

Influência da Colmatação de Filtro no Desempenho de Barragem em Condição de Operação

Luana Aparecida Silva

Estudante de Engenharia Civil, CEFET-MG, Curvelo, Brasil, luanasil412@gmail.com

Lucas de Freitas Souza

Estudante de Engenharia Civil, CEFET-MG, Varginha, Brasil, lucas.f.souza@hotmail.com

Armando Belato Pereira

Professor Doutor, CEFET-MG, Varginha, Brasil, armandobelato@cefetmg.br

Alexandre Magno Alves de Oliveira

Professor EBTT, IFSULDEMINAS, Campus Pouso Alegre, Brasil, alexandre.oliveira@ifsuldeminas.edu.br

Thiago Bomjardim Porto

Professor Doutor, CEFET-MG, Curvelo, Brasil, thiagoportoeng@gmail.com

RESUMO: As barragens de terra são estruturas geotécnicas complexas, concebidas para a contenção, retenção e armazenamento de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos. A estabilidade da estrutura está relacionada a diversos fatores, dentre eles a drenagem do fluido que percola no interior do maciço geotécnico. O sistema de drenagem interno é composto por filtros que desembocam em um dreno de pé. Em condições de operação, os filtros presentes nas barragens podem sofrer colmatação, devido ao acúmulo de partículas em seus vazios. Utilizando-se os programas SEEP/W e SLOPE/W da GeoStudio, realizou-se a modelagem numérica da seção transversal típica da barragem do açude de Benguê (altura de 24m), localizada na cidade de Aiuaba no estado do Ceará. Verificou-se o comportamento da estrutura em diferentes estágios de avanço da colmatação. Na análise realizada, identificou-se uma redução do fator de segurança (FS) em razão da progressão da colmatação e consequente saturação do maciço geotécnico da barragem. O funcionamento com filtro não colmatado teve o fator de segurança (FS) de 1,85, valor este, acima do que é exigido pelas recomendações de projeto (FS = 1,5). Já com o sistema de drenagem inoperante, teve o valor de FS correspondente a 0,96, apresentando instabilidade da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens; filtros; colmatação; estabilidade de talude; percolação.

ABSTRACT: Earth dams are sophisticated engineering structures designed for the containment, retention, and storage of liquid substances or mixtures of liquids and solids. The stability of the structure is related to various factors, including the drainage of the fluid that percolates inside the geotechnical massif. The internal drainage system is made up of filters that flow into a footing drain. Under operating conditions, the filters present in the dams can become clogged due to the accumulation of particles that are not fine enough in the empty spaces in the soil. Using GeoStudio's SEEP/W and SLOPE/W programs, numerical modeling was carried out of the typical cross-section of the Benguê dam (height 24m), located in the city of Aiuaba in the state of Ceará. The behavior of the structure at different stages of clogging progression was verified. The analysis revealed a reduction in the factor of safety (FS) due to the progression of clogging and consequent saturation of the dam's geotechnical massif. Operation with the filter not clogged had a factor of safety (FS) of 1.85, higher than that required by the design recommendations (FS = 1.5), and with the drainage system inoperative had a FS value of 0.96, showing instability of the structure.

KEYWORDS: Dams; filters; clogging; slope stability; seepage.

1 INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas complexas que segundo o Sistema Nacional de Barragens (Brasil, 2021) e a USACE (2004) atuam para conter ou acumular uma certa substância/mistura líquida e sólida, podendo ser

construída dentro de um curso de água permanentemente ou por um determinado tempo. Para garantir a estabilidade desse tipo de estrutura diversas variáveis devem ser consideradas, entre elas o sistema de drenagem interno. O filtro é um componente importante para garantir uma boa durabilidade da barragem, impedindo a saturação do talude a jusante.

A drenagem interna eficaz da água que percola no maciço pode ser impedida pelo processo de colmatagem dos filtros, que se dá pela deposição de materiais dos espaços nos vazios destinados a passagem do fluido. Com o passar do tempo os barramentos podem sofrer diversos danos devido a obstrução dos elementos de drenagem, isto impede o controle da percolação de água interna, essa situação pode influenciar no surgimento de patologias, que por sua vez, podem levar ruptura da estrutura. De acordo com *United States Bureau of Reclamation, USBR* (1984), cerca de 50% dos acidentes com barragens envolvem erosões ocasionadas por entubamento.

A garantia da durabilidade da vida útil da estrutura está intrinsecamente relacionada as medidas de controle de segurança, que representa o comprometimento com as exigências de desempenho previstos, a fim de reduzir os efeitos de possíveis acidentes (PERINI, 2009). Diante disso, faz-se relevante considerar o processo que pode levar a ineficiência do sistema de drenagem e a influência desse processo na estabilidade e segurança da estrutura.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO E OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da colmatagem dos filtros de barragens a partir de uma modelagem computacional. Para simular a colmatagem do filtro foram utilizadas 4 diferentes situações para a barragem/filtro (operante, quase colmatado, colmatado, mas com coeficiente mínimo e inoperante). Assim, pode-se avaliar a percolação de água no interior do barramento e como esta situação influencia no coeficiente de segurança e, conseqüentemente na estabilidade da barragem.

A modelagem mencionada foi realizada nos softwares do *GeoStudio 2023*, por meio do teste/estudantil, *SEEP/W* e *SLOPE/W*, para analisar a estabilidade do talude jusante e a análise de fluxo interno, respectivamente. Foi utilizado a NBR 11682 (ABNT, 2009) para compreensão de alguns termos relacionadas à estrutura de barramento.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Barragem Benguê

A barragem Benguê está situada na região sul do estado do Ceará, no município de Aiuaba, a estrutura faz parte da bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe e barra o Riacho do Umbuzeiro. O açude tem uma capacidade de 19,56 m³ de água, o barramento foi construído em 2000, com intuito de promover o abastecimento de água ao município. A estrutura possui 480 m de extensão pelo coroamento, a seção transversal adotada para a análise está representada na Figura 1.

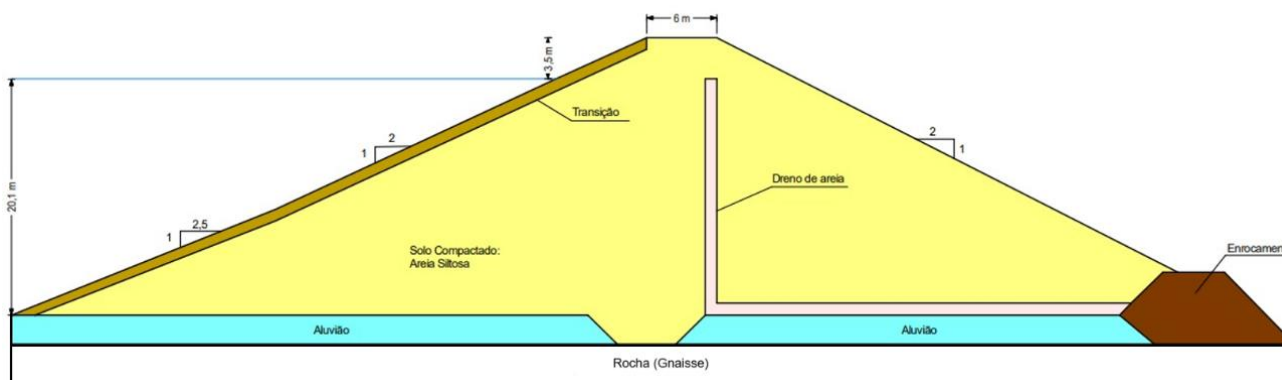


Figura 1. Seção transversal da barragem de terra.

Fonte: Adaptado de SRHCE (2018).

2 PARÂMETROS ADOTADOS

2.1 Parâmetros hidráulicos adotados para análises de fluxo

Para realizar essas análises, como demonstrado anteriormente, a geometria da seção adotada foi que apresentou maior seção transversal da estrutura. Todos os parâmetros de entrada foram fornecidos pela Secretária de Recursos Hídricos do Ceará. Para essa estrutura foram adotados a homogeneidade dos materiais de cada elemento.

Os coeficientes de permeabilidade (ou condutividades hidráulicas) dos materiais foram obtidos pelos ensaios do permeâmetro a carga constante e do permeâmetro a carga variável, esses dados foram disponibilizados nos relatórios básicos, realizados durante a fase de projeto da estrutura. Para os materiais do maciço geotécnico e do filtro foram considerados os valores médios presentes na Tabela 1.

Tabela 1. Condutividade hidráulica dos materiais que compõe a barragem.

Componente	Material	k (m/s)
Maciço	Areia Siltosa	$1,40 \times 10^{-8}$
Transição	Pedregulho	$1,00 \times 10^{-3}$
Filtro	Areia	$1,30 \times 10^{-6}$
Enrocamento	Pedregulho	$1,00 \times 10^{-3}$
Fundação superficial	Cascalho Arenoso	$3,70 \times 10^{-6}$

Fonte: SRHCE (1998).

A anisotropia hidrogeológica do material compactado considerada por Massad (2010) e adotada para esse trabalho assumiu uma condutividade hidráulica na direção X (k_x) 9 (nove) vezes maior que a condutividade hidráulica na direção Y (k_y). A perda de carga pode ser avaliada por meio das linhas equipotenciais no sentido de montante a jusante da barragem de terra, podendo-se, assim, prever o comportamento da linha freática (fluxo de água no barramento). Para esse trabalho foi avaliado o comportamento da linha freática frente as mudanças referentes a redução da permeabilidade dos filtros de drenagem.

2.1.1 Avaliação da Colmatação

A partir da formulação apresentada por Darcy (1856), tem-se a Condutividade Hidráulica dos solos (k), que é uma propriedade que expressa a capacidade de movimentação da água em um solo e é de extrema importância para avaliação da colmatação. Para Bacchi e Reichardt (1988), o fator de redução está relacionado a condutividade hidráulica, diminuindo este parâmetro conforme o fator aplicado. Para esse trabalho, o objetivo não será explicar a causa da colmatação dos drenos, mas assim, avaliar, numericamente, a interferência relativa que esse processo pode causar a estabilidade da estrutura em regime de operação.

A colmatação irá representar a ineficiência total do filtro, para essa situação a permeabilidade será anulada, para que não ocorra fluxo no interior desse elemento, porém é considerado que tal comprometimento não ocorre de forma imediata, levando a consideração do processo inicial e seus efeitos no fator de segurança.

Será avaliado, portanto, algumas situações de comprometimento da drenagem, mas enfatizando a situação mais crítica que advém do processo de colmatação, que seria a sua condição final, no qual representa um comprometimento total da drenagem pelos filtros, desse modo, parte do fluxo será direcionado apenas para a trincheira, quanto a demais passará a se acumular no interior da estrutura, ou mais em específico na região a jusante da barragem. Para a evolução da permeabilidade do material drenante foram considerados os dados da Tabela 2.

Tabela 2. Fator de redução aplicado a condutividade hidráulica.

Situação de Colmatação	Fator de redução	Condutividade hidráulica k (m/s)	
		Filtros	Dreno de pé
Operante	Sem redução	$1,30 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-3}$
Levemente Colmatado	0,0001000	$1,30 \times 10^{-8}$	$1,00 \times 10^{-5}$
Colmatado (FS mínimo)	0,0000185	$5,72 \times 10^{-9}$	$4,40 \times 10^{-6}$
Inoperante	Sem filtro	Quase zero	Quase zero

2.2 Parâmetros de resistência dos materiais

Os parâmetros presentes foram definidos por meio dos ensaios técnicos realizados, em específico do ensaio de cisalhamento. Esses dados demonstrados na Tabela 3 serão utilizados para simular a condição de estabilidade de ambos os taludes.

Tabela 3. Parâmetros geotécnicos da barragem.

Material	Peso Específico (kN)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (ϕ')
SC	18,7	1,2	33,65°
Areia	18,5	0	30°
Transição	19	0	33°
Enrocamento	20	0	40°
Aluvião	18,5	0	33°

Fonte: SRHCE (1998).

Para realizar as análises de estabilidade dos taludes foi considerado a Análise Determinística e como método de equilíbrio-limite foi utilizado o método de Morgenstern-Price (1965), no qual a superfície de ruptura pode assumir qualquer forma e todas as condições de contorno e equilíbrio são satisfeitas (GERSCOVICH, 2016). De Assis *et al* (2020), Silva (2011) e Freitas (2011) consideraram essa metodologia a mais rigorosa e exige um cálculo computacional mais complexo, que é resolvido de modo iterativo. Além do mais esse procedimento requer a divisão da massa que possui potencial de deslizamento em fatias infinitesimais, as condições que preveem a estabilidade devem considerar o equilíbrio de forças e momentos de maneira simultânea.

Com o método para obtenção do fator de segurança (FS) é possível estabelecer o coeficiente mínimo aceitável. A NBR 13028 (ABNT, 2017) aponta o FS mínimo de 1,50 para a barragem em regime de operação considerando o talude jusante como o analisado, para rebaixamento rápido a norma aponta o FS mínimo de 1,10 e o talude montante deve ser analisado, já para a fase final de construção, ambos os taludes são avaliados e o FS mínimo é 1,30. A USACE (2004) apresenta um manual de estabilidade de taludes que define fatores/coeficientes de segurança (FS) mínimos para barragens de terra bem parecido com o que a NBR 13028 apresenta, a Tabela 4 do manual pode ser vista a seguir. Ressalta-se que esse quadro de informações é de suma importância pelo fato de impactar diretamente na metodologia e resultado.

Tabela 4. Coeficiente de segurança mínimo aceitável.

Condição de análise	Fator de segurança (mínimo)	Talude analisado
Final de construção	1,30	Montante/Jusante
Regime de operação	1,50	Jusante
Rebaixamento rápido	1,10	Montante

Fonte: Adaptado de USACE (2004).

É interessante pontuar que, para este trabalho, as análises serão voltadas para o talude jusante, por se tratar do regime de operação da barragem, as outras condições como: rebaixamento do reservatório e final de construção não serão avaliados.

3 METODOLOGIA

A metodologia teve início com a definição dos pontos e a delimitação das regiões da barragem para construir a geometria do objeto de estudo. Em seguida foram determinados os parâmetros geotécnicos (coesão, ângulo de atrito e peso específico) e hidráulicos obtidos (condutividade hidráulica) dos materiais do barramento. Com as propriedades informadas aos materiais houve a necessidade de estabelecer condições de contorno para que a simulação ocorra de forma correta, sendo elas:

- Montante: condição fundamental para definir a carga de montante que impõe o fluxo;
- Jusante: condição que delimita a saída de fluxo a jusante;
- Pressão nula: condição que determina a carga hidráulica igual 0;
- Drenagem: condição que aplicada para determinar/direcionar o fluxo de água quando este entrar contato com talude jusante ou com filtro na situação operante.

Ressalta-se que as duas últimas condições de contorno foram utilizadas para simular um dreno em completo estado operante, já que ele consegue direcionar o fluxo de água jusante corretamente. Além disso, a condição “Drenagem” foi utilizada para limitar o talude jusante para quando o dreno estiver inoperante. Para avaliação da estabilidade, utilizou-se o método de entrada e saída que determina potenciais superfícies de ruptura delimitadas por duas linhas de cor vermelha, indicando o ponto de partida e chegada da análise, respectivamente. A Figura 2 apresenta sucintamente o fluxograma metodológico desta pesquisa.

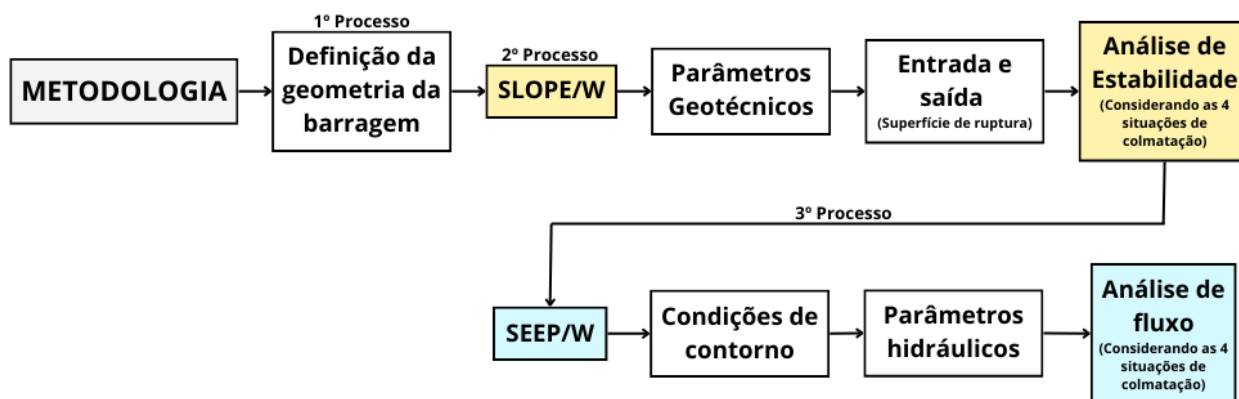


Figura 2. Fluxograma da metodologia da pesquisa.

As condições de contorno “Drenagem” e “Pressão nula” não são consideradas na modelagem do filtro colmatado e inoperante, para realizar esse cenário foi reduzido a condutividade hidráulica, conforme já foi mencionado. A Figura 3 a seguir demonstra o resultado com todas as condições de contorno.

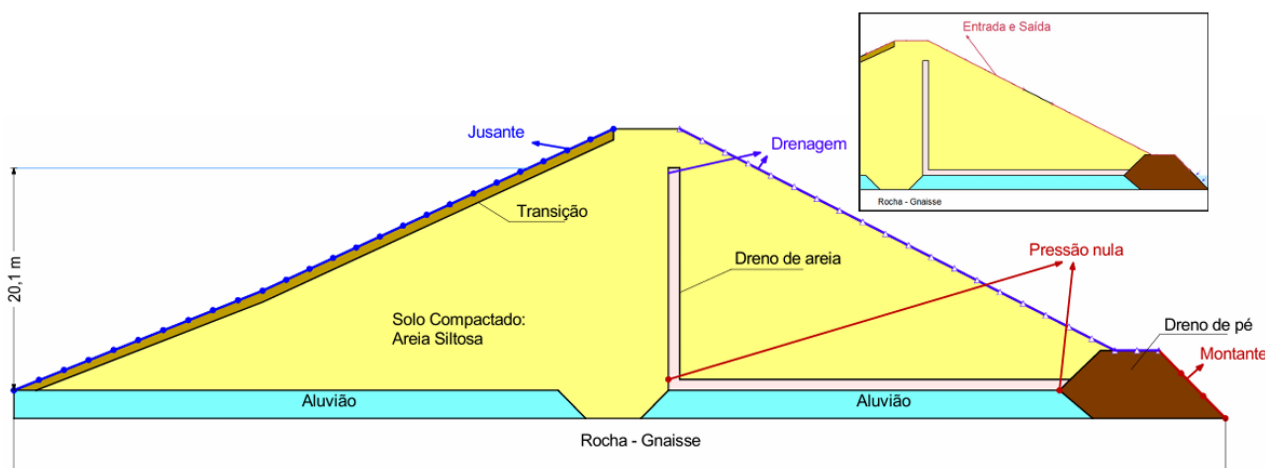


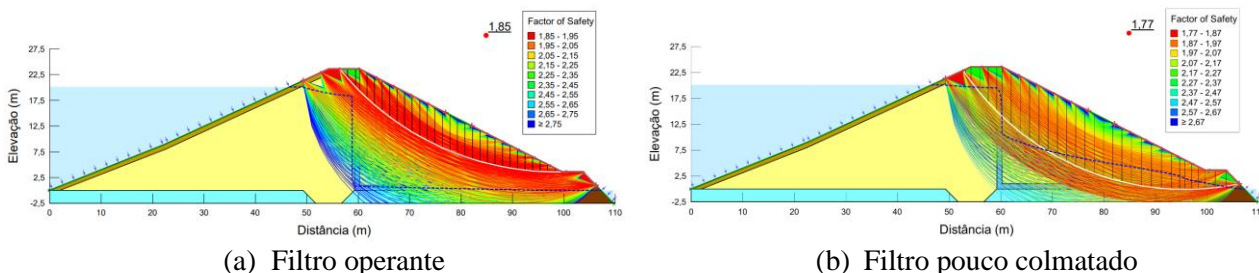
Figura 3. Condições de contorno da barragem de terra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a condição inicial apresentada na Figura 4(a), a análise de percolação apresenta um comportamento eficientemente conduzido da linha freática ao longo do filtro e do dreno de pé. Este resultado sugere uma operação adequada do sistema de drenagem, assegurando a estabilidade do maciço. O fator de segurança (FS) indicado, demonstra o valor de 1,85, que está significativamente acima do limite mínimo exigido para estabilidade da estrutura. Esses dados corroboram a efetividade do projeto implementado desde que o filtro esteja operante e sem colmatção, destacando a robustez e confiabilidade do sistema.

Na Figura 4(b), tem-se uma situação que remete ao desenvolvimento do processo de colmatção, no qual a partir da metade do filtro a linha freática deslocou-se um pouco para cima do filtro horizontal, e por fim, direcionando-se ao dreno de pé. Tal comportamento reflete a complexidade entre os componentes da barragem

e o processo de colmatção. O FS calculado teve o valor de 1,77 demonstrando que apesar de já atingir um alto índice de redução da permeabilidade do sistema de drenagem, a estrutura não apresenta instabilidade.

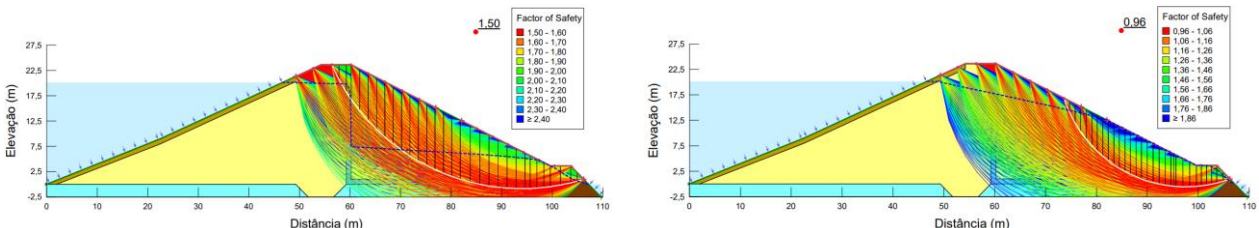


(a) Filtro operante

(b) Filtro pouco colmatado

Figura 4. Análise de Estabilidade do talude de jusante da barragem com filtro operante/colmatado.

A modelagem demonstrada na próxima Figura 5(a), apresenta a situação de colmatção dos filtros, percebe-se uma deficiência na direção da linha freática em relação ao filtro horizontal, além da percolação no maciço do talude a jusante da barragem, o que induz a saturação e aumento da poropressão na região. Para essa situação o FS demonstrou o valor de 1,50, e a partir dos comportamentos anteriores, observa-se a progressão do comprometimento do sistema de drenagem, que passa a operar com apenas 0,0018% da sua capacidade.



(a) Filtro colmatado com FS de 1,5

(b) Filtro inoperante/completamente colmatado

Figura 5. Análise de Estabilidade do talude de jusante da barragem com filtro comprometido.

Na última e mais crítica situação, Figura 5(b), o FS é de 0,96, no qual demonstra uma redução de cerca de 48,1% se comparado ao FS do filtro operante da situação da Figura 4(a). Esse comportamento representa o comprometimento da estabilidade da estrutura, uma vez que é possível perceber que a linha freática se comporta como se não houvesse um sistema de drenagem interno, para esse caso os valores de poropressão aumenta na região da jusante da barragem. A condutividade hidráulica foi ajustada para tendência zero, pois em razão da colmatção, o fluxo de água nos filtros é prejudicado, o que reflete a situação crítica de um sistema de drenagem ineficiente. A Tabela 5 apresenta o resumo para os valores dos fatores de segurança em diferentes cenários de avanço da colmatção.

Tabela 5. Resumo das análises dos fatores de segurança.

Cenário	Situação do Filtro	Fator de segurança Calculado	Fator de segurança Mínimo
1	Filtro operante	1,85	
2	Filtro pouco colmatado	1,77	1,5
3	Filtro colmatado	1,5	
4	Filtro inoperante	0,96	

Com base nos resultados expostos, a Figura 6 apresenta a correlação entre a colmatção do filtro/dreno de pé, responsável pela redução da condutividade hidráulica, e o fator de segurança da barragem. Conforme evidenciado, à medida que a condutividade hidráulica do filtro/dreno diminui, o fator de segurança também do barramento também diminui. É conveniente destacar que para construir a curva com mais acurácia foi necessário estabelecer pontos intermediários que foram simulados novamente nos softwares do GeoStudio.

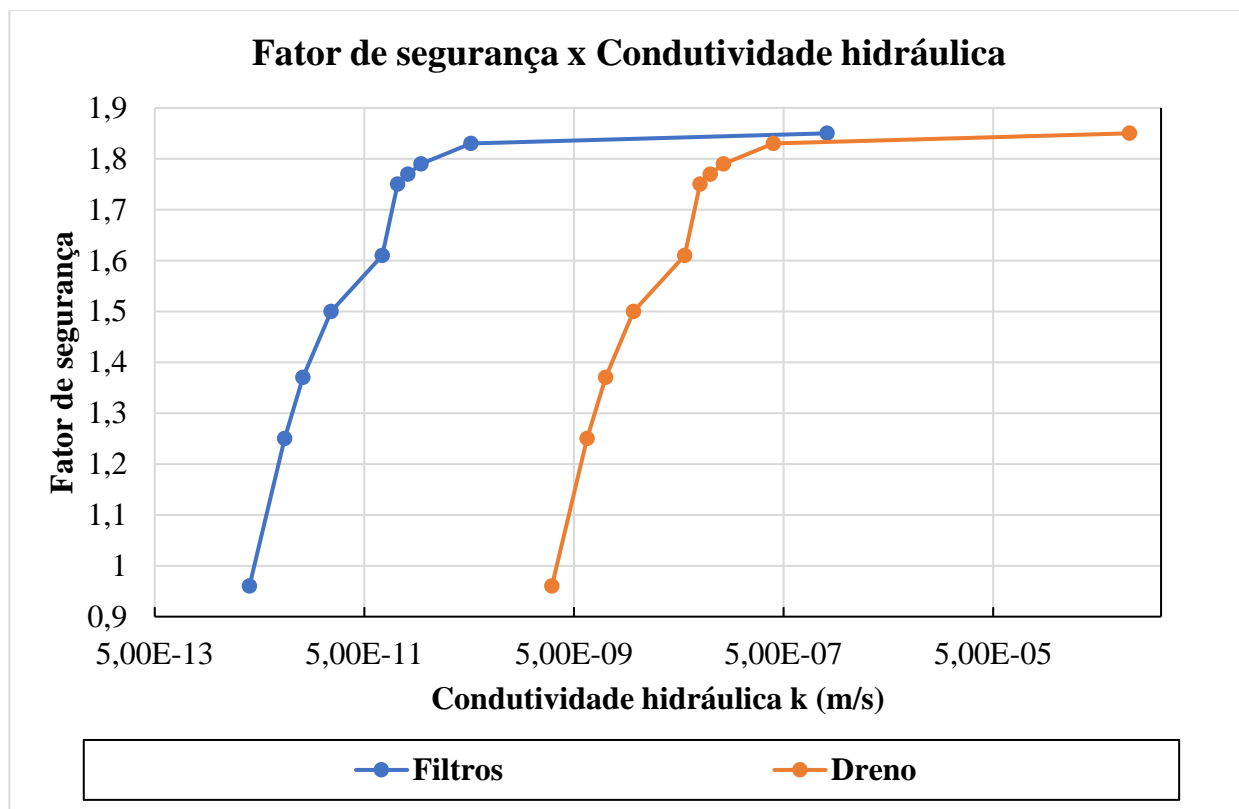


Figura 6. Fator de segurança da barragem e condutividade hidráulica do filtro.

5 CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas, foi possível observar a redução do coeficiente de segurança nas 4 situações simuladas (filtro operante, filtro pouco colmatado, filtro colmatado e filtro inoperante), além da modificação no comportamento da linha freática no maciço. Os resultados obtidos fornecem *insights* valiosos sobre a influência da colmatagem dos filtros, uma vez que foi perceptível a relação intrínseca entre o sistema de drenagem e a estabilidade da estrutura. O comparativo entre as duas primeiras condições (filtro operante-filtro pouco colmatado) demonstra que o comprometimento do sistema de drenagem devido a redução da permeabilidade, apresenta valores nítidos de redução do FS (1,85-1,77), porém o barramento ainda encontra-se condição segura e sem riscos de descontrole do direcionamento da linha freática.

Por outro lado, tem-se uma situação comparativa entre as duas últimas condições (filtro colmatado-filtro inoperante) os valores de redução dos coeficientes de segurança são significativos (1,50-0,96). No primeiro desta comparação, o filtro opera com 0,0018% da sua capacidade, com um FS de valor mínimo para uma situação crítica que leva à sua ineficiência, esse fenômeno acomete ariscos potenciais de saturação e entubamento (*piping*) dependendo do gradiente hidráulico, colocando a estrutura em uma situação crítica de ruptura.

Para efeito de análise, a situação que acomete a segurança da estrutura, não ocorre de forma imediata, no entanto rupturas recorrentes a esse fenômeno, não foram constatadas antes do colapso devido à falta de investigação do sistema de drenagem, monitoramento da instrumentação: piezometria e medida de vazão do sistema de drenagem interna. Portanto, para manter a segurança da barragem é essencial manter a condutividade hidráulica dentro dos limites adequados, medidas preventivas devem ser tomadas durante o projeto e construção da estrutura. Os resultados destacam a importância da avaliação sistema de drenagem, nos processos de mitigação aos riscos associados a colmatagem. Para essa análise foi constatado que a barragem dimensionada está adequadamente equipada para lidar com condições reais de operação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG) na viabilização do presente artigo. Gostaríamos de agradecer também a *Seequent* pela disponibilização do software e ao COBRAMSEG 2024 pela oportunidade da publicação do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 13028. *Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Bacchi, O. O. S., Reichadt, K. (1988) *Escalonamento de propriedades hídricas na avaliação de métodos de determinação da condutividade hidráulica de solos*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Campinas. Disponível em: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6691825>. Acesso em 27 mar. de 2024.
- Brasil, (2021) Relatório de segurança de barragens 2020. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2020/rsb-2020.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2024.
- Darcy, H. (1856) *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Paris: Dalmont.
- De Assis, H. B., Passafaro, G. S., e Nogueira, C. G (2020) Estudo comparativo entre abordagens determinística, de máxima probabilidade de falha e de máximo risco na estabilidade de taludes, considerando métodos de equilíbrio limite e Teoria da Confiabilidade. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2020), Campinas.
- Freitas, M.A.C. (2011) *Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61387/1/000148648.pdf>. Acesso em 19 mar. de 2024.
- Gerscovich, D. M. (2016) *Estabilidade de Taludes*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Massad, F. (2010) *Obras de Terra: curso básico de geotecnia*. 2. ed. São Paulo: : Oficina de Textos.
- Morgenstern, N.R., Price, V. E. (1965) *The analysis of the stability of general slip surfaces*. *Géotechnique*, v.15.
- Perini, D.S (2009) *Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <http://www.realp.unb.br/jspui/handle/10482/4363>. Acesso em 17 mar. de 2024.
- SRHCE (1998) *Projeto Executivo da Adutora de Aiuba (Tomo V) - Volume 1, Relatório Geral e Memorial de Cálculo*. Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (SRHCE). Disponível em: http://www.ged.srh.ce.gov.br/pesquisar_por_municipio.php. Acesso em 04 jul. de 2024.
- Silva, J. P. (2011) *Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na análise de estabilidade de taludes*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/62106/1/000149997.pdf>. Acesso em: 18 mar. de 2024
- USACE (2004) *General Design and Construction Considerations for Earth and Rockfill Dams*. United States Army Corps of Engineers. Department of the Army, Washington DC. Disponível em: https://www.publications.usace.army.mil/portals/76/publications/engineermanuals/em_1110-2-2300.pdf. Acesso em 16 mar. de 2024.
- USBR (1983) *Dams and Public Safety*. A Water Resources Technical Publication; By Robert B. Jansen. U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (USBR). Denver.