XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/42

Busca da Superfície Crítica em Análises Probabilísticas de Estabilidade de Taludes: Impacto das Abordagens Fixa e Dinâmica na Confiabilidade Geotécnica

Caio Farias Benetti
Engenheiro Civil, STE Serviços Técnicos de Engenharia, Vitória-ES, Brasil, caiofbbenetti@gmail.com

Katia Vanessa Bicalho
Professora, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória-ES, Brasil, kvbicalho@gmail.com

Rômulo Castello Henriques Ribeiro
Professor, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória-ES, Brasil, romulocastello@yahoo.com.br

RESUMO: As análises tradicionais de estabilidade de taludes fundamentam-se em métodos determinísticos que expressam o nível de segurança por um Fator de Segurança único calculado a partir de parâmetros médios de resistência. O atual cenário geotécnico demanda avaliações mais robustas, o que impulsiona o uso de análises probabilísticas para incorporar incertezas inerentes à variabilidade dos parâmetros. Dentre as perspectivas probabilísticas distinguem-se as abordagens de análise de componente e de análise de sistema em série. A análise de uma componente fixa, seja a geometria determinística ou a crítica probabilística pode subestimar riscos significativos em casos complexos onde múltiplos mecanismos de falha competem exibindo comportamento multimodal. No âmbito das simulações de Monte Carlo implementadas em softwares comerciais essa dicotomia manifesta-se na escolha entre a busca em superfície fixa ou dinâmica. Enquanto a abordagem fixa assume que a geometria crítica permanece inalterada para todas as amostragens a abordagem dinâmica realiza uma nova busca exaustiva a cada iteração permitindo que a superfície de ruptura migre conforme a variabilidade espacial das propriedades do solo. Este artigo avalia como a simplificação por busca fixa afeta a confiabilidade de estruturas em meios homogêneos e estratificadas. Os resultados mostram que, no cenário homogêneo, o desvio de probabilidade de falha (Pf) entre as metodologias foi de 37,10%, mantendo os riscos na mesma ordem de grandeza (Índice de Confiabilidade β de 2,29 para 2,26). Contudo, no talude estratificado com camada fraca, a $P_{f,sis}$ (2,59%) apresentou um incremento de 133,94% em relação à análise de componente (1,11%), concluindo que a análise dinâmica é necessária para capturar a multimodalidade em meios heterogêneos.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes; Análises Probabilísticas; Confiabilidade Geotécnica.

Traditional slope stability analyses are based on deterministic methods that express safety levels through a single Factor of Safety calculated from mean strength parameters. The current geotechnical landscape demands more robust evaluations, driving the use of probabilistic analyses to incorporate uncertainties inherent in parameter variability. Within probabilistic perspectives, component and series system analyses are distinguished. A fixed component analysis, whether using deterministic or critical probabilistic geometry, may underestimate significant risks in complex cases where multiple failure mechanisms compete, exhibiting multimodal behavior. In Monte Carlo simulations implemented in commercial software, this dichotomy is manifested in the choice between fixed or dynamic surface searches. While the fixed approach assumes that the critical geometry remains unchanged for all samples, the dynamic approach performs a new exhaustive search at each iteration, allowing the slip surface to migrate according to the spatial variability of soil properties. This paper evaluates how simplification through fixed search affects the reliability of structures in homogeneous and stratified media. Results show that in the homogeneous scenario, the probability of failure (Pf) deviation between methodologies was 37,10%, maintaining risks within the same order of magnitude (Reliability Index β from 2.29 to 2.26). However, in the stratified slope with a weak layer, the systemic probability of failure $P_{f,sis}$ (2.59%) showed a 133.94% increase compared to component analysis (1.11%), concluding that dynamic analysis is necessary to capture multimodality in heterogeneous media.

KEYWORDS: Slope Stability; Probabilistics Analysis; Geotechnical Reliability.

1 INTRODUÇÃO

As análises de estabilidade de taludes têm sido historicamente conduzidas sob uma perspectiva determinística, na qual a segurança é quantificada por um único Fator de Segurança (FS) calculado a partir de valores médios dos parâmetros de resistência do solo. No entanto, a ocorrência de colapsos catastróficos em estruturas geotécnicas complexas evidenciou as limitações desta abordagem, impulsionando a adoção de métodos probabilísticos. Estas ferramentas permitem a incorporação sistemática das incertezas inerentes à variabilidade geológica e aos modelos de cálculo, complementando o FS convencional com métricas como o Índice de Confiabilidade (β) e a Probabilidade de Falha (Pf).

Neste contexto, a definição do domínio de falha assume um papel fundamental na precisão das avaliações de risco. A fundamentação teórica da confiabilidade de taludes estabelece que o maciço não deve ser avaliado como um elemento isolado, mas sim como um sistema complexo. Oka e Wu (1990) definiram formalmente o talude como um sistema em série, composto por inúmeras superfícies potenciais de deslizamento, no qual o colapso de qualquer um desses componentes individuais acarreta a falha global da estrutura. Esta visão sistêmica reconhece que o risco real de um talude é o resultado da união probabilística de todos os mecanismos de ruptura cinematicamente viáveis.

A distinção entre a análise de confiabilidade de componente e de sistema é crucial para evitar avaliações não conservadoras. Corroborando a visão sistêmica, Zeng et al. (2015) categorizam a estabilidade de taludes como um problema de sistema intrínseco e alertam que a probabilidade de falha total do sistema Pf_{sis} é invariavelmente superior à confiabilidade de qualquer superfície individual Pf_i. Frequentemente, as análises de engenharia focam-se exclusivamente na superfície crítica determinística, ignorando que outros modos de falha competitivos podem contribuir significativamente para o risco total, especialmente em solos com estratigrafia heterogênea.

Nas ferramentas computacionais de equilíbrio limite, essa dicotomia manifesta-se na escolha entre estratégias de busca de superfície fixa ou dinâmica durante as simulações de Monte Carlo. A abordagem de superfície fixa assume que a geometria crítica identificada na análise determinística permanece inalterada para todas as amostragens probabilísticas, simplificando o problema ao nível de componente. Em contrapartida, a busca dinâmica realiza uma nova otimização global a cada nova combinação de variáveis, permitindo que a superfície de ruptura migre espacialmente conforme a variabilidade das propriedades do solo, capturando o comportamento de sistema do maciço.

O presente artigo objetiva comparar essas duas metodologias, avaliando em que medida a simplificação por busca fixa pode mascarar riscos latentes e comprometer a confiabilidade final. O foco reside no perigo da subestimação em cenários de multimodalidade, onde a presença de camadas de baixa resistência ou contrastes de rigidez induz a coexistência de diferentes mecanismos competitivos de falha. Por meio da análise de casos homogêneos e estratificados, busca-se demonstrar que a transição para a análise de sistema é indispensável para uma gestão de riscos geotécnicos condizente com a complexidade das análises geotécnicas contemporâneas.

2 MÉTRICAS DE PROBABILIDADE E FORMULAÇÃO SISTÊMICA

A fundamentação teórica da confiabilidade de taludes exige a distinção rigorosa entre diferentes métricas de probabilidade para que a avaliação de risco não seja comprometida por simplificações geométricas. O tratamento da estabilidade sob a ótica da confiabilidade de sistemas fundamenta-se na premissa de que a segurança global do maciço é governada pela união de múltiplos modos potenciais de falha. Conforme estabelecido pioneiramente por Oka e Wu em 1990, um talude pode ser idealizado como um sistema em série no qual cada superfície de deslizamento representa um componente individual e a ocorrência de falha em qualquer um desses elementos implica o colapso do sistema integral.

A formulação matemática da confiabilidade de sistema baseia-se na teoria dos conjuntos e na probabilidade da união de eventos de falha individuais representados por $E_i = E(FS_i < 1{,}0)$. Esta conceituação indica que o maciço possui três níveis principais de probabilidade de falha (comumente confundidos) que descrevem o comportamento de segurança sob diferentes perspectivas:

1) **Índice de Confiabilidade (β):** Representa a distância padronizada entre o valor esperado do fator de segurança e o estado limite de falha (FS = 1), expressa em número de desvios-padrão:

$$\beta_i = \frac{\mu_{FS,i} - 1}{\sigma_{FS,i}}$$

onde $\mu_{FS,i}$ e $\sigma_{FS,i}$ são, respectivamente, a média e o desvio-padrão do fator de segurança da superfície i. Quanto maior o valor de β_i, maior o afastamento em relação à condição de falha e, consequentemente, maior o nível de confiabilidade da superfície analisada.

2) **Probabilidade de Falha da Superfície Crítica Determinística ($P_{f,CDSS}$):** Representa a probabilidade de falha associada exclusivamente aos eventos com geometria de menor fator de segurança na análise determinística.

$$P_{f,CDSS} = P_{f,FSmín}$$

3) **Probabilidade de Falha da Superfície Crítica Probabilística ($P_{f,crit}$):** Representa a probabilidade associada à superfície de deslizamento que possui o menor índice de confiabilidade (β) entre todas as superfícies amostradas.

$$P_{f,crit} = máx(P_{f,i})$$

4) **Probabilidade de Falha do Sistema ($P_{f,sis}$):** Constitui a medida de risco total do talude sendo definida pela união estatística de todos os modos de falha potenciais e cinematicamente admissíveis. Sob a premissa de mecanismos independentes, a probabilidade do sistema pode ser aproximada pelo somatório das probabilidades individuais.

$$P_{f,sis} \approx \sum_{i=1}^{n} P_{f,i}$$

Como apresentado, a probabilidade de falha do sistema é expressa pela união de todos os componentes. Em decorrência dessa natureza sistêmica estabelece-se a inequação fundamental na qual a probabilidade do sistema é necessariamente superior ou igual à probabilidade de qualquer superfície individual resultando na condição:

$$P_{f,sis} \geq P(E_i) \;\; \therefore \;\; P_{f,sis} \geq P_{f,crit} \geq P_{f,CDSS}$$

A magnitude da diferença entre a probabilidade do sistema e a da superfície crítica é governada pelo coeficiente de correlação entre os modos de falha. Oka e Wu (1990) explicam que em cenários onde os fatores de segurança das diversas superfícies são altamente correlacionados, o que é típico em taludes homogêneos, a $P_{f,sis}$ aproxima-se numericamente da $P_{f,crit}$.

Entretanto, em casos que apresentam múltiplos mecanismos distintos e pouco correlacionados a probabilidade do sistema podem atingir valores significativamente superior. Este problema assume relevância crítica em taludes estratificados que exibem comportamento multimodal, característica atribuída geralmente à variabilidade espacial dos parâmetros de resistência, que, segundo Huang et al. (2013), cria múltiplos mecanismos de falha competitivos dentro do mesmo maciço, alternando a superfície crítica entre camadas superficiais e profundas.

Nesse contexto, a análise de sistema é fundamental para integrar mecanismos de falha independentes que a prática determinística convencional costuma mascarar. Conforme Jiang et al. (2015), restringir a avaliação à superfície crítica determinística ($P_{f,CDSS}$) subestima severamente o risco real, visto que a variabilidade espacial permite rupturas em zonas anteriormente ignoradas, elevando significativamente a probabilidade de falha sistêmica ($P_{f,sis}$).

3 ESTUDOS DE CASO

A investigação fundamenta-se na análise comparativa de dois cenários geotécnicos distintos destinados a evidenciar o comportamento da probabilidade de falha sistêmica frente à complexidade geológica. O primeiro estudo de caso aborda o talude homogêneo da Mina do Cauê composto por saprólito de quartzito ferrífero conforme investigado por Sayão et al. (1992, 2012). O segundo cenário considera um talude estratificado adaptado da configuração proposta por Zeng et al. (2015) no qual a inserção de uma camada de baixa resistência permite observar o fenômeno da multimodalidade e a consequente discrepância entre as análises de componente e de sistema**.**

3.1 Talude homogêneo e alta correlação

O primeiro cenário de análise fundamenta-se no caso histórico de um talude de mineração a céu aberto, da Mina do Cauê, originalmente investigado por Sandroni et al. (1992) e posteriormente reexaminado por Sayão et al. (2012). O maciço de 200m de altura e 34° de ângulo médio, é constituído predominantemente por saprolito de quartzito ferrífero, com parâmetros de resistência obtidos a partir de um conjunto de 50 ensaios de cisalhamento direto realizados em amostras não perturbadas de solo residual. As condições hidrogeológicas do local foram monitoradas por piezômetros, que situaram o nível freático em uma profundidade de aproximadamente 80,0 metros abaixo da crista do talude. A figura 1 apresenta a seção típica do talude.

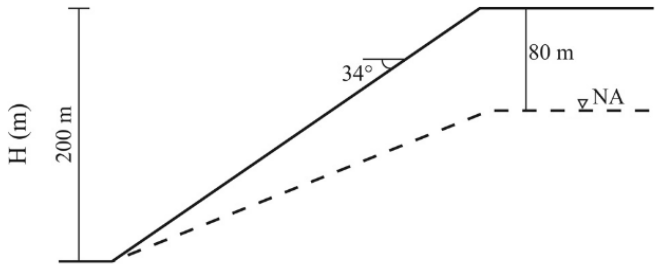


Figura 1. Seção típica de talude da Mina do Cauê, adaptado de Sayão et al (2012).

A caracterização das incertezas neste estudo demonstrou que os pesos unitários natural e saturado possuem uma contribuição reduzida para a variabilidade do fator de segurança, o que permite o tratamento destas grandezas como variáveis determinísticas sem comprometer a acurácia dos valores calculados para a probabilidade de falha.

A tabela 01 sintetiza os parâmetros geotécnicos e estatísticos aplicados para o estudo.

Tabela 1. Parâmetros e Variâncias: Caso homogêneo

Material	Solo saprolítico - Quartzito ferrífero	
Parâmetros	Média	Desvio Padrão
ϕ' (°)	38,00	3,00
c' (kPa)	25,00	24,00
N.A (m)	80,00	20,00
γ (kN/m^3)	28,30	-
γ_{sat}(kN/m^3)	29,00	-

Com o objetivo de avaliar as implicações das metodologias de superfície fixa e dinâmica no contexto do talude homogêneo, realizou-se uma nova análise de estabilidade utilizando o software Slide2 sob o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price com busca por superfície circular. A simulação contemplou 20.000 iterações de Monte Carlo adotando-se os parâmetros de resistência e variâncias originais, citada numa distribuição Lognormal (LN).

A adoção de distribuições Lognormal (LN) ou Normal Truncada (NT) para as variáveis de resistência assegura que o modelo respeite a natureza física dos solos. Conforme Siacara et al. (2020), embora a distribuição Normal (N) facilite soluções analíticas, o emprego de modelos estritamente positivos evita inconsistências teóricas e instabilidades numéricas. Assim, a distribuição LN assegura a integridade das iterações ao manter a consistência física dos parâmetros em todo o domínio da simulação.

A investigação probabilística utilizou os métodos Global Minimum e Overall Slope para confrontar as estratégias de superfície fixa e dinâmica, visando quantificar a discrepância entre o risco de componente e o sistêmico. O método Global Minimum opera sob a premissa de superfície fixa, restringindo o cálculo probabilístico exclusivamente à geometria que apresentou o menor fator de segurança na etapa determinística, o que define a probabilidade de falha da componente crítica determinística ($P_{f,CDSS}$). Em contrapartida, o método Overall Slope adota uma abordagem dinâmica ao realizar uma nova busca exaustiva por superfícies críticas em cada iteração estocástica, permitindo a migração da ruptura conforme a variabilidade dos parâmetros e fornecendo, consequentemente, a probabilidade de falha do sistema ($P_{f,sis}$).

O contraste entre as abordagens de busca para o talude homogêneo é apresentado na Figura 2, confrontando a análise de componente por superfície fixa (2.a) e a análise de sistema via busca dinâmica (2.b).

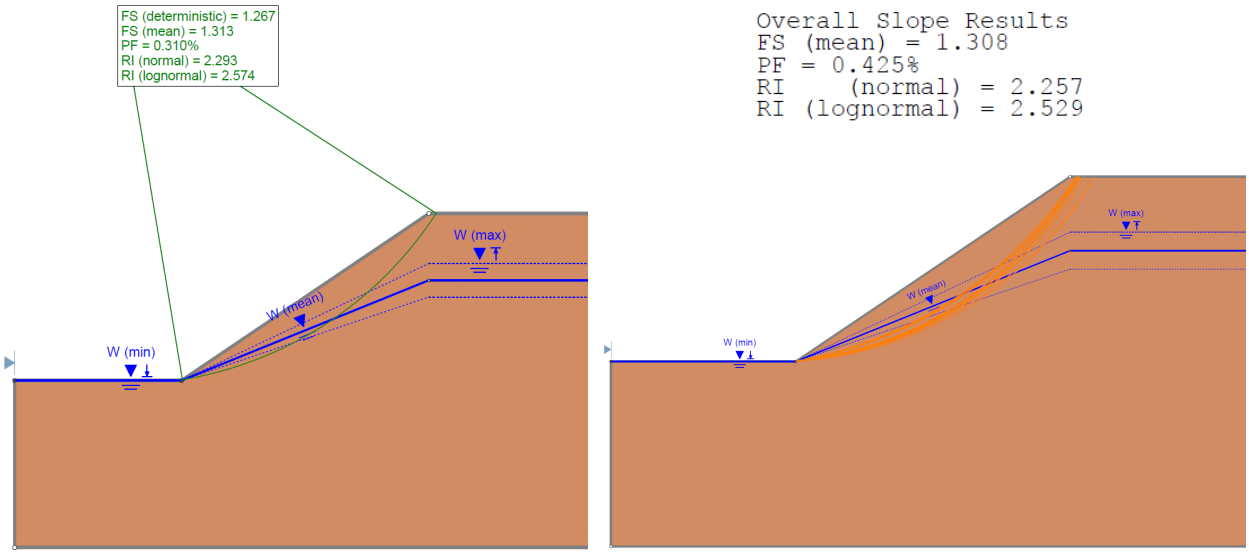


Figura 2. a) Análise fixa b) Análise dinâmica.

Os dados sintetizados na Tabela 02, abaixo, demonstram que a variação entre os métodos é marginal para os principais indicadores de segurança. O Fator de Segurança Médio apresentou um desvio aproximadamente nulo, enquanto o Índice de Confiabilidade (β) sofreu uma redução de 1,57% (2,29 para 2,26).

Tabela 2. Resultado das análises: Caso homogêneo

Parâmetros	Análise Fixa	Análise Dinâmica	Desvio (%)
FS det.	1,267	1,267	0,00%
FS méd.	1,313	1,308	0,38%
β	2,293	2,257	1,57%
Pf	0,310%	0,425%	37,10%

No que tange à Probabilidade de Falha, observou-se um incremento de 0,31% para 0,43%, resultando em um desvio relativo de 37,10%. Embora o percentual de variação pareça elevado, em termos de magnitude de probabilidade, os valores permanecem na mesma ordem de grandeza e dentro da mesma classe de desempenho geotécnico, verificado pelo desvio ínfimo do β como supracitado.

Este comportamento reafirma as conclusões citadas anteriormente sobre a influência da alta correlação em terrenos sem contrastes estratigráficos. A similaridade geométrica entre as superfícies potenciais em solos homogêneos faz com que a probabilidade da componente crítica seja uma métrica representativa da segurança

global, uma vez que a contribuição de riscos independentes é minimizada pela forte correlação entre os fatores de segurança, indicando que nesses casos, a busca exaustiva por novas superfícies críticas a cada iteração de Monte Carlo não identifica mecanismos de ruptura substancialmente distintos da geometria determinística original. Para esses casos simplórios, o uso de uma superfície fixa pode ser considerada representativa, indicando que a rapidez operacional do método não compromete significativamente a obtenção de resultados coerentes e seguros para o projeto.

3.2 Talude estratificado e multimodalidade

O segundo cenário de análise fundamenta-se no caso teórico adaptado de Zeng et al. (2015), representando um talude fictício com 8,5 metros de altura e inclinação de 27°. Diferente do modelo homogêneo, este maciço apresenta uma estratigrafia complexa, composta por quatro camadas de solo com ângulos de atrito reduzidos em todos os horizontes, variando entre 10° e 18°. Os baixos ângulos de atrito sugerem comportamento análogo ao de solos micáceos, cujas partículas placoides reduzem a resistência ao cisalhamento em toda a estratigrafia. Tal cenário amplia a complexidade do modelo, pois a baixa resistência aliada à variabilidade dos desvios-padrão favorece mecanismos de ruptura competitivos. Essa interação cria condições variadas de criticidade disseminadas em toda a estratigrafia, cujas propriedades estatísticas são sintetizadas na Tabela 03.

Tabela 3. Parâmetros: Caso homogêneo

Material		ϕ' (°)		c' (kPa)	
		Média	σ	Média	σ
Solo 1		16,0	4,8	18,0	9,0
Solo 2		14,0	4,2	20,0	10,0
Solo 3		10,0	2,0	12,0	3,6
Solo 4		18,0	5,4	20,0	10,0

Novamente, a investigação probabilística utilizou os métodos Global Minimum e Overall Slope para confrontar as estratégias de superfície fixa e dinâmica, quantificando a discrepância entre o risco de componente e sistêmico. O contraste entre abordagens de busca para o talude estratificado é apresentado na Figura 3, confrontando a análise de componente por superfície fixa (3.a) e de sistema via busca dinâmica (3.b).

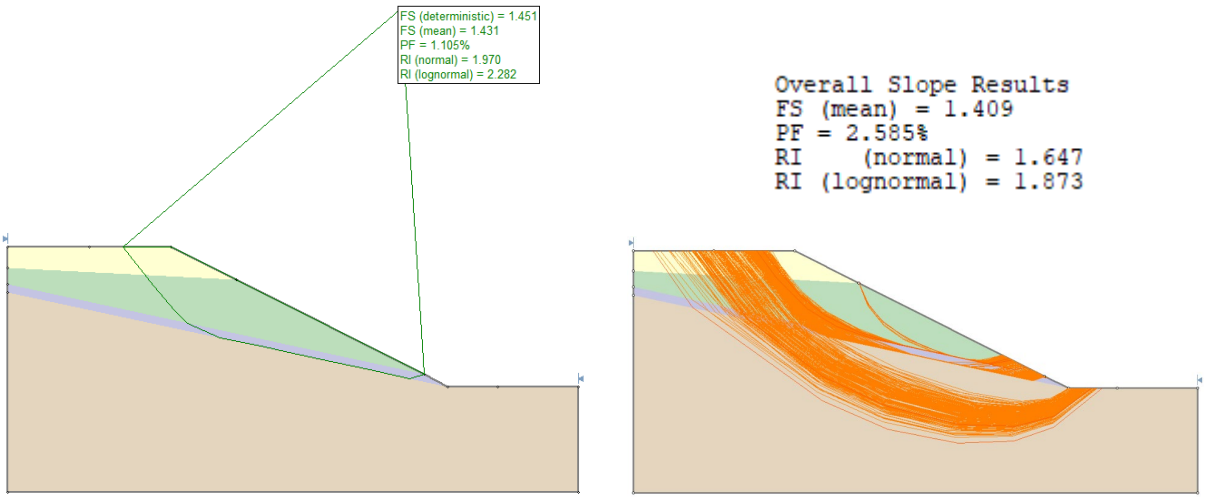


Figura 3. a) Análise fixa b) Análise dinâmica.

A tabela 04 sintetiza os resultados obtidos, computando o desvio entre os métodos de busca para os principais indicadores de segurança e confiabilidade, e o tempo computacional gasto.

Tabela 4. Resultado das análises: Caso estratificado

Parâmetros	Análise Fixa	Análise Dinâmica	Desvio
FS det.	1,45		-
FS méd.	1,43	1,41	1,40%
β_{LN}	2,28	1,87	17,85%
P_f	1,11%	2,59%	133,94%
Tempo (s)	10	36000	3600x

Os resultados obtidos para o talude estratificado demonstram um comportamento oposto ao cenário homogêneo e evidenciam as limitações da análise de componente em meios heterogêneos.

Os dados da Tabela 04 revelam que a probabilidade de falha aumentou de 1,11% na abordagem fixa para 2,59% na busca dinâmica, o que configura um desvio de 133,94%. No mesmo sentido, o índice de confiabilidade apresentou uma queda de 17,85%, reduzindo de 2,28 para 1,87 à medida que a metodologia dinâmica identificou caminhos de ruptura alternativos , evidenciando que o esforço de processamento é justificado pela necessidade de mapear mecanismos concorrentes que a análise simplificada negligencia totalmente em meios heterogêneos.

A divergência é acentuada pela presença do Solo 3, de baixa resistência média (φ = 10°, c = 12 kPa), enquanto os demais estratos, apesar de propriedades superiores, apresentam elevados desvios padrão, ampliando a ocorrência de cenários críticos sob a ótica probabilística. Como discutido por Zeng et al. (2015) e Jiang et al. (2015), restringir a avaliação à geometria determinística oculta riscos independentes que se tornam cinematicamente possíveis sob condições de incerteza.

A análise visual das superfícies críticas, consolidada na Figura 4, revela a natureza multimodal do problema: observa-se a distribuição das superfícies de falha obtidas via Simulação de Monte Carlo, com três regiões modais de concentração de rupturas concorrentes no processo estocástico.

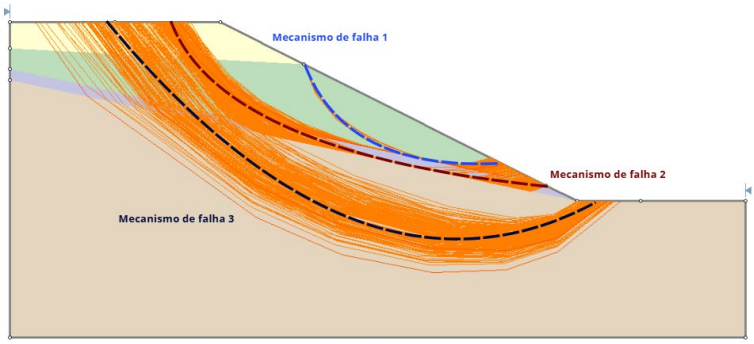


Figura 4. Ampliação esquemática dos diferentes mecanismos de falha do talude estratificado.

Observa-se que o modo de falha identificado na etapa determinística se assemelha ao Mecanismo 2, que tangencia a zona de baixa resistência da camada 3, que é a mais fraca na análise de valores médios. Ao restringir a avaliação probabilística exclusivamente a essa superfície fixa, a análise de componente ($P_{f,CDSS}$) ignora a contribuição de risco proveniente dos outros dois mecanismos independentes.

O Mecanismo 1 manifesta-se como um modo local e superficial, surgindo especificamente em cenários que Solo 2 apresenta suas piores combinações de parâmetros de resistência enquanto o solo 3 apresenta melhorias de resistência. Ao observar as trajetórias de ruptura na Figura 4, nota-se que este mecanismo detém a menor contribuição de superfícies críticas durante a Simulação de Monte Carlo, indicando uma probabilidade de ocorrência inferior em relação a outros modos profundos.

O Mecanismo 3 configura-se como uma ruptura profunda, deflagrada quando o solo inferior assume uma configuração estocástica crítica. Este modo é o mais severo sob a ótica das consequências, visto que a profundidade da superfície de deslizamento mobiliza um volume de solo significativamente maior. A análise das superfícies críticas marcadas na Figura 4 demonstra que esta região concentra a maior densidade de rupturas, o que torna o Mecanismo 3 o modo mais dominante para a confiabilidade global da estrutura. Porém, sendo geometricamente distinto da solução determinística, este risco é omitido pela análise de superfície fixa.

Segundo os critérios de El-Ramly et al. (2002), uma probabilidade de falha de 2% e β = 2,0 definem o limite de desempenho satisfatório para taludes. A análise de superfície fixa (1,11%; β = 2,28) indicaria uma estrutura dentro dos padrões de aceitabilidade. Contudo, a abordagem dinâmica de sistemas revela um risco real de 2,59% (β = 1,87), excedendo a fronteira de confiabilidade e expondo a fragilidade de simplificações que ignoram mecanismos concorrentes de ruptura. Esses resultados reforçam a necessidade de buscas dinâmicas em solos heterogêneos, garantindo que modos de falha independentes sejam integrados à avaliação probabilística.

4 CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam que a análise dinâmica de sistemas é fundamental para a avaliação confiável de maciços geologicamente complexos. No caso homogêneo, a paridade entre os métodos validou a análise de componente, pois a alta correlação entre as superfícies potenciais permite que a geometria determinística represente o risco global, no caso o desvio na probabilidade de falha foi de 37,10%, variando de 0,31% para 0,43%, dentro de uma mesma ordem de magnitude.

No cenário estratificado, a adoção de superfície fixa mostrou-se contrária à segurança ao negligenciar modos concorrentes de falha. A probabilidade de falha sistêmica mais que dobrou em relação à análise de componente, elevando-se de 1,11% para 2,59%, incremento de 133,94%, acompanhado de redução no índice de confiabilidade β de 2,28 para 1,87. O custo computacional de 10 horas observado não deve, contudo, desencorajar o uso de métodos sistêmicos, visto que estratégias como Latin Hypercube Sampling (LHS) e redução de parâmetros de busca permitem reduzir o tempo de execução sem comprometer a integridade estatística do mapeamento de riscos.

Ressalta-se que a determinação da superfície crítica probabilística não integrou o escopo deste trabalho. Os softwares comerciais empregam algoritmos de busca global meta-heurísticos, como Auto Refine e Cuckoo Search, que identificam claramente as regiões de concentração de rupturas, mas não isolam com rigor estatístico a superfície que maximiza a probabilidade de falha individual. Para tal, recomenda-se a adoção de metodologias específicas como as propostas por Siacara et al. (2020), que conciliam praticidade computacional e rigor técnico.

5 REFERÊNCIAS

El-Ramly, H., Morgenstern, N. R., & Cruden, D. M. (2002). *Probabilistic slope stability analysis for practice.* Canadian Geotechnical Journal, v. 39, n. 3, p. 665-683, 2002

Huang, J; Griffithis, D. V.; Fenton, G.A. *A benchmark slope for system reliability analysis.*Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments *III*. 2013. p. 962-971.

Jiang, S. H., Li, D. Q., Cao, Z. J., Zhou, C. B., & Phoon, K. K. *Efficient system reliability analysis of slope stability in spatially variable soils using Monte Carlo simulation.* Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, v. 141, n. 2, p. 04014096, 2015.

Oka, Y; Wu, T H. *System reliability of slope stability.* Journal of Geotechnical Engineering, v. 116, n. 8, p. 1185-1189, 1990.

Sandroni, S. S., Santana, F. C., Ramos, J. M. S. e Sayão, A. S. F. J. (1992). *Talude Rompido em Solo Saprolítico de Micaxisto na Mina do Cauê*. 1ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Taludes, Rio de Janeiro, ABMS, vol. 1, pp. 285-292.

Sayão, A. S. F. J., Sandroni, S. S., Fontoura, S. A., & Ribeiro, R. C. (2012). *Considerations on the probability of failure of mine slopes.* Soils and Rocks, v. 35, n. 1, p. 31-37, 2012.

Siacara, A. T. et al. *Análise de confiabilidade de primeira ordem (FORM) aplicada à engenharia de barragens.* Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 20., 2020, Campinas, São Paulo. 2020.

Zeng, P.; Jimenez, R; Jurado-Pinã, R. *System reliability analysis of layered soil slopes using fully specified slip surfaces and genetic algorithms.* Engineering Geology, v. 193, p. 106-117, 2015.