

# Estudo da Estabilidade de Taludes de Minas a Céu Aberto Usando o Método *BRKGA*

Rudinei M. Oliveira<sup>1</sup>, Maria T. G. Duarte<sup>2</sup>

UEMG, João Molevade, MG

**Resumo.** Este trabalho apresenta uma aplicação do algoritmo genético de chaves aleatórias viciadas (biased random-key genetic algorithm - BRKGA) para resolver o problema de agrupamentos com restrições. A solução desse problema será utilizada para separar os taludes de minas em agrupamentos de elementos similares. Os dados são provenientes de 84 taludes selecionados ao redor do mundo, possuindo 18 parâmetros que detalham suas características. Para montar a matriz de distâncias entre os taludes e separá-los em grupos usando o BRKGA, foi empregada a correlação de Pearson. Pelos resultados obtidos nos testes, a técnica demonstrou eficiência no agrupamento dos taludes.

**Palavras-chave.** BRKGA, Taludes de Minas, Problema de Agrupamentos, Correlação de *Pearson*

## 1 Introdução

Em relação aos empreendimentos de mineração, a lavra a céu aberto e suas atividades assumem uma alta relevância, ocorrendo quando são identificados depósitos de rochas ou minerais em profundidade relativamente pequena em relação à superfície [6]. Este método extrativo não requer a perfuração de túneis e tem como componentes os taludes.

Os taludes servem como base de sustentação ao solo e são considerados como qualquer superfície inclinada em relação à horizontal, delimitando determinado material, como rejeito, rocha, minério e outros. Podem estar situados em barragens de reservatórios de águas, ruas, estradas e em lavras a céu aberto [3]. Estão divididos em dois tipos: talude natural e talude artificial.

Os taludes naturais, também chamados de encostas, são formados por processos metamórficos e ação do intemperismo ao longo de milhares de anos, apresentando superfície plana ou curvilínea. Em comparação, os taludes artificiais são construídos pelo homem, resultantes de escavações, cortes em encostas ou lançamento de aterros, apresentando também duas classificações distintas: talude de corte, formado a partir da retirada de algum material, ou processo de corte; e talude de aterro, formado por deposição de massas de solo. Em geral, a composição de ambos os tipos de taludes é a mesma, diferenciando-se apenas nas características geotécnicas, ou seja, parâmetros baseados no comportamento dos solos e das rochas.

Segundo Demir [4], a estabilidade do talude é descrita pela capacidade do talude em resistir a falhas ou movimentos. O desmoronamento de um talude pode ocasionar diversos riscos. O principal é que, ao ruir para dentro da cava da mina, abalos sísmicos podem ser provocados, rompendo outras estruturas próximas ao local do talude instável. A análise da estabilidade dos taludes é uma etapa crucial em projetos de mineração, pois permite avaliar os riscos geológicos e geotécnicos associados à exploração do bem mineral.

---

<sup>1</sup>rudinei.oliveira@uemg.br

<sup>2</sup>maria.0698030@discente.uemg.br

Como contribuição, este artigo tem como objetivo estudar a estabilidade dos taludes de minas a céu aberto. A metodologia utilizada consiste em uma aplicação do problema de agrupamentos com restrições. Os dados empregados são compostos por 84 taludes de diversas localizações no mundo, abrangendo 18 parâmetros relacionados as suas características.

## 2 Dados

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes de taludes de minas a céu aberto, levando em consideração suas características que afetam a condição de estabilidade [7]. O conjunto de dados é composto por 84 taludes de minas a céu aberto e engloba 18 parâmetros, os quais são descritos a seguir:

- X1: Tipo de rocha;
- X2: Resistência da rocha intacta;
- X3: Designação de qualidade da rocha;
- X4: Intemperismo;
- X5: Regime tectônico;
- X6: Águas Subterrâneas;
- X7: Número de conjuntos;
- X8: Persistência;
- X9: Espaçamento;
- X10: Orientação;
- X11: Abertura;
- X12: Rugosidade;
- X13: Preenchimento;
- X14: Ângulo geral de inclinação;
- X15: Altura total do declive;
- X16: Método de jateamento;
- X17: Precipitação;
- X18: Instabilidade anterior.

Além das variáveis mencionadas nos itens anteriores, são conhecidas as condições de estabilidade de cada talude, podendo ocorrer: ruptura no talude global (OF), ruptura no talude inter-rampa e bancadas (FSB) e taludes estáveis (ST). As minas são compostas de ferro, cobre, chumbo, zinco, diamante, etc., e estão localizadas em países como Brasil, África do Sul, Irã, Estados Unidos, Canadá, Austrália, entre outros.

O conhecimento prévio das condições de estabilidade é importante na criação das restrições *must-link* e *cannot-link*. As restrições foram criadas seguindo a abordagem de Babaki et al. [1]. Inicialmente, dois números aleatórios foram gerados e, em seguida, verificou-se, usando o banco

de dados, se eles pertencem ao mesmo agrupamento ou não. Em caso afirmativo, uma restrição *must-link* é criada. Caso negativo, cria-se uma restrição *cannot-link*. Consulte o fluxograma da criação desse conjunto de restrições na Figura 1.

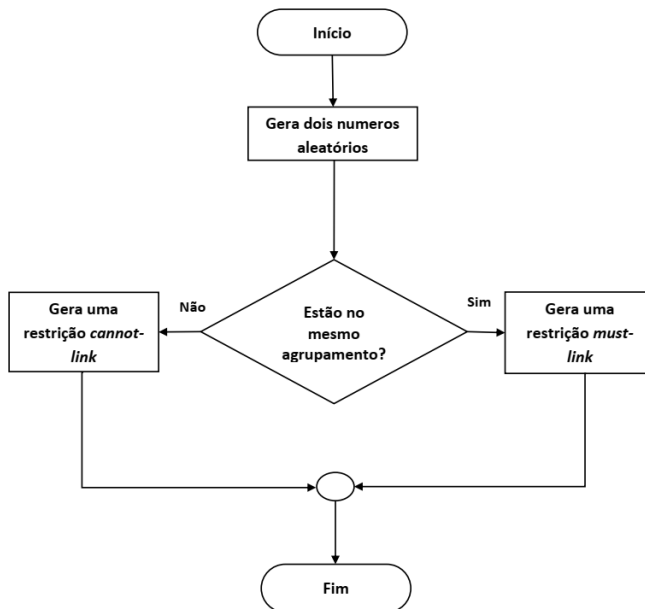


Figura 1: Fluxograma da geração de restrições. Fonte: dos autores.

### 3 Método BRKGA

O método BRKGA, desenvolvido por Gonçalves e Resende [5] para resolver problemas de otimização combinatória, é uma variação do *Random Key Genetic Algorithms* [2]. As soluções são representadas por um vetor com valores compreendidos no intervalo  $[0, 1]$ , gerados aleatoriamente. Esse vetor de chaves aleatórias é convertido na solução do problema em questão, sendo essa conversão realizada pelo decodificador, que é único para cada problema. Após a conversão, a função objetivo é calculada [1]. Esta função tem como objetivo minimizar a distância ( $d$ ) entre os elementos do mesmo agrupamento, dividida pelo número de elementos de cada agrupamento ( $|C|$ ), conforme a Equação 1, onde  $x_1 \neq x_2$  pertencem ao agrupamento  $C$  e  $|C|$  é a cardinalidade do agrupamento. Cada par de pontos em  $C$  é incluído na soma uma vez, sem repetição.

$$Z = \frac{\sum_{x_1, x_2 \in C} d^2(x_1, x_2)}{|C|} \tag{1}$$

Em seguida, verifica-se se a nova solução satisfaz o conjunto de restrições; caso contrário, é aplicada uma penalidade. A aptidão corresponde à soma da função objetivo ( $Z$ ) com uma penalidade, que aumenta proporcionalmente à quantidade de inviabilidade obtida em cada solução analisada (Equação 2), onde  $\mu$  é um valor grande,  $n$  é o número de objetos, e a inviabilidade é o número de restrições não satisfeitas.

$$Aptid\tilde{a}o = Z + \underbrace{(\mu \times n \times inviabilidade)}_{penalidade} \tag{2}$$

A cada geração, a população é ordenada pelo valor da função objetivo. Após, são criados dois grupos: elite ( $p_e$ ) e não-elite ( $p - p_e$ ). No grupo elite, estão as melhores soluções e, no grupo não-elite, as soluções restantes, tal que  $p - p_e > p_e$ .

A nova geração de soluções é formada pela combinação desses dois grupos. Para isso, um pequeno grupo com as melhores soluções ( $p_e$ ) é copiado sem modificação para a população da próxima geração. Além disso, um número pequeno de mutantes ( $p_m$ ) de vetores de chaves aleatórias gerados randomicamente também é introduzido nesta população. O restante da população ( $p - p_e - p_m$ ) é produzido através do cruzamento dos pais dos vetores elites com os não-elites na solução corrente. No método BRKGA, para gerar um filho, são necessários dois pais: um deles é sempre escolhido do grupo elite, e o outro do grupo não-elite ou de toda a população.

Neste trabalho, o BRKGA foi adaptado para resolver o problema de agrupamentos com restrições, sendo a solução aplicada para separar os taludes em agrupamentos de elementos similares. A métrica utilizada para calcular a similaridade entre as instâncias dos taludes de minas foi a correlação de *Pearson*. O método BRKGA é apresentado na Figura 2 a seguir:

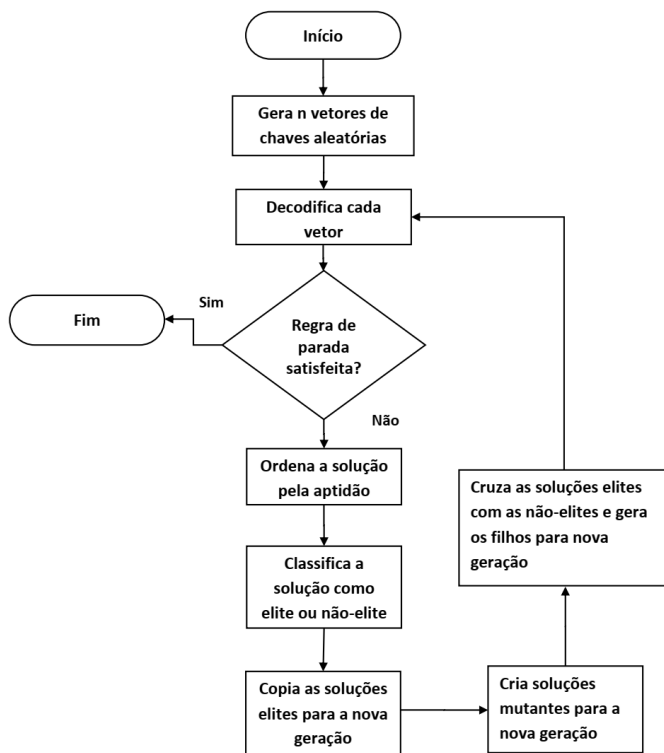


Figura 2: Fluxograma do algoritmo BRKGA, Fonte: Gonçalves e Resende [5].

## 4 Resultados Computacionais

O computador utilizado para a implementação do algoritmo BRKGA foi um PC com processador Intel Core i7, 2.9 GHz, arquitetura de 64 bits e 16 GB de memória RAM. A implementação foi realizada na linguagem C. Os parâmetros específicos utilizados estão apresentados na Tabela 1.

O conjunto de dados contém informações de 84 taludes de minas distribuídos globalmente. A Figura 3 apresenta um exemplo de agrupamentos usando duas variáveis dos dados reais,  $X_1$  e  $X_2$ .

Tabela 1: Parâmetros do BRKGA utilizados nos experimentos.

Parâmetros	valor
$p$	500
$p_e$	0.60
$p_m$	0.20
$\rho_e$	0.60

A variável X1 representa o tipo de rocha, e a variável X2 representa a resistência da rocha intacta. Na figura, é possível observar a relação entre X1, X2 e a coluna de estabilidade (status).

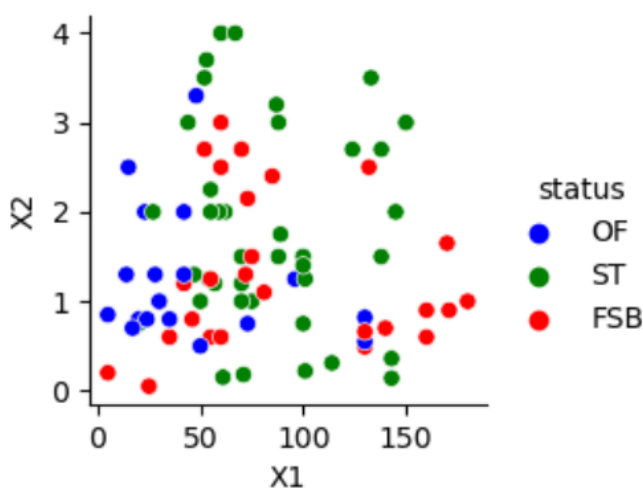


Figura 3: Exemplo de três agrupamentos usando os dados reais. Fonte: dos autores.

As restrições foram obtidas empiricamente, utilizando os dados reais da seção de dados (2). São classificadas como estáveis, ruptura do talude de bancada (inter-rampa) e ruptura global. A coluna  $\#R$  indica o número total de restrições, enquanto as colunas *must-link* (ML) e *cannot-link* (CL) indicam a quantidade de cada tipo de restrição. A quantidade de restrições geradas e utilizadas neste trabalho varia de 5 a 500 e estão na Tabela 2.

Tabela 2: Número de restrições *must-link* (ML) e *cannot-link* (CL).

$\#R$	ML	CL
5	4	1
50	19	31
100	35	65
200	67	133
300	109	191
400	145	255
500	179	321

A Tabela 3 apresenta os resultados da melhor solução e as médias obtidas em 10 execuções do algoritmo BRKGA. A correlação de Pearson foi utilizada para montar a matriz de distância entre os taludes para cada conjunto de restrições (coluna #R). A coluna ARI mostra o índice de similaridade entre a solução real e aquela obtida pelo BRKGA. Quanto mais próximo de 1.00, mais similar é a solução. Se o valor for 1.00, significa que a solução é idêntica à original. A coluna FO mostra os valores da função de Aptidão (Equação 2). A coluna Tempo, por sua vez, representa o tempo (em segundos) de processamento para obter a solução. Por fim, a coluna Inv. apresenta o número de inviabilidades, ou seja, a quantidade de restrições que não foram respeitadas.

De modo geral, analisando as melhores soluções (lado esquerdo da Tabela 3), é possível notar que até 100 restrições (coluna #C), os resultados de ARI não foram bons. Ao acrescentar mais restrições nos testes, os resultados melhoraram, obtendo o valor de 1.00 para o índice ARI de 300 a 500 restrições. Analisando as médias (lado direito da Tabela 3) os resultados ficam melhores a partir de 300 restrições, obtendo os valores de 0.88, 0.97 e 1.00 para as restrições de 300 a 500.

Em relação às inviabilidades, para as melhores soluções houve apenas cinco restrições não respeitadas com 100 restrições e três para 200 restrições (Coluna Inv.). Analisando as inviabilidades nas médias das 10 execuções, houve no máximo 14 quando se usou 200 restrições.

Tabela 3: Resultados da similaridade da melhor solução e média para 3 agrupamentos

#R	Melhor solução				Inv.	Média				
	ARI	FO	Tempo	Inv.		#R	ARI	FO	Tempo	Inv.
0	0.01	18.66	5.89	-	0	0.01	18.66	5.39	-	
5	0.06	17.22	2.19	0	5	0.02	17.26	3.65	0	
50	0.07	22.22	3.77	0	50	0.03	22.44	3.83	0	
100	0.26	22.53	6.76	5	100	0.08	22.87	6.40	3.70	
200	0.76	22.06	6.83	3	200	0.44	22.42	6.98	14	
300	1.00	21.77	5.57	0	300	0.88	22.04	6.93	6	
400	1.00	21.77	5.07	0	400	0.97	21.91	5.41	2	
500	1.00	21.77	5.34	0	500	1.00	21.91	5.83	0	

## 5 Considerações Finais

Como contribuição, este trabalho apresenta uma proposta para auxiliar na identificação de taludes com potencial risco de rompimento. O método consiste na aplicação da solução do problema de agrupamento com restrições para a separação dos taludes, de acordo com a sua similaridade, utilizando o algoritmo BRKGA. Os testes foram realizados com um conjunto de dados composto por 84 taludes de minas, cada um caracterizado por 18 parâmetros, localizados em diversos países ao redor do mundo [7].

Ao analisar os resultados obtidos na Seção 4, pode-se afirmar que foram satisfatórios, alcançando bons índices de ARI a partir de 200 restrições nas melhores soluções e a partir de 300 restrições nas médias. Vale ressaltar que a abordagem utilizada neste trabalho pode ser considerada semi-supervisionada. Assim, não é necessário o conhecimento da condição de estabilidade de todos os taludes, mas apenas de alguns. Dessa forma, espera-se que esta abordagem possa contribuir para os estudos relacionados a taludes, especialmente no que diz respeito aos riscos de sua estabilidade.

## Agradecimentos

Bolsa PQ/UEMG, edital 10/2022 da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG).

## Referências

- [1] B. Babaki, T. Guns e S. Nijssen. “Constrained Clustering Using Column Generation”. Em: **Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming**. Vol. 8451. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, 2014, pp. 438–454. DOI: 10.1007/978-3-319-07046-9\_31.
- [2] J. C. Bean. “Genetic Algorithms and Random Keys for Sequencing and Optimization”. Em: **ORSA Journal on Computing** 6.2 (1994), pp. 154–160.
- [3] J. Cristal. **O que são os Taludes usados na Mineração**. Online. Acessado em 14/02/2024, <https://cristaljr.com/taludes-mineracao/>.
- [4] S. Demir e E. Sahin. “Application of state-of-the-art machine learning algorithms for slope stability prediction by handling outliers of the dataset”. Em: **Earth Science Informatics** (jul. de 2023). DOI: 10.1007/s12145-023-01059-8.
- [5] G. J. F. Gonçalves e M. G.C. Resende. “Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization”. Em: **Journal of Heuristics** 17.5 (2011), pp. 487–525.
- [6] M. Lopes. **Estabilidade dos Taludes na Mineração**. Online. Acessado em 14/02/2024, <https://tecnicoeminerao.com.br/estabilidade-de-taludes-na-mineracao>.
- [7] M. Z. Naghadehi, R. J., R. KhaloKakaie e S. M. E. Jalali. “A new open-pit mine slope instability index defined using the improved rock engineering systems approach”. Em: **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 61 (2013), pp. 1–14. ISSN: 1365-1609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.01.012>.