Apresentação de aula de geotecnia · Estabilidade de taludes

Estabilidade de taludes: equilíbrio limite (fatias)

Aula: método das fatias do equilíbrio limite; solução manual detalhada de um círculo de ruptura e de uma fatia, com as demais fatias e os tópicos em tabelas.

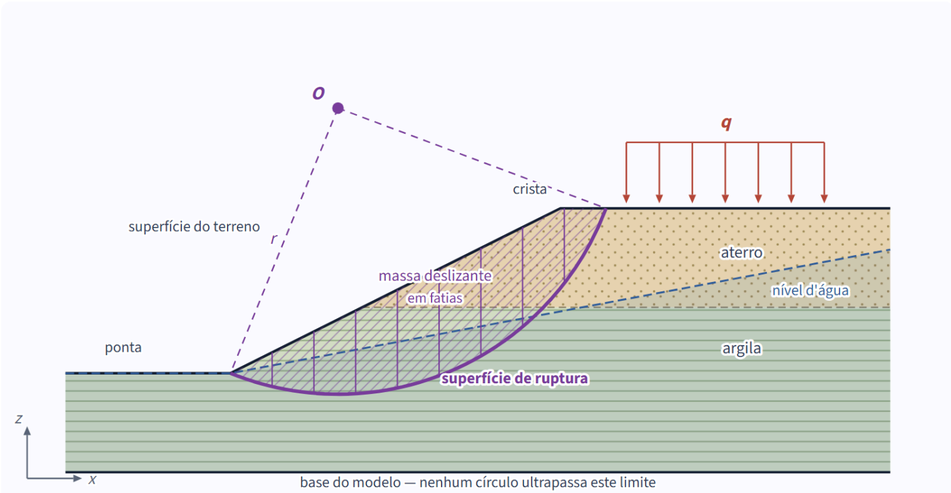
Método das fatias

Ordinário · Bishop · Spencer

Círculo crítico

Água · carga · sismo · trinca

Reforço · Hoek–Brown



Introdução

O que veremos nesta aula?

A ideia de **equilíbrio limite**: a massa acima da superfície de ruptura é um corpo rígido em que a resistência é mobilizada na mesma proporção; **FS = resistência / tensão necessária**

A divisão da massa em **fatias**: o peso W de cada fatia, a inclinação da base α, o comprimento da base L, a força da água U

Resolver em detalhe os **três métodos** (ordinário/Fellenius, Bishop simplificado, Spencer) em um único círculo de ruptura e em **uma única fatia**

Como o mesmo cálculo se repete nas **32 fatias restantes**, as tabelas de resultados e a busca do círculo crítico

Efeitos da água, de cargas, do sismo, da trinca de tração, de reforços (grampos, tirantes, geogrelha) e da rocha (Hoek–Brown)

ROTEIRO DA AULA

Primeiro a **teoria**, depois a **solução manual** com um único círculo e uma única fatia:

1 · **Teoria**: FS, fatia, três métodos

2 · **Enunciado**: círculo único, fatia única

3 · **Solução**: fatia 22 manualmente; as demais em **tabela**

Modelo: talude 2:1 com 10 m de altura; aterro no topo (γ = 18, c′ = 5, φ′ = 30°), argila embaixo (γ = 17.5, c′ = 20, φ′ = 18°); sem água, carga ou sismo. As forças são por metro de seção (kN/m).

Drenado, não drenado, crescente com a profundidade

TEORIA

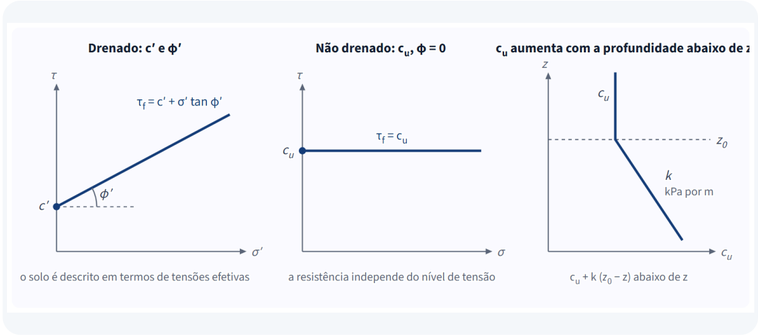
A resistência ao cisalhamento de um solo **drenado** é dada pela envoltória de Mohr–Coulomb em termos da tensão efetiva σ′ = σ − u e é definida pelos parâmetros c′ e φ′.

Em argila saturada carregada mais rapidamente do que a drenagem pode ocorrer, a resistência é a **resistência não drenada** c_u, independente da tensão normal, adotando-se φ = 0; em muitas argilas naturais c_u aumenta linearmente com a profundidade.

A resistência de uma fatia é lida no nível do ponto médio da base; o critério específico da rocha é distinto, e a escolha entre a condição drenada e a não drenada cabe ao engenheiro e constitui a primeira hipótese da análise.

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

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



Resistência / tensão necessária; momento em relação ao centro do círculo

TEORIA

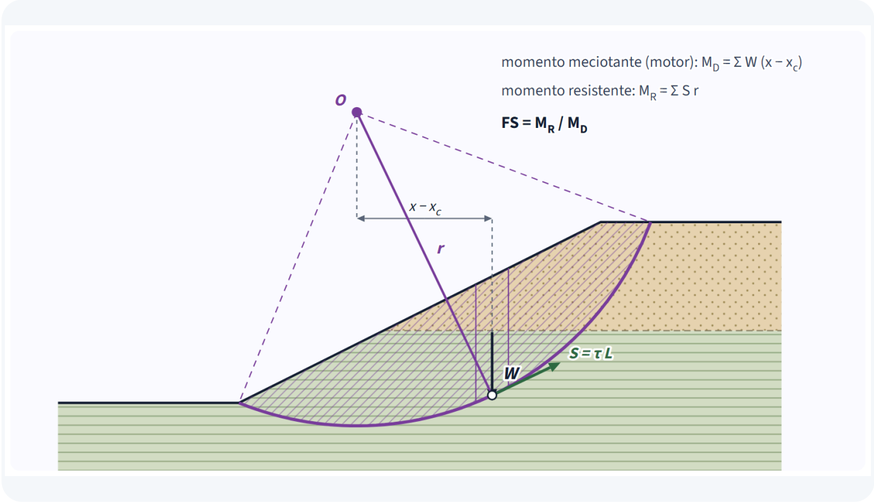
O fator de segurança (FS) é a razão entre a resistência ao cisalhamento disponível no solo e a tensão cisalhante necessária ao equilíbrio, e admite-se que tenha o mesmo valor em todos os pontos ao longo da superfície de ruptura.

Em uma superfície circular, o equilíbrio governante é o equilíbrio de momentos em torno do centro O; dividindo-se os momentos pelo raio, a razão é escrita como FS = ΣR / ΣD, e ambas as somas são expressas em kN/m.

Os três métodos diferem na forma de obter a força normal efetiva (N′) atuante na base de cada fatia: o método ordinário das fatias a obtém apenas do peso, Bishop do equilíbrio vertical e Spencer tanto do equilíbrio de forças quanto do de momentos.

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

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



Geometria, peso, forças na base

TEORIA

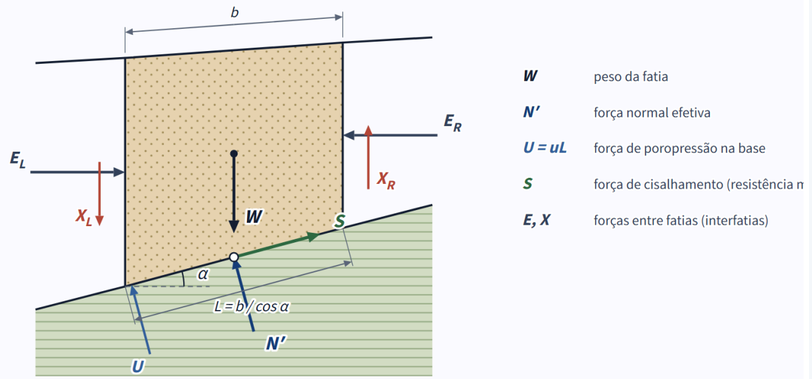
A massa entre a superfície de ruptura e a superfície do terreno é dividida em fatias por linhas verticais, de acordo com o número de fatias ou a largura máxima da fatia.

Cada ponto de interseção significativo no interior da massa é obrigatoriamente um limite de fatia; assim, a base de cada fatia atravessa um único solo e cada fatia suporta um único tipo de carga.

Na vertical pelo meio da fatia, a inclinação da base α é tomada como positiva do lado da crista do talude em relação ao centro e como negativa do lado do pé do talude.

Força normal efetiva N′ = N − U; N′ negativa indica base sob tração e, nos métodos das fatias simples e de Bishop, N′ é mantida em zero.

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



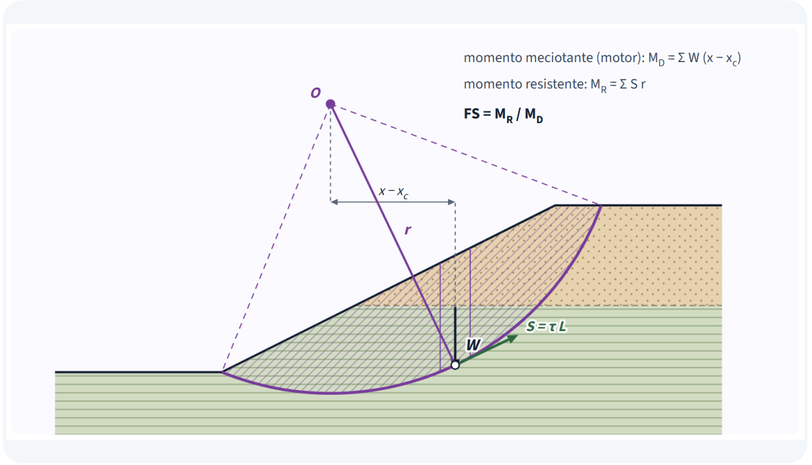
Sem forças entre fatias

TEORIA

No método de **Fellenius** (sueco), as forças entre fatias são totalmente desprezadas e cada fatia está em equilíbrio apenas na direção normal à sua base.

Esse equilíbrio fornece a força normal a partir do peso e das cargas; o fator de segurança é obtido pela razão de momentos e, em solo homogêneo, reduz-se a FS = Σ [c b / cos α + W cos α tan φ] / Σ W sin α.

O método é simples, estável e favorável à segurança; seu erro aumenta com a profundidade do círculo e com a poropressão, e, em um círculo profundo, pode fornecer resultado bem abaixo dos outros dois métodos.



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

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

Equilíbrio vertical de cada fatia; solução iterativa

TEORIA

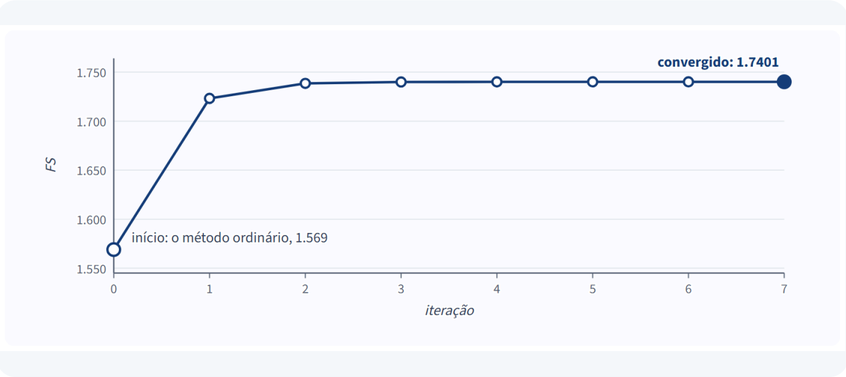
No método de Bishop simplificado, as forças cisalhantes entre fatias são desprezadas, mas o equilíbrio vertical de cada fatia é satisfeito e a força cisalhante na base é tomada igual à resistência mobilizada.

Como FS aparece nos dois lados da equação, esta é resolvida por iteração, partindo do valor do método ordinário das fatias; poucas etapas bastam.

N′ negativo é mantido em zero e não se permite que $\mathbf{m_\alpha}$ caia abaixo de 0.2; essa limitação é importante na região do pé de círculos profundos.

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

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



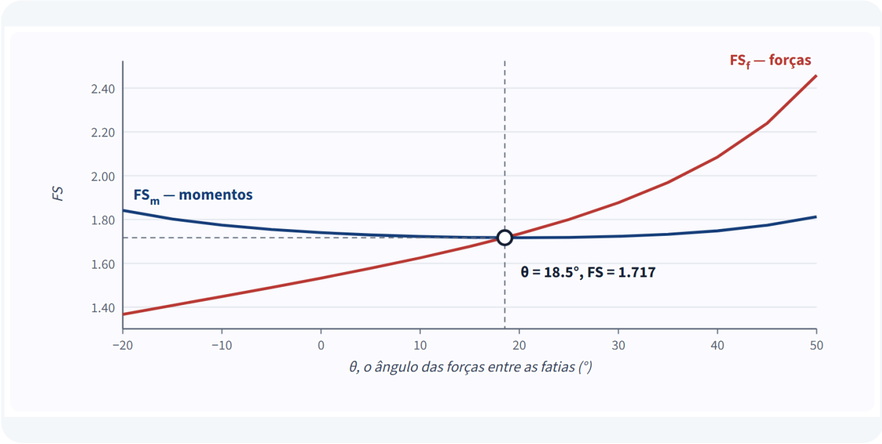
Equilíbrio de forças e de momentos; forças entre fatias paralelas

TEORIA

O método de **Spencer** satisfaz tanto o equilíbrio de forças quanto o de momentos; as forças entre fatias são paralelas entre si e a força cisalhante é uma fração constante da força normal.

Como as faces laterais nas duas extremidades da massa são livres, ΣΔE = 0 fornece o equilíbrio de forças e obtém-se um fator de segurança FS_f para cada ângulo θ.

Os momentos em relação ao centro do círculo fornecem um segundo valor: $FS_m = \Sigma[c\,L + N' \tan\varphi] / \Sigma\, D$; $FS_f(\theta)$ e $FS_m(\theta)$ se interceptam em um único ângulo, o que constitui a solução.



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

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

O que fornece e o que despreza

TEORIA

Método	Força entre fatias	Equilíbrio de forças	Equilíbrio de momentos	Superfície	FS (mesmo círculo)
Ordinário (Fellenius)	nenhum	apenas a normal da base	✓	círculo	**1.569**
Bishop simplificado	somente normal (sem cisalhamento)	vertical por fatia	✓	círculo	**1.740**
Spencer	paralelo: X = E tanθ	horizontal + vertical	✓	cada superfície	**1.717**

O método das fatias ordinário é o método adotado por padrão, que pode ser verificado por cálculo manual e é conservador; seu resultado é o menor dos três métodos.

O método de Bishop é a escolha usual para superfícies circulares; seu resultado, em uma superfície circular, difere do método de Spencer em apenas alguns por cento.

O método de Spencer satisfaz o equilíbrio completo e é usado para superfícies não circulares; é o método de maior esforço computacional, e para alguns círculos não se obtém solução.

Enunciado

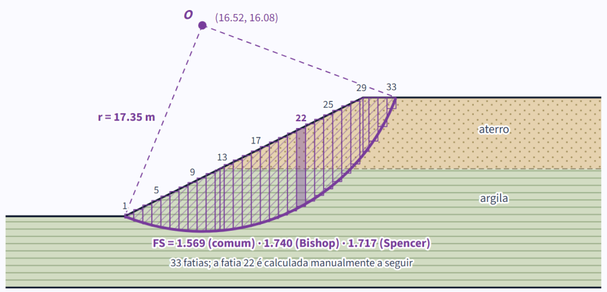
EXEMPLO

Dados

Corte	**superfície do terreno** $(0;0)$**–**$(10;0)$**–**$(30;10)$**–**$(50;10)$ **m; base** $z=-6$ **m; acima de** $z=4$ **m, aterro; abaixo, argila**
Solos	**aterro** $\gamma=18$ **kN/m³,** $c'=5$ **kPa,** $\varphi'=30°$**; argila** $\gamma=17.5$ **kN/m³,** $c'=20$ **kPa,** $\varphi'=18°$**; sem água, carga ou sismo**
Círculo de ruptura	**centro** $x_c=16.52$ **m,** $z_c=16.08$ **m; raio** $r=17.35$ **m (círculo crítico, ver o obtido na busca)**

PEDE-SE

Os pontos $\mathbf{x_a}$ e $\mathbf{x_b}$ em que o círculo intercepta o terreno, seu ponto mais baixo e a **divisão em fatias**.



Solução

SOLUÇÃO

1 Interseção do círculo com a superfície do 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 Ponto mais baixo e divisão em fatias

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

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

O círculo intercepta a massa entre x = 10.00 (pé) e 32.77 m (topo); as bordas em x = 10, 18 e 30 m dividem mais 3 fatias: **33 fatias**.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

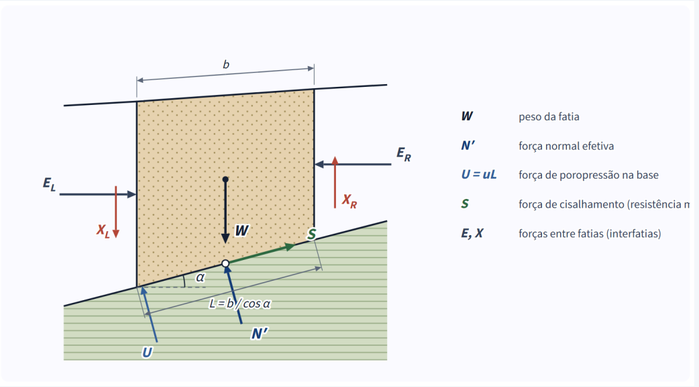
EXEMPLO

Dados

Fatia	**Fatia 22 do círculo do Exemplo 1: ponto médio $x_m = 24.800$ m, largura $b = 0.759$ m**
Solo	**aterro $\gamma = 18$ kN/m³ ($z > 4$ m); argila $\gamma = 17.5$ kN/m³, $c' = 20$ kPa, $\varphi' = 18°$ (base na argila); $u = 0$**

PEDE-SE

Os valores de **α**, **L**, **W** da fatia; **N′**, **R** e **D** (método ordinário).



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Inclinação e comprimento da 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 da coluna e peso (aterro + argila)

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

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

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

A fatia 22 é a **fatia mais pesada** (W = 88.52 kN/m); sua base tem inclinação de 28.5° e permanece na argila (c′ = 20 kPa, φ′ = 18°).

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Força normal e resistência (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 Efeito atuante

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

Fatia 22: **R = 42.55** kN/m, **D = 42.25** kN/m. Os valores de R e D de cada fatia são obtidos **com as mesmas três etapas**; o fator de segurança é a razão entre os totais: **FS = ΣR/ΣD** (tabela nas páginas seguintes).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

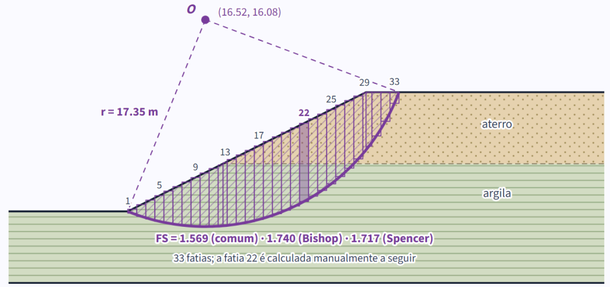
EXEMPLO

Dados

Fatias	**O círculo do Exemplo 1, 33 fatias; cada fatia é resolvida com as três etapas do Exemplo 2**
Método	**Ordinário (Fellenius): sem forças entre fatias**

PEDE-SE

Tabela de todas as fatias: **W, N′, R, D** e seus totais; **FS = ΣR / ΣD**.



Solução (1/3)

SOLUÇÃO

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

Solução (2/3)

SOLUÇÃO

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**

Solução (3/3)

SOLUÇÃO

1 Somatórios e fator de segurança

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

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

Para este círculo, o método ordinário fornece **FS = 1.569**. Nas fatias do lado do pé do talude (α < 0), a base é inclinada contra o deslizamento: D é negativo e reduz ΣD. A fatia 22 é a linha 22 da tabela e coincide com os valores obtidos à mão.

ΣR/ΣD: razão entre o efeito **resistente** e o efeito atuante; se FS > 1, não se espera deslizamento ao longo deste círculo.

O método ordinário fornece o menor valor; Bishop e Spencer são maiores no mesmo círculo (exemplos seguintes).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

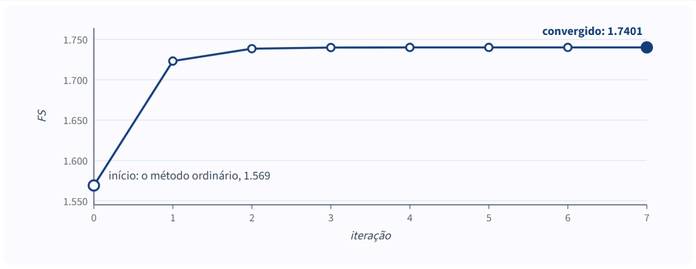
EXEMPLO

Dados

Fatia e círculo	**A 22.ª fatia do Exemplo 2 e o círculo do Exemplo 1; valor inicial $FS_0 = 1.569$ do Exemplo 3**
Método	$N' = \dfrac{W - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha}$, $m_\alpha = \cos\alpha + \dfrac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$ **(u = 0)**

PEDE-SE

Para a fatia 22, **m_α**, **N′**, **R**; **iteração** e **FS** para o círculo inteiro.



Solução (1/4)

SOLUÇÃO

1 Primeira iteração (FS_0 = valor do método ordinário = 1.5690)

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

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

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

Solução (2/4)

SOLUÇÃO

2 Com o valor convergido (FS = 1.7401)

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

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

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

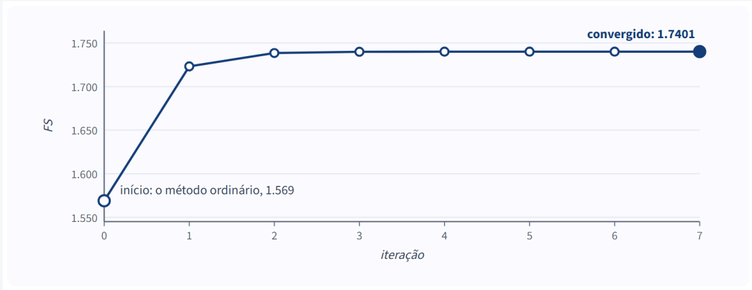
A força normal da fatia 22 aumenta de 77.79 no método ordinário para **86.56** kN/m (equilíbrio vertical entre fatias); a resistência passa de 42.55 → **45.40** kN/m. As mesmas etapas se repetem nas 33 fatias.

Solução (3/4)

SOLUÇÃO

2 A cada iteração, ΣR é recalculado, $FS_{k+1} = \Sigma R_k / \Sigma D$

Iteração k	FS_k	Diferença
0 (comum)	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



Em 7 iterações, **FS = 1.740**; ΣR = 1,115.97, ΣD = 641.34 kN/m. É 10.9% maior que o método ordinário (1.569).

Solução (4/4)

SOLUÇÃO

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**

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

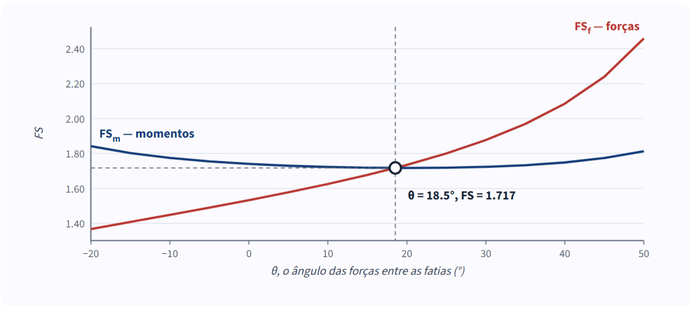
EXEMPLO

Dados

Fatia e círculo	**A 22.ª fatia do Exemplo 2, o círculo do Exemplo 1; as forças entre fatias são paralelas,** $X = E\tan\theta$
Ângulo da solução	$\theta = 18.54^\circ$ **(ângulo em que as duas curvas abaixo se cruzam),** $FS = 1.717$

PEDE-SE

Para a fatia 22: **ΔE**, **N′**, **R**, **E** e **X**; curvas θ–FS e o círculo completo.



Solução (1/4)

SOLUÇÃO

1 Diferença de força normal na fatia ΔE (θ = 18.54°, tan θ = 0.3354, FS = 1.717)

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

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

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

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

Solução (2/4)

SOLUÇÃO

2 Força normal, resistência e forças entre fatias

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

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

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

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

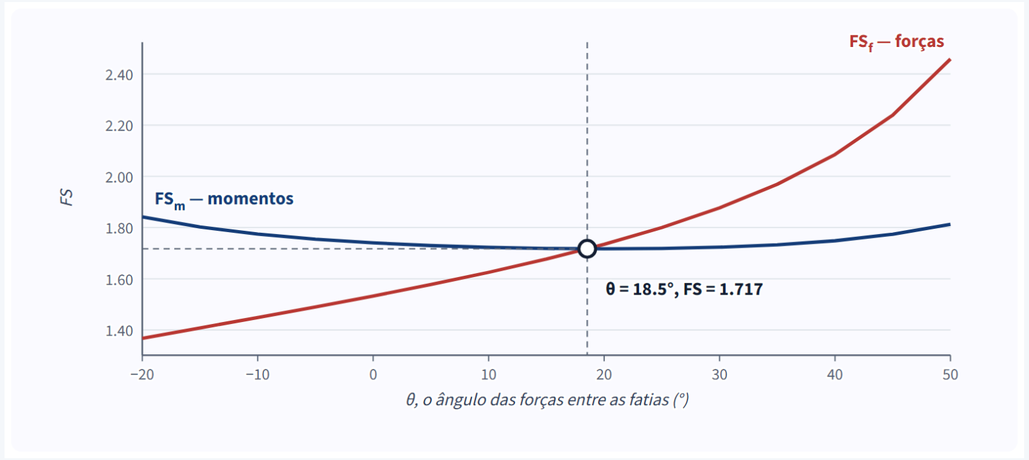
No método de Spencer, a força normal na fatia 22 é **80.76** kN/m (ordinário 77.79, Bishop 86.56); como força entre fatias, atua E = 254.69 kN/m no sentido do pé do talude.

Solução (3/4)

SOLUÇÃO

3 FS_f ($\Sigma\Delta E = 0$) e FS_m (momento) para cada θ; a interseção é a solução

θ (°)	FS_m (momento)	FS_f (força)
-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**



Solução (4/4)

SOLUÇÃO

No	ΔE	E (pé)	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.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Peso, poropressão, água no talude

TEORIA

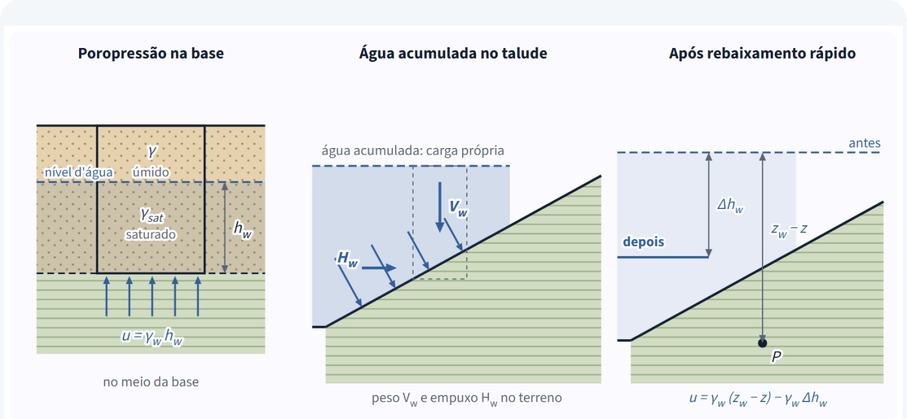
A água entra na análise de três formas: o peso do solo saturado, a poropressão que reduz a resistência na base de cada fatia e, onde estiver sobre o talude, como uma carga por si só.

Abaixo da linha do lençol freático, a poropressão é hidrostática; como a percolação não é analisada, um nível freático inclinado é uma aproximação da rede de fluxo, e o peso específico submerso nunca é utilizado.

Quando a poropressão é conhecida como proporção da carga do solo sobrejacente, atribui-se ao solo uma razão $\mathbf{r_u}$; isso se aplica a um aterro durante a construção ou a um aterro sobre argila mole.

Como a água diante do talude pode drenar, quando ela rebaixa rapidamente o suporte desaparece, a poropressão é preservada e o fator de segurança corresponde ao menor valor, logo após o rebaixamento.

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



Enunciado

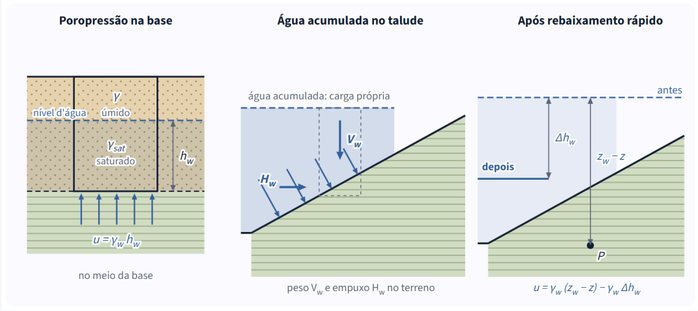
EXEMPLO

Dados

Linha d'água	$(0;0)$–$(20;2.5)$–$(50;7)$ **m, hidrostático;** $\gamma_w = 9.81$ **kN/m³; pesos específicos saturados: aterro 20, argila 19.5 kN/m³**
Fatia	**mesmo círculo; a fatia em** $x_m = 24.800$ **m (com água, torna-se a fatia 24, e não a 33)**

PEDE-SE

Na fatia: **z_w, h_w, u, U**; novos **W, N′, R, D**; **FS** no círculo completo.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Altura da água e poropressão

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

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

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

2 Peso: úmido acima do nível do lençol freático, saturado abaixo

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

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

A água eleva o peso de 88.52 kN/m, no caso seco, para **92.14** kN/m e, além disso, gera na base uma força de subpressão **U = 20.23** kN/m.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Força normal efetiva, resistência, efeito atuante (fatia 22)

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

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

4 Círculo completo (36 fatias, no mesmo círculo) e comparação com o caso seco

Método	ΣU	ΣR	ΣD	FS (água)	FS (seco)
Ordinário	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 o mesmo círculo, a água reduz o FS de 1.569 para **1.343** (ordinário); se o círculo crítico for novamente pesquisado com a linha d'água, ele fica mais raso e resulta em **1.255 / 1.568 / 1.564** (ordinário / Bishop / Spencer).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Carga em faixa e carga pontual; vertical, perpendicular, inclinada

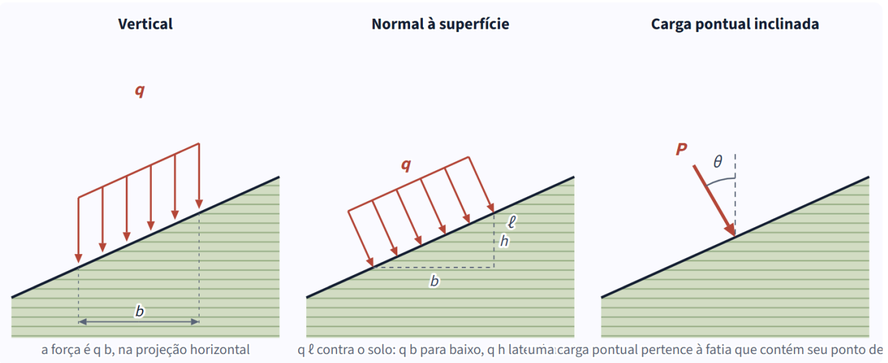
TEORIA

Uma carga em faixa vertical ou inclinada é considerada sobre sua projeção horizontal, e a força sobre a parte de largura horizontal b é q b.

Uma carga que atua perpendicularmente à superfície é tomada sobre o comprimento da superfície; a força em um trecho de comprimento ℓ é q ℓ, com componente vertical q b e componente horizontal q h.

Cada fatia suporta a parte de uma carga que cai entre as suas bordas, distribuída em proporção à largura horizontal; a carga pontual pertence à fatia que contém o seu ponto de aplicação.

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



a força é q b, na projeção horizontal — q ℓ contra o solo: q b para baixo, q h lateral — uma carga pontual pertence à fatia que contém seu ponto de

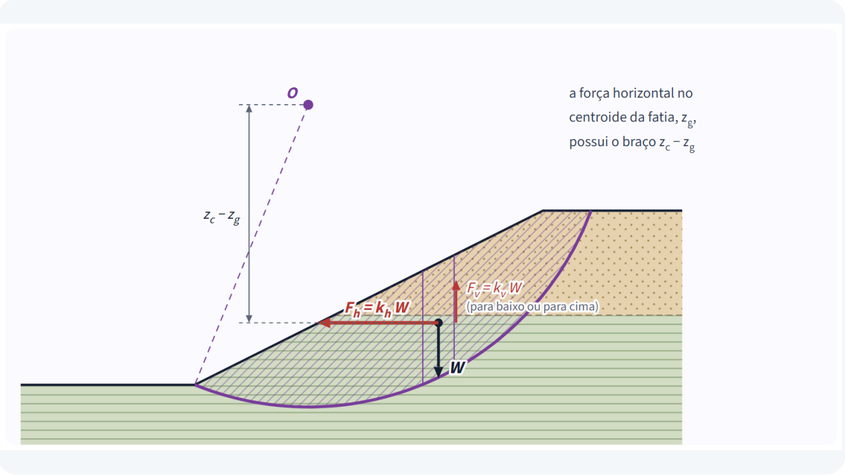
Forças de inércia no centro de gravidade da fatia

TEORIA

Na abordagem **pseudoestática**, a vibração sísmica é representada por uma aceleração constante aplicada à massa deslizante e expressa como uma fração de g.

Em cada fatia, as forças de inércia da massa de solo ($\mathbf{W_{soil}}$) são aplicadas no centro de gravidade ($\mathbf{z_g}$), obtido a partir das porções úmida e saturada do solo dentro da fatia, já que a água acumulada sobre a fatia não suporta essa força.

Na opção de caso crítico, são testadas as duas direções horizontais e as duas verticais, e adota-se o menor fator de segurança; os coeficientes são fornecidos pelo usuário, e o FS estático e o **pseudoestático** são relatados em conjunto.



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

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

Enunciado

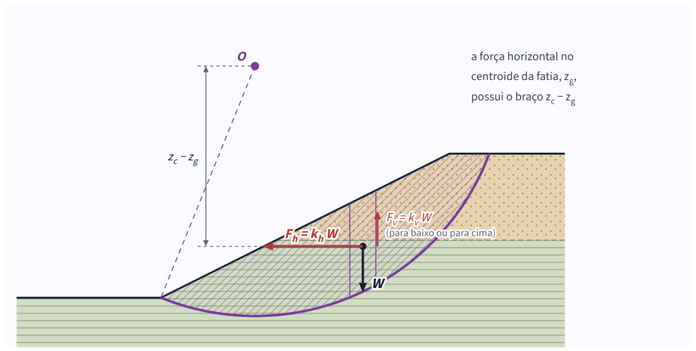
EXEMPLO

Dados

Sismo	$k_h = 0.15$, $k_v = 0$; **força horizontal no sentido do pé do talude (direção crítica)**
Fatia e círculo	**Fatia 22 e círculo do Exemplo 2; o centroide é necessário para o braço de momento z_g**

PEDE-SE

Na fatia 22: **F_h, N′, R, D**; no círculo completo, **$FS_{earthquake}$** por três métodos.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Força de inércia e braço de alavanca

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

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

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

2 Força normal, resistência, efeito atuante

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

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

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

O efeito atuante passa de 42.25 para **51.39** kN/m (+22%) e a resistência, de 42.55 para **40.49** kN/m: a força horizontal reduz a força normal e acrescenta um momento de deslizamento.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Três métodos no mesmo círculo (k_h = 0.15, k_v = 0)

Método	ΣR	ΣD	FS (estático)	FS (sísmico)
Ordinário	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**

Com k_h = 0.15, o FS diminui cerca de 27% (convencional 1.569 → **1.152**). Sob ação sísmica, o círculo crítico também se altera: no modelo da página (k_h = 0.15, k_v = 0.05, direções críticas), o resultado da busca passa a ser 1.138 / 1.265 / 1.250.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

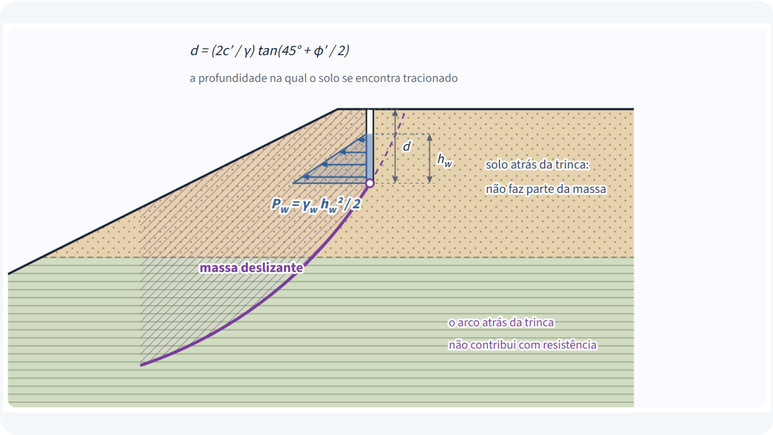
Água na trinca e em profundidade

TEORIA

A profundidade da trinca de tração é obtida por d = 2c′/γ·tan(45° + φ′/2); no caso não drenado, essa profundidade passa a ser $2c_u/\gamma$.

Quando a trinca é ativa, a superfície de ruptura termina no ponto em que a profundidade da massa deslizante é igual à profundidade da trinca; o solo atrás da trinca não faz parte da massa deslizante e a parte do arco que fica dentro da trinca não oferece resistência.

A água acumulada na trinca até a altura h_W exerce pressão por força hidrostática; uma trinca cheia d’água reduz o fator de segurança, e essa situação é a que mais frequentemente passa despercebida.



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

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

Enunciado

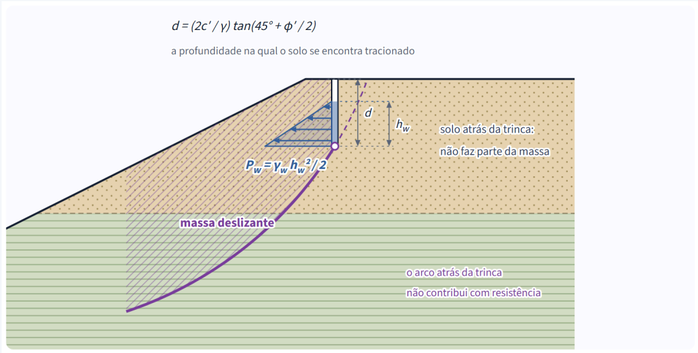
EXEMPLO

Dados

Trinca	**no topo, trinca vertical na profundidade de $d = 2$ m (valor inicial do modelo); duas condições: seca e cheia de água ($h_w = 2$ m)**
Círculo	**O círculo do Exemplo 1; termina na base da trinca**

PEDE-SE

A posição **x** da trinca; **P_w**, **z_f**, **D_{crack}**; **FS** por três métodos.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Local da trinca: termina onde o círculo desce até a cota z = 10 − 2 = 8 m

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

2 Água na trinca (h_w = 2 m): força e momento

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

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

A profundidade de Rankine é de 0.96 m no aterro e 3.15 m na argila; o módulo adota para a profundidade da trinca o valor informado pelo engenheiro (aqui, 2 m). Uma trinca cheia de água acrescenta **8.38** kN/m a ΣD.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Sem trinca, trinca seca e trinca cheia de água (mesmo círculo; 34 fatias na trinca)

Método	FS sem trinca	ΣR	ΣD (seco)	FS trinca seca	ΣD (água)	FS trinca cheia
Ordinário	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**

A trinca seca altera muito pouco o FS (a massa atuante acima e a resistência no arco são retiradas em conjunto: 1.569 → 1.585); a **trinca preenchida com água** o reduz (1.564). A água na trinca é o caso mais frequentemente esquecido.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Malha de centros, raios, refinamento

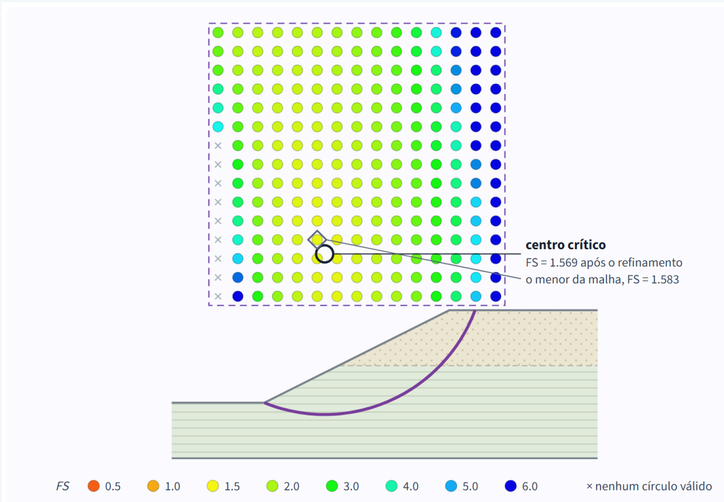
TEORIA

A busca do círculo crítico é conduzida sobre uma malha de centros de $n_X \times n_Z$ pontos, posicionada sobre o talude, e em cada centro é testado um conjunto de raios igualmente espaçados.

Cada círculo é dividido em fatias e resolvido, e o menor fator de segurança encontrado para cada centro é armazenado juntamente com o raio correspondente; no modelo resolvido, foram testados 4650 círculos com uma malha de 15 × 15 centros e 12 raios.

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

Modelo resolvido	Valor
Malha ($n_X \times n_Z \times$ raio)	15 × 15 × 12
Círculo tentado / adotado	4,650 / 3,487
Menor valor da malha	FS = 1.583
Após o refinamento	**FS = 1.569**
Círculo crítico	x_c = 16.52, z_c = 16.08, r = 17.35 m



Linha poligonal, somente Spencer

TEORIA

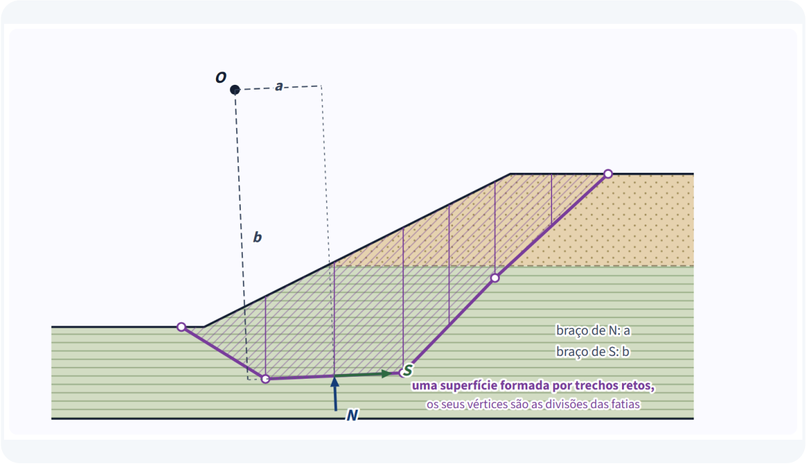
A superfície não circular pode seguir uma camada fraca, com cunhas que descem da crista do talude e sobem em direção ao pé, e é uma superfície poligonal com ambas as extremidades na superfície do terreno.

Em uma superfície de ruptura poligonal (linear múltipla), a equação de momentos é escrita em relação a um ponto O escolhido acima do pé da massa; o braço de N é a e o de S é b.

A superfície com o menor fator de segurança é procurada como uma superfície poligonal de n segmentos; o movimento só é mantido quando a superfície permanece admissível, e a restrição de convexidade evita a tendência a superfícies em zigue-zague.

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

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



Contribuição do elemento passivo e do ativo para o FS

TEORIA

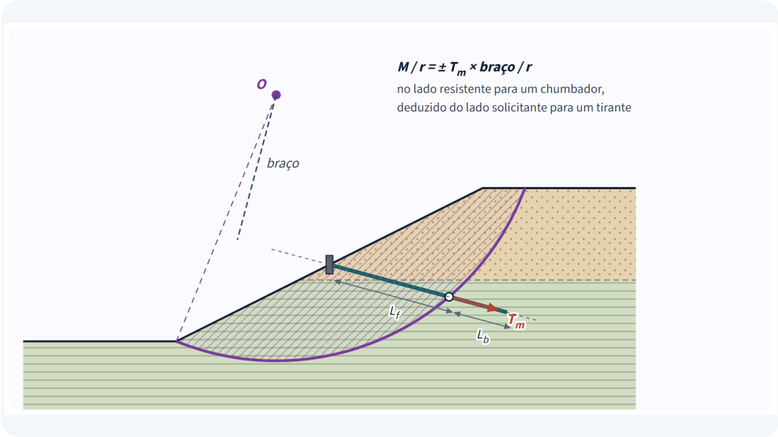
O elemento de reforço é uma linha que intercepta a superfície de ruptura; o comprimento à frente da superfície de ruptura, até o ponto em que ele intercepta o arco, é designado por L_f, e o comprimento ancorado situado atrás desse ponto, por L_b.

O momento de um elemento passivo (grampo, geogrelha) é somado ao lado resistente; como um elemento ativo (tirante) assume sua carga antes de qualquer movimento, seu momento é subtraído do lado atuante.

Para a mesma força, um elemento ativo aumenta o fator de segurança mais do que um elemento passivo; a força é tomada igual nos casos estático e pseudoestático.

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

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



O menor dos três valores

TEORIA

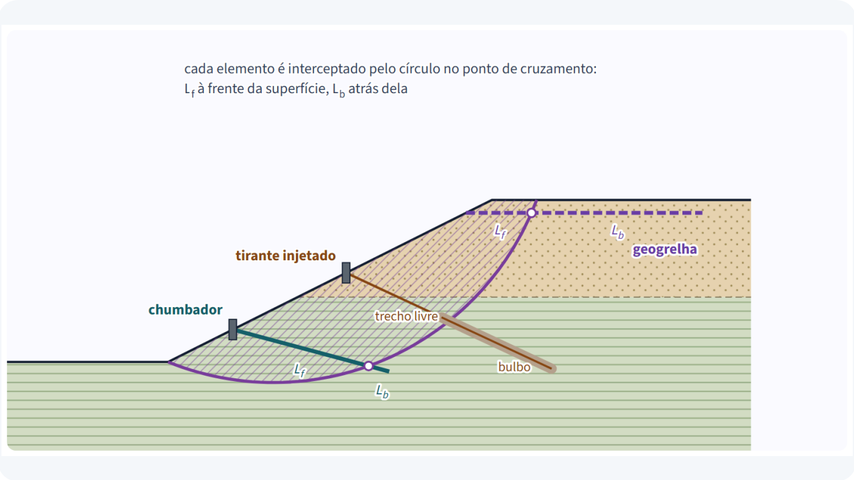
A força de tração do grampo é $T = \min[T_t,\ q_u\,\pi\,D_h\,L_b,\ q_u\,\pi\,D_h\,L_f + T_h]$, isto é, o menor dos três valores.

O grampo é um elemento passivo: entra em ação à medida que a massa se move, e a força do grampo dividida pelo espaçamento Sh é expressa por $T_m = T/S_h$.

Um grampo cuja cabeça fica fora do círculo ou cuja extremidade está dentro da massa não transmite força a esse círculo.

Não se forma aderência no comprimento livre; o tirante é retido pela raiz (comprimento ancorado), e a força que o tirante transmite ao interceptar um círculo de ruptura é o menor de três valores: **$T = \min[P,\ T_t,\ q_u\,\pi\,D_h\,L_b]$**.

O tirante é um elemento ativo: a carga está presente no tendão antes de a massa se mover, e nas equações de Spencer o tirante é uma força dada; ali ela não é dividida por **FS**.



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

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

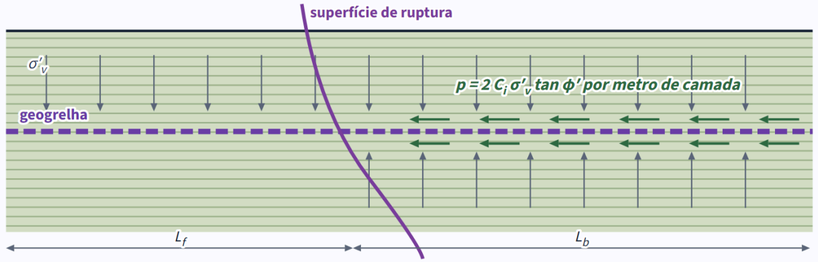
Resistência de projeto, arrancamento, conexão

TEORIA

A geogrelha é definida pelo seu comprimento L, pela sua resistência de projeto de longo prazo por metro de seção T_d, pelo coeficiente de interação entre o solo e a geogrelha C_i e, quando conectada ao paramento, pela resistência de conexão T_c.

A resistência ao arrancamento por metro de comprimento decorre do atrito nas duas faces sob a tensão vertical efetiva de sobrecarga σ'_V; a geogrelha é um elemento passivo e atua no plano da lâmina.

σ'_V obtém-se do peso do solo acima da placa – com peso específico saturado abaixo do nível do lençol freático – menos a poropressão; as cargas de superfície não são consideradas, permanecendo-se a favor da segurança.



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

Enunciado

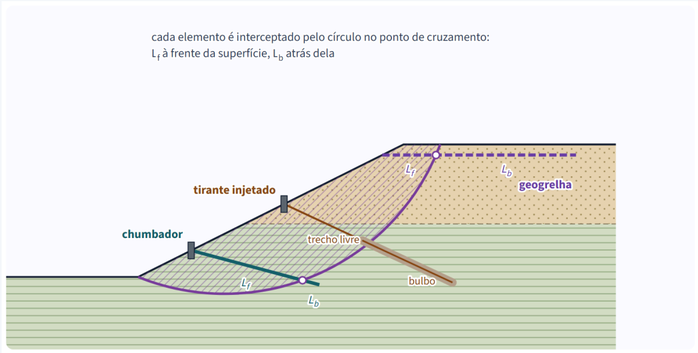
EXEMPLO

Dados

Grampos	**quatro grampos, com cabeças a** $x = 14, 18, 22, 26$ **m (na superfície), inclinação** 15°**,** $L = 14$ **m;** $T_t = 250$ **kN,** $q_u = 120$ **kPa,** $D_h = 120$ **mm,** $S_h = 1.5$ **m**
Círculo	**círculo encontrado pela busca no modelo grampeado: centro** $(18.29;\ 13.90)$**,** $r = 18.18$ **m**

PEDE-SE

Para cada grampo, **L_f**, **L_b**, **T** e **T_m**; contribuição ao momento; **FS**.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Resistência de aderência (por unidade de comprimento) e grampo N3

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

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

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

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

2 Momento da força em relação ao centro do círculo

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

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

O grampo N3, que retém a massa, suporta uma carga de **81.96** kN/m; seu momento acrescenta 30.09 kN/m a ΣR (elemento passivo).

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Forças dos quatro grampos (mesmo método)

Grampo	L_f (m)	L_b (m)	T (kN)	Condicionante	T_m (kN/m)	M/r (kN/m)
N1	–	–	0	ponta no interior do maciço: não suporta carga	0	0
N2	13.13	0.87	39.32	arrancamento na parte posterior	26.21	13.90
N3	11.28	2.72	122.94	arrancamento na parte posterior	81.96	30.09
N4	8.82	5.18	234.18	arrancamento na parte posterior	156.12	31.82

4 Modelo grampeado: FS no círculo encontrado pela busca

Método	Sem grampo (escavação inicial)	Grampeado
Ordinário	1.569	**1.753**
Bishop	1.740	**2.018**
Spencer	1.717	**2.031**

Os grampos aumentam o FS em cerca de 12% (método ordinário 1.569 → 1.753; Bishop 1.740 → 2.018).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Envoltória de resistência curva e sua tangente em cada base

TEORIA

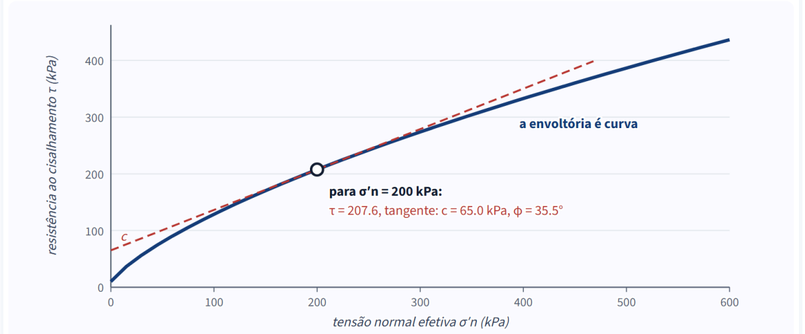
No critério generalizado de Hoek–Brown, o maciço rochoso é definido por σ_{ci}, GSI, m_i e D; adota-se D=0 para maciço não perturbado e D=1 para desmonte intenso com explosivos ou relaxação.

Como a resistência ao cisalhamento na base da fatia depende da tensão normal, a envoltória curva é transformada para o plano τ–σ'_n por meio das relações de Balmer; a tangente fornece, na base, os valores de ci e 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

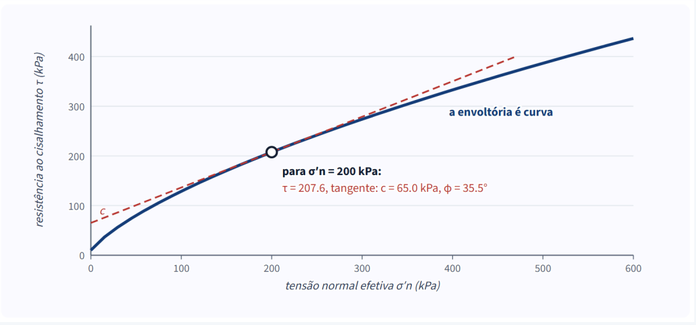
EXEMPLO

Dados

Maciço rochoso	$\sigma_{ci} = 5$ **MPa,** $GSI = 30$**,** $m_i = 8$**,** $D = 0$
Base	**tensão normal efetiva** $\sigma'_n = 200$ **kPa**

PEDE-SE

m_b, s, a; para esta tensão, **τ**, **φ_i** e **c_i**.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Constantes do maciço rochoso

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

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

2 Para σ'_n = 200 kPa, σ'_3 = 93.05 kPa (obtido por iteração)

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

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

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

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Resistência ao cisalhamento e parâmetros equivalentes de Mohr–Coulomb

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

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

Nesta base, a rocha comporta-se como um material de Mohr–Coulomb com **c_i = 65.0 kPa, φ_i = 35.5°** (τ = 207.6 kPa); quando a tensão muda, esses valores também mudam: cada fatia usa seus próprios c e φ.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

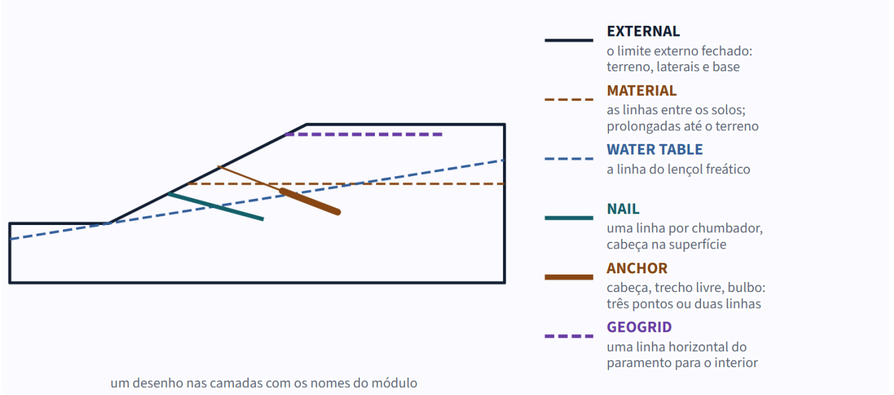
Leitura pelos nomes das camadas

TEORIA

Os nomes das camadas da seção DXF são lidos sem distinção entre maiúsculas e minúsculas, espaços, hífens e sublinhados; **EXTERNAL** fornece a superfície do terreno, os dois lados e a base como uma única polilinha fechada.

MATERIAL são as linhas entre os solos; uma linha que termina dentro da seção é prolongada ao longo da superfície do terreno, e atribui-se um solo distinto a cada região entre dois limites.

WATER TABLE é a linha do lençol freático; **NAIL**, **ANCHOR** e **GEOGRID** são reforços, e o peso específico, a resistência, a capacidade, a carga e o sismo, que não constam do desenho, são informados na aba Modelo.

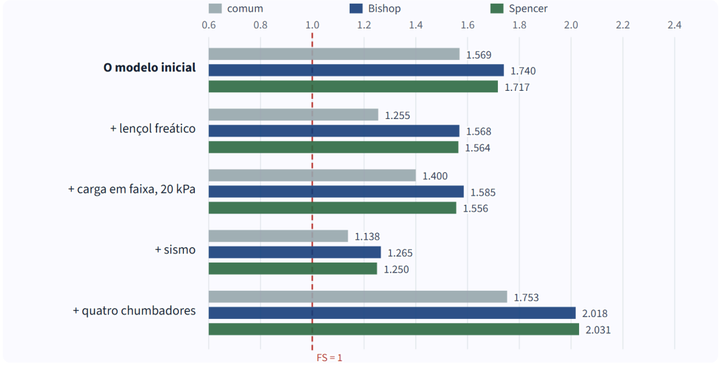


um desenho nas camadas com os nomes do módulo

Tabela de resultados

Mesma seção, cinco modelos, três métodos

Modelo (algo é adicionado, o círculo é buscado de novo)	Centro (x_c; z_c)	r (m)	Fatia	Ordinário	Bishop	Spencer
Modelo inicial (estático)	16.52; 16.08	17.35	33	**1.569**	**1.740**	**1.717**
+ nível do lençol freático que sobe em direção ao interior do talude	17.12; 11.45	16.85	36	**1.255**	**1.568**	**1.564**
+ 20 kPa de carga em faixa, 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**
+ quatro grampos, com 14 m de comprimento	18.29; 13.90	18.18	34	**1.753**	**2.018**	**2.031**



O método ordinário é sempre o menor; Bishop e Spencer são próximos entre si (para um círculo, a diferença é de poucos por cento).

A água e o sismo são os que mais reduzem o FS (1.255 e 1.138, método ordinário); quatro grampos elevam o FS a 1.753. Com grampos, Bishop e Spencer ultrapassam 2.0.

Hipóteses de cálculo

O que o modelo admite e o que não considera

O **modelo** admite estado plano de deformação: um metro de um talude infinitamente longo, a mesma resistência em todas as direções (exceto no critério isotrópico para rocha) e uma massa de solo rígida até o início do movimento.

Para a **água**, adota-se a pressão hidrostática abaixo de uma linha ou a razão r_u da tensão de sobrecarga; não se faz análise de percolação e, no rebaixamento rápido, admite-se rebaixamento instantâneo com $\bar{B} = 1$.

Para as **fatias**, todas as grandezas são tomadas na vertical média da fatia, e a força normal efetiva negativa é mantida em zero; o sismo é tratado com coeficientes pseudoestáticos e a inércia da água acumulada na superfície é desprezada.

O método de **Spencer** admite que as forças entre fatias são paralelas entre si, com um único ângulo para toda a massa; o equilíbrio de momentos é satisfeito nos três métodos, e o equilíbrio de forças apenas em Spencer.

A **busca** encontra a superfície de menor fator de segurança nas proximidades das superfícies iniciais; não está provado que esta seja a menor entre todas as superfícies.

O QUE NÃO É FEITO

- Efeitos tridimensionais (extremidade do escorregamento, largura do talude)
- Deformação, ruptura progressiva, amolecimento por deformação
- Percolação e adensamento: a poropressão é dada, não calculada
- Análise dinâmica (Newmark): o cálculo pseudoestático é uma verificação
- Veredito: o FS é informado; o engenheiro e a especificação definem o valor adequado

Resumo

Pontos-chave

FS = ΣR/ΣD; R = cL + N′ tan φ′, D = W sin α (momento em relação ao centro do círculo). Os três métodos diferem apenas na forma como determinam **N′**

Fatia 22 (exemplo): α = 28.51°, L = 0.864, W = 88.52 → ordinário 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

Mesmo círculo: **1.569 (ordinário) · 1.740 (Bishop) · 1.717 (Spencer)**; o círculo crítico foi encontrado testando 4650 círculos em uma malha de 15 × 15 × 12

Água: u = $\gamma_w h_w$ reduz N′; **sismo**: F_h reduz a normal e acrescenta momento; **a água na trinca** acrescenta a ΣD o momento de P_w

Reforço: o passivo (grampos, geogrelha) é considerado do lado resistente; o ativo (tirante), subtraído do lado atuante; **Hoek–Brown**: c_i e φ_i tangentes na base de cada fatia

Referências 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 os exemplos numéricos foram gerados com as próprias bibliotecas de cálculo do módulo; o módulo fornece os mesmos valores. O modelo resolvido da página do módulo também é esta seção (talude 2:1 com 10 m de altura, argila sobre aterro).

GeoTerva

Cálculos geotécnicos on-line

Da teoria à prática

Desenhar a própria seção ou importá-la de um arquivo DXF; informar os solos, a água, as cargas, o sismo e a armadura. O módulo busca o círculo crítico e fornece o fator de segurança pelos três métodos, as tabelas de fatias, a solução passo a passo e o relatório.

Abrir o módulo →

Página de teoria →

Abrir no celular
Os módulos de teste não exigem cadastro.