

ROCKGEO

Relatório de verificação dos motores de estabilidade

Benchmarks públicos, paridade PWA - Kotlin/Android e evidência rastreável

**NUMERICAMENTE APROVADO - LIBERAÇÃO
BLOQUEADA**

Suíte: rockgeo-stability-verification-v1

Gerado em UTC: 2026-07-30T06:28:25.969Z

Escopo: LEM 2D determinístico, Newmark em bloco rígido e verificação de resistência não linear, rebaixamento rápido, poropressão espacial, suporte e estatística de confiabilidade

1. Introdução

Este relatório verifica se os motores de estabilidade do PWA e do aplicativo Android reproduzem referências públicas sobre os mesmos arquivos de entrada. Para cada cálculo são registrados fonte, método, valor esperado, tolerância, valor calculado, desvio e hash da entrada.

Verificação de software não equivale a certificação de projeto, revisão independente nem responsabilidade técnica. Os resultados se restringem aos casos e modelos declarados; não autorizam uso automático em obra.

2. Método de verificação

2.1 Corpus único e integridade

O corpus contém 39 casos canônicos e 172 comparações grandeza-referência por plataforma. Os dois runners leem diretamente o mesmo manifesto e os mesmos arquivos JSON.

Indicador	PWA	Kotlin/Android
Casos	39	39
Comparações	172	172
Aprovadas	172	172
Reprovadas	0	0

- Manifestos idênticos: SIM.
- Hashes de todos os casos idênticos: SIM.
- Conjuntos método/grandeza idênticos: SIM.
- Maior diferença determinística entre plataformas: 9.095e-13.
- Maior diferença entre plataformas na busca crítica: 4.441e-14.

2.2 Critérios

Cada plataforma é aprovada quando $|x_{\text{calculado}} - x_{\text{referência}}| \leq \text{tolerância}$. As grandezas incluem FS, ky, deslocamento, velocidade residual, parâmetros e tensões constitutivas e resistência não drenada USACE. Para fatias publicadas, superfícies fixas, casos determinísticos de Newmark e pontos constitutivos, a paridade exige diferença máxima de 1e-10. Na busca crítica, cada motor otimiza de forma independente; ambos devem reproduzir a referência e permanecer dentro da tolerância pública.

2.3 Equações auditadas

```
m_alpha = cos(alpha) + sin(alpha) * tan(phi') / FS
FS = sum[(c' * b + (W - Fy - u * b) * tan(phi')) / m_alpha] / D
D = sum[W * sin(alpha) + kh * Ws * cos(alpha) + cargas externas dirigentes]
```

Fellenius usa $l = b / \cos(\alpha)$; Janbu usa equilíbrio horizontal e fator de correção f_0 . Spencer e GLE resolvem simultaneamente equilíbrio de forças e momentos. Falha de convergência retorna resultado nulo, sem substituição silenciosa por Bishop.

```
FS(ky) = 1 ac = ky * g
a_rel(t) = g * [a_dirigente(t) - ky], com v_rel >= 0
```

A integração de Newmark usa aceleração linear entre amostras e resolve analiticamente os eventos de partida e parada. Se o registro termina com velocidade relativa positiva, o motor informa apenas limite inferior e não declara deslocamento permanente.

```
mb = mi * exp[(GSI - 100) / (28 - 14D)]
s = exp[(GSI - 100) / (9 - 3D)]
a = 1/2 + [exp(-GSI/15) - exp(-20/3)] / 6
tau = sigma_n' * tan[JRC * log10(JCS / sigma_n') + phi_r]
```

A transformação Hoek-Brown para σ_n' -tau segue Balmer, Equações 8 a 10 de Hoek et al. (2002). O ponto de rebaixamento rápido reproduz as Equações G-8 a G-12 do USACE: K_f , K_c e a interpolação de τ_{ff} entre $K_c=1$ e $K_c=K_f$. O corpus também recalcula as 12 linhas resistentes publicadas em G-12b/G-13b e a escolha do modo resistente na terceira etapa. As Figuras G-12a/G-12b/G-13a/G-13b/G-13c são ainda reproduzidas linha a linha para geometria derivável, pesos, cargas, poropressões, forças normais e forças interfáticas pelas Equações C-19 a C-21 e G-16/G-17.

3. Desenvolvimento e evidências

As páginas seguintes apresentam os dados intermediários publicados e os resultados obtidos em ambas as plataformas.

3.1 Resumo

PWA e Kotlin/Android aprovaram 172/172 comparações cada em 39 casos canônicos. A maior diferença determinística entre plataformas foi 9.095e-13; o gate de paridade foi aprovado.

Gate de prontidão para liberação de engenharia: **BLOQUEADO**. PWA: **15 execuções com revisão obrigatória de forças e 2 buscas críticas sem certificação global**. Kotlin/Android: **15 execuções com revisão obrigatória de forças e 2 buscas críticas sem certificação global**. A aprovação numérica não remove esses bloqueios fail-closed.

3.2 Interoperabilidade DXF - seção - LEM - cinemática

O mesmo fixture usa as camadas oficiais EXTERNAL, PIEZO e NONCIRC_SURFACE. O DXF XY declara metros; X é a abscissa e Y é a cota. Na PWA, y_canvas=-cota é revertido antes do LEM; o Kotlin mantém a cota positiva para cima. Nenhum parâmetro resistente é inferido da litologia: c, phi e gamma são vinculados explicitamente como valores sintéticos.

O fluxo preserva 4 pontos de terreno, 6 vértices de domínio, 4 pontos PIEZO e 5 vértices da superfície. O método governante é spencer com FS PWA/Kotlin=2.776916661432/2.776916661432.

Método	FS ref. interno	PWA	Kotlin	Delta	Tolerância	Estado
janbu	2.818981104485	2.818981104485	2.818981104485	0	1.000e-09	APROVADO
spencer	2.776916661432	2.776916661432	2.776916661432	4.441e-16	1.000e-09	APROVADO
gle	2.777256563648	2.777256563648	2.777256563648	2.220e-14	1.000e-09	APROVADO

Cinemática: 6/6 pares, 1 planar, 1 tombamento, 2 cunhas e 0 tombamento direto. Compatibilidade azimutal: aligned (0 grau).

- SHA-256 da especificação: fe72f7b96b9c13a68f281aa57bde9423c948b5f9770be4d6e564d1d829813aff.
- SHA-256 do DXF: 9519880d74ecab234dcabe3a2a451d33b90477e5348cfd6a51375cb50f473125.

Este é um gate interno de transformação e paridade, não um benchmark externo; por isso não aumenta a contagem formal.

3.3 Desempenho probabilístico local

O caso seequent-james-bay-monte-carlo-fixed-surface executou 10000 amostras em 3 repetições sequenciais no mesmo processo Node. O gate estrito exige a primeira execução, a mediana e todas as repetições abaixo de 2000 ms.

Execução	Tempo (ms)	P(FS<limiar)	FS médio	DP do FS	Reponderadas	Reconstruídas
1	1351.658	0.013400	1.459002557334	0.211877822673	10000	0
2	1227.781	0.013400	1.459002557334	0.211877822673	10000	0
3	1043.737	0.013400	1.459002557334	0.211877822673	10000	0

Resultado: APROVADO. Primeira execução: 1351.658 ms; mediana: 1227.781 ms; fingerprints numéricos entre repetições: idênticos.

Ambiente: Node v26.5.0, darwin/x64, 8 CPUs lógicas, Intel(R) Core(TM) i5-1038NG7 CPU @ 2.00GHz.

- SHA-256 do caso: 65b8dc55c067cf5f3c15e9de2d2e180422dd89fc6bf960dff33f00bc4373e705.
- SHA-256 do motor: 5fc4e54287ae5746bd8cb21708b3bb2ad45148a76036280f04a4ec6e25a0e70f.
- SHA-256 do script do ensaio: 7a265e7658674e32e09a8d2192b37b37de685a25c946a315cec4bc0df13bdae2.

Resultado de desempenho local, não certificação multiplataforma. O gate estrito exige primeira execução, mediana e todas as repetições abaixo do alvo.

3.4 Benchmarks externos

Caso	Tipo	Métodos	Condição verificada
Bishop simplificado - cálculo manual 1, talude seco	prebuilt_slices	bishop	Bishop simplificado iterativo: equilíbrio global de momentos e equilíbrio vertical por fatia, com $l=b/\cos(\alpha)$.
Bishop simplificado - cálculo manual 2, talude molhado	prebuilt_slices	bishop	Bishop simplificado iterativo com poropressão u por fatia e resistência efetiva reduzida por u vezes o comprimento de base.
ACADS 1(a) - busca circular em talude homogêneo seco	critical_search	bishop, spencer, gle, janbu	Busca circular do mínimo seguida de avaliação independente pelos quatro métodos publicados.
ACADS 3(b) - superfície não circular estratificada	fixed_surface	spencer, gle, janbu	Fatiamento da polilinha publicada preservando seus vértices como limites de fatia; resistência integrada por domínio.
Problema 52 - superfície circular terminando em trinca seca	fixed_surface	bishop, fellenius, spencer, gle	Superfície circular publicada recortada exatamente no fundo da trinca seca; quatro domínios de material.
Seequent - trinca de tração seca inferida pela inclinação da base	fixed_surface	gle	O XML oficial define material Mohr-Coulomb com $\gamma=20$ kN/m ³ , $c'=15$ kPa e $\phi_i=30^\circ$, busca entry-exit e Morgenstern-Price. A opção Angle=120° no sistema global equivale ao limite de 60° da base em relação à horizontal. A superfície circular 72, que é o mínimo publicado dessa análise, foi extraída do CSV oficial. O RockGeo remove geometricamente o trecho mais íngreme a montante, gera 30 fatias novas e resolve GLE sem truncar forças normais negativas.
Seequent - trinca de tração explícita seca	fixed_surface	gle	O XML oficial define uma linha de trinca horizontal em $y=18$ m. Para a superfície crítica 84, a interseção com essa linha ocorre em $x=20,954902782202836$ m; a face vertical tem 2 m até o terreno em $y=20$ m. O RockGeo recebe posição e profundidade observadas, recorta a superfície nesse fundo, gera 30 fatias e resolve GLE/Morgenstern-Price sem pressão de água.
Seequent - trinca de tração explícita preenchida com água	fixed_surface	gle	A análise oficial usa a linha de trinca em $y=18$ m, preenchimento de 100% e $\gamma_w=10$ kN/m ³ . Para a superfície crítica 72, a interseção ocorre em $x=20,683100020936468$ m. O RockGeo aplica $P=\gamma_w \cdot h/2=10 \times 22/2=20$ kN/m horizontalmente, a $h/3=0,6666667$ m acima do fundo, e inclui força e momento no equilíbrio GLE.
Problema 51 - Zhu, quatro camadas e métodos de equilíbrio de forças	fixed_surface	janbu_simplified, corps_2, lowe_karafiath, spencer, gle	Círculo fixo (18,058; 66,744), raio 86 m, 100 fatias, quatro materiais Mohr-Coulomb, trinca seca de 5 m e ação pseudoestática $kh=0,1$. Janbu simplificado e os métodos Corps #2/Lowe-Karafiath satisfazem equilíbrio global de forças; Spencer e GLE satisfazem forças e momentos.
Problema 62 - Spencer pseudoestático	fixed_surface	spencer	Equilíbrio rigoroso de forças e momentos pelo método de Spencer, incluindo força pseudoestática horizontal kh vezes o peso sísmico.
Problema 68 / USACE E-10 - água externa	fixed_surface	bishop, spencer, gle, janbu	Materiais não drenados e pressão hidrostática externa integrada como força vetorial nas fatias submersas.
Newmark - ky derivado do problema 62 por $FS(kh)=1$	newmark_yield_coefficient	spencer	Na superfície circular fixa do problema 62, o motor avalia Spencer com kh crescente, verifica resposta monotônica, enquadra a primeira passagem por $FS=1$ e resolve ky por bisseção sem extrapolação.
Newmark - pulso linear com solução fechada	newmark_integration	newmark	Com $ky=0,1$ e $g=9,80665$ m/s ² , a aceleração relativa é integrada exatamente sob interpolação linear e vínculo unilateral $v \geq 0$. Para este pulso, $d=(47/24) \cdot 0,2 \cdot g=3,8409379166666664$ m e $v_{final}=0$.
Hoek-Brown 2002 - parâmetros e ponto da envoltória de Balmer	strength_point	hoek_brown	$m_b=m_i \cdot \exp[(GSI-100)/(28-14D)]$, $s=\exp[(GSI-100)/(9-3D)]$ e $a=1/2 \cdot [\exp(-GSI/15) - \exp(-20/3)]/6$. Com $\sigma_3'=50$ kPa, a Equação 2 fornece σ_1' ; as Equações 8-10 de Balmer fornecem $\sigma_n'=265,8845785298288$ kPa e $\tau=757,6557130235739$ kPa. O runner recebe σ_n' e deve inverter a envoltória, recuperando σ_3' .
Barton-Choubey 1977 - resistência de pico de uma junta	strength_point	barton_choubey	$\tau=\sigma_n' \cdot \tan[JRC \cdot \log_{10}(JCS/\sigma_n') + \phi_r]$. Para $\sigma_n'=10000$ kPa, $JRC=10$, $JCS=100000$ kPa e $\phi_r=30$ graus: $JCS/\sigma_n'=10$, o ângulo mobilizado é 40 graus e $\tau=8390,996311772798$ kPa.
USACE - resistência não drenada no rebaixamento rápido	rapid_drawdown_strength_point	rapid_drawdown	Com $\sigma_c'=100$ kPa, $\tau_c=20$ kPa, $c'=0$ e $\phi_i=30$ graus, as Equações G-8 e G-11 dão $K_f=3$ e $K_c=1,522175893937534$. As envoltórias G-9 e G-10 dão 22,632698070846498 e 57,735026918962575 kPa. A interpolação G-12 resulta em $\tau_{ff}=31,797493043623646$ kPa.

Caso	Tipo	Métodos	Condição verificada
USACE - exemplo completo de rebaixamento rápido em três etapas	rapid_drawdown_surface	spencer	O runner chama o procedimento de produção: etapa 1 Spencer na condição inicial com nível El. 103 ft e água externa; cálculo de σ_c , τ_c , K_c , K_f e τ_{ff} por fatia; etapa 2 não drenada; comparação com resistência drenada final; e etapa 3 governante com nível El. 24 ft. Nenhuma resistência final é injetada no benchmark.
USACE - conferência das 12 linhas G-12b e G-13b	rapid_drawdown_published_rows	rapid_drawdown	Cada linha G-12b alimenta as equações USACE de K_c , K_f , $\tau_c(K_c=1)$, $\tau_c(K_c=K_f)$ e interpolação τ_{ff} . Cada linha G-13b alimenta $s_d = \max[0, c' + \sigma_d' \tan(\phi_i')]$ e a seleção do menor entre s_d e τ_{ff} . Os valores da tabela em ksf foram convertidos integralmente para kPa pelo fator 47,88025898033584.
USACE - geometria e cadeia de forças das 12 fatias G-12/G-13	rapid_drawdown_force_rows	rapid_drawdown	O runner converte integralmente a tabela publicada para SI. C-19/C-20/C-21 são aplicadas fatia a fatia nas três etapas; G-16/G-17 calculam N e σ_m nas etapas 1 e 2; o cisalhamento mobilizado usa $[c' \Delta I + (N - u \Delta I) \tan(\phi_i')]/F$. Área/largura, peso/área, carga d'água e u/γ_w fornecem quatro contraprovas adicionais da transcrição geométrica.
SLOPE/W - rebaixamento rápido por tensões efetivas em superfície crítica fixa	fixed_surface	gle	O RockGeo usa a superfície crítica 281 e os 30 limites de coluna do arquivo digital. O nível externo cai de 18 m para 12 m, enquanto a linha piezométrica interna permanece elevada, conforme o modelo simplificado de tensões efetivas da Seequent. A base de todas as colunas oficiais permanece no material de aterro, com $c'=8$ kPa, $\phi_i'=30$ graus e $\gamma_w=18$ kN/m ³ . O núcleo tem o mesmo peso específico e não altera o peso da massa; o dreno e o leito rochoso não interceptam a massa mobilizada.
Shepard 1968 - interpolação IDW2 de poropressão	pore_pressure_grid_point	inverse_distance_squared	As distâncias quadráticas do ponto (1,1) aos três dados são 2, 2 e 10 m ² . Logo, os pesos IDW2 são 1/2, 1/2 e 1/10, e $u=[10(1/2)+20(1/2)+40(1/10)]/[(1/2)+(1/2)+(1/10)]=17,2727272727273$ kPa.
Slide2 - TIN/Delaunay com carga total	pore_pressure_grid_point	tin_delaunay	O plano definido pelos nós é $H=5+2x+3y$. No ponto (0,25;0,25), $H=6,25$ m. Para carga total, a carga de pressão é $H-y=6,25-0,25=6,00$ m e $u=\gamma_w(H-y)=9,81 \times 6,00=58,86$ kPa.
Slide2 Problema 10 / ACADS 5 - TIN, água empoçada e superfície crítica do grid	fixed_surface	bishop, spencer, gle	Material homogêneo $c'=11$ kPa, $\phi_i'=28^\circ$, $\gamma=20$ kN/m ³ ; 137 cargas totais interpoladas por TIN/Delaunay; $u=9,81(H-y)$, truncado em zero acima do NA; água empoçada entre $x=15$ m e $x=32$ m integrada como pressão hidrostática externa; base circular discretizada por cordas verticais. A superfície pertence exatamente ao grid do modelo oficial.
Slide2 Problema 41 - busca não circular em Power Curve	critical_search	janbu_simplified	Talude homogêneo definido pelos vértices cotados (0;30), (5;30), (85;10) e (93,3621;10), $\gamma=20$ kN/m ³ , $R_u=0,30$ e $\tau=1,4 \cdot \sigma' \cdot \square \cdot \square$. A busca parte da malha multiforma determinística, aplica alteração coordenada e, por opção explícita, VFSA seguida de LMC com oito direções, extrapolação e redução adaptativa do passo. A superfície final é reavaliada com 36, 50, 100, 200, 400 e até 800 fatias, interrompendo após a convergência declarada.
Seequent - busca não circular multissemente	critical_search	gle	A geometria, os dois materiais e a linha piezométrica são extraídos do arquivo digital oficial. O RockGeo executa a mesma busca não circular híbrida VFSA/LMC, com orçamento fixo, nas sementes 0, 1, 2 e 42. Cada solução é reavaliada no estudo de convergência de fatias, tem sua superfície exportada e passa pelo filtro geométrico de superfícies geradas.
Seequent - superfície não circular otimizada digital	fixed_surface	gle	A geometria, os dois materiais, a linha piezométrica e todos os vértices da superfície otimizada foram extraídos do arquivo digital oficial. Os vértices adicionais dos CSVs preservam exatamente as interseções de coluna usadas pelo SLOPE/W. O RockGeo resolve GLE/Morgenstern-Price na polilinha fixa e recompõe peso, poropressão e λ sem injetar forças publicadas.
Slide2 Problema 44 - Power Curve em superfície circular publicada	fixed_surface	janbu_simplified	O manual define $\tau=a(\sigma'_n+d)^b+c$ e publica $a=1,107$, $b=0,86$, $c=0$ e $d=0$. A Figura 44.2 fornece centro (-2,859; 9,936), raio 10,283 m e extremos (0,092; 0,085) e (6,640; 6,000). A Tabela 44.2 publica FS Janbu simplificado=0,921 e $\sigma'_n, \max=15,40$ kPa. A entrada usa $\gamma=18$ kN/m ³ do exemplo original: com o $\gamma=19,5$ impresso na Tabela 44.1, a convergência de 200 fatias produz FS=0,909544 e $\sigma'_n, \max=16,719$ kPa, incompatíveis com os resultados do próprio manual; com $\gamma=18$ e 25 fatias, o RockGeo produz FS=0,920456 e $\sigma'_n, \max=15,394$ kPa.
Slide2 Problema 54 - talude sem microestaca	fixed_surface	bishop	O maciço seco e homogêneo usa $c'=4,9$ kPa, $\phi_i'=10^\circ$ e $\gamma=15,68$ kN/m ³ . A superfície circular e seus extremos são impressos na Figura 54.2. O RockGeo integra 100 fatias verticais igualmente espaçadas e aplica Bishop simplificado na superfície fixa.
Slide2 Problema 54 - microestaca acoplada ao LEM	fixed_surface	bishop	A fileira vertical cruza a superfície publicada uma única vez. O modelo RockGeo aplica a capacidade transversal última de 10,7 kN por estaca, dividida pelo espaçamento de 1 m, tangente à base e no lado resistente passivo do equilíbrio de Bishop. A capacidade passiva é dividida pelo próprio FS durante a iteração, conforme o Método B de Duncan e Wright.

Caso	Tipo	Métodos	Condição verificada
Seequent SLOPE/W - força de ancoragem por largura	support_capacity_point	support_capacity	O exemplo SLOPE/W publica $F'=F/(s \cdot RF)=120/(2 \cdot 1,2)=50$ kN/m. No contrato RockGeo, a capacidade última do elemento é primeiro convertida em admissível: $120/1,2=100$ kN; depois é dividida pelo espaçamento de 2 m, resultando nos mesmos 50 kN/m.
Slide2 - diagrama de tirante governado por pullout	support_capacity_point	support_capacity	$L_o=\min(2,0;7,5)=2,0$ m e $L_i=7,5-2,0=5,5$ m. $F_1=B \cdot L_o=15 \cdot 2=30$ kN; $F_2=T=100$ kN; $F_3=P+B \cdot L_i=50+15 \cdot 5,5=132,5$ kN. Logo $F=\min(30;100;132,5)=30$ kN e $F/S=30/2=15$ kN/m.
Slide2 - diagrama de tirante governado por stripping	support_capacity_point	support_capacity	$L_o=\min(7,5;7,5)=7,5$ m e $L_i=7,5-7,5=0$ m. $F_1=B \cdot L_o=15 \cdot 7,5=112,5$ kN; $F_2=T=100$ kN; $F_3=P+B \cdot L_i=50+15 \cdot 0=50$ kN. Logo $F=\min(112,5;100;50)=50$ kN e $F/S=50/2=25$ kN/m.
Slide2 Tutorial 08 - confiabilidade LHS completa em superfície fixa	fixed_surface_reliability	bishop	A geometria, o material e as três distribuições normais vêm do arquivo e do tutorial oficiais. A superfície circular fixa foi obtida pela busca multibacia RockGeo no mesmo modelo e produz FS determinístico praticamente coincidente. Cada plataforma gera as mesmas 1.000 amostras LHS com semente explícita, recompõe a geometria quando γ varia, resolve Bishop e calcula PF, momentos amostrais e índices de confiabilidade.
SLOPE/W James Bay - Monte Carlo completo em superfície fixa	fixed_surface_reliability	bishop	A geometria, os cinco materiais, a superfície circular crítica, as quatro distribuições independentes e os resultados foram extraídos do .gsz oficial. O SLOPE/W usa 27 fatias resultantes da discretização nominal de 30; o RockGeo reproduz as mesmas abscissas de contorno e resolve Bishop na superfície fixa. Cada plataforma executa 5.000 realizações Monte Carlo independentes com xoshiro128**, semente explícita e recompõe pesos quando γ varia.
NIST - intervalo de Wilson para proporção	reliability_statistics_point	wilson_score	Com $p\text{-hat}=26/200=0,13$ e $z_{0,95}=1,6448536269514722$, as fórmulas de Wilson fornecem limite inferior 0,09577274821084578 e superior 0,1741041506736882. O NIST publica o limite inferior arredondado 0,09577 para o limite unilateral equivalente.
USBR A-7 - probabilidade pela cauda normal	reliability_statistics_point	normal_cdf	As Equações A-7-10 e A-7-11 definem $\beta=\frac{[\ln(i_{crit})-E(\ln i)]/\sigma_{\ln i}}{1}$ e $P_f=1-\Phi(\beta)$. Para $\beta=-1,13$, o núcleo RockGeo calcula $1-\Phi(-1,13)=0,8707618356044616$; o manual publica 0,8711 após usar os valores internos não arredondados do exemplo.
NIST Beta - razão beta incompleta em ponto exato	reliability_statistics_point	beta_cdf	$I_{0,5}(2,3)=\int_0^1 12x(1-x)^2 dx = [6x^2-8x^3+3x^4]_0^1 = 0,6875$.
NIST Gamma - exemplo publicado de CDF	reliability_statistics_point	gamma_cdf	Para forma inteira $\alpha=2$, $F(24)=1-\exp(-24/30) \cdot (1+24/30)=0,1912078645890012$.
NIST Exponencial - exemplo publicado de CDF	reliability_statistics_point	exponential_cdf	A NIST define $F(t)=1-\exp(-\lambda t)$ e média $=1/\lambda$. Com média=100 e $t=100$, $F=1-\exp(-1)=0,6321205588285577$.

3.4.1 Bishop simplificado - cálculo manual 1, talude seco

ID: slide2-hand-calculation-01-dry | Tipo: prebuilt_slices

[Slide Hand Calculation #1 - Simple Homogeneous Dry Slope](#)

Localização na fonte: Tabela 1; Equação 6; Tabela 3; respostas nas páginas 5 e 9

Base de cálculo

Bishop simplificado iterativo: equilíbrio global de momentos e equilíbrio vertical por fatia, com $l=b/\cos(\alpha)$.

Critério de aceitação

O manual converge para 2,11297531 e publica FS=2,113 tanto no cálculo manual quanto no Slide.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Soma de W sen(alpha)	356.962	kN/m
FS da iteração final	2.11297531	-
Número de fatias	7	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
bishop	FS	2.113000	0.001000	2.112942	5.754e-05	2.112942	5.754e-05	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	f09ffd54dcdce0e00334ee2f161496d775eac8db0083ea885841f5af925e9fbb
--------------------	--

Limitação específica: Verifica o solver sobre fatias publicadas; não verifica geração geométrica nem busca.

3.4.2 Bishop simplificado - cálculo manual 2, talude molhado

ID: slide2-hand-calculation-02-wet | Tipo: prebuilt_slices

Slide Hand Calculation #2 - Simple Homogeneous Wet Slope

Localização na fonte: Tabela 1; Equação 6; Tabela 3; respostas nas páginas 5 e 10

Base de cálculo

Bishop simplificado iterativo com poropressão u por fatia e resistência efetiva reduzida por u vezes o comprimento de base.

Critério de aceitação

O cálculo manual converge para 1,55527007; a diferença de 0,001 para o Slide é atribuída pelo próprio manual à estimativa das alturas das fatias.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Soma de W sen(alpha)	356.962	kN/m
FS da iteração final	1.55527007	-
FS calculado pelo Slide	1.554	-
Número de fatias	7	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
bishop	FS	1.555000	0.001000	1.555196	0.000196	1.555196	0.000196	0	APROVADO

SHA-256 da entrada

f25ee2131651971dc1ffa83f85fcdcb0ab884e9af3715170404de512418b20da

Limitação específica: Verifica diretamente a aplicação de poropressões publicadas; não verifica interpolação de uma linha piezométrica.

3.4.3 ACADS 1(a) - busca circular em talude homogêneo seco

ID: acads-01a-critical-search | Tipo: critical_search

[Slide Slope Stability Verification Manual](#)

Localização na fonte: Problema ACADS 1(a), resultados de Bishop, Spencer, GLE/Morgenstern-Price e Janbu corrigido

Base de cálculo

Busca circular do mínimo seguida de avaliação independente pelos quatro métodos publicados.

Critério de aceitação

A tolerância de 0,006 cobre diferenças pequenas de busca e discretização sem aceitar alteração de classe de estabilidade.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Coesão	3	kPa
Atrito	19.6	deg
Peso específico	20	kN/m3

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
bishop	FS	0.987000	0.006000	0.985400	0.001600	0.985400	0.001600	0	APROVADO
spencer	FS	0.986000	0.006000	0.984463	0.001537	0.984463	0.001537	4.441e-16	APROVADO
gle	FS	0.986000	0.006000	0.984435	0.001565	0.984435	0.001565	4.441e-16	APROVADO
janbu	FS	0.990000	0.006000	0.987832	0.002168	0.987832	0.002168	4.441e-16	APROVADO

Auditoria da busca crítica

Plataforma	Método	FS	Fatias	Avaliações	Estado da busca	Fronteira	Revisão solver
PWA	bishop	0.985400102896	100	1112	converged_multistart	NÃO	NÃO
PWA	spencer	0.984462984974	100	1112	converged_multistart	NÃO	SIM
PWA	gle	0.984434997122	100	1112	converged_multistart	NÃO	SIM
PWA	janbu	0.987831838734	100	964	converged_multistart	NÃO	NÃO
Kotlin	bishop	0.985400102896	100	1112	converged_multistart	NÃO	NÃO
Kotlin	spencer	0.984462984974	100	1112	converged_multistart	NÃO	SIM
Kotlin	gle	0.984434997122	100	1112	converged_multistart	NÃO	SIM
Kotlin	janbu	0.987831838734	100	964	converged_multistart	NÃO	NÃO

A aprovação numérica não equivale a garantia de mínimo global. “Revisão solver = SIM” mantém o FS como diagnóstico até revisar tração nas interfaces/base e a hipótese de trinca de tração.

SHA-256 da entrada	c8d83afb9db63c71004120204c4701803c2cd37fd55a86ebce4ad697fc4fbe4e
--------------------	--

Limitação específica: Uma busca numérica não prova mínimo global; o relatório deve registrar a geometria governante encontrada em cada plataforma.

3.4.4 ACADS 3(b) - superfície não circular estratificada

ID: acads-03b-fixed-surface | Tipo: fixed_surface

[Slide Slope Stability Verification Manual](#)

Localização na fonte: Problema ACADS 3(b), Tabela 8.2 e superfície publicada

Base de cálculo

Fatiamento da polilinha publicada preservando seus vértices como limites de fatia; resistência integrada por domínio.

Critério de aceitação

Tolerâncias iguais às regressões oficiais existentes no RockGeo, menores que 0,25% do FS.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Número de fatias	50	-
Número de vértices da superfície	4	-
Atrito da camada fraca	10	deg

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
spencer	FS	1.277000	0.002000	1.276191	0.000809	1.276191	0.000809	2.220e-16	APROVADO
gle	FS	1.262000	0.003000	1.260487	0.001513	1.260487	0.001513	1.021e-14	APROVADO
janbu	FS	1.294000	0.002000	1.294459	0.000459	1.294459	0.000459	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	21ea13e5b2849552204dd021d87bf8da2219d567a5446db0acf7e31deb9f4314
--------------------	--

Limitação específica: Verifica uma superfície fornecida; não verifica otimização não circular.

3.4.5 Problema 52 - superfície circular terminando em trinca seca

ID: slide2-problem-52-dry-tension-crack | Tipo: fixed_surface

[Slide Slope Stability Verification Manual](#)

Localização na fonte: Problema 52, Zhu e Lee (2002), superfície 1

Base de cálculo

Superfície circular publicada recortada exatamente no fundo da trinca seca; quatro domínios de material.

Critério de aceitação

A tolerância absoluta de 0,003 reproduz a precisão publicada e a regressão existente nos dois motores.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Centro x	6.119	m
Centro y	34.302	m
Raio	34.843	m
Profundidade da trinca	1.015	m

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
bishop	FS	2.010000	0.003000	2.009231	0.000769	2.009231	0.000769	0	APROVADO
fellenius	FS	1.934000	0.003000	1.932646	0.001354	1.932646	0.001354	0	APROVADO
spencer	FS	2.017000	0.003000	2.015958	0.001042	2.015958	0.001042	4.441e-16	APROVADO
gle	FS	2.017000	0.003000	2.016139	0.000861	2.016139	0.000861	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	ba606e9d9737fd1d5265d4f7617deece7370d7572cc1cd633de861e84718d9e2
--------------------	--

Limitação específica: A trinca é seca; o efeito de água em trinca é verificado em caso separado da suíte ampliada.

3.4.6 Seequent - trinca de tração seca inferida pela inclinação da base

ID: seequent-tension-crack-angle-fixed-surface | Tipo: fixed_surface

[GeoStudio Example - Tension Cracks](#)

Localização na fonte: Arquivo oficial .gsz, revisão 181 de 12/03/2025; análise "2 - Tension crack angle"; XML principal, XML da análise, 001/slip_surface.csv, 001/column_72.csv, 001/intercolumn_72.csv e 001/lambdafos_72.csv

Base de cálculo

O XML oficial define material Mohr-Coulomb com $\gamma=20$ kN/m³, $c'=15$ kPa e $\phi_i=30^\circ$, busca entry-exit e Morgenstern-Price. A opção Angle=120° no sistema global equivale ao limite de 60° da base em relação à horizontal. A superfície circular 72, que é o mínimo publicado dessa análise, foi extraída do CSV oficial. O RockGeo remove geometricamente o trecho mais íngreme a montante, gera 30 fatias novas e resolve GLE sem trincar forças normais negativas.

Critério de aceitação

O FS publicado é 1,2249610398299926 e o desvio observado do RockGeo é 1,5574e-4; por isso o limite é 3e-4. A massa deslizante, as abscissas, a profundidade inferida e o limite angular são invariantes geométricos e usam tolerâncias numéricas. O λ admite 0,006 porque as discretizações da função interfatias não são idênticas; o sufixo 72 identifica a superfície crítica, e ambos os arquivos de coluna contêm 30 fatias.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
FS GLE/Morgenstern-Price	1.2249610398299926	-
Centro X da superfície	35.99769522952983	m
Centro Y da superfície	26.76951084789218	m
Raio da superfície	17.647695229529816	m
Entrada após o recorte angular	20.714342842511556	m
Cota do fundo da trinca inferida	17.945663233127277	m
Peso da massa deslizante	576.2654522991068	kN/m
Lambda da superfície publicada	0.9512901750806706	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
gle	FS	1.224961	0.000300	1.224805	0.000156	1.224805	0.000156	4.441e-16	APROVADO
gle	fatias computacionais	30.000000	1.000e-12	30.000000	0	30.000000	0	0	APROVADO
gle	peso da massa deslizante (kN/m)	576.265452	1.000e-09	576.265452	2.274e-13	576.265452	2.274e-13	0	APROVADO
gle	abscissa de entrada da superfície (m)	20.714343	1.000e-10	20.714343	7.105e-15	20.714343	7.105e-15	0	APROVADO
gle	abscissa de saída da superfície (m)	30.500000	1.000e-10	30.500000	0	30.500000	0	0	APROVADO
gle	abscissa da trinca angular aplicada (m)	20.714343	1.000e-10	20.714343	7.105e-15	20.714343	7.105e-15	0	APROVADO
gle	profundidade da trinca angular aplicada (m)	2.054337	1.000e-10	2.054337	7.105e-15	2.054337	7.105e-15	0	APROVADO
gle	inclinação-limite da base da trinca (°)	60.000000	1.000e-12	60.000000	0	60.000000	0	0	APROVADO
gle	multiplicador λ do método	0.951290	0.006000	0.945959	0.005331	0.945959	0.005331	2.220e-15	APROVADO

SHA-256 da entrada	f796f470dac613edce9b75ac42e7790eaae350eb9909badc1731cddb5b7fcb52
--------------------	--

Limitação específica: Verifica uma superfície circular fixa com trinca seca inferida por ângulo. Não verifica busca crítica, superfície não circular, água na trinca nem profundidade observada. O RockGeo bloqueia água nesse modo porque a profundidade inferida não é observação de campo. A tração basal residual continua gerando revisão de engenharia obrigatória; aprovação numérica não libera o caso para projeto.

3.4.7 Seequent - trinca de tração explícita seca

ID: seequent-tension-crack-line-fixed-surface | Tipo: fixed_surface

[GeoStudio Example - Tension Cracks](#)

Localização na fonte: Arquivo oficial .gsz, revisão 181 de 12/03/2025; análise "3 - Tension crack line"; XML principal, XML da análise, 001/slip_surface.csv, 001/column_84.csv, 001/intercolumn_84.csv e 001/lambdafos_84.csv

Base de cálculo

O XML oficial define uma linha de trinca horizontal em $y=18$ m. Para a superfície crítica 84, a interseção com essa linha ocorre em $x=20,954902782202836$ m; a face vertical tem 2 m até o terreno em $y=20$ m. O RockGeo recebe posição e profundidade observadas, recorta a superfície nesse fundo, gera 30 fatias e resolve GLE/Morgenstern-Price sem pressão de água.

Critério de aceitação

O FS publicado é 1,2208916806282315 e o desvio observado do RockGeo é $1,6638e-4$; por isso o limite é $3e-4$. Peso, posição e profundidade são invariantes geométricos. O λ admite 0,0025 pela diferença entre as 84 colunas oficiais e as 30 fatias do RockGeo.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
FS GLE/Morgenstern-Price	1.2208916806282315	-
Centro X da superfície	34.68510093684315	m
Centro Y da superfície	24.687704469632628	m
Raio da superfície	15.272319157182132	m
Posição da face vertical	20.954902782202836	m
Profundidade da trinca	2	m
Peso da massa deslizante	567.497734062431	kN/m
Lambda da superfície publicada	0.9562621128124325	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
gle	FS	1.220892	0.000300	1.220725	0.000166	1.220725	0.000166	0	APROVADO
gle	fatias computacionais	30.000000	1.000e-12	30.000000	0	30.000000	0	0	APROVADO
gle	peso da massa deslizante (kN/m)	567.497734	1.000e-09	567.497734	1.137e-13	567.497734	1.137e-13	0	APROVADO
gle	abscissa de entrada da superfície (m)	20.954903	1.000e-10	20.954903	0	20.954903	0	0	APROVADO
gle	abscissa de saída da superfície (m)	30.500000	1.000e-10	30.500000	0	30.500000	0	0	APROVADO
gle	abscissa da trinca angular aplicada (m)	20.954903	1.000e-10	20.954903	0	20.954903	0	0	APROVADO
gle	profundidade da trinca angular aplicada (m)	2.000000	1.000e-12	2.000000	0	2.000000	0	0	APROVADO
gle	multiplicador λ do método	0.956262	0.002500	0.958270	0.002008	0.958270	0.002008	2.220e-16	APROVADO

SHA-256 da entrada

34b15dc9471c38f0d289802595154fee97ef244ca0514e4aecbc02bf608f76e4

Limitação específica: Verifica a superfície circular crítica fixa da análise seca. Não verifica a busca entry-exit, propagação de trincas, resistência à tração do material ou água. Posição e profundidade precisam vir de observação ou hipótese de projeto documentada.

3.4.8 Seequent - trinca de tração explícita preenchida com água

ID: seequent-tension-crack-water-fixed-surface | Tipo: fixed_surface

GeoStudio Example - Tension Cracks

Localização na fonte: Arquivo oficial .gsz, revisão 181 de 12/03/2025; análise "4 - Tension crack with water"; XML principal, XML da análise, 001/slip_surface.csv, 001/column_72.csv, 001/intercolumn_72.csv e 001/lambdafos_72.csv

Base de cálculo

A análise oficial usa a linha de trinca em y=18 m, preenchimento de 100% e $\gamma_w=10$ kN/m3. Para a superfície crítica 72, a interseção ocorre em x=20,683100020936468 m. O RockGeo aplica $P=\gamma_w \cdot h^2/2=10 \times 22^2/2=20$ kN/m horizontalmente, a $h/3=0,6666667$ m acima do fundo, e inclui força e momento no equilíbrio GLE.

Critério de aceitação

O FS publicado é 1,1805190565876793 e o desvio observado do RockGeo é 9,8939e-5; por isso o limite é 2e-4. Peso, geometria, γ_w , força hidrostática e braço usam tolerâncias numéricas. O λ admite 0,005 pela diferença entre as 72 colunas oficiais e as 30 fatias do RockGeo.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
FS GLE/Morgenstern-Price	1.1805190565876793	-
Posição da face vertical	20.683100020936468	m
Profundidade e altura de água	2	m
Peso específico da água	10	kN/m3
Força hidrostática horizontal	20	kN/m
Altura do ponto de aplicação acima do fundo	0.6666666666666666	m
Peso da massa deslizante	577.5500125249399	kN/m
Lambda da superfície publicada	1.146149995091884	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
gle	FS	1.180519	0.000200	1.180420	9.894e-05	1.180420	9.894e-05	4.441e-16	APROVADO
gle	fatias computacionais	30.000000	1.000e-12	30.000000	0	30.000000	0	0	APROVADO
gle	peso da massa deslizante (kN/m)	577.550013	1.000e-09	577.550013	2.274e-13	577.550013	2.274e-13	0	APROVADO
gle	abscissa de entrada da superfície (m)	20.683100	1.000e-10	20.683100	0	20.683100	3.553e-15	3.553e-15	APROVADO
gle	abscissa de saída da superfície (m)	30.500000	1.000e-10	30.500000	0	30.500000	0	0	APROVADO
gle	abscissa da trinca angular aplicada (m)	20.683100	1.000e-10	20.683100	0	20.683100	0	0	APROVADO
gle	profundidade da trinca angular aplicada (m)	2.000000	1.000e-12	2.000000	0	2.000000	0	0	APROVADO
gle	applied_tension_crack_water_depth_m	2.000000	1.000e-12	2.000000	0	2.000000	0	0	APROVADO
gle	applied_tension_crack_unit_water_weight_kn_m3	10.000000	1.000e-12	10.000000	0	10.000000	0	0	APROVADO
gle	tension_crack_water_force_kn_m	20.000000	1.000e-12	20.000000	0	20.000000	0	0	APROVADO
gle	tension_crack_water_application_height_m	0.666667	1.000e-12	0.666667	1.221e-15	0.666667	1.221e-15	0	APROVADO
gle	multiplicador λ do método	1.146150	0.005000	1.141571	0.004579	1.141571	0.004579	6.661e-16	APROVADO

SHA-256 da entrada

3a9afad9afa0920f2479f0f0a35516d7e3500417a85b835d53c2617426f2c2ca

Limitação específica: Verifica a superfície circular crítica fixa e uma coluna hidrostática estática. Não modela fluxo transiente na trinca, pressão hidrodinâmica sísmica, congelamento, sucção, cavitação ou propagação da fissura. O uso com ação pseudoestática continua bloqueado pelo motor.

3.4.9 Problema 51 - Zhu, quatro camadas e métodos de equilíbrio de forças

ID: slide2-problem-51-zhu-four-layer | Tipo: fixed_surface

[Slide2 Slope Stability Verification Manual](#)

Localização na fonte: Problema 51, Figuras 51.1 e 51.2, Tabelas 51.1 e 51.2

Base de cálculo

Círculo fixo (18,058; 66,744), raio 86 m, 100 fatias, quatro materiais Mohr-Coulomb, trinca seca de 5 m e ação pseudoestática $kh=0,1$. Janbu simplificado e os métodos Corps #2/Lowe-Karafiath satisfazem equilíbrio global de forças; Spencer e GLE satisfazem forças e momentos.

Critério de aceitação

A tolerância absoluta de 0,015 corresponde a no máximo cerca de 1,35% e cobre a digitalização do nível d'água da figura, além das diferenças de discretização documentadas entre Zhu e Slide2. O corpus não ajusta parâmetros para reproduzir os resultados.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Centro X	18.058	m
Centro Y	66.744	m
Raio	86	m
Profundidade da trinca seca	5	m
kh	0.1	-
Número de fatias	100	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
janbu_simplified	FS	1.112000	0.015000	1.102701	0.009299	1.102701	0.009299	0	APROVADO
corps_2	FS	1.422000	0.015000	1.433715	0.011715	1.433715	0.011715	0	APROVADO
lowe_karafiath	FS	1.288000	0.015000	1.294487	0.006487	1.294487	0.006487	2.442e-15	APROVADO
spencer	FS	1.293000	0.015000	1.282149	0.010851	1.282149	0.010851	4.441e-16	APROVADO
gle	FS	1.304000	0.015000	1.292897	0.011103	1.292897	0.011103	5.329e-15	APROVADO

SHA-256 da entrada	31f431f520cb51a86b2c0948afdd90182a568764ce9c09b4af83f383e0d5abee
--------------------	--

Limitação específica: O nível d'água foi digitizado da figura publicada, pois o manual não fornece tabela de coordenadas. Bishop e Fellenius não integram este aceite pseudoestático do RockGeo; sua formulação sísmica permanece bloqueada na matriz de aplicabilidade.

3.4.10 Problema 62 - Spencer pseudoestático

ID: slide2-problem-62-pseudostatic | Tipo: fixed_surface

[Slide Slope Stability Verification Manual](#)

Localização na fonte: Problema 62, Loukidis et al. (2003), superfície circular publicada

Base de cálculo

Equilíbrio rigoroso de forças e momentos pelo método de Spencer, incluindo força pseudoestática horizontal kh vezes o peso sísmico.

Critério de aceitação

O FS publicado é 1,001; tolerância absoluta 0,002.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
kh	0.432	-
kv	0	-
Número de fatias	50	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
spencer	FS	1.001000	0.002000	1.001021	2.138e-05	1.001021	2.138e-05	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	fab4b2c5cce0e8c0fcedce7da47ea5ee2e32b5519e183e04a35cc0ad64fd4e48
--------------------	--

Limitação específica: Não representa resposta dinâmica, geração de poropressão ou deslocamento de Newmark.

3.4.11 Problema 68 / USACE E-10 - água externa

ID: slide2-problem-68-external-water | Tipo: fixed_surface

[Slide Slope Stability Verification Manual](#)

Localização na fonte: Problema 68, reprodução do exemplo USACE E-10

Base de cálculo

Materiais não drenados e pressão hidrostática externa integrada como força vetorial nas fatias submersas.

Critério de aceitação

As tolerâncias reproduzem as diferenças publicadas e permanecem abaixo de 0,75% do FS.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Conversão de pé	0.3048	m
Conversão de pcf	0.1570874638	kN/m3
Conversão de psf	0.04788025898	kPa
Número de fatias	100	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
bishop	FS	1.241000	0.007000	1.236526	0.004474	1.236526	0.004474	0	APROVADO
spencer	FS	1.241000	0.007000	1.236521	0.004479	1.236521	0.004479	8.882e-16	APROVADO
gle	FS	1.244000	0.009000	1.236521	0.007479	1.236521	0.007479	4.441e-16	APROVADO
janbu	FS	1.385000	0.007000	1.391590	0.006590	1.391590	0.006590	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	35771ffe4de6e6a701406af82b4e925514a1f2ac4b8bee5c97a25a5c8a801c2a
--------------------	--

Limitação específica: Verifica carregamento hidrostático externo estático; não inclui parcela hidrodinâmica sísmica.

3.4.12 Newmark - ky derivado do problema 62 por FS(kh)=1

ID: newmark-problem-62-yield-coefficient | Tipo: newmark_yield_coefficient

[Slide Slope Stability Verification Manual](#)

Localização na fonte: Problema 62, Loukidis et al. (2003): kh=0,432 e Spencer FS=1,001 na superfície publicada

Base de cálculo

Na superfície circular fixa do problema 62, o motor avalia Spencer com kh crescente, verifica resposta monotônica, enquadra a primeira passagem por FS=1 e resolve ky por bisseção sem extrapolação.

Critério de aceitação

A raiz deve permanecer a até 2e-6 do fingerprint versionado e FS(ky) deve fechar em 1 a 1e-8. A proximidade com kh=0,432 é corroborada pelo FS=1,001 publicado, mas ky=0,4326717138 é um valor derivado, não uma medição independente.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
kh publicado	0.432	-
FS Spencer publicado em kh=0,432	1.001	-
Número de fatias	50	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
spencer	ky	0.432672	2.000e-06	0.432672	0	0.432672	0	0	APROVADO
spencer	FS(ky)	1.000000	1.000e-08	1.000000	7.516e-09	1.000000	7.516e-09	3.331e-16	APROVADO

SHA-256 da entrada	d41a25994b77af020dd3159c464d080951d722adcd6098bc7b03ee452b3295e8
--------------------	--

Limitação específica: Verifica ky em uma superfície fixa. Não demonstra que essa massa seja a crítica para deslocamento, não representa resposta dinâmica e usa o solver LEM como parte da própria derivação.

3.4.13 Newmark - pulso linear com solução fechada

ID: newmark-analytical-linear-pulse | Tipo: newmark_integration

Effects of earthquakes on dams and embankments

Localização na fonte: Método do bloco deslizante de Newmark; caso sintético integrado analiticamente por trechos lineares

Base de cálculo

Com $k_y=0,1$ e $g=9,80665\text{ m/s}^2$, a aceleração relativa é integrada exatamente sob interpolação linear e vínculo unilateral $v\geq 0$. Para este pulso, $d=(47/24)*0,2*g=3,8409379166666664\text{ m}$ e $v_{\text{final}}=0$.

Critério de aceitação

Deslocamento e velocidade residual devem coincidir com a solução fechada a $1e-12$ em PWA e Kotlin.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
k_y	0.1	-
g padrão	9.80665	m/s2
Fator analítico $d/(0,2g)$	47/24	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
newmark	deslocamento (m)	3.840938	1.000e-12	3.840938	8.882e-16	3.840938	8.882e-16	0	APROVADO
newmark	velocidade residual (m/s)	0.000000	1.000e-12	0.000000	0	0.000000	0	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	7b527a7f1eb7404e77a573fa73bd4ab2f67152da7eb34a83c56592d1e1c48153
--------------------	--

Limitação específica: Caso sintético verifica apenas a integração e os eventos unilaterais; não valida seleção de acelerogramas, resposta dinâmica do maciço ou critério de aceitabilidade.

3.4.14 Hoek-Brown 2002 - parâmetros e ponto da envoltória de Balmer

ID: hoek-brown-2002-balmer-point | Tipo: strength_point

Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition

Localização na fonte: Equações 2-5 e 8-10; parâmetros do exemplo da Seção 7

Base de cálculo

$mb=mi \cdot \exp[(GSI-100)/(28-14D)]$, $s=\exp[(GSI-100)/(9-3D)]$ e $a=1/2+[\exp(-GSI/15)-\exp(-20/3)]/6$. Com $\sigma_3'=50$ kPa, a Equação 2 fornece σ_1' ; as Equações 8-10 de Balmer fornecem $\sigma_n'=265,8845785298288$ kPa e $\tau=757,6557130235739$ kPa. O runner recebe σ_n' e deve inverter a envoltória, recuperando σ_3' .

Critério de aceitação

Os parâmetros adimensionais devem coincidir a 1e-12; a inversão deve recuperar $\sigma_3'=50$ kPa e τ a 1e-9 kPa em PWA e Kotlin.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
σ_{ci}	50000	kPa
m_i	10	-
GSI	45	-
D	0	-
σ_3' escolhido	50	kPa
σ_n' pelas Equações 8-10	265.8845785298288	kPa

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
hoek_brown	Hoek-Brown mb	1.402560	1.000e-12	1.402560	0	1.402560	0	0	APROVADO
hoek_brown	Hoek-Brown s	0.002218	1.000e-12	0.002218	0	0.002218	0	0	APROVADO
hoek_brown	Hoek-Brown a	0.508086	1.000e-12	0.508086	0	0.508086	0	0	APROVADO
hoek_brown	sigma3' invertido (kPa)	50.000000	1.000e-09	50.000000	1.017e-10	50.000000	1.017e-10	0	APROVADO
hoek_brown	tau resistente (kPa)	757.655713	1.000e-09	757.655713	4.177e-10	757.655713	4.177e-10	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	533b14f8efealedda4bbf2c39028bb7a2f584e8f6ef32229a569753207d8fc7f
--------------------	--

Limitação específica: Verifica as equações constitutivas e a inversão tensão normal-tensão principal em um ponto. Não valida a seleção de GSI, mi, D ou sigma3max, nem um fator de segurança de talude rochoso completo.

3.4.15 Barton-Choubey 1977 - resistência de pico de uma junta

ID: barton-choubey-1977-strength-point | Tipo: strength_point

[The shear strength of rock joints in theory and practice](#)

Localização na fonte: Lei empírica de atrito baseada em JRC, JCS e ângulo de atrito residual

Base de cálculo

$\tau = \sigma_n' \cdot \tan[JRC \cdot \log_{10}(JCS/\sigma_n') + \phi_r]$. Para $\sigma_n' = 10000$ kPa, $JRC = 10$, $JCS = 100000$ kPa e $\phi_r = 30$ graus: $JCS/\sigma_n' = 10$, o ângulo mobilizado é 40 graus e $\tau = 8390,996311772798$ kPa.

Critério de aceitação

O ângulo mobilizado deve fechar a 1e-12 grau e a tensão resistente a 1e-9 kPa nas duas plataformas.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
JRC	10	-
JCS	100000	kPa
σ_n'	10000	kPa
JCS/σ_n'	10	-
ϕ_r	30	deg

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
barton_choubey	ângulo Barton-Choubey (graus)	40.000000	1.000e-12	40.000000	0	40.000000	0	0	APROVADO
barton_choubey	tau resistente (kPa)	8390.996312	1.000e-09	8390.996312	0	8390.996312	0	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	8bb1183e6aebbd30652296145bbb2873f3e466ec636fff172eed58b1b83c412
--------------------	---

Limitação específica: Verifica a lei de pico em um ponto de escala laboratorial declarado. Não valida medição de JRC/JCS, correção de escala, resistência residual pós-pico, preenchimento, intemperismo, água ou comportamento cíclico da junta.

3.4.16 USACE - resistência não drenada no rebaixamento rápido

ID: usace-rapid-drawdown-g8-g12-point | Tipo: rapid_drawdown_strength_point

EM 1110-2-1902 - Slope Stability

Localização na fonte: Apêndice G, procedimento melhorado, Equações G-8 a G-12

Base de cálculo

Com σ_c' =100 kPa, τ_c =20 kPa, c' =0 e ϕ' =30 graus, as Equações G-8 e G-11 dão K_f =3 e K_c =1,522175893937534. As envoltórias G-9 e G-10 dão 22,632698070846498 e 57,735026918962575 kPa. A interpolação G-12 resulta em τ_{ff} =31,797493043623646 kPa.

Critério de aceitação

K_c e K_f devem coincidir a 1e-12; as três resistências devem coincidir a 1e-9 kPa em PWA e Kotlin.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
σ_c'	100	kPa
τ_c	20	kPa
c'	0	kPa
ϕ'	30	deg
$d_c(K_c=1)$	5	kPa
$\psi_c(K_c=1)$	10	deg

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
rapid_drawdown	Kc	1.522176	1.000e-12	1.522176	0	1.522176	0	0	APROVADO
rapid_drawdown	Kf	3.000000	1.000e-12	3.000000	0	3.000000	0	0	APROVADO
rapid_drawdown	tau(Kc=1) (kPa)	22.632698	1.000e-09	22.632698	0	22.632698	0	0	APROVADO
rapid_drawdown	tau(Kc=Kf) (kPa)	57.735027	1.000e-09	57.735027	0	57.735027	0	0	APROVADO
rapid_drawdown	tau_ff (kPa)	31.797493	1.000e-09	31.797493	0	31.797493	0	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	7c4cfa74b6b992b0a3ef60f08dda1ccc67d2c4989aa83b139973f3a7e263db5d
--------------------	--

Limitação específica: Este caso isolado verifica somente as Equações G-8 a G-12 em um estado sintético. Casos separados confrontam o fluxo completo, os três fatores de segurança, as 12 linhas resistentes e a cadeia de geometria/pesos/forças publicada; a percolação transiente permanece fora do exemplo USACE.

3.4.17 USACE - exemplo completo de rebaixamento rápido em três etapas

ID: usace-rapid-drawdown-three-stage | Tipo: rapid_drawdown_surface

[EM 1110-2-1902 - Slope Stability](#)

Localização na fonte: Apêndice G, Figuras G-5, G-6, G-12 e G-13; Seção G-7

Base de cálculo

O runner chama o procedimento de produção: etapa 1 Spencer na condição inicial com nível El. 103 ft e água externa; cálculo de σ'_c , τ_c , K_c , K_f e τ_{ff} por fatia; etapa 2 não drenada; comparação com resistência drenada final; e etapa 3 governante com nível El. 24 ft. Nenhuma resistência final é injetada no benchmark.

Critério de aceitação

O manual publica $FS_{inicial}=2,23$, $FS_{da\ etapa\ 2}=1,52$ e $FS_{final}=1,44$. As tolerâncias de 0,04, 0,02 e 0,01 incluem a troca das 12 larguras desiguais publicadas por 14 fatias computacionais refinadas e os arredondamentos das tabelas. O número de etapas deve ser exatamente três e a discretização deve permanecer em 14 fatias.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
FS inicial Spencer publicado	2.23	-
FS da etapa 2 publicado	1.52	-
FS final publicado	1.44	-
Número de etapas	3	-
Número de fatias no manual	12	-
Número nominal solicitado ao RockGeo	12	-
Número computacional após refinamento geométrico	14	-
Peso específico	135	pcf
d para $K_c=1$	1379	psf
psi para $K_c=1$	18.2	deg

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
spencer	FS	1.440000	0.010000	1.439577	0.000423	1.439577	0.000423	4.219e-15	APROVADO
spencer	FS inicial	2.230000	0.040000	2.222960	0.007040	2.222960	0.007040	8.882e-16	APROVADO
spencer	FS etapa 2	1.520000	0.020000	1.520243	0.000243	1.520243	0.000243	1.088e-14	APROVADO
spencer	etapas executadas	3.000000	1.000e-12	3.000000	0	3.000000	0	0	APROVADO
spencer	fatias computacionais	14.000000	1.000e-12	14.000000	0	14.000000	0	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	93d30cfa515c881dd5a24605c07e7e0a6f1c3c8c5a61ea34b974e63ca1ef87be
--------------------	--

Limitação específica: Este caso reproduz o fluxo completo e os três fatores de segurança com discretização própria. Um caso separado reproduz as larguras desiguais e as colunas por fatia das Figuras G-12/G-13 dentro da precisão impressa. Nenhum dos dois representa percolação transiente; ambos usam as condições piezométricas assumidas pelo próprio exemplo.

3.4.18 USACE - conferência das 12 linhas G-12b e G-13b

ID: usace-rapid-drawdown-published-slice-rows | Tipo: rapid_drawdown_published_rows

[EM 1110-2-1902 - Slope Stability](#)

Localização na fonte: Apêndice G, Figuras G-12b e G-13b, p. G-21 e G-22

Base de cálculo

Cada linha G-12b alimenta as equações USACE de K_c , K_f , $\tau(K_c=1)$, $\tau(K_c=K_f)$ e interpolação τ_{ff} . Cada linha G-13b alimenta $s_d = \max[0, c' + \sigma'_d \tan(\phi')]$ e a seleção do menor entre s_d e τ_{ff} . Os valores da tabela em ksf foram convertidos integralmente para kPa pelo fator 47,88025898033584.

Critério de aceitação

Todas as 12 linhas e os 12 modos da terceira etapa devem ser avaliados. Os erros máximos aceitos correspondem à impressão com duas casas; a primeira fatia domina K_c e τ_{ff} porque σ'_c e τ_c são muito pequenos. Nenhuma tolerância é usada para mascarar divergência entre PWA e Kotlin, cuja paridade continua limitada a $1e-10$.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Número de fatias	12	-
d para $K_c=1$	1.379	ksf
psi para $K_c=1$	18.2	deg
ϕ'	30	deg
K_f	3	-
Fatias drenadas na terceira etapa	1, 2 e 12	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
rapid_drawdown	linhas USACE verificadas	12.000000	1.000e-12	12.000000	0	12.000000	0	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo de Kc	0.000000	0.060000	0.057765	0.057765	0.057765	0.057765	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo de Kf	0.000000	1.000e-12	0.000000	4.441e-16	0.000000	4.441e-16	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo de tau(Kc=1) (kPa)	0.000000	0.287282	0.263815	0.263815	0.263815	0.263815	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo de tau(Kc=Kf) (kPa)	0.000000	0.335162	0.294477	0.294477	0.294477	0.294477	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo de tau_ff (kPa)	0.000000	1.532168	1.475671	1.475671	1.475671	1.475671	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo da resistência drenada (kPa)	0.000000	0.287282	0.248040	0.248040	0.248040	0.248040	0	APROVADO
rapid_drawdown	divergências do modo resistente na etapa 3	0.000000	1.000e-12	0.000000	0	0.000000	0	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	f48b2cffcc491b406d19129595c2e66992f96c2d7d68c1c22650192b74f2647d
--------------------	--

Limitação específica: Este caso verifica somente as colunas resistentes publicadas de G-12b/G-13b e a decisão drenada/não drenada. Um caso separado agora reproduz linha a linha geometria derivável, pesos, cargas, poropressões, forças normais e forças interfatias de G-12a/G-12b/G-13a/G-13b/G-13c; outro confronta o fluxo completo e os três fatores de segurança.

3.4.19 USACE - geometria e cadeia de forças das 12 fatias G-12/G-13

ID: usace-rapid-drawdown-published-force-rows | Tipo: rapid_drawdown_force_rows

EM 1110-2-1902 - Slope Stability

Localização na fonte: Apêndices C e G: Eqs. C-19 a C-21, G-16/G-17 e Figuras G-12a/G-12b/G-13a/G-13b/G-13c, p. C-23 a C-25 e G-21 a G-23

Base de cálculo

O runner converte integralmente a tabela publicada para SI. C-19/C-20/C-21 são aplicadas fatia a fatia nas três etapas; G-16/G-17 calculam N e sigma' nas etapas 1 e 2; o cisalhamento mobilizado usa $[c' \Delta_l + (N - u \Delta_l) \tan(\phi')]/F$. Área/largura, peso/área, carga d'água e u/γ_w fornecem quatro contraprovas adicionais da transcrição geométrica.

Critério de aceitação

Os valores do manual são impressos com zero a duas casas: forças e comprimentos geralmente em inteiros, ângulos de base em graus inteiros e tensões em centésimos de ksf. As tolerâncias são limites de reprodução arredondados acima do desvio obtido ao propagar exatamente essas entradas publicadas; não se aplicam à paridade PWA/Kotlin, que permanece em 1e-10. Um erro de sinal, unidade, seno/cosseno ou índice de fatia excede esses limites amplamente.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Número de fatias	12	-
FS da etapa 1	2.23	-
Inclinação interfatias da etapa 1	6	deg
FS da etapa 2	1.52	-
Inclinação interfatias da etapa 2	12.2	deg
FS da etapa 3	1.44	-
Inclinação interfatias da etapa 3	13.7	deg
Peso específico total adotado	0.135	kip/ft3
Peso específico da água adotado	0.0624	ksf/ft
Fatias drenadas confirmadas pelo texto e pelo mínimo numérico	1, 2 e 12	-

SHA-256 da entrada	5b078e11f1d9c809df181d69a59cc6698belf7d040ded6de65b6eef1c025579b
--------------------	--

Limitação específica: É uma reprodução das tabelas arredondadas de um único exemplo manual, não um arquivo digital de precisão total. A Figura G-13b aparenta trocar as etiquetas textuais das fatias 2 e 11: os valores e a Seção G-6e identificam 1, 2 e 12 como drenadas. O benchmark usa o menor valor numérico e registra as duas etiquetas contraditórias, sem corrigi-las silenciosamente.

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
rapid_drawdown	fatias USACE com cadeia de forças	12.000000	1.000e-12	12.000000	0	12.000000	0	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo área/largura versus altura média (m)	0.000000	0.550000	0.491067	0.491067	0.491067	0.491067	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo peso/área (kN/m)	0.000000	7.000000	6.129439	6.129439	6.129439	6.129439	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo da carga d'água (kN/m)	0.000000	27.000000	25.685269	25.685269	25.685269	25.685269	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo u/gamma_w (kPa)	0.000000	1.700000	1.570472	1.570472	1.570472	1.570472	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo local de Z, etapa 1 (kN/m)	0.000000	50.000000	46.218563	46.218563	46.218563	46.218563	0	APROVADO
rapid_drawdown	fechamento propagado de Z, etapa 1 (kN/m)	0.000000	12.000000	9.590017	9.590017	9.590017	9.590017	9.095e-13	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo de N, etapa 1 (kN/m)	0.000000	22.000000	20.222600	20.222600	20.222600	20.222600	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo de sigma'c, etapa 1 (kPa)	0.000000	11.500000	10.469408	10.469408	10.469408	10.469408	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo de S, etapa 1 (kN/m)	0.000000	15.000000	13.625503	13.625503	13.625503	13.625503	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo de tau_c, etapa 1 (kPa)	0.000000	3.000000	2.597816	2.597816	2.597816	2.597816	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo local de Z, etapa 2 (kN/m)	0.000000	40.000000	35.758502	35.758502	35.758502	35.758502	0	APROVADO
rapid_drawdown	fechamento propagado de Z, etapa 2 (kN/m)	0.000000	65.000000	59.638017	59.638017	59.638017	59.638017	9.095e-13	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo de N, etapa 2 (kN/m)	0.000000	16.000000	14.392588	14.392588	14.392588	14.392588	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo de sigma'd, etapa 2 (kPa)	0.000000	10.000000	9.153653	9.153653	9.153653	9.153653	0	APROVADO
rapid_drawdown	erro máximo local de Z, etapa 3 (kN/m)	0.000000	42.000000	37.891415	37.891415	37.891415	37.891415	0	APROVADO
rapid_drawdown	fechamento propagado de Z, etapa 3 (kN/m)	0.000000	90.000000	86.011033	86.011033	86.011033	86.011033	9.095e-13	APROVADO

3.4.20 SLOPE/W - rebaixamento rápido por tensões efetivas em superfície crítica fixa

ID: seequent-rapid-drawdown-simple-effective-stress-fixed-surface | Tipo: fixed_surface

Rapid Drawdown with Simple Effective Stresses

Localização na fonte: Arquivo oficial .gsz, revisão 177 de 12/03/2025; análise "2 - After rapid drawdown"; XML principal, XML da análise, 001/slip_surface.csv, 001/column_281.csv e 001/intercolumn_281.csv

Base de cálculo

O RockGeo usa a superfície crítica 281 e os 30 limites de coluna do arquivo digital. O nível externo cai de 18 m para 12 m, enquanto a linha piezométrica interna permanece elevada, conforme o modelo simplificado de tensões efetivas da Sequent. A base de todas as colunas oficiais permanece no material de aterro, com $c'=8$ kPa, $\phi'=30$ graus e $\gamma=18$ kN/m³. O núcleo tem o mesmo peso específico e não altera o peso da massa; o dreno e o leito rochoso não interceptam a massa mobilizada.

Critério de aceitação

A tolerância do FS é 0,0002, equivalente a 0,0183% do valor oficial. O peso da massa e os limites da superfície usam tolerâncias absolutas próximas da precisão de serialização. A pequena diferença de poropressão e λ decorre da discretização publicada e do tratamento conservador do RockGeo, que não credita sucção acima da piezométrica.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
FS antes do rebaixamento	1.9847431698407891	-
FS após o rebaixamento	1.0957704738126803	-
Superfícies válidas pesquisadas pelo SLOPE/W	376	-
Identificador da superfície crítica	281	-
Centro X da superfície	17.744258146890992	m
Centro Y da superfície	31.034111581777765	m
Raio da superfície	22.193134359812635	m
Abscissa de entrada	13.500859946371031	m
Abscissa de saída	37	m
Número de colunas	30	-
Área da massa deslizando	83.58123513177368	m2
Peso da massa deslizando	1504.462232371926	kN/m
Poropressão máxima nas colunas	50.44218679377862	kPa
Lambda Morgenstern-Price	0.3816484052882877	-
SHA-256 do XML principal	08f1beb4e28c32e799e41bb3525a1957c6b8aecc252aa98fa0021ac5fc7d1b29	-
SHA-256 do CSV de superfícies	a35c0fa84a61171531828a4d7e6995943a09e6857cbf3a9b606521acb40cb695	-
SHA-256 do CSV da superfície 281	ddb5f71494b1e6dd32dff71346b035abcb0c21c1a6a05391fe18bb3104774fa	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
gle	FS	1.095770	0.000200	1.095617	0.000154	1.095617	0.000154	2.220e-16	APROVADO
gle	fatias computacionais	30.000000	1.000e-12	30.000000	0	30.000000	0	0	APROVADO
gle	peso da massa deslizante (kN/m)	1504.462232	1.000e-06	1504.462232	4.775e-11	1504.462232	4.775e-11	0	APROVADO
gle	abscissa de entrada da superfície (m)	13.500860	1.000e-09	13.500860	3.710e-10	13.500860	3.710e-10	0	APROVADO
gle	abscissa de saída da superfície (m)	37.000000	1.000e-09	37.000000	0	37.000000	0	0	APROVADO
gle	poropressão máxima nas fatias (kPa)	50.442187	0.020000	50.457617	0.015430	50.457617	0.015430	0	APROVADO
gle	multiplicador λ do método	0.381648	0.002000	0.383241	0.001592	0.383241	0.001592	5.551e-17	APROVADO

SHA-256 da entrada	90216a995199b9f02d680395619c77b97d9364801d4525c20fc121fac31ff3fe
--------------------	--

Limitação específica: Verifica a condição imediatamente após o rebaixamento na superfície crítica fixa do arquivo oficial. Não reproduz a busca proprietária do SLOPE/W, não modela dissipação transitória e não transforma esta abordagem simplificada em substituta de uma análise SEEP/W/FEM acoplada.

3.4.21 Shepard 1968 - interpolação IDW2 de poropressão

ID: shepard-1968-idw2-pore-pressure-point | Tipo: pore_pressure_grid_point

[A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data](#)

Localização na fonte: ACM National Conference 1968, p. 517-524; média ponderada pelo inverso da distância

Base de cálculo

As distâncias quadráticas do ponto (1,1) aos três dados são 2, 2 e 10 m2. Logo, os pesos IDW2 são 1/2, 1/2 e 1/10, e $u=[10(1/2)+20(1/2)+40(1/10)]/[(1/2)+(1/2)+(1/10)]=17,2727272727273$ kPa.

Critério de aceitação

O valor deve coincidir a 1e-12 kPa nas duas plataformas, sem extrapolação nem truncamento de sucção neste ponto.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
d12	2	m2
d22	2	m2
d32	10	m2
soma dos pesos	1.1	-
soma ponderada	19	kPa

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
inverse_distance_squared	poropressão interpolada (kPa)	17.272727	1.000e-12	17.272727	3.553e-15	17.272727	3.553e-15	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	0bb5b021522cc15ea26035d2adeb639274b3e7d3553398c8934807a8d681ee0d
--------------------	--

Limitação específica: Verifica o interpolador espacial em um ponto interno. Não valida a representatividade hidrogeológica dos pontos, um campo de percolação, a conversão de carga total nem um fator de segurança completo alimentado por malha espacial.

3.4.22 Slide2 - TIN/Delaunay com carga total

ID: slide2-tin-delaunay-total-head-point | Tipo: pore_pressure_grid_point

[Slide2 Documentation - Interpolation Method](#)

Localização na fonte: TIN Triangulation; plano pelos três vértices e interpolação linear

Base de cálculo

O plano definido pelos nós é $H=5+2x+3y$. No ponto (0,25;0,25), $H=6,25$ m. Para carga total, a carga de pressão é $H-y=6,25-0,25=6,00$ m e $u=\gamma w(H-y)=9,81\times6,00=58,86$ kPa.

Critério de aceitação

A solução é algébrica e linear dentro do TIN; PWA e Kotlin devem coincidir com 58,86 kPa a $1e-12$.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Carga total interpolada H	6.25	m
Elevação y	0.25	m
Carga de pressão H-y	6	m
Peso específico do fluido	9.81	kN/m3

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
tin_delaunay	poropressão interpolada (kPa)	58.860000	1.000e-12	58.860000	0	58.860000	0	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	fe55d88554614ee0ecd746bbff0457cb0e4f4be5beadf48b44ab3fd5a111d660
--------------------	--

Limitação específica: Verifica triangulação, interpolação linear e conversão de carga total em um ponto interno. O benchmark completo ACADS 5 verifica separadamente o efeito da malha no fator de segurança e na busca circular.

3.4.23 Slide2 Problema 10 / ACADS 5 - TIN, água empoçada e superfície crítica do grid

ID: slide2-problem-10-acads5-pore-grid-fixed-surface | Tipo: fixed_surface

[Slide2 Slope Stability Verification Manual](#)

Localização na fonte: Problema 10 / ACADS 5, páginas 50-52; modelo oficial slope stability #010.slim da versão 9.043

Base de cálculo

Material homogêneo $c'=11$ kPa, $\phi_i'=28^\circ$, $\gamma=20$ kN/m³; 137 cargas totais interpoladas por TIN/Delaunay; $u=9,81(H-y)$, truncado em zero acima do NA; água empoçada entre $x=15$ m e $x=32$ m integrada como pressão hidrostática externa; base circular discretizada por cordas verticais. A superfície pertence exatamente ao grid do modelo oficial.

Critério de aceitação

Cada método deve permanecer a no máximo 0,0075 do valor publicado, isto é, 0,50% de $FS=1,50$. O limite inclui diferenças documentadas de discretização e a tolerância 0,005 usada pelo solver de referência; PWA e Kotlin continuam sujeitos à paridade determinística de $1e-10$.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Nós da malha de poropressão	137	-
Interpolação oficial	TIN/Delaunay	-
Coesão efetiva	11	kPa
Ângulo de atrito efetivo	28	deg
Peso específico	20	kN/m3
Fatias solicitadas	25	-
Grid de centros	20 × 20 intervalos (21 × 21 centros)	-
Incrementos de raio	10	-
Círculos da busca oficial	4851	-
Nó crítico usado	ix=10, iy=11, ir=3	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
bishop	FS	1.498000	0.007500	1.492945	0.005055	1.492945	0.005055	0	APROVADO
spencer	FS	1.500000	0.007500	1.494315	0.005685	1.494315	0.005685	0	APROVADO
gle	FS	1.500000	0.007500	1.493743	0.006257	1.493743	0.006257	2.665e-15	APROVADO

SHA-256 da entrada	b94ab501ec7b1b0001ecc7346b04b4fb83122e78e8d2068d89d4445ad19e8d7c
--------------------	--

Limitação específica: O caso público executa uma superfície circular fixa, embora ela tenha sido obtida por varredura integral do grid oficial. Portanto, valida geometria, TIN, água interna/externa e três métodos LEM nessa superfície, mas não prova mínimo global nem substitui o gate separado de busca circular.

3.4.24 Slide2 Problema 41 - busca não circular em Power Curve

ID: slide2-problem-41-power-curve-noncircular-search | Tipo: critical_search

Slide Slope Stability Verification Manual, Part 2

Localização na fonte: Problema 41, páginas 131-132; Figura 41.1, Tabela 41.1 e seção 41.4

Base de cálculo

Talude homogêneo definido pelos vértices cotados (0;30), (5;30), (85;10) e (93,3621;10), $\gamma=20\text{ kN/m}^3$, $R_u=0,30$ e $\tau=1,4 \cdot \sigma' \cdot \square \cdot \square$. A busca parte da malha multiforma determinística, aplica alteração coordenada e, por opção explícita, VFSA seguida de LMC com oito direções, extrapolação e redução adaptativa do passo. A superfície final é reavaliada com 36, 50, 100, 200, 400 e até 800 fatias, interrompendo após a convergência declarada.

Critério de aceitação

O manual publica $FS=1,563$ com três casas decimais; Baker (2003) publica $FS=1,60$ por Janbu e $FS=1,56$ por busca por programação dinâmica 2D. A tolerância absoluta de 0,006 equivale a 0,38% do valor de referência, cobre diferenças de discretização/localização do mínimo e permanece estreita o bastante para detectar mudança material da solução.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Power Curve A	1.4	-
Power Curve B	0.8	-
Peso específico	20	kN/m3
Ru	0.3	-
FS Janbu simplificado do Slide	1.563	-
FS Janbu de Baker (2003)	1.6	-
FS da programação dinâmica 2D de Baker (2003)	1.56	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
janbu_simplified	FS	1.563000	0.006000	1.560804	0.002196	1.560804	0.002196	0	APROVADO

Auditoria da busca crítica

Plataforma	Método	FS	Fatias	Avaliações	Estado da busca	Fronteira	Revisão solver
PWA	janbu_simplified	1.560803514768	101	3003	Metaheurística: mínimo global não certificado	NÃO	NÃO
Kotlin	janbu_simplified	1.560803514768	101	3003	Metaheurística: mínimo global não certificado	NÃO	NÃO

A aprovação numérica não equivale a garantia de mínimo global. “Revisão solver = SIM” mantém o FS como diagnóstico até revisar tração nas interfaces/base e a hipótese de trinca de tração.

SHA-256 da entrada	af3e50148f61c551fa0ea0222f6a53444a25bc7c4d4dd2fc3fbb69edf3790b0a
--------------------	--

Limitação específica: Busca metaheurística não prova o mínimo global. A semente fixa torna o ensaio reproduzível, mas não elimina mínimos locais. Bishop não é aceito pelo RockGeo para superfícies não circulares porque sua formulação simplificada pressupõe superfície circular; por isso, o valor Bishop=1,656 do manual é evidência contextual, não uma expectativa executável.

3.4.25 Seequent - busca não circular multissemente

ID: seequent-slip-surface-optimization-search | Tipo: critical_search

GeoStudio Example - Slip Surface Optimization

Localização na fonte: Arquivo oficial .gsz, revisão 72 de 12/03/2025; análises "1a - Entry-Exit" e "1b - Entry-Exit Optimized"; XML principal, XMLs das análises e 001/optimization.csv

Base de cálculo

A geometria, os dois materiais e a linha piezométrica são extraídos do arquivo digital oficial. O RockGeo executa a mesma busca não circular híbrida VFSA/LMC, com orçamento fixo, nas sementes 0, 1, 2 e 42. Cada solução é reavaliada no estudo de convergência de fatias, tem sua superfície exportada e passa pelo filtro geométrico de superfícies geradas.

Critério de aceitação

O mínimo GLE/Morgenstern-Price publicado após otimização é FS=1,3276299802582405. Todas as sementes devem concluir, não tocar a fronteira, convergir em fatias e permanecer a no máximo 0,002 do valor oficial; a amplitude entre sementes deve ser no máximo 0,001. O gate também exige que nenhuma execução alegue garantia matemática de mínimo global.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
FS antes da otimização no SLOPE/W	1.3458824861549532	-
FS depois da otimização no SLOPE/W	1.3276299802582405	-
Sementes versionadas	0, 1, 2 e 42	-
Iterações VFSA por semente	96	-
Passes LMC por semente	20	-
Orçamento máximo por semente	3200	avaliações

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
gle	FS	1.327630	0.002000	1.329175	0.001545	1.329175	0.001545	3.264e-14	APROVADO
gle	sementes executadas	4.000000	1.000e-12	4.000000	0	4.000000	0	0	APROVADO
gle	sementes concluídas	4.000000	1.000e-12	4.000000	0	4.000000	0	0	APROVADO
gle	menor FS entre sementes	1.327630	0.002000	1.328578	0.000948	1.328578	0.000948	2.087e-14	APROVADO
gle	maior FS entre sementes	1.327630	0.002000	1.329328	0.001698	1.329328	0.001698	4.441e-14	APROVADO
gle	amplitude de FS entre sementes	0.000000	0.001000	0.000750	0.000750	0.000750	0.000750	2.354e-14	APROVADO
gle	superfícies na fronteira	0.000000	1.000e-12	0.000000	0	0.000000	0	0	APROVADO
gle	execuções sem convergência de fatias	0.000000	1.000e-12	0.000000	0	0.000000	0	0	APROVADO
gle	alegações de mínimo global	0.000000	1.000e-12	0.000000	0	0.000000	0	0	APROVADO

Auditoria da busca crítica

Plataforma	Método	FS	Fatias	Avaliações	Estado da busca	Fronteira	Revisão solver
PWA	gle	1.329175184150	100	3083	Metaheurística: mínimo global não certificado	NÃO	SIM
Kotlin	gle	1.329175184150	100	3083	Metaheurística: mínimo global não certificado	NÃO	SIM

Plataforma	Sementes	Sucessos	FS mínimo	FS máximo	Amplitude	Fronteira	Não conv.	Revisão
PWA	4	4	1.328578053877	1.329327691442	0.000750	0	0	4
Kotlin	4	4	1.328578053877	1.329327691442	0.000750	0	0	4

A aprovação numérica não equivale a garantia de mínimo global. “Revisão solver = SIM” mantém o FS como diagnóstico até revisar tração nas interfaces/base e a hipótese de trinca de tração.

SHA-256 da entrada	19855fc9dca3d9168226f26e72a3f2faf527ab41bdc6fbf305055a6341a34a0a
--------------------	--

Limitação específica: Convergência de quatro sementes para o valor publicado é evidência empírica de robustez, não prova matemática do mínimo global. O benchmark não substitui confronto com algoritmos independentes nem outros domínios geológicos.

3.4.26 Seequent - superfície não circular otimizada digital

ID: seequent-slip-surface-optimization-fixed-surface | Tipo: fixed_surface

[GeoStudio Example - Slip Surface Optimization](#)

Localização na fonte: Arquivo oficial .gsz, revisão 72 de 12/03/2025; análise "1b - Entry-Exit Optimized"; XML principal, XML da análise, 001/slip_surface.csv, 001/column_397.csv, 001/intercolumn_397.csv e 001/optimization.csv

Base de cálculo

A geometria, os dois materiais, a linha piezométrica e todos os vértices da superfície otimizada foram extraídos do arquivo digital oficial. Os vértices adicionais dos CSVs preservam exatamente as interseções de coluna usadas pelo SLOPE/W. O RockGeo resolve GLE/Morgenstern-Price na polilinha fixa e recompõe peso, poropressão e λ sem injetar forças publicadas.

Critério de aceitação

O FS é confrontado a $1e-4$ (desvio observado de $4,30e-5$). Peso e abscissas usam tolerâncias numéricas. A poropressão máxima admite 0,02 kPa pela interpolação no centro da fatia. λ admite 0,0055 porque a função interfatias e a discretização de interfaces não são idênticas, enquanto o fechamento de forças e momentos e o FS permanecem estreitos.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
FS GLE/Morgenstern-Price otimizado	1.3276299802582405	-
Peso da massa deslizante	1999.347557545945	kN/m
Entrada da superfície	8.104458978149216	m
Saída da superfície	33.85790063943177	m
Poropressão máxima publicada	39.421834193644735	kPa
Lambda publicado	0.3455728750283031	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
gle	FS	1.327630	0.000100	1.327673	4.304e-05	1.327673	4.304e-05	1.110e-15	APROVADO
gle	peso da massa deslizante (kN/m)	1999.347558	1.000e-06	1999.347558	2.274e-13	1999.347558	2.274e-13	0	APROVADO
gle	abscissa de entrada da superfície (m)	8.104459	1.000e-09	8.104459	0	8.104459	1.776e-15	1.776e-15	APROVADO
gle	abscissa de saída da superfície (m)	33.857901	1.000e-09	33.857901	0	33.857901	0	0	APROVADO
gle	poropressão máxima nas fatias (kPa)	39.421834	0.020000	39.433893	0.012059	39.433893	0.012059	0	APROVADO
gle	multiplicador λ do método	0.345573	0.005500	0.350519	0.004946	0.350519	0.004946	4.663e-15	APROVADO

SHA-256 da entrada	a66343dc96373e8aa539362f55ff72cba6b21cdc9b771164a41c45e5264735a5
--------------------	--

Limitação específica: Verifica integralmente a avaliação da superfície otimizada oficial, não prova que uma busca sempre a encontrará. Essa segunda obrigação é exercitada pelo benchmark de busca não circular do Problema 41 e pelos testes de repetibilidade por semente.

3.4.27 Slide2 Problema 44 - Power Curve em superfície circular publicada

ID: slide2-problem-44-power-curve-fixed-surface | Tipo: fixed_surface

Slide2 Slope Stability Verification Manual

Localização na fonte: Problema 44, páginas 164-166; Figuras 44.1-44.2 e Tabelas 44.1-44.2

Base de cálculo

O manual define $\tau=a(\sigma'n+d)^b+c$ e publica $a=1,107$, $b=0,86$, $c=0$ e $d=0$. A Figura 44.2 fornece centro $(-2,859; 9,936)$, raio 10,283 m e extremos $(0,092; 0,085)$ e $(6,640; 6,000)$. A Tabela 44.2 publica FS Janbu simplificado=0,921 e $\sigma'n,max=15,40$ kPa. A entrada usa $\gamma=18$ kN/m3 do exemplo original: com o $\gamma=19,5$ impresso na Tabela 44.1, a convergência de 200 fatias produz FS=0,909544 e $\sigma'n,max=16,719$ kPa, incompatíveis com os resultados do próprio manual; com $\gamma=18$ e 25 fatias, o RockGeo produz FS≈0,920456 e $\sigma'n,max≈15,394$ kPa.

Critério de aceitação

A tolerância absoluta de FS é 0,001, correspondente à precisão publicada e cobrindo o arredondamento da superfície a 0,001 m; $\sigma'n,max$ recebe 0,05 kPa, cinco vezes a resolução publicada de 0,01 kPa e ainda apenas 0,32% do valor esperado. A convergência de fatias e a paridade PWA/Kotlin são registradas separadamente.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Vértice do talude	(6,43; 6,00)	m
Peso específico do exemplo original	18	kN/m3
Peso específico conflitante impresso na Tabela 44.1	19.5	kN/m3
Power Curve a	1.107	-
Power Curve b	0.86	-
Power Curve c	0	kPa
Power Curve d	0	kPa
Centro x	-2.859	m
Centro y	9.936	m
Raio	10.283	m
FS Janbu simplificado publicado	0.921	-
Tensão normal efetiva máxima publicada	15.4	kPa

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
janbu_simplified	FS	0.921000	0.001000	0.920456	0.000544	0.920456	0.000544	0	APROVADO
janbu_simplified	tensão normal efetiva máxima (kPa)	15.400000	0.050000	15.394044	0.005956	15.394044	0.005956	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	50e512f2021e6b7e6e609ff32f7b1b13d91a6d44f080b17245cc1a9f011d5d08
--------------------	--

Limitação específica: Verifica o cálculo completo na superfície circular Janbu publicada, não a busca global. A superfície Spencer crítica não tem coordenadas publicadas no manual e, por isso, o valor Spencer da tabela não é usado como expectativa. O conflito de γ no manual é preservado como errata rastreada, não apagado.

3.4.28 Slide2 Problema 54 - talude sem microestaca

ID: slide2-problem-54-micropile-baseline | Tipo: fixed_surface

[Slide2 Slope Stability Verification Manual](#)

Localização na fonte: Problema 54, páginas 196-198; Figura 54.1, Tabela 54.1, Tabela 54.2 e Figura 54.2

Base de cálculo

O maciço seco e homogêneo usa $c'=4,9$ kPa, $\phi_i=10^\circ$ e $\gamma=15,68$ kN/m³. A superfície circular e seus extremos são impressos na Figura 54.2. O RockGeo integra 100 fatias verticais igualmente espaçadas e aplica Bishop simplificado na superfície fixa.

Critério de aceitação

O manual publica o FS com três casas decimais e as coordenadas com três casas. A tolerância absoluta de 0,002 cobre o arredondamento geométrico publicado e permanece abaixo de 0,2% do valor de referência.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Coesão efetiva	4.9	kPa
Ângulo de atrito efetivo	10	deg
Peso específico	15.68	kN/m3
Centro x sem estaca	2.674	m
Centro y sem estaca	7.573	m
Raio sem estaca	8.031	m
FS Slide2 sem estaca	1.102	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
bishop	FS	1.102000	0.002000	1.100712	0.001288	1.100712	0.001288	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	f92c97521ecd6fa02e20e68c07d3a8cf7def7d5ce28d1a564840abfd2f689021
--------------------	--

Limitação específica: Verifica o cálculo Bishop na superfície crítica publicada, não a busca circular. O caso de referência é bidimensional, seco e homogêneo.

3.4.29 Slide2 Problema 54 - microestaca acoplada ao LEM

ID: slide2-problem-54-micropile-supported | Tipo: fixed_surface

[Slide2 Slope Stability Verification Manual](#)

Localização na fonte: Problema 54, páginas 196-198; Figura 54.1, Tabela 54.1, Tabela 54.2 e Figura 54.3

Base de cálculo

A fileira vertical cruza a superfície publicada uma única vez. O modelo RockGeo aplica a capacidade transversal última de 10,7 kN por estaca, dividida pelo espaçamento de 1 m, tangente à base e no lado resistente passivo do equilíbrio de Bishop. A capacidade passiva é dividida pelo próprio FS durante a iteração, conforme o Método B de Duncan e Wright.

Critério de aceitação

A força, o espaçamento e as projeções devem fechar numericamente nas duas plataformas. Para o FS, a tolerância absoluta de 0,003 corresponde a 0,25% do valor publicado e cobre o arredondamento a 0,001 m da superfície e diferenças de discretização; o resultado RockGeo de referência com 100 fatias é aproximadamente 1,19512.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Posição x da fileira	9	m
Topo da microestaca	4	m
Base da microestaca	-2	m
Espaçamento fora do plano	1	m
Resistência transversal por estaca	10.7	kN
Centro x com estaca	2.674	m
Centro y com estaca	7.376	m
Raio com estaca	8.102	m
FS Slide2 com estaca	1.193	-
FS Yamagami com estaca	1.2	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
bishop	FS	1.193000	0.003000	1.195124	0.002124	1.195124	0.002124	0	APROVADO
bishop	support_applied_element_count	1.000000	1.000e-12	1.000000	0	1.000000	0	0	APROVADO
bishop	support_passive_element_count	1.000000	1.000e-12	1.000000	0	1.000000	0	0	APROVADO
bishop	support_applied_force_per_width_kn_m	10.700000	1.000e-12	10.700000	0	10.700000	0	0	APROVADO
bishop	capacidade disponível por largura (kN/m)	10.700000	1.000e-12	10.700000	0	10.700000	0	0	APROVADO
bishop	support_shear_component_kn_m	10.700000	1.000e-12	10.700000	0	10.700000	0	0	APROVADO
bishop	support_normal_component_kn_m	0.000000	1.000e-12	0.000000	0	0.000000	0	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	8c221f256c330b3b05d1b8b416cec78c086eefcb07263cde9d4cc57d6f8cbaa5
--------------------	--

Limitação específica: Verifica o suporte acoplado ao LEM em uma superfície fixa, não a busca circular. O RockGeo recebe a capacidade transversal como dado e não calcula Ito-Matsui, EFW, flexão, deslocamentos ou interação solo-estaca; esses mecanismos permanecem fora do domínio deste benchmark.

3.4.30 Seequent SLOPE/W - força de ancoragem por largura

ID: seequent-fixed-anchor-capacity-point | Tipo: support_capacity_point

[GeoStudio Example - Reinforcement with User Defined](#)

Localização na fonte: Caso 1, p. 2 e 6, Equações 1 e 2

Base de cálculo

O exemplo SLOPE/W publica $F' = F / (s \cdot RF) = 120 / (2 \cdot 1,2) = 50$ kN/m. No contrato RockGeo, a capacidade última do elemento é primeiro convertida em admissível: $120 / 1,2 = 100$ kN; depois é dividida pelo espaçamento de 2 m, resultando nos mesmos 50 kN/m.

Critério de aceitação

As capacidades por elemento e por metro devem coincidir exatamente nas duas plataformas; a tolerância numérica é $1e-12$.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Capacidade do elemento F	120	kN
Espaçamento s	2	m
Fator de redução RF	1.2	-
Força factored publicada F'	50	kN/m

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
support_capacity	força aplicada do elemento (kN)	100.000000	1.000e-12	100.000000	0	100.000000	0	0	APROVADO
support_capacity	força aplicada por largura (kN/m)	50.000000	1.000e-12	50.000000	0	50.000000	0	0	APROVADO
support_capacity	capacidade disponível (kN)	100.000000	1.000e-12	100.000000	0	100.000000	0	0	APROVADO
support_capacity	capacidade disponível por largura (kN/m)	50.000000	1.000e-12	50.000000	0	50.000000	0	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	b1308cbdae7fa0ed69810504ad09ccf65715f61849ddb6752d91e02d3f414e24
--------------------	--

Limitação específica: Verifica normalização de capacidade e espaçamento de um ancorante ativo. Não reproduz a geometria completa, a interseção com a superfície, a orientação, a distribuição entre fatias nem o fator de segurança global do exemplo.

3.4.31 Slide2 - diagrama de tirante governado por pullout

ID: slide2-grouted-tieback-pullout-point | Tipo: support_capacity_point

[Slide2 Documentation - Grouted Tieback](#)

Localização na fonte: Implementation of Grouted Tieback Support, Equações 1 a 4

Base de cálculo

$Lo = \min(2,0; 7,5) = 2,0$ m e $Li = 7,5 - 2,0 = 5,5$ m. $F1 = B \cdot Lo = 15 \cdot 2 = 30$ kN; $F2 = T = 100$ kN; $F3 = P + B \cdot Li = 50 + 15 \cdot 5,5 = 132,5$ kN. Logo $F = \min(30; 100; 132,5) = 30$ kN e $F/S = 30/2 = 15$ kN/m.

Critério de aceitação

Equações algébricas fechadas; resultados e decomposição Lo/Li devem coincidir exatamente nas duas plataformas, com tolerância numérica de $1e-12$.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Resistência de aderência B	15	kN/m
Comprimento aderido além da superfície Lo	2	m
Comprimento aderido na massa Li	5.5	m
Pullout F1	30	kN
Força por largura	15	kN/m

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
support_capacity	força aplicada do elemento (kN)	30.000000	1.000e-12	30.000000	0	30.000000	0	0	APROVADO
support_capacity	força aplicada por largura (kN/m)	15.000000	1.000e-12	15.000000	0	15.000000	0	0	APROVADO
support_capacity	capacidade disponível (kN)	30.000000	1.000e-12	30.000000	0	30.000000	0	0	APROVADO
support_capacity	capacidade disponível por largura (kN/m)	15.000000	1.000e-12	15.000000	0	15.000000	0	0	APROVADO
support_capacity	comprimento aderido total (m)	7.500000	1.000e-12	7.500000	0	7.500000	0	0	APROVADO
support_capacity	comprimento aderido além da superfície, Lo (m)	2.000000	1.000e-12	2.000000	0	2.000000	0	0	APROVADO
support_capacity	comprimento aderido na massa deslizante, Li (m)	5.500000	1.000e-12	5.500000	0	5.500000	0	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	e599193585f8a495011a574f31f0279caf6999dfe38faf79317768f0c0b72983
--------------------	--

Limitação específica: Verifica um ponto do diagrama de força e o espaçamento. Não valida sozinho a busca da superfície crítica nem a interação deformacional solo-suporte.

3.4.32 Slide2 - diagrama de tirante governado por stripping

ID: slide2-grouted-tieback-stripping-point | Tipo: support_capacity_point

[Slide2 Documentation - Grouted Tieback](#)

Localização na fonte: Implementation of Grouted Tieback Support, Equações 1 a 4

Base de cálculo

$Lo = \min(7,5; 7,5) = 7,5$ m e $Li = 7,5 - 7,5 = 0$ m. $F1 = B \cdot Lo = 15 \cdot 7,5 = 112,5$ kN; $F2 = T = 100$ kN; $F3 = P + B \cdot Li = 50 + 15 \cdot 0 = 50$ kN. Logo $F = \min(112,5; 100; 50) = 50$ kN e $F/S = 50/2 = 25$ kN/m.

Critério de aceitação

Equações algébricas fechadas; resultados e decomposição Lo/Li devem coincidir exatamente nas duas plataformas, com tolerância numérica de $1e-12$.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Comprimento aderido além da superfície Lo	7.5	m
Comprimento aderido na massa Li	0	m
Pullout $F1$	112.5	kN
Tração $F2$	100	kN
Stripping $F3$	50	kN
Força por largura	25	kN/m

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
support_capacity	força aplicada do elemento (kN)	50.000000	1.000e-12	50.000000	0	50.000000	0	0	APROVADO
support_capacity	força aplicada por largura (kN/m)	25.000000	1.000e-12	25.000000	0	25.000000	0	0	APROVADO
support_capacity	capacidade disponível (kN)	50.000000	1.000e-12	50.000000	0	50.000000	0	0	APROVADO
support_capacity	capacidade disponível por largura (kN/m)	25.000000	1.000e-12	25.000000	0	25.000000	0	0	APROVADO
support_capacity	comprimento aderido total (m)	7.500000	1.000e-12	7.500000	0	7.500000	0	0	APROVADO
support_capacity	comprimento aderido além da superfície, Lo (m)	7.500000	1.000e-12	7.500000	0	7.500000	0	0	APROVADO
support_capacity	comprimento aderido na massa deslizante, Li (m)	0.000000	1.000e-12	0.000000	0	0.000000	0	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	6ff77a5a2ff1491afbdc3b52afdf6469bc551fb629306de4c53337c43411d476
--------------------	--

Limitação específica: Verifica um ponto do diagrama de força e o espaçamento. Não valida sozinho a busca da superfície crítica nem a interação deformacional solo-suporte.

3.4.33 Slide2 Tutorial 08 - confiabilidade LHS completa em superfície fixa

ID: slide2-tutorial-08-fixed-surface-reliability | Tipo: fixed_surface_reliability

Slide2 Tutorial 08 - Probabilistic Analysis

Localização na fonte: Seções 2 a 4; tabela de variáveis aleatórias; figuras Results e Histogram

Base de cálculo

A geometria, o material e as três distribuições normais vêm do arquivo e do tutorial oficiais. A superfície circular fixa foi obtida pela busca multibacia RockGeo no mesmo modelo e produz FS determinístico praticamente coincidente. Cada plataforma gera as mesmas 1.000 amostras LHS com semente explícita, recompõe a geometria quando y varia, resolve Bishop e calcula PF, momentos amostrais e índices de confiabilidade.

Critério de aceitação

FS, média, desvio-padrão e índices publicados têm tolerâncias estreitas. A sequência LHS do Slide2 não possui semente publicada; por isso PF e contagem usam a faixa de 95% de Wilson em torno de 102/1.000, arredondada conservadoramente para $\pm 0,021$ e ± 21 amostras. A paridade PWA-Kotlin permanece determinística e muito mais estrita.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
FS determinístico	1.142	-
FS médio	1.145	-
Desvio-padrão do FS	0.1206	-
Amostras com FS < 1	102	-
Probabilidade de falha	10.2	%
RI normal	1.204	-
RI lognormal	1.238	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
bishop	FS determinístico da confiabilidade	1.142000	0.003000	1.140153	0.001847	1.140153	0.001847	0	APROVADO
bishop	FS médio amostral	1.145000	0.003000	1.143765	0.001235	1.143765	0.001235	2.220e-16	APROVADO
bishop	desvio-padrão amostral do FS	0.120600	0.001000	0.120533	6.702e-05	0.120533	6.702e-05	1.388e-17	APROVADO
bishop	amostras com FS < limiar	102.000000	21.000000	119.000000	17.000000	119.000000	17.000000	0	APROVADO
bishop	probabilidade empírica	0.102000	0.021000	0.119000	0.017000	0.119000	0.017000	0	APROVADO
bishop	RI normal por momentos	1.204000	0.030000	1.192742	0.011258	1.192742	0.011258	1.998e-15	APROVADO
bishop	RI lognormal por momentos	1.238000	0.030000	1.225624	0.012376	1.225624	0.012376	1.776e-15	APROVADO

SHA-256 da entrada	5339a88200e407c21c88dd09f7c459e75f8a377757680e1d7da44188994843ad
--------------------	--

Limitação específica: O caso verifica confiabilidade condicional a uma superfície circular fixa, não busca global em cada realização nem probabilidade total da obra. A semente do Slide2 não é publicada; a aceitação probabilística é estatística, enquanto a paridade entre os motores RockGeo é determinística. Incerteza de modelo, variabilidade espacial, correlações, hidráulica e suporte não fazem parte deste caso.

3.4.34 SLOPE/W James Bay - Monte Carlo completo em superfície fixa

ID: seequent-james-bay-monte-carlo-fixed-surface | Tipo: fixed_surface_reliability

Probabilistic - James Bay Case History

Localização na fonte: Arquivo oficial .gsz, revisão 196 de 03/06/2025; análise "8 - No spatial consideration"; XML, 001/slip_surface.csv, 001/column_1.csv e 001/prob_1.csv

Base de cálculo

A geometria, os cinco materiais, a superfície circular crítica, as quatro distribuições independentes e os resultados foram extraídos do .gsz oficial. O SLOPE/W usa 27 fatias resultantes da discretização nominal de 30; o RockGeo reproduz as mesmas abscissas de contorno e resolve Bishop na superfície fixa. Cada plataforma executa 5.000 realizações Monte Carlo independentes com xoshiro128**, semente explícita e recompõe pesos quando γ varia.

Critério de aceitação

O FS determinístico tem tolerância absoluta 0,001. Para os momentos e a PF, o arquivo de referência usa 30.000 realizações e o RockGeo usa 5.000 para manter a suíte executável nas duas plataformas; as tolerâncias cobrem aproximadamente três erros-padrão combinados. A PF oficial 0,0144667 fica dentro do intervalo de Wilson de 95% produzido pelo RockGeo com a semente canônica.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Centro X da superfície	85.9	m
Centro Y da superfície	128.3	m
Raio da superfície	122.8	m
Número nominal de fatias	30	-
Fatias efetivas no SLOPE/W	27	-
Realizações SLOPE/W	30000	-
FS determinístico SLOPE/W	1.4603298192567944	-
Média do FS SLOPE/W	1.4619834020951443	-
Desvio-padrão do FS SLOPE/W	0.21446433186089092	-
Probabilidade empírica de falha SLOPE/W	1.4466666666666668	%
Índice por momentos normais SLOPE/W	2.154126973406482	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
bishop	FS determinístico da confiabilidade	1.460330	0.001000	1.460199	0.000131	1.460199	0.000131	0	APROVADO
bishop	FS médio amostral	1.461983	0.009000	1.458178	0.003805	1.458178	0.003805	0	APROVADO
bishop	desvio-padrão amostral do FS	0.214464	0.008000	0.213230	0.001234	0.213230	0.001234	0	APROVADO
bishop	probabilidade empírica	0.014467	0.004500	0.013600	0.000867	0.013600	0.000867	0	APROVADO
bishop	RI normal por momentos	2.154127	0.080000	2.148748	0.005379	2.148748	0.005379	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	65b8dc55c067cf5f3c15e9de2d2e180422dd89fc6bf960dff33f00bc4373e705
--------------------	--

Limitação específica: O caso verifica Monte Carlo não espacial condicionado à superfície circular fixa. Não verifica busca da superfície crítica em cada realização, variabilidade espacial, correlação, incerteza de modelo, consolidação durante a construção nem a geometria aleatória de espessuras discutida no estudo James Bay. A sequência aleatória proprietária do SLOPE/W não é publicada; por isso a aceitação compara estatísticas com incerteza amostral, enquanto a paridade PWA-Kotlin permanece determinística.

3.4.35 NIST - intervalo de Wilson para proporção

ID: nist-wilson-score-interval-point | Tipo: reliability_statistics_point

[NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods](#)

Localização na fonte: Seção 7.2.4.1, fórmulas de Wilson e exemplo unilateral de 95%

Base de cálculo

Com $p\text{-hat}=26/200=0,13$ e $z_{0,95}=1,6448536269514722$, as fórmulas de Wilson fornecem limite inferior 0,09577274821084578 e superior 0,1741041506736882. O NIST publica o limite inferior arredondado 0,09577 para o limite unilateral equivalente.

Critério de aceitação

O limite inferior deve reproduzir o valor NIST dentro de 5e-6; o limite superior derivado da mesma fórmula deve coincidir a 1e-9 nas duas plataformas.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Sucessos	26	-
Ensaios	200	-
p-hat	0.13	-
z para 95% unilateral / 90% bilateral	1.6448536269514722	-
Limite inferior publicado	0.09577	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
wilson_score	limite inferior de Wilson	0.095770	5.000e-06	0.095773	2.748e-06	0.095773	2.748e-06	0	APROVADO
wilson_score	limite superior de Wilson	0.174104	1.000e-09	0.174104	5.415e-11	0.174104	5.415e-11	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	4e84aaf0e78a65c6dd43d8e0a897d01d00a531e10cc045f9aa61647103111345
--------------------	--

Limitação específica: Verifica o intervalo binomial usado para comunicar incerteza de uma probabilidade empírica. Não valida a amostragem Monte Carlo, as distribuições geotécnicas, a correlação, a superfície fixa nem incerteza espacial ou de modelo.

3.4.36 USBR A-7 - probabilidade pela cauda normal

ID: usbr-a7-normal-tail-probability | Tipo: reliability_statistics_point

[Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis - Chapter A-7](#)

Localização na fonte: Seção A-7.2, Equações A-7-10 e A-7-11, p. A-7-10

Base de cálculo

As Equações A-7-10 e A-7-11 definem $\beta = [\ln(i_{crit}) - E(\ln i)] / \sigma_{\ln i}$ e $P_f = 1 - \Phi(\beta)$. Para $\beta = -1,13$, o núcleo RockGeo calcula $1 - \Phi(-1,13) = 0,8707618356044616$; o manual publica 0,8711 após usar os valores internos não arredondados do exemplo.

Critério de aceitação

A diferença deve ficar abaixo de 0,0005 de probabilidade, cobrindo o arredondamento de β para duas casas no manual. PWA e Kotlin devem permanecer muito mais próximas entre si.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
$E[i]$	1.17	-
$\sigma_{\ln i}$	0.301	-
i_{crit}	0.85	-
beta publicado	-1.13	-
Probabilidade publicada	0.8711	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
normal_cdf	probabilidade de cauda superior	0.871100	0.000500	0.870762	0.000338	0.870762	0.000338	0	APROVADO

SHA-256 da entrada

5f90ba0c920c8bf27bea094f1248f12a234f2747463e028eb8221d48278cc9ca

Limitação específica: Verifica a transformação final do índice de confiabilidade em probabilidade. Não reproduz o FOSM completo, a simulação Monte Carlo do USBR nem uma análise de talude com variáveis geotécnicas.

3.4.37 NIST Beta - razão beta incompleta em ponto exato

ID: nist-beta-cdf-point | Tipo: reliability_statistics_point

[NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods - Beta Distribution](#)

Localização na fonte: Seção 1.3.6.6.17, Cumulative Distribution Function e Common Statistics

Base de cálculo

$I_{0,5}(2,3)=\text{integral}[0;0,5] \ 12x(1-x)^2 \ dx = [6x^2-8x^3+3x^4]_{0,5} = 0,6875.$

Critério de aceitação

O valor é analítico e deve ser reproduzido com erro absoluto máximo de 1e-12; PWA e Kotlin usam a mesma fração contínua e devem concordar em 1e-10 ou melhor.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Primeira forma p	2	-
Segunda forma q	3	-
x	0.5	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
beta_cdf	probabilidade acumulada Beta	0.687500	1.000e-12	0.687500	8.882e-16	0.687500	8.882e-16	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	e520d64045cdbbe6630744f69f0e8ce098cb739d94e3c773ac8b0830f47c54a1
--------------------	--

Limitação específica: Verifica a CDF Beta padronizada em um ponto. A adequação de uma distribuição Beta a parâmetros geotécnicos continua dependente de dados, justificativa e revisão técnica.

3.4.38 NIST Gamma - exemplo publicado de CDF

ID: nist-gamma-cdf-point | Tipo: reliability_statistics_point

[NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods - Gamma](#)

Localização na fonte: Seção 8.1.6.5, exemplo com alpha=2, beta=30 e t=24

Base de cálculo

Para forma inteira alpha=2, $F(24)=1-\exp(-24/30)*(1+24/30)=0,1912078645890012$.

Critério de aceitação

A tolerância de 5e-6 cobre o arredondamento da publicação a cinco casas decimais e é muito maior que o gate de paridade entre plataformas.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Forma alpha	2	-
Escala beta	30	-
t	24	-
CDF publicada	0.19121	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
gamma_cdf	probabilidade acumulada Gamma	0.191210	5.000e-06	0.191208	2.135e-06	0.191208	2.135e-06	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	844874174dc931a4f2e9f226a76ec383f2b89e292cf95b4830e7706f98ffce05
--------------------	--

Limitação específica: Verifica um ponto da CDF Gamma. Não valida seleção estatística, truncagem física nem correlação entre variáveis de uma obra.

3.4.39 NIST Exponencial - exemplo publicado de CDF

ID: nist-exponential-cdf-point | Tipo: reliability_statistics_point

[NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods - Exponential](#)

Localização na fonte: Seção 8.1.6.1, exemplo lambda=0,01 e t=100 horas

Base de cálculo

A NIST define $F(t)=1-\exp(-\lambda t)$ e $média=1/\lambda$. Com $média=100$ e $t=100$, $F=1-\exp(-1)=0,6321205588285577$.

Critério de aceitação

A tolerância de 5e-5 cobre o arredondamento da publicação a quatro casas decimais; a paridade PWA/Kotlin permanece sujeita ao gate de 1e-10.

Valores intermediários de referência

Valor	Resultado	Unidade
Taxa lambda	0.01	-
Média	100	-
t	100	-
CDF publicada	0.6321	-

Resultados e desvios

Método	Grandeza	Ref.	Tol.	PWA	Desvio PWA	Kotlin	Desvio Kotlin	Dif. plataformas	Estado
exponential_cdf	probabilidade acumulada Exponencial	0.632100	5.000e-05	0.632121	2.056e-05	0.632121	2.056e-05	0	APROVADO

SHA-256 da entrada	5ce577248606d96a2a155356a1748a49764a2b75b1c8dafdadd4af590b922e5a
--------------------	--

Limitação específica: Verifica um ponto da CDF Exponencial. O uso geotécnico exige evidência de que a assimetria e a cauda exponencial são adequadas ao parâmetro modelado.

4. Proveniência e reprodutibilidade

O commit identifica a base do repositório. Como a árvore estava em desenvolvimento concorrente, os hashes agregados dos motores e runners são a identificação autoritativa do código executado.

Campo	Valor
Commit base	ed260363bc7928208e416f44aa0c5a350b6d0ecb
Branch	codex/rebuild-section-2d
Árvore limpa	NÃO
Entradas modificadas/não rastreadas	200
Hash agregado PWA	0784f5bc406610652cfef85a2b14fbff16e31ec22dd21fa69c5d9be7749b282b
Hash agregado Kotlin	6090a7bb2dac22e282bbbbb598547d5708443eedbcb9122460bf3f7e69ece5c
Hash do manifesto	65e3217c3b09d5014c25ecb533478336eb1e1bcde5492e3bc9bdb9dcae7d05d
Hash da evidência de desempenho	62e02b1a67ed2d5ecb54c80610aa7509fc8c915eba9fb1003f364caae02ed9d5
Comando de desempenho	node tools/benchmark_reliability.mjs

Comandos registrados

```
node lib/geo/tests.mjs
```

```
node lib/cad/tests.mjs
```

```
npm run test:benchmarks
```

```
/Users/diego/Documents/Desenvolvimento/RockGeo/gw :shared:geo-engines:testDebugUnitTest --tests com.geofieldai.geoengines.VerificationSuiteJvmTest
--tests com.geofieldai.geoengines.DxfSectionKinematicInteroperabilityJvmTest --tests *StabilitySafetyGateCommonTest --tests
com.geofieldai.geoengines.SlopeReliabilityCommonTest --tests com.geofieldai.geoengines.SliceGeometryReuseCommonTest --rerun-tasks --no-daemon
```

5. Limitações e trabalho necessário para 10/10

Este corpus formal cobre equilíbrio-limite 2D determinístico, superfície fixa, busca circular, condição seca/molhada, estratigrafia, trinca seca, ação pseudoestática, água externa e dois fingerprints de Newmark: a raiz $FS(ky)=1$ e uma integração com solução fechada. Também reproduz pontos analíticos das equações Hoek-Brown/Balmer, Barton-Choubey e USACE G-8 a G-12. O exemplo USACE completo em três etapas também é confrontado com os três fatores de segurança publicados, e as 12 linhas resistentes de G-12b/G-13b são recalculadas. O corpus também reproduz geometria derivável, pesos, cargas, poropressões, forças normais e forças interfatias das Figuras G-12/G-13. IDW2 e TIN/Delaunay são confrontados com referências independentes; o caso ACADS 5 acrescenta 137 cargas totais, água empoçada e três métodos LEM na superfície circular do grid oficial. Capacidade/espacamento de suporte e estatística de confiabilidade também são verificados contra fontes externas. O Problema 54 verifica um talude completo com microestaca passiva. Um segundo benchmark de rebaixamento rápido usa o arquivo digital oficial da Seequent e confronta FS, peso da massa, 30 colunas, limites da superfície, poropressão máxima e λ de Morgenstern-Price. O caso James Bay confronta FS determinístico, média, desvio-padrão, probabilidade empírica e índices de confiabilidade em Monte Carlo. O contrato probabilístico ainda publica erro-padrão binomial, intervalo de Wilson, suficiência mínima das caudas, histograma, CDF empírica e dispersões; Beta, Gamma e Exponencial são confrontadas com pontos públicos da NIST. Regressões espelhadas também verificam identidades Gamma, simetria Beta, inversão CDF/PPF até $p=1e-8$, limites exatos em $p=0/1$ e rejeição fora de $[0,1]$. O Problema 44 acrescenta um benchmark completo de talude com resistência Power Curve, incluindo FS e tensão normal efetiva máxima. O Problema 41 confronta a busca não circular híbrida VFSA/LMC com um mínimo publicado. O exemplo digital Slip Surface Optimization da Seequent acrescenta um segundo mínimo, quatro sementes versionadas, amplitude inferior a 0,001, convergência de fatias, superfícies fora da fronteira e uma avaliação separada da superfície oficial em seis grandezas. A tração residual detectada pelo solver rigoroso mantém a revisão de engenharia obrigatória e é exibida neste relatório. Um gate local separado registra 10 mil amostras com proveniência de caso, motor, script e ambiente.

- Modelos adicionais de interação solo-estrutura para suporte, como Ito-Matsui, EFW, flexão e resposta dependente de deslocamento; o caso aceito hoje verifica a capacidade transversal passiva declarada.
- Percolação transitória/FEM acoplada, poropressão cíclica e liquefação.
- Resposta dinâmica deformável, amplificação, degradação cíclica e aceleração vertical, fora do modelo de bloco rígido.
- Busca não circular por algoritmos independentes e novos mínimos em outros domínios geológicos, além de um portfólio de DXF reais anonimizados. Problema 41 e Seequent já cobrem VFSA/LMC em dois mínimos, com estudo multissemente; o fixture interno cobre EXTERNAL, PIEZO, NONCIRC_SURFACE, LEM e cinemática.
- Casos externos de campo para o vínculo integrado entre cinemática, seções e superfícies; a transformação e a paridade internas já têm gate.
- Incerteza espacial e calibração das distribuições e correlações probabilísticas.
- Matriz formal de desempenho, usabilidade e acessibilidade em dispositivos reais e com usuários; o gate atual caracteriza somente o ambiente local.
- Revisão linguística profissional do catálogo automatizado da PWA e cobertura equivalente dos mesmos idiomas no App.
- Revisão independente por terceiro e confronto com casos de campo.

6. Conclusão

No escopo declarado, o resultado é NUMERICAMENTE APROVADO - LIBERAÇÃO BLOQUEADA: PWA e Kotlin/Android aprovaram 172/172 comparações cada, usando entradas com hashes idênticos. Nos casos determinísticos, os resultados coincidiram até precisão numérica; na busca crítica, ambos reproduziram os valores publicados dentro das tolerâncias. O gate interno DXF-seção-LEM-cinemática também foi aprovado, sem ser contabilizado como benchmark externo. O ensaio local de 10000 amostras teve mediana de 1227.781 ms; esse resultado não substitui uma matriz de dispositivos.

O gate interno de prontidão para liberação de engenharia permanece BLOQUEADO. Há 15 execuções PWA e 15 execuções Kotlin com revisão obrigatória das forças. Esses estados não invalidam o confronto numérico, mas impedem interpretação como autorização automática de projeto.

O RockGeo ainda não deve ser classificado como 10/10 até que as lacunas da Seção 5 sejam implementadas, verificadas e revisadas de forma independente. O deslocamento de Newmark é uma demanda complementar de bloco rígido em superfície fixa; não substitui análise dinâmica nem constitui, por si só, critério universal de aceitabilidade.

7. Fontes primárias e confrontos independentes

1. Slide Hand Calculation #1 - Simple Homogeneous Dry Slope

<https://static.rocscience.cloud/assets/verification-and-theory/Slide2/Hand-Calculation-1-Simple-Homogeneous-Dry-Slope.pdf>

2. Slide Hand Calculation #2 - Simple Homogeneous Wet Slope

<https://static.rocscience.cloud/assets/verification-and-theory/Slide2/Hand-Calculation-2-Simple-Homogeneous-Wet-Slope.pdf>

3. Slide Slope Stability Verification Manual

https://static.rocscience.cloud/assets/verification-and-theory/Slide2/Slide_SlopeStabilityVerification.pdf

4. GeoStudio Example - Tension Cracks

<https://files.seequent.com/GeoStudio/SlopeW/Tension%20cracks.gsz>

5. Effects of earthquakes on dams and embankments

<https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.2.139>

6. Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition

https://www.d.umn.edu/~carranza/HB02/%5B2002%5D_EH_CCT_%26_BC_%5BHB_2002-NARMS-conference%5D.pdf

7. The shear strength of rock joints in theory and practice

<https://doi.org/10.1007/BF01261801>

8. EM 1110-2-1902 - Slope Stability

https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1902.pdf

9. Rapid Drawdown with Simple Effective Stresses

<https://files.seequent.com/GeoStudio/SlopeW/Rapid%20Drawdown%20with%20Simple%20Effective%20Stresses.gsz>

10. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data

<https://doi.org/10.1145/800186.810616>

11. Slide2 Documentation - Interpolation Method

<https://www.rocscience.com/help/slide2/documentation/slide-model/project-settings/groundwater/interpolation-method>

12. Slide Slope Stability Verification Manual, Part 2

https://www.rocscience.com/downloads/slide/Slide_VerificationManual_Part2.pdf

13. GeoStudio Example - Slip Surface Optimization

<https://files.seequent.com/GeoStudio/SlopeW/Slip%20Surface%20Optimization.qsz>

14. GeoStudio Example - Reinforcement with User Defined

<https://files.seequent.com/GeoStudio/SlopeW/Reinforcement%20with%20User%20Defined.pdf>

15. Slide2 Documentation - Grouted Tieback

<https://www.rocscience.com/help/slide2/documentation/slide-model/support-2/define-support-properties/grouted-tieback>

16. Slide2 Tutorial 08 - Probabilistic Analysis

<https://www.rocscience.com/help/slide2/tutorials/tutorials-overview/probabilistic-analysis-tutorial>

17. Probabilistic - James Bay Case History

<https://files.seequent.com/GeoStudio/SlopeW/Probabilistic%20-%20James%20Bay%20Case%20History.qsz>

18. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods

<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section2/prc241.htm>

19. Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis - Chapter A-7

<https://www.usbr.gov/damsafety/risk/BestPractices/Chapters/A7-ProbabilisticLimitStateAnalysis.pdf>

20. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods - Beta Distribution

<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda366h.htm>

21. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods - Gamma

<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr165.htm>

22. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods - Exponential

<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr161.htm>

23. Jiang, Baker e Yamagami (2003), Three-dimensional slope stability analysis using an integrated framework

<https://doi.org/10.1139/t02-111>

Referência primária original associada ao Problema 44 pelo manual do Slide2.

24. Rocscience, Conversion of Nonlinear Strength Envelopes to Generalized Hoek-Brown Envelopes

https://static.rocscience.cloud/assets/verification-and-theory/RS2/RS2_Conversion_of_Nonlinear_Strength_Envelopes_to_GHB_Envelopes_Theory.pdf

Fundamentação técnica oficial da formulação Power Curve da Rocscience.

25. XSLOPE, Rocscience verification problems - VP44

<https://xslope.org/en/latest/verification/rocscience/>

Reprodução pública independente usada somente para confrontar a divergência de gamma do manual.

26. Seequent, Probabilistic - James Bay Case History

<https://www.seequent.com/probabilistic-james-bay-case-history/>

Descrição oficial do estudo probabilístico, da amostragem Monte Carlo e da influência da variabilidade espacial.

27. Slide2 - Import DXF

<https://www.rocscience.com/help/slide2/documentation/slide-model/import-export/import>

Camadas oficiais EXTERNAL e NONCIRC_SURFACE, geometria 2D XY e unidades declaradas.

28. Dips 9 Tutorial 6 - Kinematic Analysis

<https://www.rocscience.com/help/dips/v9/tutorials/tutorials-overview/6-kinematic-analysis>

Face 45/135, atrito 30 graus e limites laterais explícitos.

Artefatos de auditoria

- Corpus: verification/manifest.json e verification/cases/*.json.
- Evidência JSON: docs/verificacao/evidence/verification-evidence.json.
- Desempenho bruto: docs/verificacao/evidence/reliability-performance.json.
- Relatório-fonte: docs/verificacao/RELATORIO_VERIFICACAO_ESTABILIDADE.md.