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/COBRAMSEG2026.4/46

Comparação entre Métodos de Busca para Superfícies de Ruptura Não Circulares em Análises de Estabilidade Um Estudo Aplicado Utilizando o Slide2

Fabiana Aparecida Blanco
Engenheira Geotécnica, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte - MG, Brasil,
fabiana.blanco@walmengenharia.com.br

Fernando Carolino da Silva
Engenheiro Geotécnico, The Mosaic Company, Catalão - GO, Brasil,
fernando.silva2@mosaicco.com

Gilson Gabriel Teixeira Varela
Engenheiro Geotécnico, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte - MG, Brasil,
gilson.varela@walmengenharia.com.br

RESUMO: A avaliação precisa da estabilidade de taludes é um requisito fundamental em projetos geotécnicos, especialmente em obras de infraestrutura linear, atividades de mineração e sistemas de disposição de rejeitos. A identificação da superfície crítica de ruptura exerce influência direta no fator de segurança calculado, constituindo um dos principais parâmetros de verificação conforme a ABNT NBR 11682:2009, bem como diretrizes internacionais, como o *US Army Corps of Engineers* (2003) e o Boletim 121 da ICOLD (2001). Em cenários caracterizados por estratigrafia heterogênea, anisotropia de resistência ou presença de estruturas geológicas, a adoção de superfícies de ruptura circulares pode resultar na superestimação das condições de estabilidade. Nesse contexto, o emprego de superfícies de ruptura não circulares, associado a algoritmos de busca capazes de explorar eficientemente o espaço de soluções, torna-se indispensável. Este estudo compara três métodos disponíveis no software *Slide2*: o algoritmo determinístico *Auto Refine Search* e os métodos heurísticos *Cuckoo Search* (Yang & Deb, 2009) e *Particle Swarm Optimization* – PSO (*Kennedy & Eberhart*, 1995), aplicados à análise de estabilidade de um talude constituído por múltiplas unidades geotécnicas. Os resultados indicam que os algoritmos heurísticos foram mais eficazes na identificação de mecanismos de ruptura complexos, reconhecendo superfícies profundas e compostas, associadas a fatores de segurança mais conservadores, além de convergirem entre si com a superfície muito próxima. Já a superfície gerada pelo Auto Refine Search corroborou um formato mais circular e diferentes dos outros métodos. Os achados corroboram tendências previamente descritas na literatura *(Duncan*, 1996; *Fredlund & Krahn*, 1977) e reforçam a importância da adoção de métodos compatíveis com a complexidade geológica do maciço analisado. A pesquisa contribui para o aprimoramento das práticas de modelagem avançada em análises de estabilidade de taludes e recomenda o uso criterioso de técnicas heurísticas em consonância com manuais técnicos e literatura especializada.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade de taludes, superfícies de ruptura não circulares, algoritmos heurísticos, fator de segurança, modelagem geotécnica.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes e aterros é tradicionalmente avaliada na engenharia geotécnica por meio de métodos clássicos de equilíbrio limite (*Limit Equilibrium Methods – LEM*), cuja precisão depende de forma decisiva da adequada representação da superfície potencial de ruptura (*Bishop*, 1955; *Janbu*, 1967). Embora a adoção de superfícies circulares apresente elevada eficiência computacional e seja apropriada para solos homogêneos e geometrias simples, as condições geotécnicas observadas em campo frequentemente envolvem heterogeneidades litológicas, interfaces inclinadas ou discordantes, presença de reforços, bem como estruturas

de contenção rígidas, tornando indispensável o emprego de superfícies de ruptura não circulares (*Zhang et al*., 2005; *Schuster*, 2010).

O software Slide2, desenvolvido pela Rocscience Inc., constitui uma plataforma consolidada para análises bidimensionais de estabilidade, permitindo a modelagem de geometrias complexas, a definição de zonas com distintos parâmetros de resistência e a aplicação de diversos algoritmos de busca para a identificação das superfícies críticas de ruptura (*Rocscience*, 2021). Dentre essas técnicas, o algoritmo determinístico *Auto Refine Search* é amplamente utilizado em função de sua eficiência computacional e simplicidade de implementação. Por outro lado, algoritmos bioinspirados, como o *Cuckoo Search* (CS) (Yang & Deb, 2009) e o *Particle Swarm Optimization* (PSO) (Kennedy & Eberhart, 1995), foram desenvolvidos com o objetivo de ampliar a capacidade de exploração do espaço de soluções, possibilitando a identificação de mecanismos de ruptura mais complexos e potencialmente mais críticos.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma comparação técnica entre esses métodos de busca, avaliando suas vantagens, limitações e aplicabilidade em cenários geotécnicos realistas caracterizados por estratigrafia complexa e propriedades mecânicas heterogêneas, conforme discutido por Lima et al. (2018) e Zhang et al. (2007).

2 METODOLOGIA

O software *Slide2* permite a definição de superfícies de ruptura não circulares por meio de *splines* cúbicas, polígonos multissegmentados ou curvas definidas por pontos de controle, possibilitando a representação de conformações mais realistas e compatíveis com os mecanismos de ruptura esperados. Essas superfícies podem atravessar zonas constituídas por materiais regidos por diferentes envoltórias de resistência, como os critérios de Mohr-Coulomb, modelos anisotrópicos e modelos não lineares, o que amplia significativamente a complexidade do domínio de busca (Rocscience, 2021).

Dessa forma, a seleção de algoritmos capazes de localizar com precisão a superfície crítica de ruptura, definida como aquela associada ao menor fator de segurança possível, torna-se um aspecto central da análise, especialmente em razão da elevada dimensionalidade e da natureza não convexa do espaço de soluções envolvido (Lima et al., 2018).

2.1 Algoritmos de Busca para Identificação das Superfícies Críticas de Ruptura

A identificação da superfície crítica de ruptura pode ser formulada, do ponto de vista computacional, como um problema de otimização não linear com restrições, no qual as variáveis independentes correspondem às coordenadas geométricas dos pontos que definem cada superfície candidata. O objetivo do processo consiste na minimização do fator de segurança, sujeito às restrições geométricas e mecânicas impostas pelo modelo geotécnico adotado. Em virtude da elevada dimensionalidade do problema e da possível existência de múltiplos mínimos locais, a escolha do algoritmo de busca exerce influência direta sobre a confiabilidade dos resultados obtidos.

O software *Slide2* disponibiliza diferentes estratégias para a resolução desse problema, as quais podem ser classificadas em métodos determinísticos clássicos, como o *Auto Refine Search*, e algoritmos heurísticos ou metaheurísticos, como o *Cuckoo Search* e o *Particle Swarm Optimization* (PSO). A seguir, são apresentados os fundamentos conceituais e as principais características de cada abordagem.

2.1.1 Auto Refine Search

O *Auto Refine Search* é um algoritmo determinístico baseado em refinamentos sucessivos locais, amplamente empregado em análises de estabilidade por métodos de equilíbrio limite em razão de sua elevada eficiência computacional. O procedimento inicia-se com a geração de um conjunto discreto de superfícies potenciais, obtidas a partir da variação sistemática de parâmetros geométricos previamente definidos, como a profundidade da superfície de ruptura, a posição dos pontos de entrada e saída e a configuração intermediária da geometria analisada. Cada superfície candidata é avaliada quanto ao fator de segurança, sendo identificada aquela associada ao menor valor obtido na malha inicial de busca.

A partir dessa etapa, o algoritmo promove o refinamento progressivo da malha em torno da superfície considerada mais crítica, reduzindo gradativamente o domínio de busca e aumentando a resolução geométrica da superfície por meio de interpolações, usualmente baseadas em *splines*. Esse processo iterativo visa

aprimorar a definição da geometria da superfície crítica, concentrando os esforços computacionais em regiões previamente identificadas como potencialmente desfavoráveis.

Apesar de apresentar bom desempenho em modelos com geometrias simples e comportamento relativamente homogêneo, a eficácia do *Auto Refine Search* depende fortemente da discretização inicial adotada e da adequada definição dos limites do domínio de busca. Em cenários geotécnicos mais complexos, caracterizados por heterogeneidade de materiais, presença de descontinuidades ou múltiplos mínimos locais do fator de segurança, o método pode convergir para soluções subótimas, especialmente quando a malha inicial é grosseira ou inadequadamente posicionada, conforme discutido por Lima et al. (2018). Nessas condições, a natureza essencialmente local do algoritmo limita sua capacidade de explorar superfícies de ruptura mais profundas ou geometricamente não convencionais.

2.1.2 Cuckoo Search (CS)

O algoritmo *Cuckoo Search*, proposto por Yang e Deb (2009), é uma técnica metaheurística inspirada no comportamento de parasitismo reprodutivo observado em determinadas espécies de cucos, sendo fundamentado em mecanismos de busca estocástica com forte capacidade de exploração global. O método utiliza os denominados *Lévy flights*, caracterizados por deslocamentos aleatórios de grande amplitude governados por distribuições de probabilidade de cauda pesada, o que possibilita a realização de saltos longos no espaço de soluções e reduz significativamente a probabilidade de aprisionamento em mínimos locais.

No contexto das análises de estabilidade de taludes no software Slide2, o Cuckoo Search é implementado como um método estocástico populacional, no qual múltiplas superfícies candidatas são avaliadas simultaneamente a cada geração. Superfícies com desempenho inferior são progressivamente abandonadas, sendo substituídas por novas soluções geradas a partir dos mecanismos de exploração global do algoritmo. Esse processo permite uma investigação mais abrangente do domínio de busca, especialmente em modelos com elevado número de variáveis geométricas e forte não linearidade do problema.

Essa abordagem torna o *Cuckoo Search* particularmente adequado para análises envolvendo elevada heterogeneidade de materiais, interfaces inclinadas ou discordantes e geometrias irregulares, nas quais a superfície crítica pode assumir conformações profundas, compostas e não circulares. Estudos como os de Zhang et al. (2007) indicam que esse tipo de algoritmo apresenta desempenho superior na identificação de mecanismos de ruptura associados a zonas de fraqueza e contrastes significativos de resistência ao cisalhamento.

2.1.3 Particle Swarm Optimization (PSO)

O *Particle Swarm Optimization* é um algoritmo de otimização global baseado em população, inspirado nos princípios de inteligência coletiva observados em sistemas naturais, como o movimento coordenado de bandos de aves ou cardumes, originalmente proposto por Kennedy e Eberhart (1995). No contexto da modelagem da estabilidade de taludes, cada partícula representa uma superfície de ruptura candidata, definida por um conjunto de pontos de controle que descrevem sua geometria no espaço bidimensional.

Ao longo do processo iterativo, as partículas ajustam suas posições no espaço de busca com base em dois componentes principais: a melhor solução individual previamente encontrada (memória cognitiva) e a melhor solução global identificada pelo conjunto de partículas (componente social). A combinação desses mecanismos permite um equilíbrio eficiente entre a exploração global do domínio de soluções e o refinamento local das regiões mais promissoras.

Em aplicações geotécnicas, o PSO tem se mostrado particularmente eficaz na identificação de superfícies críticas em modelos caracterizados por domínios não convexos, estratigrafia complexa e contrastes acentuados de propriedades mecânicas entre unidades geotécnicas. Sua capacidade de adaptação dinâmica ao espaço de busca e de incorporação de informações globais torna o método robusto para a investigação de mecanismos de ruptura extensos e geometricamente complexos, ainda que, em geral, com maior custo computacional quando comparado a métodos determinísticos.

3 ESTUDO DE CASO

3.1.1 Configuração do Modelo Numérico

O modelo numérico foi desenvolvido no software *Slide2* com base em um perfil representativo de talude típico de barragens de rejeitos de mineração, caracterizado por elevada complexidade geométrica, presença de múltiplas unidades geotécnicas e descontinuidades estratigráficas. A geometria do talude foi definida com inclinações variáveis e incluiu a incorporação de uma berma de estabilidade, resultando em uma altura total aproximada de 25 m.

As unidades litológicas e as propriedades dos materiais foram atribuídas conforme apresentado na Figura 1, sendo os parâmetros mecânicos definidos a partir de valores típicos obtidos por ensaios triaxiais e por meio de correlações empíricas amplamente empregadas na prática geotécnica. Para todas as unidades modeladas, foram adotados os critérios de resistência de Mohr-Coulomb e Hoek-Brown.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (°)	UCS (intact) (kPa)	Parameters vary with depth	GSI	mi	D	Vertical Stress Ratio	Minimum Shear Strength (kPa)
Taillings - Drained		20	Mohr-Coulomb	1	35							
Embankment		20	Mohr-Coulomb	5	27							
Filter		19	Mohr-Coulomb	0	30							
Started Dam		18	Mohr-Coulomb	7	25							
Raise		18	Mohr-Coulomb	13	28							
Residual Soil from Basalt		19	Mohr-Coulomb	20	28							
Granite Saprolite		18.5	Mohr-Coulomb	10	29							
Weathered Quartzite Rock		20	Generalized Hoek-Brown			22000	No	30	9	0		
Reinforcement Berm		19.5	Mohr-Coulomb	25	30							
Taillings - Undrained		20	Vertical Stress Ratio								0.23	0

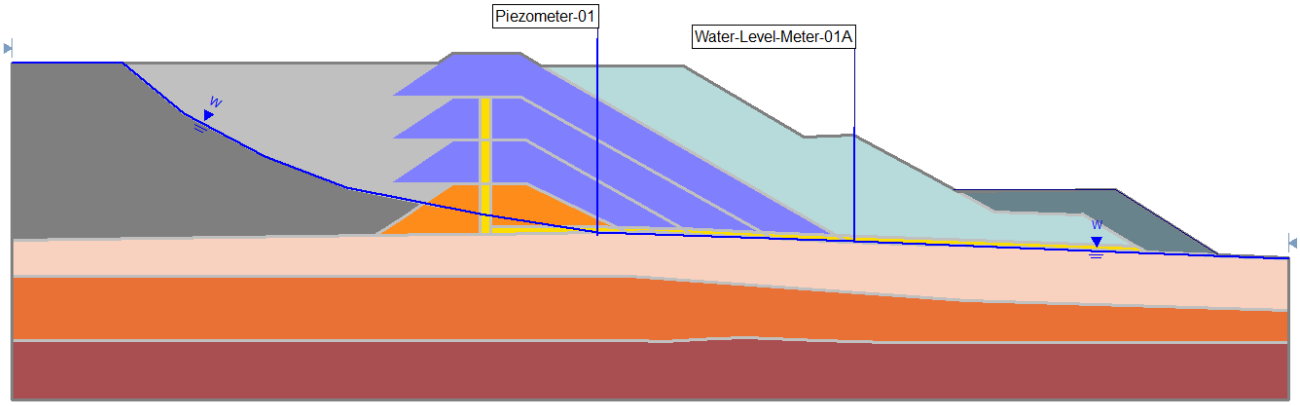


Figure 1 Modelo Geotécnico Utilizado

3.1.2 Algoritmos de Busca para Identificação de Superfícies Críticas de Ruptura

Neste estudo, foram aplicados três métodos distintos de busca por superfícies críticas de ruptura. No método *Auto Refine Search*, foi interpretado um conjunto inicial de 600 superfícies potenciais, sendo realizados cinco ciclos de refinamento local. A geometria das superfícies foi ajustada por meio de interpolação por *splines* cúbicas, permitindo maior suavidade e representatividade dos mecanismos de ruptura.

Para o algoritmo *Cuckoo Search*, adotou-se uma população de 50 ninhos, com um número máximo de 100 gerações. O parâmetro da distribuição de voo de Lévy (λ) foi definido como 1,5, e a probabilidade de abandono dos ninhos foi fixada em 0,25, conforme recomendações usuais da literatura para problemas de otimização não linear.

No método de Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO), foram utilizadas 100 partículas, com um limite máximo de 200 iterações. O peso de inércia foi estabelecido em 0,7, enquanto os coeficientes de atração cognitiva e social foram ambos fixados em 1,5, de modo a equilibrar a exploração do espaço de busca e a convergência das soluções.

Para os métodos de natureza estocástica, cada simulação foi repetida cinco vezes, utilizando diferentes sementes aleatórias, com o objetivo de avaliar a variabilidade de desempenho e a tendência de convergência em direção a soluções globais.

Os parâmetros de cada algoritmo foram definidos de modo a garantir uma exploração adequada e representativa do espaço de busca, respeitando as particularidades operacionais de cada método. Ressalta-se que o objetivo da comparação não foi igualar numericamente o esforço computacional entre os algoritmos,

mas avaliar sua capacidade relativa de identificar superfícies críticas de ruptura sob as mesmas condições geotécnicas e geométricas de modelagem.

3.1.3 Comparação e Critérios de Avaliação

As análises comparativas entre os métodos de busca foram conduzidas com base nos seguintes critérios técnicos:

- menor fator de segurança obtido (FS crítico);
- geometria da superfície crítica e sua coerência com os mecanismos de ruptura esperados;
- comportamento de convergência, avaliado a partir do número de iterações necessárias para a estabilização da solução;
- tempo de processamento computacional; e
- capacidade do algoritmo em evitar a convergência prematura para mínimos locais.

Os resultados foram analisados de forma integrada, considerando simultaneamente a eficiência numérica dos algoritmos, a robustez do processo de busca e a consistência geotécnica das superfícies críticas identificadas. Ressalta-se que o fator de segurança foi interpretado em conjunto com a geometria das superfícies críticas, evitando conclusões baseadas exclusivamente em valores numéricos isolados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Fatores de Segurança e Geometrias Obtidas

Os resultados apresentados na Figura 2 evidenciam diferenças significativas nos fatores de segurança determinados por cada método de busca. A avaliação contemplou não apenas os valores dos fatores de segurança, mas também a geometria das superfícies críticas de ruptura, o comportamento de convergência, a eficiência computacional e a interpretação geotécnica das soluções obtidas.

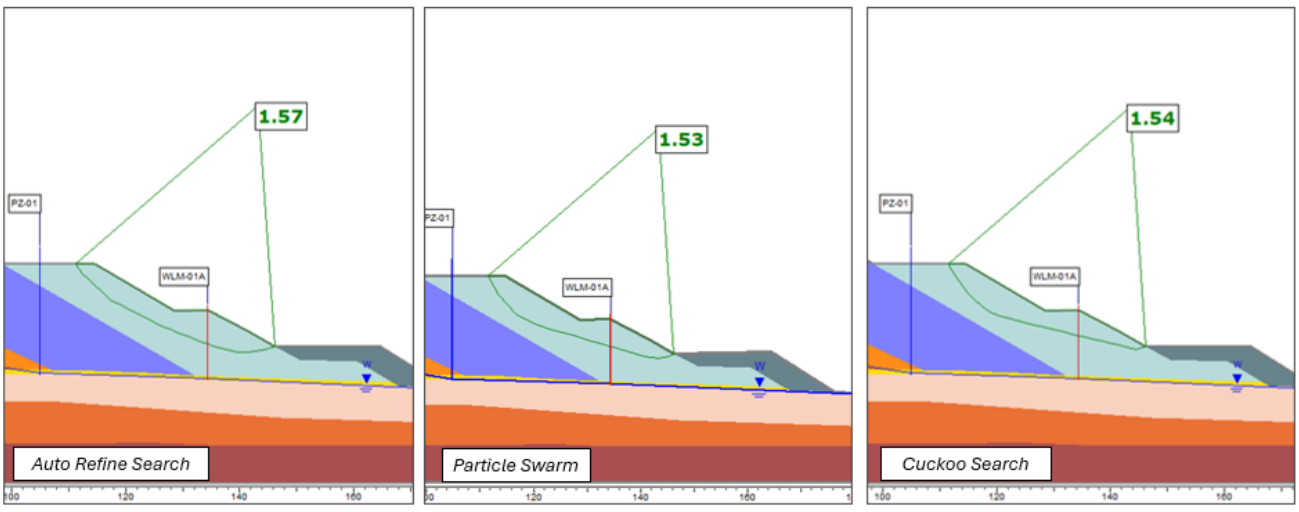


Figure 2 Fatores de Segurança Obtidos

Os resultados evidenciam diferenças significativas entre os algoritmos de busca, tanto nos fatores de segurança obtidos quanto na geometria das superfícies críticas. O método *Auto Refine Search* apresentou fatores de segurança mais elevados, associados a superfícies de ruptura geometricamente simplificadas, com tendência a conformações mais circulares. Esse comportamento decorre de sua natureza determinística e da forte dependência da malha inicial de busca, o que limita a exploração do espaço de soluções em modelos com maior complexidade geotécnica. Como consequência, o método tende a convergir para mínimos locais, resultando em uma possível superestimação da estabilidade global do talude.

Em contrapartida, os métodos estocásticos, *Cuckoo Search* e *Particle Swarm Optimization*, produziram fatores de segurança mais baixos e próximos, convergindo e também superfícies críticas com geometrias não

circulares e maior adaptação às variações geométricas e mecânicas do modelo. Embora as superfícies identificadas permaneçam predominantemente concentradas em uma mesma unidade geotécnica, sua conformação reflete maior sensibilidade às descontinuidades internas e aos contrastes locais de resistência, resultando em mecanismos de ruptura mais representativos.

Do ponto de vista computacional, o *Auto Refine Search* apresentou rápida convergência e menor tempo de processamento, porém com menor capacidade de investigação global do domínio de busca. Já o *Cuckoo Search* e o *Particle Swarm Optimization* demandaram maior esforço computacional, mas demonstraram maior robustez na exploração do espaço de soluções e maior capacidade de evitar a convergência prematura para mínimos locais. Entre os métodos estocásticos, o *Cuckoo Search* mostrou maior sensibilidade a variações locais de resistência, enquanto o *Particle Swarm Optimization* apresentou superfícies mais amplas, refletindo variações globais da geometria do talude.

De forma geral, os resultados indicam que, embora métodos determinísticos sejam computacionalmente eficientes, algoritmos de busca global são mais adequados para análises de estabilidade em modelos geotécnicos complexos, nos quais a correta representação geométrica da superfície crítica é determinante para uma avaliação consistente do fator de segurança.

5 CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que os métodos metaheurísticos, *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Cuckoo Search*, foram mais eficazes na identificação de superfícies de ruptura com geometrias não circulares e maior complexidade geométrica, associadas a fatores de segurança mais baixos e potencialmente mais representativos do comportamento mecânico do modelo analisado. Ainda que as superfícies críticas identificadas permaneçam predominantemente concentradas em uma mesma unidade geotécnica, os métodos estocásticos mostraram maior sensibilidade às variações locais de resistência e às descontinuidades internas do maciço, quando comparados ao método determinístico.

Sob a ótica prática, o método *Auto Refine Search* mostra-se adequado para análises preliminares ou para modelos com geometrias simplificadas, especialmente em situações nas quais a eficiência computacional é um fator determinante. No entanto, em modelos com maior complexidade geométrica ou com potencial desenvolvimento de mecanismos de ruptura não circulares, sua limitação na exploração global do espaço de soluções pode resultar na identificação de superfícies menos críticas, exigindo uma avaliação criteriosa dos resultados sob o ponto de vista geotécnico.

Para análises que demandem maior robustez na identificação da superfície crítica, recomenda-se a adoção de métodos de busca global, como PSO ou *Cuckoo Search*, mesmo diante de maior custo computacional, em função da maior capacidade desses algoritmos de evitar a convergência prematura para mínimos locais e de representar mecanismos de instabilidade mais compatíveis com a configuração do modelo.

Dessa forma, a escolha do algoritmo de busca deve ser tratada como uma etapa crítica no processo de modelagem geotécnica, uma vez que influencia diretamente a definição dos mecanismos potenciais de instabilidade e, consequentemente, a tomada de decisão em projetos de taludes, barragens e escavações. Os resultados reforçam que análises baseadas exclusivamente em métodos determinísticos podem conduzir a avaliações excessivamente conservadoras ou pouco representativas do comportamento estrutural esperado.

Por fim, o software *Slide2* demonstrou ser uma plataforma consistente e versátil para a integração entre métodos rigorosos de equilíbrio limite e algoritmos avançados de busca. A adequada parametrização dessas ferramentas, aliada ao conhecimento geotécnico do modelo e à interpretação crítica dos resultados, constitui um fator determinante para a qualidade, a confiabilidade e a segurança das análises de estabilidade. Estudos futuros podem explorar a aplicação combinada de diferentes técnicas de otimização, bem como a validação dos resultados numéricos por meio de dados de campo, ampliando a aplicabilidade e a robustez das metodologias avaliadas

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à WALM BH Engenharia e a The Mosaic Company pelo incentivo e apoio no desenvolvimento técnico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BISHOP, A.W. (1955) 'The use of the slip circle in the stability analysis of slopes', Geotechnique, 5(1), pp. 7–17.

JANBU, N. (1967) 'Stabilität von Erdkörpern', Geoteknikk, 1, pp. 19–48.

ZHANG, L., CHEN, H., LI, Q. and WANG, Z. (2005) 'Numerical analysis of slope stability using different failure mechanisms', Engineering Geology, 77(2), pp. 1–17.

SCHUSTER, R.L. (2010) 'Slope stability and design', Rock Mechanics and Rock Engineering, 43(1), pp. 1–17.

ROCSCIENCE INC. (2021) Slide2: A 2D slope stability analysis program, viewed 29 April 2025, https://www.rocscience.com/.

YANG, X. and DEB, S. (2009) 'Cuckoo search via Lévy flights', Proceedings of the World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC), IEEE, pp. 210–214.

KENNEDY, J. and EBERHART, R. (1995) 'Particle swarm optimization', Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, IEEE, Perth, Australia, pp. 1942–1948.

FREDLUND, D.G. and KRAHN, J. (1977) 'Comparison of slope stability methods of analysis', Canadian Geotechnical Journal, 14(3), pp. 429–439.

DUNCAN, J.M. (1996) 'Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes', Journal of Geotechnical Engineering, 122(7), pp. 577–596.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2009) NBR 11682: Estabilidade de taludes – Procedimento, ABNT, Rio de Janeiro.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. (2001) Guidelines for Selecting and Designing Geotechnical Instrumentation for Dams and Their Foundations, Bulletin 121, ICOLD, Paris.