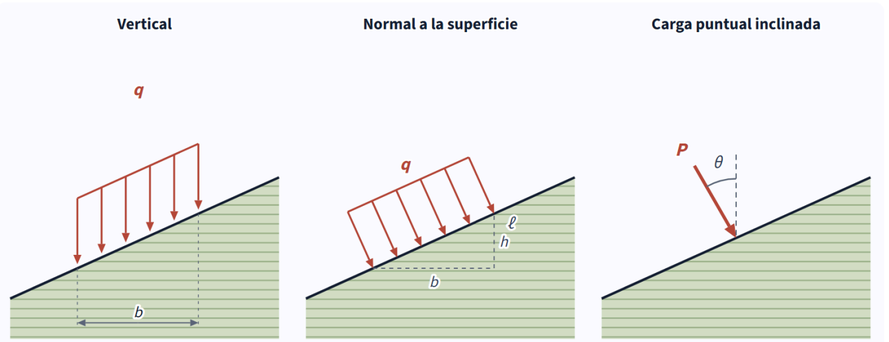
TEORÍA

Una sobrecarga en franja vertical o inclinada se toma sobre su proyección horizontal, y la fuerza sobre la parte de ancho horizontal b es q b.

Una carga que actúa perpendicularmente a la superficie se toma sobre la longitud de la superficie; la fuerza sobre un tramo de longitud ℓ es q ℓ, con componente vertical q b y componente horizontal q h.

Cada dovela soporta la parte de una carga que cae entre sus bordes, repartida según el ancho horizontal, y la carga puntual pertenece a la dovela que contiene su punto de aplicación.

$$F = q\,b \qquad F_n = q\,\ell \;\Rightarrow\; F_z = q\,b,\; F_x = q\,h \qquad P_x = P\sin\theta,\; P_z = P\cos\theta$$



Fuerzas de inercia en el centroide de la dovela

TEORÍA

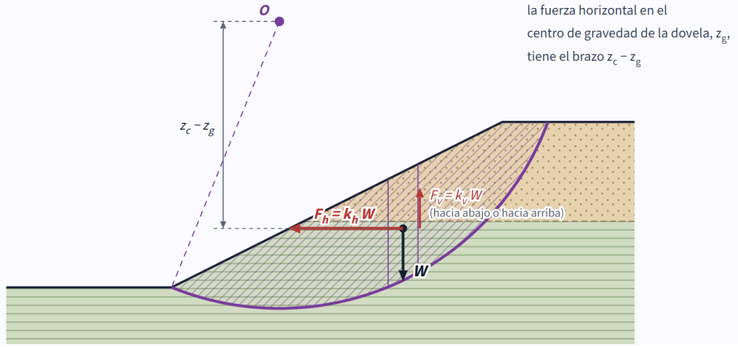
En el enfoque **pseudoestático**, la sacudida sísmica se representa mediante una aceleración constante aplicada a la masa deslizante y expresada como una fracción de g.

En cada dovela, las fuerzas de inercia de la masa de suelo ($\mathbf{W_{soil}}$) se aplican en el centro de gravedad ($\mathbf{z_g}$) obtenido a partir de las partes húmeda y saturada del suelo dentro de la dovela, ya que el agua acumulada sobre la dovela no soporta esta fuerza.

En la opción de caso crítico se ensayan ambas direcciones horizontales y ambas verticales, y se adopta el menor factor de seguridad; los coeficientes los introduce el usuario y el FS estático y el **pseudoestático** se presentan conjuntamente en el informe.

$$F_h = k_h W_{soil} \qquad F_v = k_v W_{soil}$$

$$N = (W + F_v)\cos\alpha \mp F_h \sin\alpha \qquad D = (W + F_v)\sin\alpha + F_h \frac{z_c - z_g}{r}$$



Enunciado

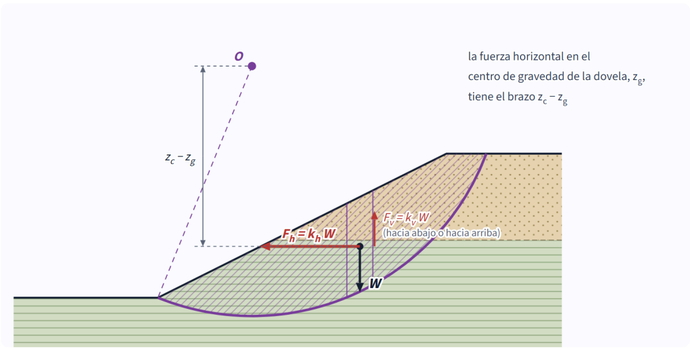
EJEMPLO

Datos

Sismo	$k_h = 0.15$, $k_v = 0$; **fuerza horizontal hacia el pie del talud (dirección crítica)**
Dovela y círculo	**Dovela 22 y círculo del Ejemplo 2; el centroide hace falta para el brazo de momento z_g**

SE PIDE

En la dovela 22: **F_h, N′, R, D**; en todo el círculo, **FS_{sis}** con tres métodos.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Fuerza de inercia y brazo de palanca

$$F_h = k_h W = 0.15(88.52) = \mathbf{13.28}\ \mathrm{kN/m}$$

$$z_g = \sum W_i z_{g,i}/W = (46.45(5.700) + 42.07(2.416))/88.52 = 4.139\ \mathrm{m}$$

$$\text{brazo de momento} = (z_c - z_g)/r = (16.080 - 4.139)/17.352 = 0.6882$$

2 Fuerza normal, resistencia, efecto desestabilizador

$$N' = W\cos\alpha - F_h \sin\alpha = 77.79 - 6.34 = \mathbf{71.45}\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 71.45(0.3249) = \mathbf{40.49}\ \mathrm{kN/m}$$

$$D = W\sin\alpha + F_h\,\frac{z_c - z_g}{r} = 42.25 + 13.28(0.6882) = \mathbf{51.39}\ \mathrm{kN/m}$$

El efecto desestabilizador pasa de 42.25 → **51.39** kN/m (+22%), la resistencia de 42.55 → **40.49** kN/m: la fuerza horizontal reduce la fuerza normal y añade un momento de deslizamiento.

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

3 Tres métodos sobre el mismo círculo (k_h = 0.15, k_v = 0)

Método	ΣR	ΣD	FS (estático)	FS (sismo)
Ordinario	967.97	840.48	1.569	**1.152**
Bishop	1,083.01	840.48	1.740	**1.289**
Spencer	1,069.09	840.48	1.717	**1.272**

k_h = 0.15 reduce FS en aproximadamente un 27% (en condiciones ordinarias 1.569 → **1.152**). Bajo la acción sísmica el círculo crítico también cambia: en el modelo de la página (k_h = 0.15, k_v = 0.05, direcciones críticas) el resultado de la búsqueda es 1.138 / 1.265 / 1.250.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

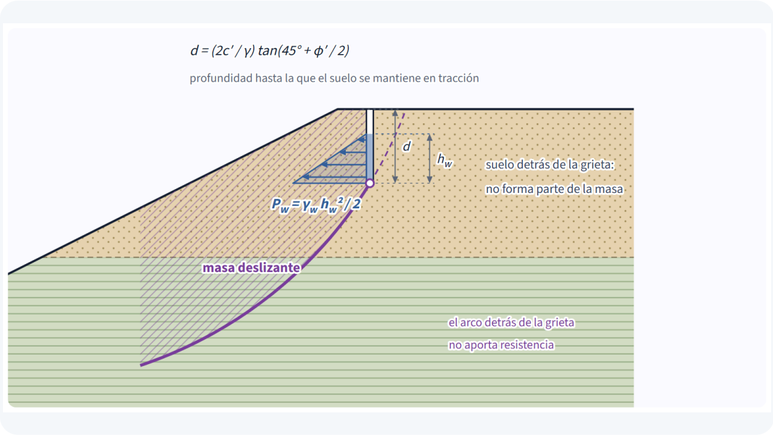
Agua en la grieta y a profundidad

TEORÍA

La profundidad de la grieta de tracción se obtiene como d = 2c′/γ·tan(45° + φ′/2); en condiciones sin drenaje esta profundidad es $2c_u/\gamma$.

Cuando la grieta es activa, la superficie de rotura termina en el punto en que la profundidad de la masa deslizante es igual a la profundidad de la grieta; el terreno situado tras la grieta no forma parte de la masa deslizante y la parte del arco que queda dentro de la grieta no aporta resistencia.

El agua que permanece en la grieta hasta la altura h_W ejerce presión con una fuerza hidrostática; una grieta llena de agua reduce el factor de seguridad, y esta situación se pasa por alto con más frecuencia.



$$d = \frac{2c'}{\gamma}\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) \qquad d = \frac{2c_u}{\gamma}$$

$$P_w = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} \qquad z_f = z_{base} + \frac{h_w}{3} \qquad D_{crack} = \frac{P_w\,(z_c - z_f)}{r}$$

Enunciado

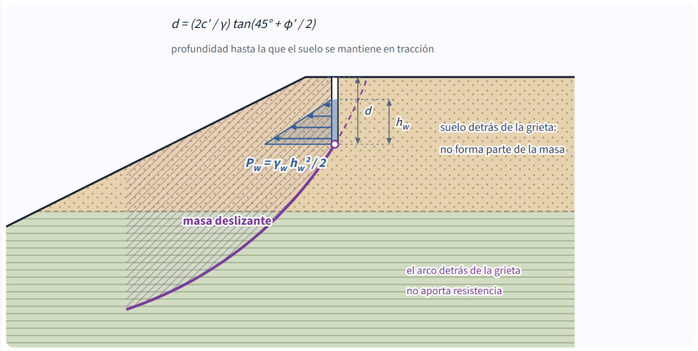
EJEMPLO

Datos

Grieta	**en la parte superior, grieta vertical a $d = 2$ m de profundidad (valor inicial del modelo); dos casos: seca y llena de agua ($h_w = 2$ m)**
Círculo	**Círculo del Ejemplo 1; termina en la base de la grieta**

SE PIDE

Posición **x** de la grieta; **P_w**, **z_f**, **D_{gr}**; **FS** por tres métodos.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Ubicación de la grieta: termina donde el círculo alcanza la cota z = 10 − 2 = 8 m

$$x = x_c + \sqrt{r^2 - (8 - z_c)^2} = 16.518 + \sqrt{301.08 - (8 - 16.080)^2} = \mathbf{31.87}\ \text{m}$$

2 Agua en la grieta (h_w = 2 m): fuerza y momento

$$P_w = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} = \frac{9.81(2)^2}{2} = \mathbf{19.62}\ \text{kN/m} \qquad z_f = 8 + \frac{2}{3} = 8.667\ \text{m}$$

$$D_{crack} = \frac{P_w(z_c - z_f)}{r} = \frac{19.62(16.080 - 8.667)}{17.352} = \mathbf{8.38}\ \text{kN/m}$$

La profundidad de Rankine es de 0.96 m en el relleno y de 3.15 m en la arcilla; el módulo toma la profundidad de la grieta con el valor introducido por el ingeniero (aquí 2 m). Una grieta llena de agua añade **8.38** kN/m a ΣD.

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

3 Sin grieta, grieta seca y grieta llena de agua (mismo círculo; 34 dovelas en la grieta)

Método	FS sin grieta	ΣR	ΣD (seco)	FS con grieta seca	ΣD (agua)	FS con grieta llena
Ordinario	1.569	991.18	625.52	**1.585**	633.91	**1.564**
Bishop	1.740	1,096.39	625.52	**1.753**	633.91	**1.727**
Spencer	1.717	1,083.00	625.52	**1.731**	633.91	**1.702**

Una grieta seca modifica muy poco el FS (la masa desestabilizadora situada encima y la resistencia en el arco desaparecen a la vez: 1.569 → 1.585); una **grieta llena de agua** lo reduce (1.564). El agua en la grieta es el caso que más se olvida.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Malla de centros, radios, refinamiento

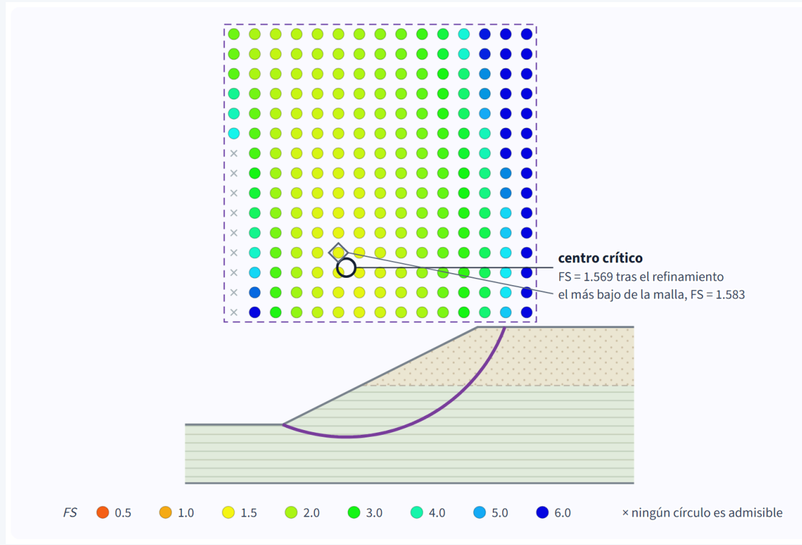
TEORÍA

La búsqueda del círculo crítico se realiza sobre una malla de centros de $n_x \times n_z$ puntos situada sobre el talud, y en cada centro se prueba un conjunto de radios equiespaciados.

Cada círculo se divide en dovelas y se resuelve, y el factor de seguridad más bajo hallado para cada centro se guarda junto con el radio correspondiente; en el modelo resuelto se probaron 4650 círculos con una malla de 15 × 15 centros y 12 radios.

$$FS(x_c, z_c) = \min_j FS(x_c, z_c, r_j) \qquad FS_{crit} = \min_{x_c, z_c} FS(x_c, z_c)$$

Modelo resuelto	Valor
Malla ($n_x \times n_z \times$ radio)	15 × 15 × 12
Círculo de prueba / aceptado	4,650 / 3,487
El mínimo de la malla	FS = 1.583
Tras el refinamiento	**FS = 1.569**
Círculo crítico	x_c = 16.52, z_c = 16.08, r = 17.35 m



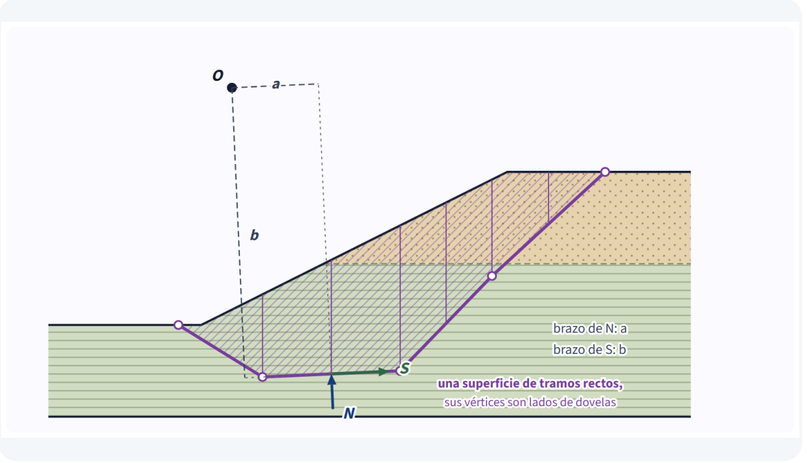
Línea quebrada, solo Spencer

TEORÍA

La superficie no circular puede seguir un estrato débil mediante cuñas que descienden desde la coronación del talud y ascienden hacia el pie del talud; es una superficie poligonal con ambos extremos en la superficie del terreno.

En una superficie de rotura poligonal, la ecuación de momentos se plantea respecto a un punto O elegido por encima del pie de la masa; el brazo de N es a y el de S es b.

Se busca la superficie con menor factor de seguridad como una línea quebrada de n tramos; el movimiento solo se conserva cuando la superficie sigue siendo admisible, y la restricción de convexidad evita la deriva hacia superficies en zigzag.



$$a = (X - X_O)\cos\alpha - (z - z_O)\sin\alpha \qquad b = (X - X_O)\sin\alpha + (z - z_O)\cos\alpha$$

$$\sum [Na + Sb] - \sum V(X - X_O) - \sum A(z_A - z_O) + M_{reinforcement} + M_{crack} = 0$$

Contribución del elemento pasivo y del activo al FS

TEORÍA

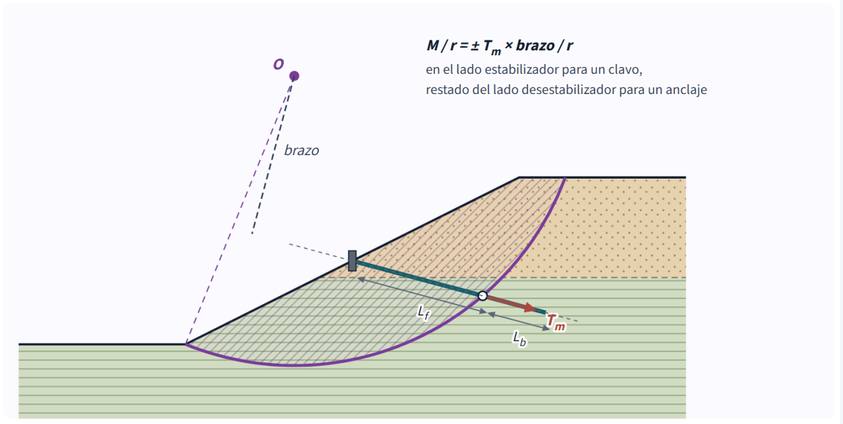
El elemento de refuerzo es una línea que corta la superficie de rotura; la longitud de la superficie de rotura situada delante del punto en que corta al arco se designa L_f, y la longitud adherente situada detrás de ese punto, L_b.

El momento de un elemento pasivo (clavo, geomalla) se suma al lado estabilizador; como un elemento activo (anclaje) soporta su carga antes de que se produzca el movimiento, su momento se resta del lado desestabilizador.

Para la misma fuerza, un elemento activo aumenta el factor de seguridad más que un elemento pasivo; la fuerza se toma igual en el caso estático y en el pseudoestático.

$$\frac{M}{r} = \pm \frac{(x_P - x_c)F_z - (z_P - z_c)F_x}{r}$$

$$FS = \frac{\sum R + \sum M_{passive}/r}{\sum D - \sum M_{active}/r}$$



El menor de los tres valores

TEORÍA

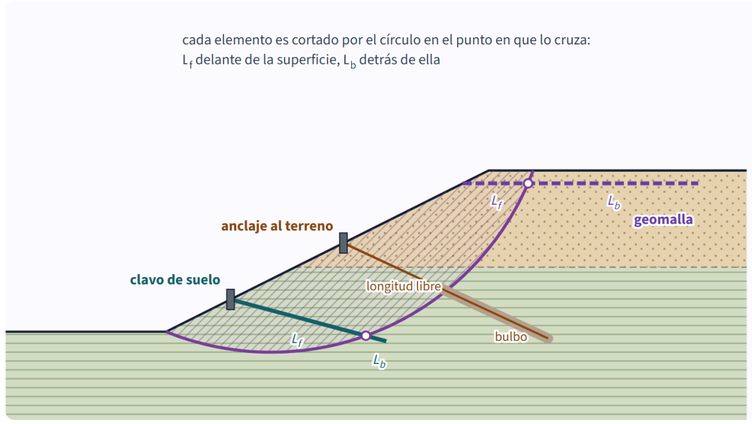
La fuerza de tracción del clavo es el menor de los tres valores: $T = \min[T_t, q_u \pi D_h L_b, q_u \pi D_h L_f + T_h]$.

El clavo es un elemento pasivo: entra en acción a medida que se mueve la masa, y la fuerza del clavo dividida por la separación Sh se expresa como $T_m = T/S_h$.

Un clavo cuya cabeza queda fuera del círculo o cuyo extremo se encuentra dentro de la masa no aporta fuerza para ese círculo.

En la longitud libre no se desarrolla adherencia; el anclaje lo retiene el bulbo, y la fuerza que el anclaje transmite al cortar un círculo de deslizamiento es la menor de tres valores: **$T = \min[P, T_t, q_u \pi D_h L_b]$**.

El anclaje es un elemento activo: la carga está en el tendón antes de que la masa se mueva, y en las ecuaciones de Spencer el anclaje es una fuerza dada; allí no se divide por **FS**.



$$\text{clavo: } T = \min\left[T_t,\ q_u \pi D_h L_b,\ q_u \pi D_h L_f + T_h\right] \qquad T_m = \frac{T}{S_h}$$

$$\text{anclaje: } T = \min\left[P,\ T_t,\ q_u \pi D_h L_b\right] \qquad T_m = \frac{T}{S_h}$$

Resistencia de cálculo, arrancamiento, conexión

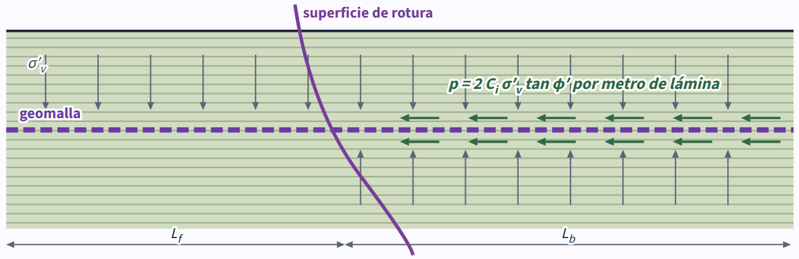
TEORÍA

La geomalla se define por su longitud L, su resistencia de cálculo a largo plazo por metro de sección T_d, el coeficiente de interacción entre el suelo y la geomalla C_i y, cuando se conecta al paramento, la resistencia de la conexión T_c.

La resistencia al arrancamiento por metro de longitud procede del rozamiento en sus dos caras bajo la tensión efectiva de sobrecarga σ'_v; la geomalla es un elemento pasivo y actúa en el plano de la lámina.

σ'_v se obtiene del peso del terreno situado sobre la placa —con el peso específico saturado por debajo del nivel freático— restando la presión intersticial; las cargas superficiales no se incluyen, quedando del lado de la seguridad.

$$p = 2\,C_i\,\sigma'_v\tan\varphi' \qquad T_m = \min\left[T_d,\ \int_{L_b} p\,dl,\ \int_{L_f} p\,dl + T_c\right]$$



Enunciado

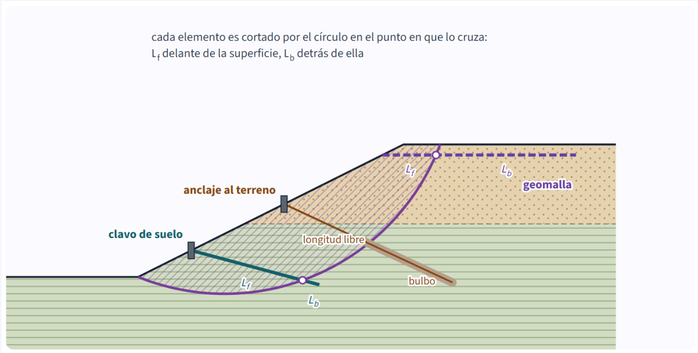
EJEMPLO

Datos

Clavos	**cuatro clavos, con cabezas a $x = 14, 18, 22, 26$ m (en la superficie), inclinados 15°, $L = 14$ m; $T_t = 250$ kN, $q_u = 120$ kPa, $D_h = 120$ mm, $S_h = 1.5$ m**
Círculo	**círculo hallado por la búsqueda en el modelo con clavos: centro $(18.29;\ 13.90)$, $r = 18.18$ m**

SE PIDE

Para cada clavo, **L_f, L_b, T** y **T_m**; la aportación al momento; **FS**.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Resistencia de adherencia (por unidad de longitud) y clavo N3

$$q_u \pi D_h = 120\pi(0.120) = \mathbf{45.239}\ \text{kN/m}$$

$$L_f = 11.282\ \text{m},\ L_b = 2.718\ \text{m} \qquad P(32.90;\ 3.08)$$

$$T = \min[250,\ 45.239(2.718) = 122.94,\ 45.239(11.282) = 510.4] = \mathbf{122.94}\ \text{kN}$$

$$T_m = \frac{T}{S_h} = \frac{122.94}{1.5} = \mathbf{81.96}\ \text{kN/m}$$

2 Momento de la fuerza respecto al centro del círculo

$$F_x = T_m \cos 15^\circ = 79.17,\quad F_z = -T_m \sin 15^\circ = -21.21\ \text{kN/m}$$

$$\frac{M}{r} = \frac{(x_P - x_c)F_z - (z_P - z_c)F_x}{r} = \frac{(14.606)(-21.21) - (-10.822)(79.17)}{18.178} = \mathbf{30.09}\ \text{kN/m}$$

El clavo N3 soporta una carga de **81.96** kN/m que retiene la masa; su momento añade 30.09 kN/m a ΣR (elemento pasivo).

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

3 Fuerzas de los cuatro clavos (mismo método)

Clavo	L_f (m)	L_b (m)	T (kN)	Determinante	T_m (kN/m)	M/r (kN/m)
N1	–	–	0	punta dentro de la masa: no soporta carga	0	0
N2	13.13	0.87	39.32	arrancamiento en la parte posterior	26.21	13.90
N3	11.28	2.72	122.94	arrancamiento en la parte posterior	81.96	30.09
N4	8.82	5.18	234.18	arrancamiento en la parte posterior	156.12	31.82

4 Modelo con clavos: FS en el círculo hallado por la búsqueda

Método	Sin clavos (excavación)	Con clavos
Ordinario	1.569	**1.753**
Bishop	1.740	**2.018**
Spencer	1.717	**2.031**

Los clavos aumentan el FS en aproximadamente un 12% (ordinario 1.569 → 1.753; Bishop 1.740 → 2.018).

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Envolvente de resistencia curvilínea y su tangente en cada base

TEORÍA

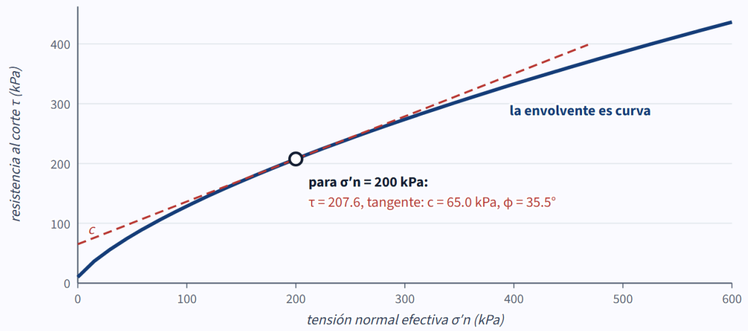
En el criterio de Hoek–Brown generalizado, el macizo rocoso se define mediante σ_{ci}, GSI, m_i y D; se toma D = 0 para un macizo no alterado y D = 1 en caso de voladura intensa o de aflojamiento.

Dado que la resistencia al corte en la base de la dovela depende de la tensión normal, la envolvente curva se transforma al plano τ–σ′n mediante las relaciones de Balmer; la tangente proporciona en la base los valores de ci y φi.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}\left(m_b\frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

$$m_b = m_i\, e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \qquad s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \qquad a = \frac{1}{2} + \frac{e^{-GSI/15} - e^{-20/3}}{6}$$

$$d = \frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} \qquad \sin\varphi_i = \frac{d-1}{d+1} \qquad c_i = \tau - \sigma_n' \tan\varphi_i$$



Enunciado

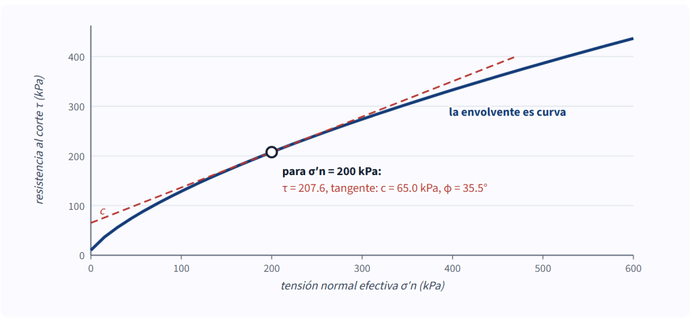
EJEMPLO

Datos

Macizo rocoso	$\sigma_{ci} = 5$ **MPa,** $GSI = 30$**,** $m_i = 8$**,** $D = 0$
Base	**tensión normal efectiva** $\sigma'_n = 200$ **kPa**

SE PIDE

m_b, s, a; con esta tensión, **τ**, **φ_i** y **c_i**.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Constantes del macizo rocoso

$$m_b = 8\,e^{(30-100)/28} = 0.6567 \qquad s = e^{(30-100)/9} = 0.000419$$

$$a = 0.5 + \frac{e^{-2} - e^{-20/3}}{6} = 0.5223$$

2 Para σ'_n = 200 kPa, σ'_3 = 93.05 kPa (se obtiene por iteración)

$$d = 1 + a\,m_b \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a-1} = 3.767$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a} = 602.9\ \text{kPa}$$

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}\,\frac{d-1}{d+1} = 200.0\ \text{kPa}\ \checkmark$$

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

3 Resistencia al corte y parámetros equivalentes de Mohr–Coulomb

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3')\frac{\sqrt{d}}{d+1} = \mathbf{207.6}\ \mathrm{kPa}$$

$$\varphi_i = \arcsin\frac{d-1}{d+1} = \mathbf{35.48}^\circ \qquad c_i = \tau - \sigma_n' \tan\varphi_i = 207.6 - 200(0.7128) = \mathbf{65.0}\ \mathrm{kPa}$$

En esta base la roca se comporta, como en Mohr–Coulomb, con **c_i = 65.0 kPa, φ_i = 35.5°** (τ = 207.6 kPa); al cambiar la tensión, estos valores también cambian: cada dovela utiliza sus propios valores de c y φ.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

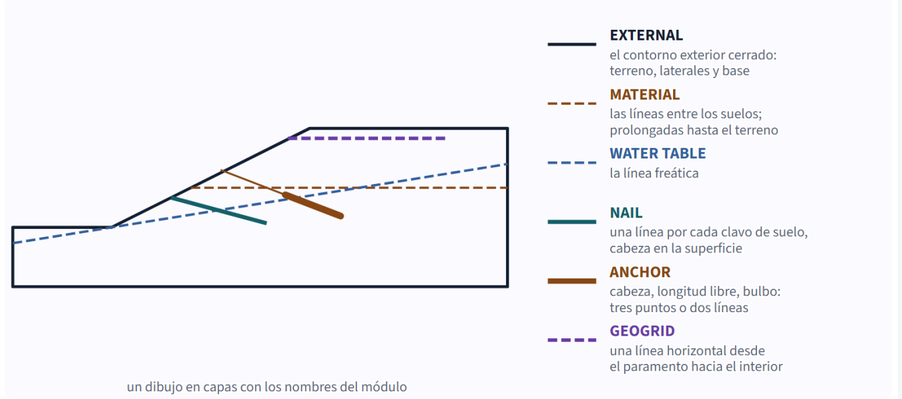
Lectura según los nombres de los estratos

TEORÍA

Los nombres de capa de la sección DXF se leen sin distinguir mayúsculas y minúsculas, espacios, guiones ni guiones bajos; **EXTERNAL** define la superficie del terreno, los dos laterales y la base como una única polilínea cerrada.

Las líneas **MATERIAL** son las que separan los suelos; una línea que termina dentro de la sección se prolonga a lo largo de la superficie del terreno, y a cada zona comprendida entre dos límites se le asigna un suelo distinto.

WATER TABLE es la línea del nivel freático; **NAIL**, **ANCHOR** y **GEOGRID** son refuerzos, y el peso específico, la resistencia, la capacidad, la carga y el sismo, que no figuran en el dibujo, se introducen en la pestaña Modelo.

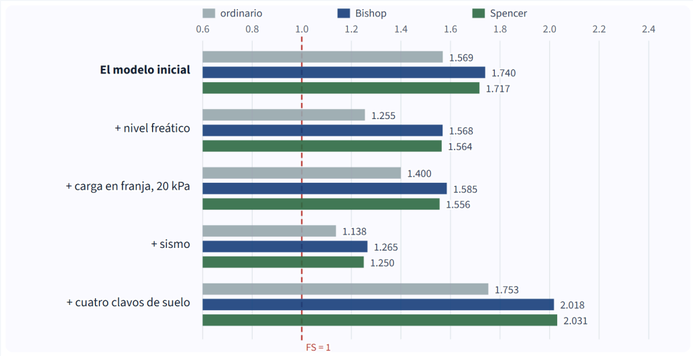


un dibujo en capas con los nombres del módulo

Tabla de resultados

La misma sección, cinco modelos, tres métodos

Modelo (se añade algo y se vuelve a buscar el círculo)	Centro (x_c; z_c)	r (m)	Dovela	Ordinario	Bishop	Spencer
Modelo inicial (estático)	16.52; 16.08	17.35	33	**1.569**	**1.740**	**1.717**
+ nivel freático ascendente hacia el interior del talud	17.12; 11.45	16.85	36	**1.255**	**1.568**	**1.564**
+ carga en franja de 20 kPa, x = 25 – 32 m	16.25; 15.44	16.66	35	**1.400**	**1.585**	**1.556**
+ sismo, kh 0.15, kv 0.05 (crítico)	16.72; 17.45	18.70	34	**1.138**	**1.265**	**1.250**
+ cuatro clavos de suelo, de 14 m de longitud	18.29; 13.90	18.18	34	**1.753**	**2.018**	**2.031**



El método ordinario da siempre el valor más bajo; Bishop y Spencer son próximos entre sí (en el caso de un círculo, la diferencia es de pocos puntos porcentuales).

El agua y el sismo son los que más reducen FS (1.255 y 1.138, método ordinario); cuatro clavos elevan FS a 1.753. Con los clavos, Bishop y Spencer superan 2.0.

Hipótesis

Lo que el modelo supone y lo que no hace

El **modelo** supone deformación plana: se considera un metro de un talud de longitud infinita, la misma resistencia en todas las direcciones (excepto en el criterio de roca isótropa) y una masa de suelo rígida hasta que comienza el movimiento.

Para el **agua** se emplea una línea hidrostática bajo una línea dada o la relación r_u de la sobrecarga del terreno; no se realiza análisis de filtración y, en el descenso rápido, se adopta $\bar{B} = 1$ como descenso instantáneo.

Para las **dovelas**, todas las magnitudes se toman en la vertical media de la dovela y la fuerza normal efectiva negativa se mantiene en cero; el sismo se trata con coeficientes pseudoestáticos y se desprecia la inercia del agua acumulada en la superficie.

El método de **Spencer** supone que las fuerzas entre dovelas son paralelas entre sí, con un único ángulo para toda la masa; el equilibrio de momentos se satisface en los tres métodos, y el equilibrio de fuerzas solo en el de Spencer.

La **búsqueda** encuentra, en las proximidades de las superficies iniciales, la superficie con el menor factor de seguridad; no está demostrado que este sea el menor entre todas las superficies.

LO QUE NO CUBRE

- Efectos tridimensionales (extremo del deslizamiento, ancho del talud)
- Deformación, rotura progresiva, ablandamiento por deformación
- Filtración y consolidación: la presión intersticial se da como dato, no se calcula
- Análisis dinámico (Newmark): el cálculo pseudoestático es una comprobación
- Criterio: se fija el FS; el valor suficiente lo determinan el ingeniero y el pliego de condiciones

Resumen

Puntos clave

FS = ΣR/ΣD; R = cL + N′ tan φ′, D = W sin α (momento respecto al centro del círculo). Los tres métodos se diferencian únicamente en cómo obtienen **N′**

Dovela 22 (ejemplo): α = 28.51°, L = 0.864, W = 88.52 → ordinario N′ = 77.79, R = 42.55, D = 42.25; Bishop N′ = 86.56, R = 45.40; Spencer N′ = 80.76, R = 43.51 kN/m

Mismo círculo: **1.569 (ordinario) · 1.740 (Bishop) · 1.717 (Spencer)**; el círculo crítico se halló probando 4650 círculos en una malla de 15 × 15 × 12

Agua: con u = $\gamma_w h_w$ disminuye N′; **sismo**: F_h reduce la normal y añade un momento; **el agua en la grieta** añade a ΣD el momento de P_w

Refuerzo: el pasivo (clavos, geomalla) se considera del lado resistente y el activo (anclaje) se resta del lado desestabilizador; **Hoek–Brown**: c_i, φ_i tangentes en cada base

Referencias bibliográficas

Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. Transactions of the 2nd Congress on Large Dams, Washington, 4, 445–463.

Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, 5(1), 7–17.

Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. Géotechnique, 17(1), 11–26.

Morgenstern, N.R. and Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, 15(1), 79–93.

Duncan, J.M., Wright, S.G. and Brandon, T.L. (2014). Soil Strength and Slope Stability, 2nd ed. Wiley.

Terzaghi, K. (1950). Mechanism of landslides. In Application of Geology to Engineering Practice (Berkey Volume), Geological Society of America, 83–123.

Rankine, W.J.M. (1857). On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 147, 9–27.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). Hoek–Brown failure criterion — 2002 edition. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, 1, 267–273.

Balmer, G. (1952). A general analytical solution for Mohr's envelope. Proceedings ASTM, 52, 1260–1271.

Lazarte, C.A., Robinson, H., Gómez, J.E., Baxter, A., Cadden, A. and Berg, R. (2015). Soil Nail Walls — Reference Manual. Geotechnical Engineering Circular No. 7, FHWA-NHI-14-007.

Sabatini, P.J., Pass, D.G. and Bachus, R.C. (1999). Ground Anchors and Anchored Systems. Geotechnical Engineering Circular No. 4, FHWA-IF-99-015.

Berg, R.R., Christopher, B.R. and Samtani, N.C. (2009). Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes. Geotechnical Engineering Circular No. 11, FHWA-NHI-10-024.

NOTA

Todos los ejemplos numéricos se han obtenido con las propias bibliotecas de cálculo del módulo; el módulo da los mismos valores. El modelo resuelto de la página del módulo es también esta sección (talud 2:1 de 10 m de altura, arcilla sobre relleno).

GeoTerva

Cálculos geotécnicos en línea

De la teoría a la práctica

Dibujar la propia sección o importarla desde DXF; introducir los suelos, el agua, las cargas, el sismo y el refuerzo. El módulo busca el círculo crítico y proporciona los factores de seguridad de los tres métodos, las tablas de dovelas, la solución paso a paso y el informe.

Abrir el módulo → **Página de teoría →**

Abrir en el teléfono
Los módulos de prueba no requieren registro.

Si desea utilizarlas en sus clases: info@geoterva.com