DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/36

Desempenho Hidráulico de Sistemas de Drenagem Interna na Barragem Aracoiaba: Comparação entre Filtro Vertical e Filtro Inclinado

Rosiel Ferreira Leme 1
Docente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, rosiel.leme@ufc.br

Fabiola Costa de Lima 2
Doutoranda, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, fabiolac.lima@alu.ufc.br

Ana Maria de Queiroz 3
Técnico de Laboratório, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, ana@det.ufc.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma avaliação comparativa do desempenho hidráulico e estabilidade de taludes sistemas de drenagem interna aplicados à Barragem Aracoiaba, localizada no estado do Ceará e gerenciada pela COGERH. O estudo compara a configuração executada no empreendimento, composta por filtro inclinado direcionado ao pé de jusante, com uma solução convencional baseada em filtro vertical do tipo chaminé associado a dreno horizontal. As análises foram realizadas por meio de modelagem numérica utilizando os módulos SEEP/W e SLOPE/W do software GeoStudio 2025. Foram avaliados parâmetros como vazão de percolação, distribuição da linha freática, gradientes hidráulicos e fator de segurança dos taludes. Os resultados indicaram que a configuração com filtro inclinado promoveu redução da vazão de percolação, da ordem de 12,5%, quando comparada à solução com filtro chaminé. Nas análises de estabilidade, os fatores de segurança obtidos foram 2,15 para o filtro inclinado e 2,20 para a configuração convencional, indicando diferenças inferiores a 3%. Os resultados mostram que a alteração da geometria do sistema de drenagem exerce influência limitada no regime de percolação e na estabilidade global do maciço, sugerindo que soluções convencionais podem apresentar desempenho equivalente com menor complexidade construtiva.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens de terra; drenagem interna; percolação; gradiente hidráulico; modelagem numérica.

ABSTRACT: This study presents a comparative assessment of the hydraulic performance and slope stability and slope stability of internal drainage systems applied to the Aracoiaba Dam, located in the state of Ceará, Brazil, and operated by COGERH. The analysis compares the drainage configuration implemented in the dam, consisting of an inclined filter directed toward the downstream toe, with a conventional design composed of a vertical chimney filter associated with a horizontal drainage blanket. Numerical modeling was carried out using the SEEP/W and SLOPE/W modules of GeoStudio 2025. The analyses considered seepage flow rates, phreatic surface distribution, hydraulic gradients and slope stability factors of safety. The results indicate that the inclined filter configuration reduced seepage discharge by approximately 12.5% when compared to the chimney filter solution. In the stability analyses, the factors of safety obtained were 2.15 for the inclined filter and 2.20 for the conventional configuration, representing differences of less than 3%. Overall, the results suggest that changes in the geometry of the drainage system have limited influence on seepage behavior and global stability, indicating that conventional drainage solutions may provide equivalent performance with lower construction complexity.

KEYWORDS: Embankment dams; internal drainage; seepage; hydraulic gradient; numerical modeling.

1 INTRODUÇÃO

Barragens de terra constituem uma das tipologias de estruturas geotécnicas mais amplamente utilizadas para armazenamento e regularização de recursos hídricos, desempenhando papel fundamental no abastecimento humano, irrigação, controle de cheias e geração de energia. O comportamento seguro dessas

estruturas depende de diversos fatores de projeto, entre os quais se destaca o controle da percolação e a adequada dissipação das pressões neutras no interior do maciço. Nesse contexto, os sistemas de drenagem interna exercem papel essencial na segurança hidráulica e estrutural das barragens, atuando na redução dos gradientes hidráulicos, no controle da posição da linha freática e na mitigação de processos de erosão interna (Terzaghi et al., 1996; Sherard & Dunnigan, 1989).

Diversos casos históricos de falhas em barragens de terra estão associados a deficiências nos sistemas de drenagem interna e no dimensionamento de filtros, frequentemente relacionadas a processos de piping e erosão interna (Fell et al., 2015; ICOLD, 2017).

Entre as soluções clássicas de drenagem interna destaca-se o sistema composto por filtro vertical do tipo chaminé associado a dreno horizontal, responsável por interceptar as linhas de fluxo e conduzir a água percolante de forma controlada até jusante (Terzaghi et al., 1996; Sherard & Dunnigan, 1989).

Entretanto, ao longo da evolução dos projetos de barragens, diferentes configurações geométricas de sistemas drenantes passaram a ser adotadas com o objetivo de otimizar o comportamento hidráulico e estrutural do maciço. Entre essas alternativas destaca-se o uso de filtros inclinados em direção ao pé de jusante, solução que modifica o percurso das linhas de fluxo e pode influenciar a distribuição de gradientes hidráulicos e pressões neutras no interior da barragem. A Figura 1 apresenta uma ilustração esquemática de um sistema de drenagem com filtro inclinado para jusante, bem como a trajetória típica das linhas de fluxo através do maciço.

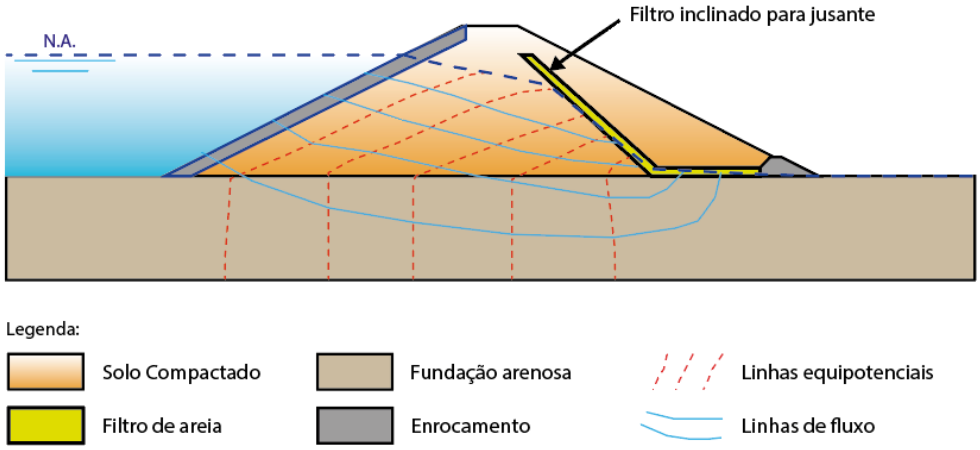


Figura 1. Esquema de barragem de terra com filtro inclinado para jusante e linhas de fluxo de percolação.

A inclinação do sistema drenante para jusante tende a aumentar o caminho de percolação através do maciço e da fundação, o que pode contribuir para a redução dos gradientes hidráulicos e para a dissipação mais gradual das pressões neutras. Por outro lado, essa configuração pode também reduzir a extensão da zona não saturada no talude de jusante, o que, dependendo das condições de carregamento hidráulico e da geometria da barragem, pode influenciar o comportamento de estabilidade do maciço (Sherard & Dunnigan, 1989; Foster et al., 2000; Fell et al., 2015).

Nesse contexto, a Barragem Aracoiaba, localizada no estado do Ceará, constitui um caso de interesse técnico por apresentar um sistema de drenagem interna com filtro inclinado direcionado ao pé de jusante, solução distinta da configuração convencional baseada em filtro chaminé. O presente estudo utiliza essa barragem como estudo de caso para avaliar o desempenho hidráulico de diferentes arranjos de drenagem interna em barragens de terra por meio de modelagem numérica do fluxo em meio poroso.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo e caracterização da barragem

A Barragem Aracoiaba está localizada no município de Aracoiaba, no estado do Ceará, e integra o sistema de reservatórios gerenciados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH). Trata-se de uma barragem de terra com sistema de drenagem interna constituído por filtro

inclinado direcionado ao pé de jusante, configuração distinta do sistema convencional composto por filtro vertical do tipo chaminé associado a dreno horizontal.

Do ponto de vista construtivo, a barragem apresenta maciço em aterro compactado com sistema de drenagem interna destinado ao controle da percolação através do corpo da barragem. Diferentemente das soluções mais frequentemente adotadas em barragens de terra, que utilizam filtros verticais (chaminé) associados a tapetes drenantes, a Barragem Aracoiaba foi projetada com um sistema de drenagem constituído por filtro inclinado direcionado ao pé de jusante, o que confere particularidades ao seu comportamento hidráulico.

Essa configuração influencia o desenvolvimento das linhas de fluxo no interior do maciço, bem como a posição da superfície freática e os gradientes hidráulicos próximos à zona de saída da percolação.

No presente trabalho, a Barragem Aracoiaba é utilizada como base para a elaboração de modelos numéricos de fluxo em regime permanente, permitindo comparar o desempenho hidráulico do arranjo drenante com filtro inclinado em relação a uma solução alternativa baseada em um sistema convencional composto por filtro vertical associado a dreno horizontal. A análise concentra-se na avaliação da vazão de percolação, bem como na influência das diferentes alternativas de drenagem sobre essa vazão e sobre a estabilidade do talude de jusante, considerando condições de regime permanente associadas ao nível máximo operacional do reservatório.

2.2 Seções transversais analisadas

Para a realização das análises numéricas, foram consideradas duas configurações de seção transversal representativas da Barragem Aracoiaba, mantendo-se constantes as características geométricas do maciço e as propriedades dos materiais. As seções diferem apenas quanto à configuração do sistema de drenagem interna adotado.

A seção tipo da barragem corresponde a uma barragem de terra com cota de coroamento igual a 100 m, largura de coroamento de 7 m e altura máxima de 36,02 m. O talude de montante apresenta inclinação de 1V:2,5H, enquanto o talude de jusante possui inclinação de 1V:2H, valores compatíveis com geometrias usualmente empregadas em barragens de terra compactada, conforme projeto executivo da barragem (COGERH, 2017).

Na primeira configuração, correspondente ao arranjo executado no empreendimento, o sistema de drenagem interna é constituído por filtro inclinado em direção ao pé de jusante, conectado a um dreno horizontal. O filtro apresenta inclinação de aproximadamente 75,6° em relação à horizontal e encontra-se deslocado cerca de 8,3 m horizontalmente para jusante. O sistema drenante é complementado por um dreno horizontal do tipo sanduíche, composto por camadas de areia e brita, destinado à coleta e condução da água percolada em direção à saída do sistema. A geometria correspondente a essa configuração é apresentada na Figura 2.

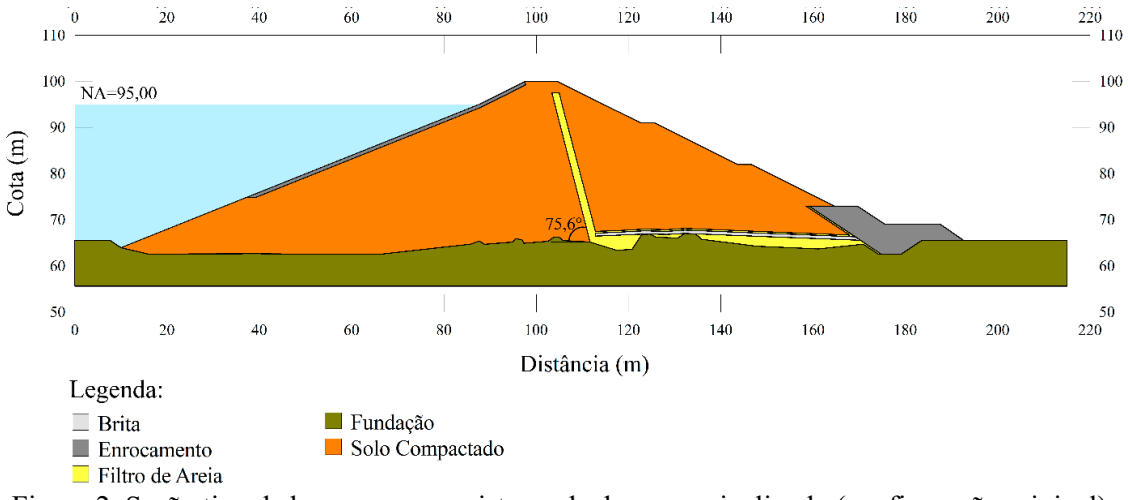


Figura 2. Seção tipo da barragem com sistema de drenagem inclinado (configuração original).

Na segunda configuração analisada, buscou-se avaliar uma solução alternativa de drenagem interna amplamente utilizada em barragens de terra. Nessa concepção, mantém-se a mesma geometria do maciço e as mesmas propriedades dos materiais, alterando-se apenas o posicionamento e o tipo de sistema drenante. O filtro inclinado é substituído por um filtro vertical do tipo chaminé, associado ao dreno horizontal na base da barragem. Essa solução permite interceptar a linha freática em posição mais próxima da região central do maciço, favorecendo o rebaixamento das pressões neutras e a condução da água em direção ao sistema de drenagem de base. A geometria correspondente à seção com dreno chaminé vertical é apresentada na Figura 3.

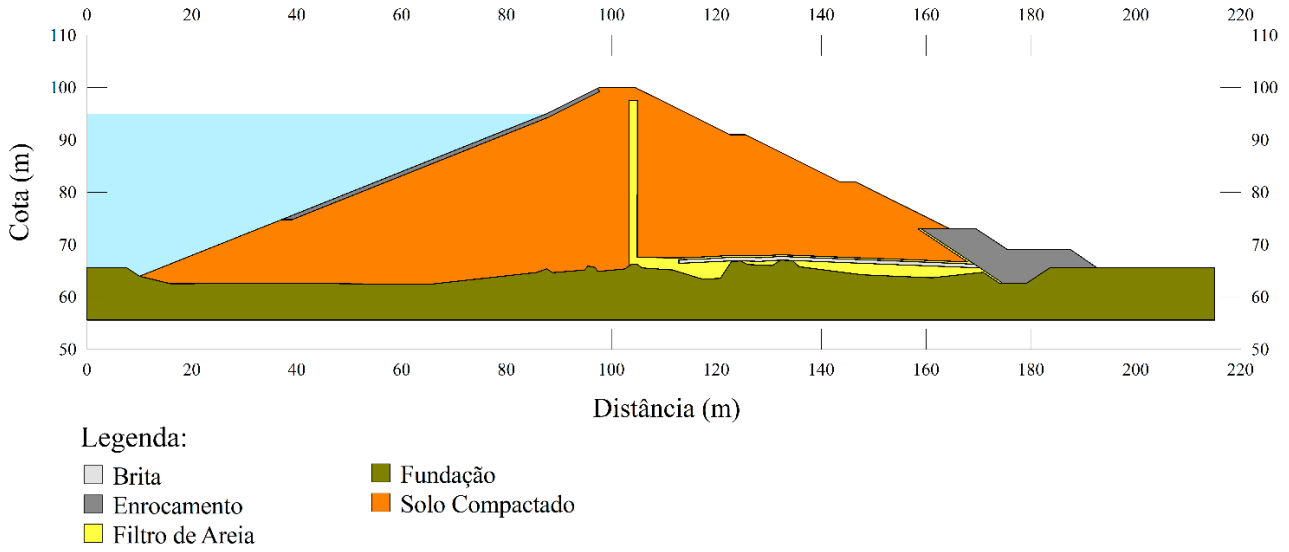


Figura 3. Seção tipo da barragem com sistema de drenagem vertical do tipo chaminé.

2.3 Parâmetros geotécnicos adotados

Os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises foram obtidos a partir de levantamento realizado no projeto executivo da Barragem Aracoiaba, disponível na biblioteca técnica da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH). Nesse levantamento foram identificados os parâmetros de resistência ao cisalhamento e permeabilidade dos materiais constituintes do maciço da barragem e de seus dispositivos de drenagem.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros geotécnicos adotados nas modelagens numéricas de fluxo e estabilidade realizadas neste estudo. Esses parâmetros incluem peso específico, coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo dos materiais.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos adotados nas modelagens de fluxo e estabilidade da Barragem Aracoiaba.

Zona/Material	Peso Específico (kN/m³)	Coesão Efetiva - c' (kPa)	Ângulo de Atrito φ' (°)	Permeabilidade (m/s)	Anisotropia (k_y/k_x)
Solo Compactado	18,4	9	29,5	$2,5 \times 10^{-9}$	0,1
Filtro de Areia	19,0	0	30	$1,0 \times 10^{-5}$	1,0
Fundação	19,5	0	32	$6,5 \times 10^{-6}$	1,0
Enrocamento	21,0	0	40	$1,0 \times 10^{-3}$	1,0
Brita	21,0	0	35	$1,0 \times 10^{-4}$	1,0

Para os materiais granulares presentes no sistema de drenagem, tais como areia de filtro, brita e enrocamento, os parâmetros de resistência e permeabilidade foram estimados com base em valores típicos

reportados na literatura técnica para materiais com características granulométricas semelhantes. Nesses materiais não foi considerado o parâmetro φ_b, uma vez que se tratam de materiais essencialmente granulares e que, durante as condições analisadas, tendem a permanecer saturados ou apresentar comportamento dominado pela resistência por atrito.

Para o solo compactado do maciço foi considerada a possibilidade de contribuição da sucção matricial por meio do parâmetro φ_b, conforme formulação de Fredlund et al. (1978). O valor adotado foi $\varphi_b = 15°$, estimado a partir de recomendações da literatura técnica. Conforme a formulação clássica de resistência ao cisalhamento para solos não saturados proposta por Fredlund et al. (1978), a resistência pode ser representada pela contribuição das tensões efetivas e da sucção matricial. Na ausência de dados experimentais específicos para determinação de φ_b, este parâmetro pode ser estimado como aproximadamente metade do ângulo de atrito efetivo do solo, conforme indicado por Krahn (2004).

2.4 Metodologia de análise de fluxo

A análise de percolação através do maciço da barragem foi realizada por meio de modelagem numérica utilizando o módulo SEEP/W, integrante do software GeoStudio 2025. As simulações foram conduzidas em regime permanente, considerando condições hidráulicas representativas do nível máximo operacional do reservatório.

Como condição de contorno a montante, adotou-se o nível d'água correspondente à cota 95 m, que corresponde à cota do vertedouro e representa o nível máximo operacional da barragem. Essa condição foi utilizada para representar o cenário mais desfavorável em termos de gradientes hidráulicos e pressões neutras no interior do maciço.

A discretização do domínio foi realizada por meio de uma malha de elementos finitos, empregando elementos triangulares. O refinamento da malha foi definido com tamanho global dos elementos de aproximadamente 1 m, resultando em uma malha composta por cerca de 5.254 elementos, considerada adequada para representar a geometria da barragem e seus dispositivos drenantes.

2.5 Metodologia de análise de estabilidade

A análise de estabilidade dos taludes da barragem foi realizada por meio de modelagem numérica utilizando o módulo SLOPE/W, integrante do software GeoStudio 2025. As avaliações foram conduzidas empregando o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price, amplamente utilizado em análises geotécnicas por satisfazer simultaneamente as condições de equilíbrio de forças e momentos.

O cálculo do fator de segurança foi realizado por meio do método das fatias, com discretização automática do maciço em 30 fatias, conforme configuração padrão do software. A determinação da superfície crítica de ruptura foi efetuada por meio de um processo de otimização, utilizando o algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO), método metaheurístico baseado no comportamento coletivo de partículas em busca de soluções ótimas em um espaço de soluções.

Para o processo de otimização foram adotados os seguintes parâmetros, correspondentes às configurações padrão do software: 30 gerações, 30 agentes (partículas) e 3.000 iterações máximas. Esses parâmetros controlam o processo iterativo de busca da superfície crítica durante o procedimento de otimização.

Adicionalmente, foi empregado o método de busca Entry and Exit, no qual são definidos intervalos de entrada e saída das superfícies potenciais ao longo do talude. Para essa análise foram consideradas 18 divisões para os pontos de entrada, 18 divisões para os pontos de saída e 15 divisões para o raio das superfícies circulares, resultando na avaliação de aproximadamente 5.777 superfícies potenciais de ruptura ao longo do processo de simulação.

Essa abordagem permitiu a identificação da superfície de ruptura crítica associada ao menor fator de segurança, garantindo uma investigação abrangente do espaço de soluções possíveis para o problema de estabilidade analisado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Vazão de percolação e desempenho hidráulico do sistema de drenagem

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados das análises de fluxo obtidas para as duas configurações de sistema de drenagem avaliadas. A Figura 4 mostra o campo de poropressões e a posição da linha freática para a seção original da barragem, que utiliza filtro inclinado direcionado ao pé de jusante. Já a Figura 5 apresenta os resultados correspondentes para a configuração tradicional, composta por filtro chaminé associado ao sistema drenante horizontal.

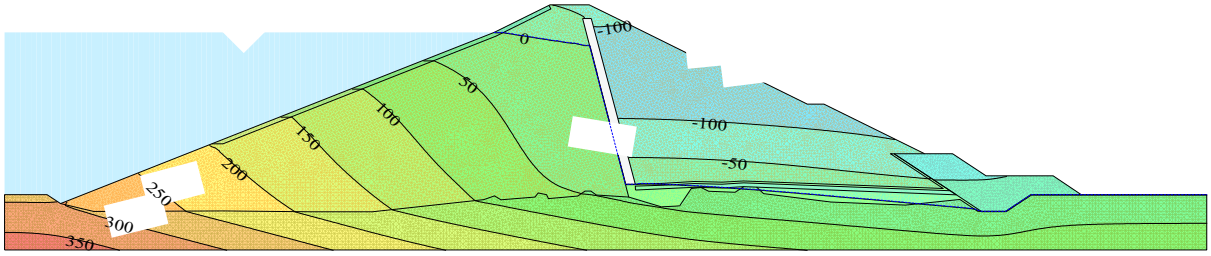


Figura 4. Campo de poropressões e linha freática na seção com filtro inclinado.

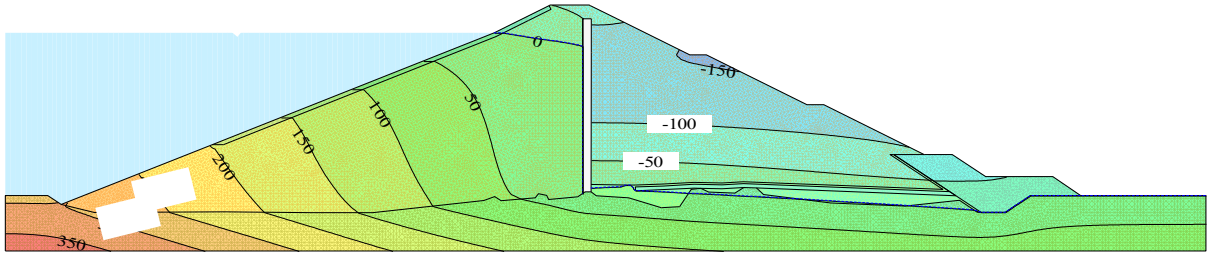


Figura 5. Campo de poropressões e linha freática na seção com filtro chaminé.

O principal parâmetro adotado para comparação entre as duas soluções foi a vazão total de percolação ao longo da seção analisada. Para o projeto original com filtro inclinado, a vazão obtida foi de aproximadamente 1,05 m³/dia por metro linear de barragem, enquanto para a configuração com filtro chaminé foi de cerca de 1,20 m³/dia por metro linear.

A comparação entre os resultados indica que a adoção do filtro inclinado proporcionou uma redução da vazão de percolação da ordem de aproximadamente 12,5% em relação ao sistema tradicional. Apesar da redução observada na vazão de percolação, a a diferença observada entre as soluções foi considerada pouco significativa do ponto de vista hidráulico.

Esse comportamento sugere que, para a seção analisada, a vazão total de fluxo é fortemente controlada pelas propriedades hidráulicas dos materiais do maciço e pela geometria global da barragem, sendo pouco sensível à alteração da configuração do sistema de drenagem. Assim, embora o filtro inclinado aumente o caminho de percolação no interior do maciço, o efeito prático na redução da vazão total mostrou-se limitado nas condições avaliadas.

3.2 Resultados das análises de estabilidade

As análises de estabilidade foram realizadas para as duas configurações de drenagem consideradas neste estudo, utilizando a seção tipo da barragem e os parâmetros geotécnicos previamente definidos. A Figura 6 apresenta o resultado da análise de estabilidade para a seção original do projeto, que utiliza filtro inclinado direcionado ao pé de jusante, enquanto a Figura 7 apresenta o resultado correspondente para a configuração tradicional, composta por filtro chaminé associado ao sistema drenante horizontal.

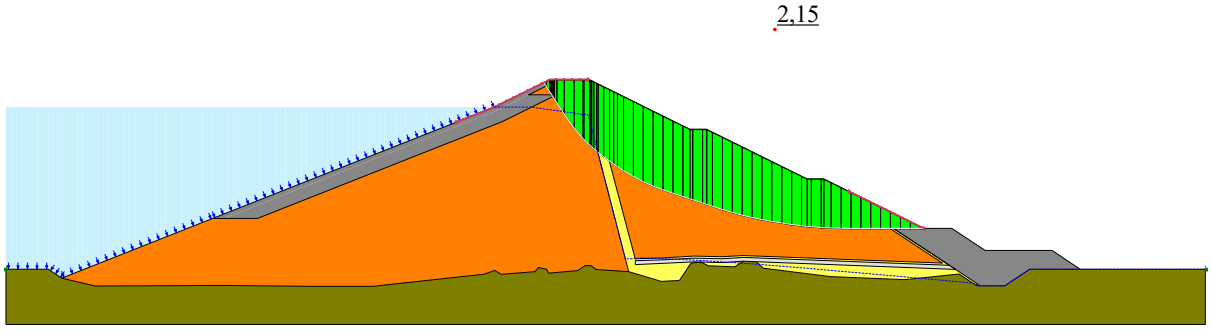


Figura 6. Superfície crítica de ruptura obtida na análise de estabilidade da seção com filtro inclinado.

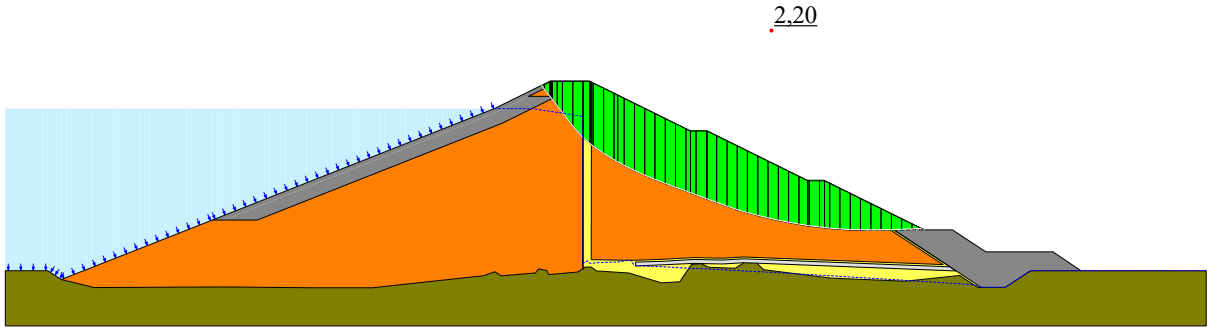


Figura 7. Superfície crítica de ruptura obtida na análise de estabilidade da seção com filtro chaminé.

Para a seção com filtro inclinado, obteve-se um fator de segurança de 2,15, enquanto para a seção com filtro chaminé o fator de segurança calculado foi de 2,20. Observa-se que os valores obtidos são bastante próximos, indicando que a alteração na configuração do sistema de drenagem não produziu variações significativas na estabilidade global do maciço. Em termos percentuais, a diferença entre os fatores de segurança foi inferior a 3%, o que confirma a baixa influência da geometria do sistema de drenagem nas condições analisadas.

Ambos os resultados encontram-se significativamente acima dos valores mínimos usualmente recomendados para barragens de terra em condição de regime permanente, tipicamente da ordem de 1,5, conforme indicado em diretrizes internacionais de projeto e manuais de engenharia de barragens (USACE, 2003; Fell et al., 2015). Dessa forma, as duas soluções analisadas apresentam níveis adequados de segurança geotécnica.

Assim, os resultados indicam que a adoção do filtro inclinado direcionado para jusante, embora represente uma alternativa geométrica distinta da solução convencional com filtro chaminé, não promoveu alterações relevantes nas condições de estabilidade da barragem, mantendo fatores de segurança elevados e compatíveis com as recomendações de projeto.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma avaliação comparativa entre duas configurações de drenagem interna aplicadas à seção tipo da Barragem Aracoiaba: filtro inclinado direcionado ao pé de jusante e filtro chaminé associado a dreno horizontal.

Os resultados das análises de fluxo indicaram que a adoção do filtro inclinado promoveu redução pouco significativa da vazão de percolação, passando de aproximadamente 1,20 m³/dia/m na solução com filtro chaminé para 1,05 m³/dia/m na configuração com filtro inclinado, correspondendo a uma diminuição da ordem de 12,5%.

Nas análises de estabilidade, os fatores de segurança obtidos foram 2,20 para a solução com filtro chaminé e 2,15 para a configuração com filtro inclinado. Esses valores são bastante próximos e permanecem significativamente acima do fator de segurança mínimo usualmente recomendado para condições de regime permanente, tipicamente da ordem de 1,5.

De forma geral, os resultados indicam que a alteração da geometria do sistema de drenagem não produziu influência significativa no regime de percolação nem nas condições de estabilidade global do maciço.

Considerando-se que a execução de filtros inclinados pode demandar maior complexidade construtiva e controle executivo mais rigoroso, os resultados obtidos sugerem que, para as condições analisadas na Barragem Aracoiaba, a solução tradicional com filtro chaminé apresenta desempenho hidráulico e estabilidade de taludes semelhante, com a vantagem de maior simplicidade executiva e ampla consolidação na prática de projeto de barragens de terra. e amplamente consolidado em projetos de barragens de terra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (2017) Projeto executivo da Barragem Aracoiaba. Fortaleza, CE.

Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., Foster, M. (2015) *Geotechnical Engineering of Dams*. 2nd ed., CRC Press, London.

Foster, M., Fell, R., Spannagle, M. (2000) The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37 (5), p.1000-1024.

Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., Widger, R.A. (1978) The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15 (3), p.313-321.

ICOLD – International Commission on Large Dams (2017) *Bulletin on Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes*. Paris.

Krahn, J. (2004) *Stability Modeling with SLOPE/W: An Engineering Methodology*. Geo-Slope International Ltd., Calgary.

Sherard, J.L.; Dunnigan, L.P. (1989) Critical filters for impervious soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 115 (7), p.927-947.

Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G. (1996) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd ed., John Wiley & Sons, New York.

U.S. Army Corps of Engineers (2003) *Engineering and Design – Slope Stability*. Engineer Manual EM 1110-2-1902, Washington, DC.