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/COBRAMSEG2026.4/90

Influência de Diferentes Algoritmos de Busca em Análises de Estabilidade de Superfícies Não Circulares Utilizando o Software Slide 2

Alexandre de Lima Oliveira
Engenheiro de Minas, WALM Engenharia, Ouro Preto - MG, Brasil, alexandre1801.lima@gmail.com

Danilo Rodrigues Miranda
Engenheiro Civil Geotécnico, WALM Engenharia, Belo Horizonte - MG, Brasil, drmiranda3@gmail.com

RESUMO: As barragens são estruturas essenciais no contexto evolutivo da humanidade, com múltiplas finalidades, como uso agrícola, geração de energia e contenção de rejeitos da mineração. Em razão da importância dessas estruturas, torna-se fundamental identificar e gerenciar os riscos associados, destacando-se a realização de análises de estabilidade de taludes como um aspecto crítico para avaliação da segurança estrutural. Atualmente, essas análises podem ser realizadas com o auxílio de *softwares*. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência dos algoritmos de busca *Auto Refine, Cuckoo* e *Particle Swarm* nos fatores de segurança obtidos em análises de estabilidade de taludes por meio da metodologia do equilíbrio limite, utilizado os métodos de *Morgenstern-Price* e *Sarma* no *software* Slide 2. As análises foram conduzidas em condições drenadas e não drenadas, sendo nesta última observadas as maiores diferenças nos fatores de segurança em função dos diferentes algoritmos de busca empregado.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens, Estabilidade de taludes, Método equilíbrio limite, Algoritmos de busca

ABSTRACT: Dams are essential structures in the evolutionary context of humanity, with multiple purposes, such as agricultural use, power generation, and mining waste containment. Due to the importance of these structures, it is essential to identify and manage the risks to which they are subjected, with the analysis of slope stability being a critical aspect for structural safety. Currently, these analyses can be performed with the aid of software. In this context, this study aims to evaluate the influence of the Auto Refine, Cuckoo, and Particle Swarm search algorithms on the safety factors obtained in slope stability analyses using the limit equilibrium methodology, employing the Morgenstern-Price and Sarma methods in the Slide 2 software. The analyses were conducted under drained and undrained conditions, with the latter showing the greatest differences in safety factors due to the different search algorithms employed.

KEYWORDS: Dams, Slope Stability, Limit equilibrium methods, Search algorithms

1. INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas essenciais no contexto da evolução da humanidade, com registros de sua construção datando de aproximadamente 4.000 a.C, no Oriente Médio (Sandroni e Guidicini, 2025). Segundo a *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 2019), existem cerca de 58.000 barragens em operação no mundo, destinadas a diferentes finalidades, como uso agrícola, geração de energia e contenção de rejeitos da mineração.

Em função da relevância dessas estruturas, torna-se fundamental identificar e gerenciar os riscos aos quais estão submetidas (Bowles *et al.,* 2011). Nesse contexto, a realização de análises de estabilidade dos taludes destaca-se como um dos aspectos mais relevantes para avaliação da segurança de barragens. De modo geral, a análise de estabilidade dos taludes pode ser realizada por duas abordagens principais: o método do equilíbrio limite, fundamentado na estática do equilíbrio, e o método dos elementos finitos, baseado na relação tensão-deformação.

Dentre essas abordagens, o método do equilíbrio limite é o mais amplamente empregado na engenharia geotécnica, em razão da maior facilidade de obtenção dos parâmetros de entrada, do menor custo

computacional e do menor tempo de execução. Assim, no presente estudo, adota-se a metodologia do equilíbrio limite por meio dos métodos de Morgenstern-Price (1965) e Sarma (1973).

Um aspecto central nas análises de estabilidade por equilíbrio limite é a determinação da superfície potencial de ruptura crítica, associada ao menor fator de segurança. O *software* Slide 2, desenvolvido pela empresa *Rocscience*, disponibiliza diferentes algoritmos de busca para a identificação dessas superfícies (Rocscience, 2016). Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência de três algoritmos de busca distintos (*Auto Refine, Cuckoo* e *Particle Swarm*) nos fatores de segurança associados a superfícies de ruptura não circulares.

2. METODOLOGIA

2.1. Método do Equilíbrio Limite

A metodologia do equilíbrio limite é amplamente utilizada na engenharia geotécnica e tem como fundamento o método das fatias introduzido por Fellenius (1927), no qual a superfície de deslizamento é considerada circular e a massa potencialmente instável é subdividida em fatias. Esse método baseia-se na aplicação das equações da estática do equilíbrio a cada fatia, permitindo a determinação do fator de segurança associado a superfície analisada.

Ao longo do tempo, diversos autores propuseram aprimoramentos a essa abordagem inicial. No presente estudo, são adotados os métodos de Morgenstern e Price (1965) e Sarma (1973). A escolha desses métodos justifica-se pelo fato de ambos permitirem a análise de superfícies de ruptura não circulares e considerarem, de forma simultânea, o equilíbrio de forças verticais e horizontais, bem como o equilíbrio de momentos, conferindo maior robustez aos resultados obtidos. Além disso, esses métodos avaliam explicitamente as forças de interação entre fatias, aspecto que é desconsiderado por outras formulações.

2.2. Algoritmos de Busca de Superfícies Não Circulares

A adoção de superfícies de ruptura não circulares justifica-se pelo fato de que esse tipo de geometria proporciona uma representação mais fiel dos mecanismos de ruptura observados na natureza, especialmente em situações nas quais a superfície de deslizamento intercepta camadas geológicas com propriedades distintas, evidenciando a heterogeneidade do maciço. Nessas condições, a hipótese de superfícies circulares pode não ser adequada para descrever o comportamento real do mecanismo de ruptura.

É nesse contexto que se insere o caso em estudo, no qual a consideração de superfícies não circulares mostra-se mais apropriada para a análise da estabilidade. A Figura 1, ilustra, de forma esquemática, uma situação típica em que a aplicação de superfícies não circulares se revela mais representativa.

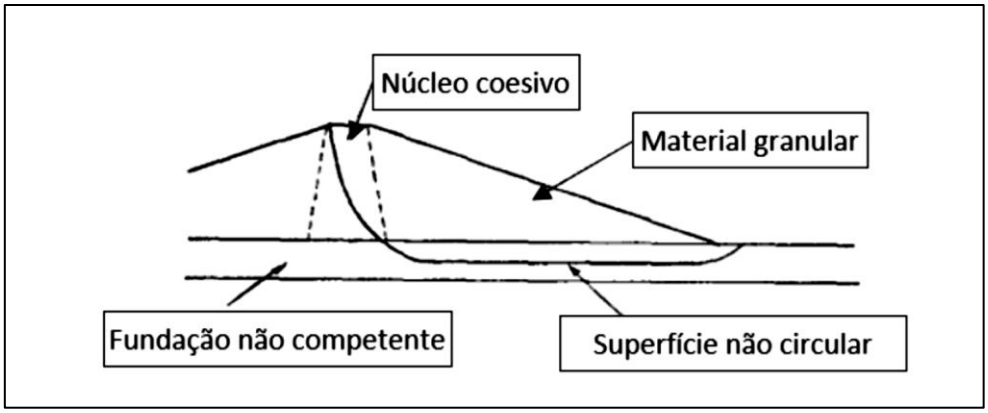


Figura 1. Exemplo de superfície de ruptura não circular. Fonte: Adaptado de Morgenstern e Price (1965).

Diante dessas considerações, procede-se à definição dos algoritmos de busca empregados nesse estudo. Conforme indicado no manual da Rocscience (2016), recomenda-se, em análises de estabilidade, a utilização

de dois ou três algoritmos distintos, de modo a possibilitar a comparação dos resultados obtidos. Assim, neste trabalho, foram selecionados os algoritmos *Auto Refine, Cuckoo* e *Particle Swarm*.

2.2.1. Auto Refine

O algoritmo *Auto Refine* é um método determinístico que, diferentemente dos outros dois algoritmos a serem apresentados, realiza a busca da superfície crítica por meio do refinamento progressivo de uma região de interesse, produzindo sempre o mesmo resultado para condições de contorno idênticas. Inicialmente, a superfície potencial de ruptura é subdividida em seções, a partir das quais são geradas superfícies candidatas e calculados os respectivos fatores de segurança médios. A cada iteração, apenas as divisões associadas aos menores fatores de segurança são mantidas, definindo-se uma nova região de busca mais restrita. Esse procedimento é repetido até que seja atingido o número máximo de iterações, promovendo a convergência sistemática para a superfície crítica.

No caso de superfícies de rupturas não circulares, as superfícies circulares são aproximadas por segmentos lineares definidos por vértices, o que possibilita a representação de geometrias de ruptura mais complexas e compatíveis com as condições reais do maciço.

2.2.2. Cuckoo Search

O algoritmo de otimização *Cuckoo Search*, desenvolvido por Yang e Deb (2010), é um método metaheurístico inspirado na natureza, fundamentado no comportamento parasítico da espécie *Cuckoo*. O algoritmo inicia-se com um conjunto fixo de soluções válidas, que são iterativamente avaliadas e ordenadas de acordo com o fator de segurança.

A cada iteração, novas soluções temporárias são geradas a partir de soluções existentes por meio de um processo de caminhada aleatória, controlado por um parâmetro de passo e por uma distribuição probabilística. Essas soluções temporárias são comparadas com soluções selecionadas aleatoriamente, substituindo-as quando apresentam melhor desempenho. Em seguida, o conjunto de soluções é novamente ordenado, e uma fração das piores soluções é descartada e substituída por novas soluções geradas aleatoriamente, promovendo a exploração contínua do espaço de busca.

2.2.3. Particle Swarm

A Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*), desenvolvida por Kennedy e Eberhart (1995), é um algoritmo metaheurístico inspirado no comportamento coletivo de organismos na natureza, como cardumes de peixes e bando de aves. O algoritmo inicia-se com um conjunto de partículas cujas posições e velocidades são geradas aleatoriamente no espaço de busca.

A cada iteração, as partículas têm suas velocidades e posições atualizadas a partir da combinação de três componentes principais: o termo de inércia, responsável por preservar parte do movimento anterior; o termo cognitivo, associado à melhor posição individual previamente encontrada; e o termo social, relacionado à melhor posição identificada pelo enxame. Esse processo é repetido até que seja atingido um critério de parada, permitindo que o enxame explore globalmente o espaço de soluções e, simultaneamente, convirja progressivamente para regiões associadas a melhores desempenhos.

2.3. Estudo de Caso

Para avaliar a influência dos diferentes algoritmos de busca, foi utilizado uma seção típica de uma barragem de rejeitos em operação, localizada no Brasil. As análises foram realizadas por meio das metodologias de equilíbrio limite de *Morgenstern-Price* e *Sarma***.** Os três algoritmos de busca empregados (*Auto Refine, Cuckoo* e *Particle Swarm*) foram aplicados utilizando as condições de contorno padrão do *software*, com a opção de otimização das superfícies ativada em todas as simulações. Essa escolha teve como objetivo minimizar a influência do usuário sobre o desempenho dos algoritmos de busca avaliados.

Além disso, em todas as análises foram adotados limites nas extremidades do modelo, de modo a permitir que os próprios algoritmos identificassem as superfícies críticas de ruptura, sem a imposição de

regiões preferenciais de busca pelo usuário. Dessa forma, buscou-se reduzir possíveis vieses associados à definição manual das superfícies e assegurar maior comparabilidade entre os resultados.

Para cada seção de análise, foram pesquisadas superfícies de rupturas locais, caracterizadas pela interceptação de um único talude, e superfícies de rupturas globais, caracterizadas pela interceptação simultânea da crista do aterro e da fundação da estrutura.

As análises foram conduzidas considerando condições de carregamento drenado e não drenado. Os parâmetros de resistência dos materiais que compõem o modelo geológico-geotécnico da seção típica foram determinados a partir de ensaios laboratoriais e estão apresentados na Tabela 1. Ressalta-se que, para as porções não saturadas dos materiais constituintes do modelo geológico-geotécnico, não foi considerada a parcela adicional de resistência ao cisalhamento decorrente do mecanismo de sucção matricial.

Tabela 1. Parâmetros de resistência dos materiais utilizado no modelo.

Material	Parâmetros de Resistência			
		Drenado		Não drenado
	$\Upsilon\ (KN/m^3)$	c' (KPa)	Φ' (°)	S_u/σ'_v
Rejeito	18,0	0,0	32,0	0,22
Solo de Fundação 01	18,0	0,0	31,0	0,28
Solo de Fundação 02	20,0	10,0	35,0	-
Aterro	20,0	15,0	32,0	-

No que se refere às condições de fluxo, o reservatório da barragem possui sistema de impermeabilização por meio de geomembranas, assim, foi definida uma superfície piezométrica posicionada no topo da camada de rejeitos do reservatório. Já a superfície freática na fundação da barragem foi estabelecida com base nas leituras registradas pelos piezômetros instalados na fundação da estrutura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro teste realizado na seção típica considerada neste estudo correspondeu a um cenário de carregamento estático, utilizando os parâmetros drenados dos materiais que compõem o modelo. A Figura 2 apresenta os menores fatores de segurança obtidos a partir dos métodos de *Morgenstern-Price e Sarma* para o algoritmo *Auto Refine*, sendo observados valores de 2,12 para a superfície de ruptura local e 2,22 para a superfície de ruptura global.

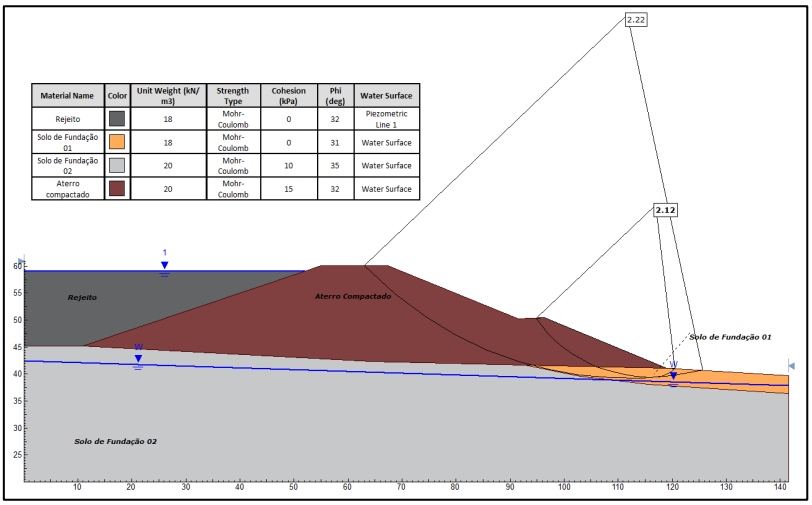


Figura 2. Análise de estabilidade utilizando o algoritmo *Auto Refine* – Cenário drenado.

A Figura 3, por sua vez, representa os menores fatores de segurança obtidos utilizando o algoritmo *Cuckoo*, apresentando também valores de 2,12 para a superfície de ruptura local e 2,22 para a superfície de ruptura global.

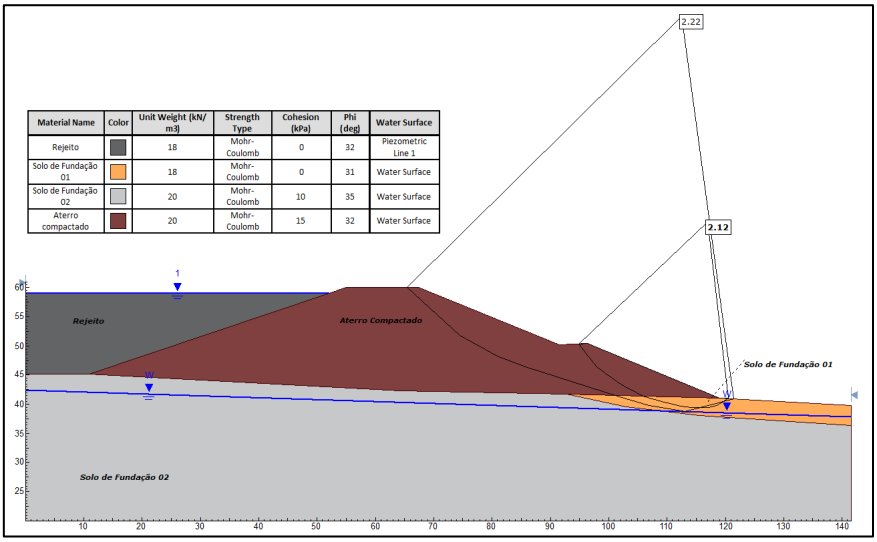


Figura 3. Análise de estabilidade utilizando o algoritmo *Cuckoo* – Cenário drenado.

Por fim, a Figura 4 apresenta os menores fatores de segurança obtidos para o algoritmo *Particle Swarm*, apresentando valores de 2,12 para a superfície de ruptura local e 2,16 para a superfície de ruptura global.

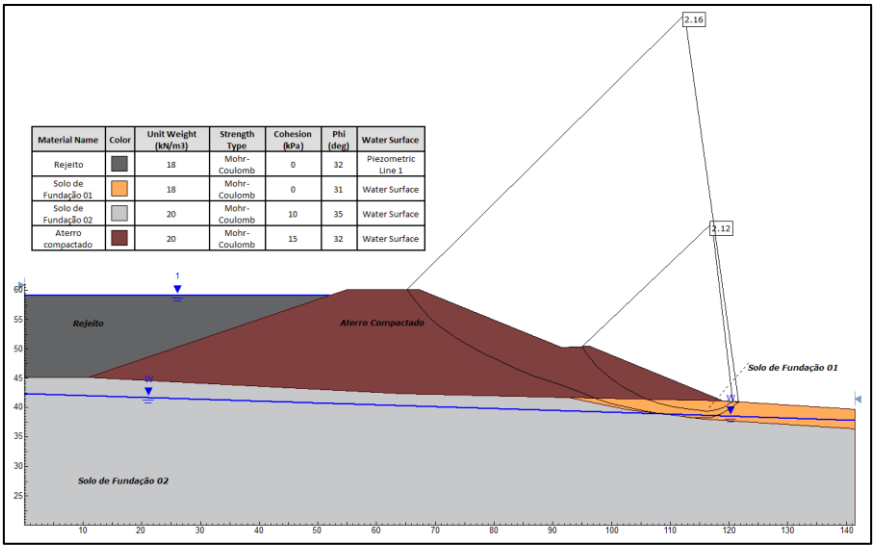


Figura 4. Análise de estabilidade utilizando o algoritmo *Particle Swarm* – Cenário drenado.

A partir das análises, observa-se que, para superfícies de ruptura locais, os três algoritmos de busca apresentaram boa convergência, resultando em valores idênticos de fator de segurança. Uma possível explicação para esse comportamento reside no fato de que, em superfícies de menor volume, a geometria do problema é relativamente simples, o que facilita a identificação da região crítica no espaço de busca. Nessas condições, os diferentes algoritmos conseguem localizar soluções de forma consistente, uma vez que a região associada à ruptura é bem definida.

Por outro lado, ao analisar as superfícies de ruptura globais, nota-se a ocorrência de diferentes valores de fator de segurança obtidos pelos algoritmos *Cuckoo* e *Auto Refine* em comparação ao *Particle Swarm*. Em cenários de maior complexidade geométrica, o *Particle Swarm* tende a se destacar, uma vez que cada

partícula possui a capacidade de explorar diferentes regiões do espaço de busca e compartilhar informações com as demais. Esse mecanismo colaborativo favorece o refinamento das soluções em problemas mais complexos, assegurando maior continuidade e coerência na definição de superfícies de ruptura de maior volume.

Em contrapartida, o algoritmo *Cuckoo*, por depender de saltos aleatórios, tende a apresentar menor eficiência no refinamento de geometrias mais complexas, especialmente quando há uma ampliação no espaço de busca. Frequentemente, o algoritmo *Auto Refine* pode ficar "restrito" em mínimos locais e limitar a exploração em regiões mais distantes no espaço de busca, resultando em um pior refinamento dessas regiões.

O segundo teste realizado constituiu em um cenário de carregamento estático, aplicando-se, desta vez, os parâmetros de resistência não drenada dos materiais nas regiões em que estes se encontram saturados. Novamente, serão apresentadas nas figuras as análises que resultaram nos menores fatores de segurança entre os métodos *Morgenstern-Price e Sarma*. A Figura 5 apresenta os valores dos fatores de segurança obtidos para o algoritmo *Auto Refine* na condição não drenada, sendo observados valores de 1,71 para a superfície de ruptura local e 2,24 para superfície de ruptura global.

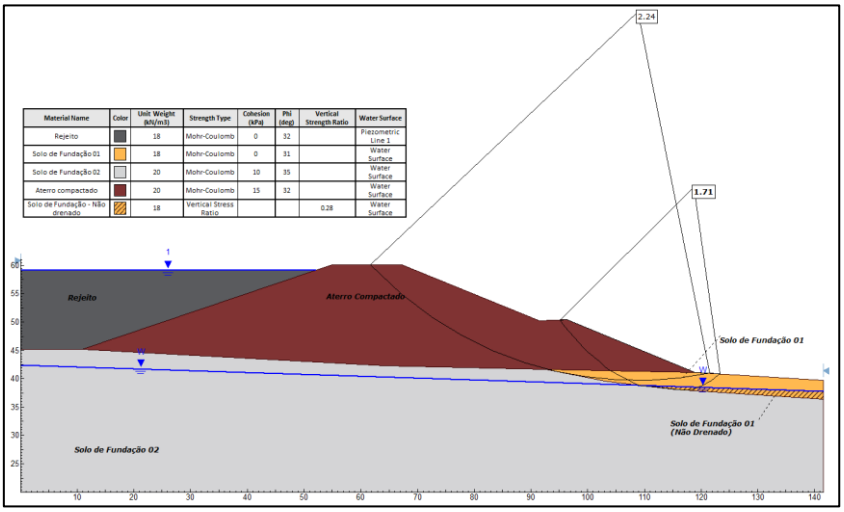


Figura 5. Análise de estabilidade utilizando o algoritmo *Auto Refine* – Cenário não drenado.

A Figura 6, por sua vez, representa os menores fatores de segurança obtidos utilizando o algoritmo *Cuckoo*, no cenário não drenado, obtendo-se valores iguais a 1,70 para a superfície de ruptura local e 2,16 para a superfície de ruptura global.

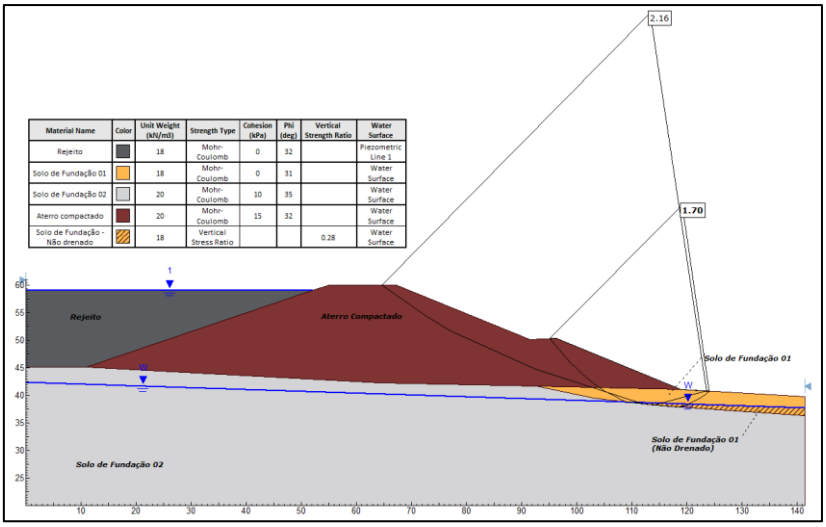


Figura 6. Análise de estabilidade utilizando o algoritmo *Cuckoo* – Cenário não dreado.

Por fim, a Figura 7 apresenta os menores fatores de segurança obtidos para o algoritmo *Particle Swarm*, no cenário não drenado, apresentando valores de 1,70 para a superfície de ruptura local e 1,99 para a superfície de ruptura global.

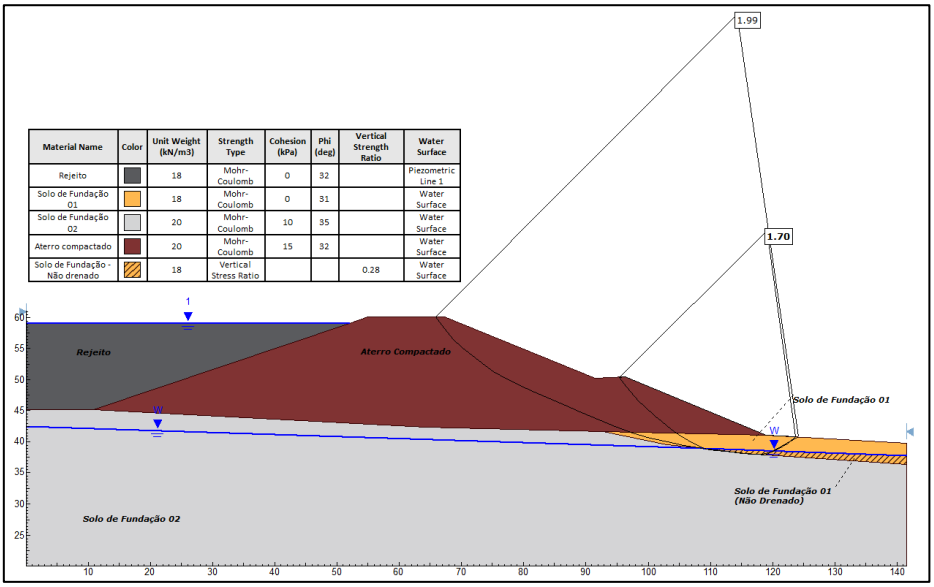


Figura 7. Análise de estabilidade utilizando o algoritmo *Particle Swarm* – Cenário não drenado.

A partir das análises referentes ao cenário não drenado, observa-se novamente boa convergência entre os valores de fator de segurança obtidos para as superfícies de ruptura local, nos três algoritmos de busca avaliados.

Em contrapartida, persistem divergências entre os fatores de segurança calculados para as superfícies de ruptura global. O fator de segurança obtido pelo algoritmo *Auto Refine* para as superfícies de ruptura global mostrou-se superior, inclusive ao valor calculado no cenário drenado. Esse comportamento decorre da tendência do *Auto Refine* a convergir para mínimos locais: como há, nesse caso, uma superfície de ruptura local com fator de segurança inferior, o algoritmo concentrou o refinamento computacional nessa região, restringindo a busca em zonas mais distantes, onde se localizam as superfícies de ruptura global de maior volume. Em consequência, a superfície de ruptura global identificada por esse algoritmo não intercepta a porção do material saturado de menor resistência geotécnica, o que explica o valor elevado do fator de segurança obtido.

Por sua vez, o algoritmo *Particle Swarm* novamente apresentou-se capaz de identificar superfícies de ruptura globais mais refinadas, em razão de seu mecanismo colaborativo, no qual cada partícula é capaz de compartilhar informações com as demais.

A Tabela 2 resume todos os fatores de segurança encontrados utilizando os dois métodos de equilíbrio limite para os diferentes algoritmos de busca testado, considerando ambos os cenários, drenado e não drenado.

Tabela 2. Resumo dos valores obtidos de fatores de segurança nos diversos cenários análisados.

Algoritmos de Busca	Condição	Superfície de ruptura	Fatores de Segurança	
			Morgenstern-Price	*Sarma*
Auto Refine	Drenado	Global / Local	2,22 / 2,12	2,22 / 2,12
	Não Drenado	Global / Local	2,24 / 1,71	2,24 / 1,71
Cuckoo	Drenado	Global / Local	2,22 / 2,12	2,22 / 2,12
	Não Drenado	Global / Local	2,16 / 1,70	2,24 / 1,71
Particle Swarm	Drenado	Global / Local	2,16 / 2,12	2,18 / 2,12
	Não Drenado	Global / Local	1,99 / 1,70	2,01 / 1,70

Por meio da Tabela 2 é possível notar que a diferença nos fatores de segurança obtidos pelo *Particle Swarm,* associados às superfícies de ruptura globais, mostrou-se ainda mais discrepante em relação aos demais algoritmos de busca no cenário de carregamento não drenado.

4. CONCLUSÕES

O objetivo do presente estudo, de identificar as características dos três algoritmos de busca (*Auto Refine*, *Cuckoo* e *Particle Swarm*) e evidenciar como estes influenciam os resultados finais dos fatores de segurança, foi alcançado.

Entende-se que o critério de sucesso de um algoritmo de busca em relação aos demais é a capacidade de buscar menores fatores de segurança, correspondentes a superfícies de ruptura mais críticas e, portanto, à condição mais desfavorável a que a estrutura pode estar sujeita para fins de avaliação da estabilidade.

Além disso, foi possível identificar que, para as superfícies de rupturas local, os três algoritmos apresentam boa convergência. Por sua vez, para as superfícies de ruptura global, o algoritmo *Particle Swarm* apresentou melhor refinamento em relação aos demais.

Adicionalemte, recomenda-se que os resultados, assim como as superfícies de ruptura apresentadas pelo *software*, sejam sempre avaliados criticamente, com base no julgamento de engenharia, evitando interpretações automáticas e simplistas que possam comprometer a segurança das estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bowles, D.; Rutherford, M.; Anderson, L. (2011) Risk assessment of Success Dam, California: evaluation of operating restrictions as an interim measure to mitigate earthquake risk. In: Geo-Risk 2011: Risk Assessment and Management, Reston. *Proceedings [...]*. Reston: ASCE, p. 586-599.

Fellenius, W. (1927) *Stability analysis of earth slopes and retaining walls considering both friction and cohesion and assuming cylindrical sliding surfaces*. Berlin: Ernst.

International Commission On Large Dams – ICOLD (2019) Dams' safety is at the very origin of the foundation of ICOLD. Paris.

Kennedy, J.; Eberhart, R. (1995) Particle swarm optimization. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway. Piscataway: IEEE Press, p. 1942-1948.

Morgenstern, N. R.; Price, V. E. (1965) The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, London, 15 (1), p. 79-93. DOI: https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79.

Rocscience (2016) Critical slip surface search methods in Slide: a guide to search methods in Slide. *RocNews*, Spring. Disponível em: https://static.rocscience.cloud/assets/verification-and-theory/Slide2/Slide-Search-Methods.pdf. Acesso em: 07 fev. 2026.

Sandroni, S. S.; Guidicini, G. (2025) *Barragens de terra e enrocamento*. Porto Alegre: Oficina de Texto. E-book. p. 5. Disponível em: https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-65-86235-62-3/. Acesso em: 07 fev. 2026.

Sarma, S. K. (1973) *Stability analysis of embankments and slopes*. London: Department of Civil Engineering, Imperial College of Science and Technology.

Yang, X. S.; Deb, S. (2010) Engineering optimization by cuckoo search. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 1 (4), p. 330-343.