

ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTABILIDADE DE MÉTODOS DE ALTEAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITOS

ÉRICA LISBOA NUNES¹, BERNARDO ANTONIO SILVA RAMOS²

¹Enga. Civil, Egressa UNIEURO, Brasília – DF, ericalisboanunes@gmail.com;

²Me. em Engenharia Civil, Prof. UNIEURO, Brasília – DF, bernardoramos@gmail.com;

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
15 a 17 de setembro de 2021

RESUMO: Este artigo tem como objetivo analisar e comparar a influência de métodos de alteamento na estabilidade dos taludes de jusante de barragens de contenção de rejeitos. O estudo foi desenvolvido com auxílio do programa computacional GeoStudio 2020 em específico: Seep/W para análise de percolação e Slope/W para análise de estabilidade. O fator de segurança de referência neste trabalho é 1,50 conforme preconizado pelo CBDB (2001). Os resultados demonstraram que alteamento à montante e à linha de centro apresentaram fatores de segurança menores do que o estipulado devido à instabilidade inerente do material componente da praia de rejeito a qual serviu de base para a parcela à montante dos alteamentos. Já o alteamento à jusante tende a demonstrar ser mais eficiente, por conta da sua execução ser controlada e todo o corpo da barragem ser compactado, isso pode ser visto no resultado da análise de estabilidade de talude, onde teve um fator de segurança maior que o mínimo.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de rejeito, métodos de alteamento, estabilidade de taludes

COMPARATIVE ANALYSIS OF SLOPE STABILITY OF DESIGN METHODS OF TAILINGS DAMS

ABSTRACT: This article aims to analyze and compare the influence of design methods on the stability of the downstream slopes of tailings dams. The study was developed using the software GeoStudio 2020, specifically: Seep/W for percolation analysis and Slope/W for stability analysis. The reference safety factor in this work is 1.50 as recommended by the CBDB (2001). The results demonstrated that upstream construction method and centerline construction method presents safety factor smaller than stipulated due to the inherent instability of the tailings which is the foundation for the upstream portion of the embankment. The downstream construction method tends to be more efficient, because its execution is controlled and the entire body of the dam is compacted, this can be seen in the result of the slope stability analysis, where it had a greater safety factor than the Minimum.

KEY WORDS: Tailings dam, design methods, slope stability

INTRODUÇÃO

O Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2020) informa que o setor da mineração apresentou um crescimento de 36,2% no ano de 2020 em relação ao ano de 2019 e que a produção de minério ferro representa 66,36% da participação no faturamento do setor neste mesmo ano. Através do beneficiamento é possível separar, por diversos processos, o minério de ferro do material que não possui valor comercial. Este material origina o rejeito de minério ferro que é contido pela barragem de contenção de rejeitos. A Agência Nacional de Mineração – ANM (2021) apresenta que das 435 barragens submetidas ao Plano Nacional de Segurança de Barragens – PNSB, 74,7% apresentam Categoria de Risco – CRI baixo (325 barragens), 13,3% apresentam CRI médio (58 barragens) e 12% apresentam CRI alto (52 barragens).

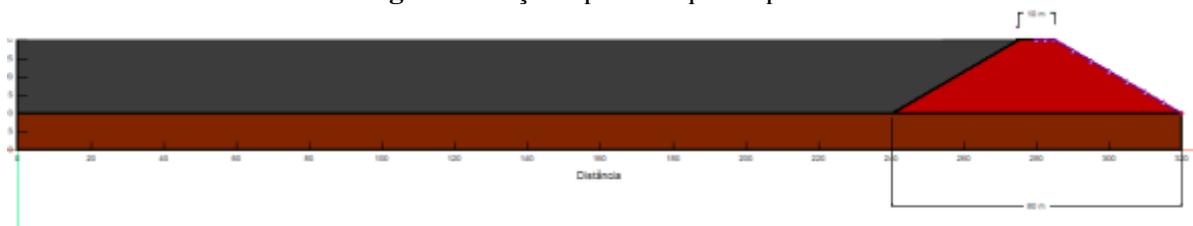
A partir do momento em que a capacidade operacional da barragem de contenção de rejeitos é atingida, é necessário que o dique de partida seja elevado gradualmente, com fim de acumular mais resíduos. Este processo é denominado de alteamento e pode ser executado geralmente por três formas diferentes: alteamento à jusante, alteamento à montante e alteamento de linha de centro (ANA, 2021). Devido às rupturas das barragens de contenção de rejeitos em Mariana/MG em 2015 e Brumadinho/MG em 2019, ambas construídas pela técnica de alteamento à montante, a Lei nº 14.066 (BRASIL, 2020) foi publicada proibindo a construção ou o alteamento de barragem de mineração pelo método à montante.

Pelo contexto nacional da segurança deste tipo de barragem, percebe-se que os métodos de alteamento se relacionam diretamente com a estabilidade dos taludes das barragens de contenção de rejeitos. Dessa forma, esse trabalho propõe-se analisar e comparar as características de cada método de alteamento a fim de identificar a influência dos métodos de alteamento na estabilidade do barramento.

MATERIAL E MÉTODOS

Este artigo apresenta uma abordagem qualitativa cujo objetivo é analisar e comparar a estabilidade dos taludes de barragens de contenção de rejeitos alteadas à montante, à jusante e à linha de centro. As análises propostas serão desenvolvidas com auxílio do programa computacional GeoStudio 2020. Em específico, a análise do fluxo da água no barramento e a análise de estabilidade dos taludes do barramento considerando a fase de operação serão realizadas, respectivamente, pelos programas computacionais Seep/W e Slide/W, componentes do GeoStudio 2020. A partir do trabalho de Araújo (2006), considerou-se inicialmente um dique de partida com 20 m de altura, 80 m de base e 10 m de crista conforme ilustrado na Figura 1. Este dique servirá de base para os alteamentos subsequentes que serão realizados em três incrementos de cinco metros para os três tipos de alteamento.

Figura 1: Seção-tipo do dique de partida



A Tabela 1 apresenta os parâmetros geotécnicos considerados nas análises de percolação e estabilidade realizadas para os três tipos de alteamento já citados. Optou-se por buscar os valores na literatura a fim de que se considerasse parâmetros fidedignos às propriedades dos rejeitos de minério de ferro.

Tabela 1: Parâmetros geotécnicos dos materiais utilizados no estudo

Material	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kN)	Ângulo de atrito (°)	Coefficiente de permeabilidade – K (m/s)	Kv/Kh
Solo do dique inicial	19,0	10,0	27,3	2,50E-08	0,1
Solo de fundação	20,0	20,0	30,0	1,50E-06	1,0
Solo dos alteamentos	19,0	10,0	42,0	5,00E-07	0,3
Rejeito lançado	18,0	0,0	20,0	5,00E-06	1,0
Rejeito lançado compactado	18,0	0,0	32,0	3,20E-06	1,0
Filtro/Dreno	19,0	0,0	45,0	1,00E-03	1,0
Enrocamento	22,0	0,0	45,0	0,01	1,0

Fonte: Adaptado de Albuquerque Filho (2004); Araújo (2006); Pereira (2013); e Ferreira (2018).

O estudo foi iniciado através da utilização do programa computacional Seep/W para definir a linha piezométrica, comportamento do fluxo de água dentro da barragem e a distribuição de poropressão. Esta modelagem foi realizada baseando-se na condição saturada dos materiais componentes do barramento, regime permanente e carga hidráulica máxima do reservatório afastada 150 m do talude de montante devido a consideração de uma praia de rejeito formada nesta região.

Nos métodos de alteamento à jusante e à linha de centro, adotou-se filtros verticais, levados até a cota máxima do nível d'água do reservatório, e filtros horizontais ao longo da base do barramento até o pé do talude de jusante. Ambos com 1 m de espessura. No caso do alteamento à montante, adotou-se enrocamento no pé do talude de jusante.

Ao finalizar as análises de percolação, os resultados foram transferidos para o Slope/W para realização das análises de estabilidades dos taludes de jusante. Para tal, adotou-se o critério de Morgenstern-Price e fator de segurança de 1,5 relacionado ao talude de jusante submetido a percolação permanente com o reservatório na cota máxima (CBDB, 2001).

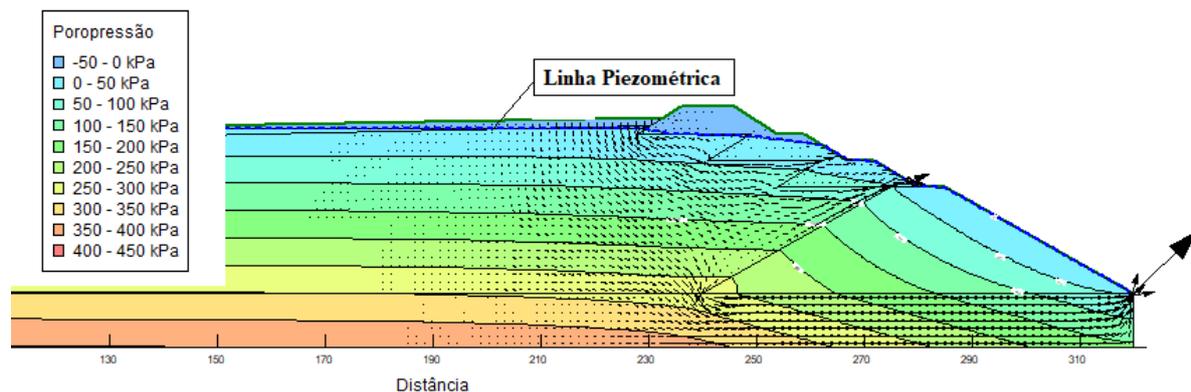
A primeira análise a ser realizada foi da percolação, a qual tinha por finalidade definir a linha piezométrica, comportamento do fluxo de água dentro da barragem e a distribuição das pressões. Logo após a obtenção desses resultados, eles foram acoplados no SLOPE/W para realização da análise da estabilidade do talude que irá determinar o Fator e Segurança pelo método de Morgenstern-Price, baseado na teoria do equilíbrio limite.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Alteamento à montante

Conforme pode ser visto na Figura 2, os vetores de fluxo indicam o sentido da percolação, que vai do talude de montante para a jusante, tanto no maciço quanto na fundação. Além disso, é possível observar que a linha piezométrica infiltra no pé do talude de montante do último alteamento e segue ao longo de todo o maciço, podendo aflorar no talude de jusante do primeiro alteamento.

Figura 2: Análise de percolação - Alteamento à montante



O fato de a água poder aflorar no talude de jusante é preocupante, pois devido à força de percolação da água, pode ocorrer a formação do fenômeno piping, o que compromete a segurança da barragem. O comportamento apresentado pelo fluxo de água reforça a importância do projeto e execução de filtros e drenos em barragens a fim de impedir a saturação e fluxo de água no talude de montante. O afloramento do nível d'água no barramento reflete em sua estabilidade conforme apresentado na Figura 3.

Após análise, obteve-se fator de segurança de 0,824 cuja superfície de ruptura engloba todos os alteamentos e grande parte do dique de partida. Pode-se justificar a localização da superfície de ruptura abaixo dos alteamentos pelo fato de parte de suas bases estarem apoiadas na praia de rejeito formada pelo alteamento anterior caracterizado por ser composta de material não consolidado. É interessante também notar que o solo de fundação não foi mobilizado durante a ruptura, fato este que pode ser explicado pelo limite imposto ao programa para análise das superfícies de ruptura.

Alteamento à linha de centro

Conforme pode ser visto na Figura 4, a existência de drenos impacta significativamente na determinação da linha freática. Percebe-se que a linha freática não atinge os alteamentos ficando exclusivamente na praia de rejeitos e dique de partida. Este comportamento é resultado da ação dos drenos instalados na estrutura. Principalmente, o filtro horizontal na base do dique de partida. O que reforça a importância deste filtro ser bem dimensionado.

Após análise de estabilidade, obteve-se fator de segurança de 1,413 conforme apresentado na Figura 5. Nota-se que a superfície de ruptura transpassa tanto o dique de partida quanto os alteamentos. Neste caso, acredita-se que aumentado a inclinação dos taludes de jusante pode-se alcançar o fator de segurança imposto pela CBDB (2001).

Figura 3: Análise de Estabilidade - Alteamento à montante

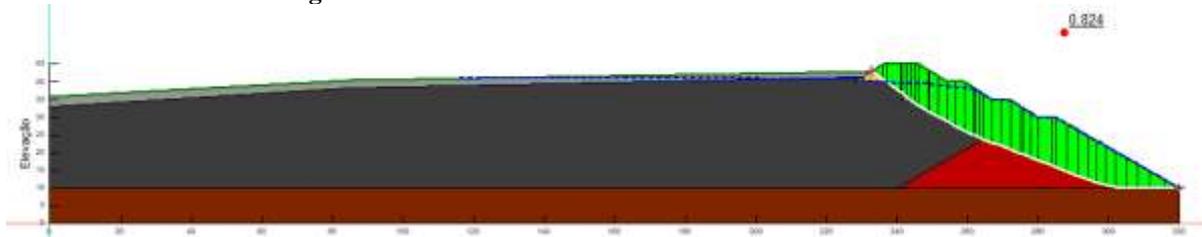


Figura 4: Análise de percolação - Alteamento à linha de centro

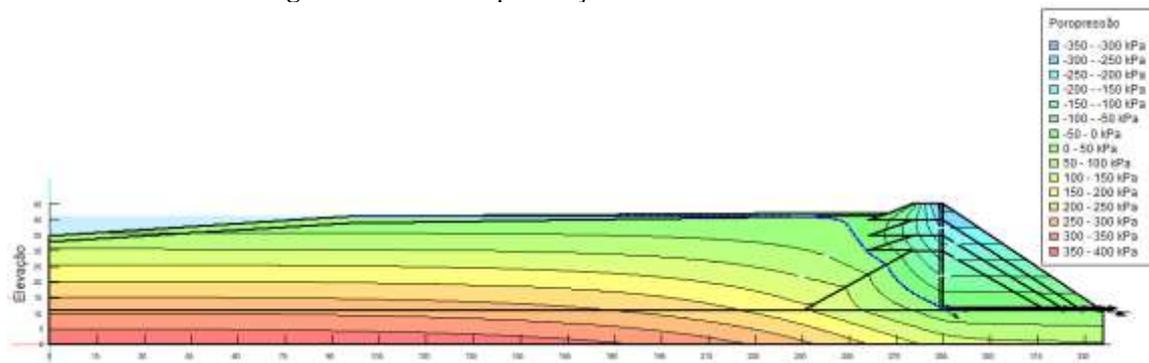
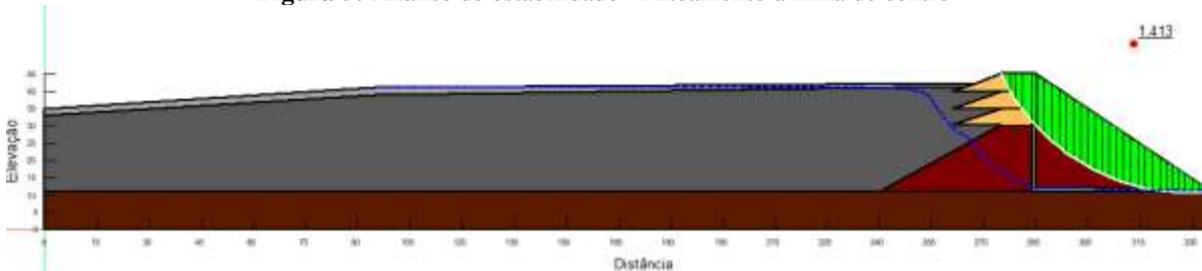


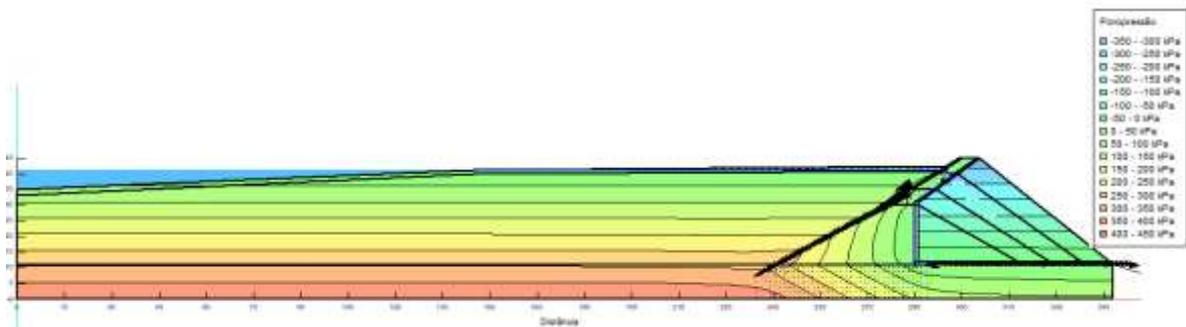
Figura 5: Análise de estabilidade - Alteamento à linha de centro



Alteamento à jusante

Conforme pode ser visto na Figura 6, a continuação da drenagem interna nos alteamentos representada pelos filtros inclinados é de grande importância para não permitir a saturação dos taludes a jusante conforme pode ser visto também na Figura 4.

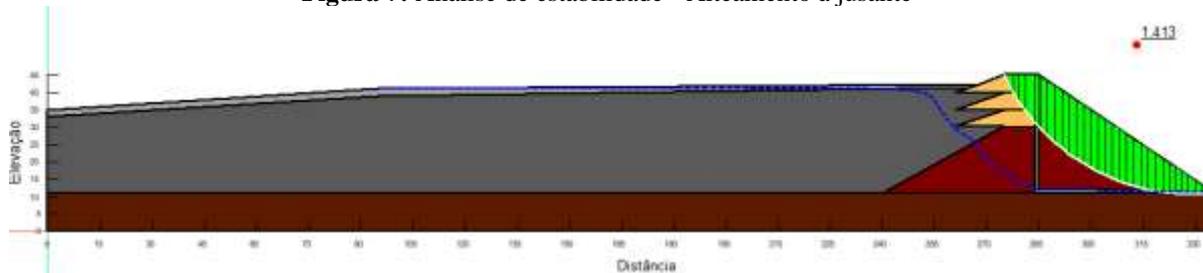
Figura 6: Análise de percolação - Alteamento à jusante



Após análise de estabilidade, obteve-se fator de segurança de 1,620 conforme apresentado na Figura 7. Este fator satisfaz a fator de segurança mínimo imposto pelo CBDB (2001) e pode ser

explicado não somente pelo controle de percolação dentro do barramento pelos drenos bem como pela geometria resultante após alteamentos. Ou seja, os alteamentos foram executados sobre superfície compactada e com controle tecnológico em função do seu método de execução. Ou seja, elimina as incertezas de apoio das bases dos alteamentos existentes nos métodos de alteamento à linha de centro e, principalmente, à montante.

Figura 7: Análise de estabilidade - Alteamento à jusante



CONCLUSÃO

Comparando os métodos construtivos, o alteamento a jusante tende a demonstrar ser mais eficiente, pois traz mais segurança e estabilidade à barragem, de modo que, quando se faz a compactação dos rejeitos usados no alteamento, diminuem-se os índices de vazios e, conseqüentemente, diminui-se também a possibilidade de ocorrerem recalques, além de ser um método que tem a possibilidade de controle construtivo.

O método a montante ser construído sobre o rejeito depositado nos leva a ter uma maior dificuldade no controle de suas propriedades geotécnicas do local em que se realiza o alteamento. Assim, tende a apresentar baixa resistência, podendo provocar os mecanismos de ruptura.

Quanto ao método de linha de centro, trata-se de um alteamento intermediário e tem menos risco que o de montante e mais que a jusante. Um dos pontos positivos é que ele possui facilidade na sua execução, que tem a presença de dreno na vertical e a metade do alteamento ocorre pelo método a jusante.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque Filho, L. H. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone. Minas Gerais: UFOP, 2004. 194f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia).
- ANA. Agência Nacional de Mineração. 2021. Relatório de segurança de barragens 2020. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/>. Acesso em: 12 de julho de 2021.
- ANM. Agência Nacional de Mineração. 2021. II Relatório de segurança de barragens de mineração 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/>. Acesso em: 12 de julho de 2021.
- Araújo, C. B. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2006. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia).
- BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 de setembro de 2020.
- CBDB. Comitê Brasileiro de Barragens. Guia básico de segurança de barragens. São Paulo: CBDB, 2001. 77 f.
- Ferreira, D. B. Liquefação de rejeitos de minério de ferro – estudo de caso: sistema pontal em Itabira/MG. Minas Gerais: UFOP, 2018. 117 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia).
- IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. 2020. Infográfico: Dados do setor mineral – 2020. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/06/Infografico-Mineracao-em-Numeros-2020-NOVO.pdf>. Acesso em: 12 de julho de 2021.
- Pereira, T. dos S. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra. Rio Grande do Sul: UFSM, 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).