

Estudo da influência de veios drenantes em barragens de terra na condição de rebaixamento rápido

Louise Cuadra

Enga. Geotécnica, UFPR, Foz do Iguaçu, Brasil, louisecuadra@gmail.com

Sidnei Helder Cardoso Teixeira

Professor Associado, UFPR, Curitiba/PR, Brasil, s.teixeira@ufpr.br

Tennison Freire de Souza Junior

Pós-doutorando e Eng. Geotécnico, UFPR/TPF Engenharia, Curitiba/PR, Brasil, tennison.junior@tpfe.com.br

RESUMO: O rebaixamento do nível do reservatório é uma condição importante de carregamento em barragem de terra e que precisa ser avaliada. A decompressão causada pela redução do empuxo hidráulico no talude de montante, nessas situações, reduz a estabilidade do espaldar do aterro e, a depender da velocidade que ocorre, não permite a dissipação de poropressões positivas no interior do maciço, minorando as tensões efetivas podendo levar a barragem ao colapso. Uma alternativa técnica viável para esses casos consiste na construção de veios drenantes no espaldar montante da barragem. Esses elementos são drenos lineares dispostos equiespaçadamente, alteram o fluxo e reduzem as poropressões positivas no interior do aterro, implicando em aumento da estabilidade global do talude de montante. Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito dos veios drenantes em taludes de montante de barragens de terra a partir uma avaliação paramétrica, por meio de simulações numéricas no software Geostudio (módulo SEEP/W e SLOPE W) com base no método dos elementos finitos (MEF) em condições de fluxo de transiente. Através destas análises, busca-se retirar conclusões sobre o efeito de cada parâmetro na resposta de estabilidade de taludes por meio de modelos de equilíbrio limite.

PALAVRAS-CHAVE: Fluxo transiente, Veios drenantes, Estabilidade de taludes, Rebaixamento rápido, Barragem de terra.

ABSTRACT: The reservoir water level drawdown is a crucial loading condition in earth dams that requires thorough evaluation. The decompression induced by the reduction of hydraulic thrust on the upstream slope diminishes the stability of the embankment slope. In such scenarios, depending on its rate, it impedes the dissipation of positive pore pressures within the mass, consequently diminishing effective stresses and potentially leading to dam failure. A technically viable alternative for these situations involves the construction of horizontal intermediate filters in the upstream slope of the dam. These elements, equispaced linear drains, alter the flow and mitigate positive pore pressures within the embankment, resulting in an overall increase in the stability of the upstream slope. This study aims to assess the effect of drainage veins on upstream slopes of earth dams through a parametric evaluation, utilizing numerical simulations in the Geostudio software (SEEP/W and SLOPE/W modules) based on the Finite Element Method (FEM) under transient flow conditions. Through these analyses, conclusions were obtained regarding the influence of each parameter on slope stability responses using limit equilibrium models.

KEYWORDS : Transient flow, Horizontal intermediate filters, Slope stability, Rapid drawdown, Earth dam.

1 INTRODUÇÃO

De um modo geral, as barragens de terra são estruturas em solo compactados que tem como objetivo criar um reservatório para o representamento da água ou rejeitos de mineração para atendimento da

necessidades humanas, tais como irrigação, geração de energia, abastecimento de água, controle de cheias, estocagem de rejeitos, saneamento e outros.

Para que as barragens de terra desempenhem adequadamente a finalidade a que foi projetada, é necessário que seja considerado o sistema de drenagem interna composto por tapetes drenantes, drenos lineares, drenos de fundo, etc. Estes sistemas de drenagem interna tem como objetivo reduzir o excesso de poropressão positiva, de modo a evitar possíveis fenômenos de piping de aterro, piping de fundação, surgências, e/ou instabilidade dos taludes da estrutura.

Em termos técnicos, para que se garanta a estabilidade dos taludes de uma estrutura de barragem de terra para representamento de água, faz-se necessário que, durante as avaliações de estabilidade, a estrutura atenda aos fatores de segurança mínimos requeridos para os cenários de final de construção, operação com reservatório cheio, rebaixamento rápido do NA e ocorrência de evento sísmico (Gaioto, 2003). O cenário de rebaixamento rápido tem como característica o desconfinamento do talude, em função da redução do empuxo ativo da água, em velocidade superior à com que ocorre a dissipação das poro-pressões internas no maciço. O excesso de poropressão reduz a tensão efetiva do espaldar montante e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento e o fator de segurança são afetados.

A condição de rebaixamento rápido ocorre em regiões com longos períodos estiagem, como por exemplo em regiões do semiárido, baixa precipitação mensal ou anual de uma área, em função de alguma operação na comporta ou em períodos de chuvas incomuns com posterior rebaixamento. Atualmente, uma das técnicas para reduzir as poropressões no espaldar de montante é a introdução de veios drenantes (também conhecido na literatura internacional como *intermediate filters*).

Os veios drenantes são drenos horizontais introduzidos ao longo da altura da barragem que tem o objetivo de reduzir os caminhos de fluxo, de modo que durante a construção ou durante o rebaixamento rápido do reservatório, ocorra a redução das poro-pressões a níveis que não afetem a estabilidade dos taludes. Assim sendo, este artigo tem como objetivo avaliar o efeito dos veios drenantes em taludes de montante de barragens de terra em distintas condições de fundações, através de simulações numéricas no *software* Geostudio (módulo Seep/W e Slope/W) com base no método dos elementos finitos (MEF) em condições de fluxo de transiente.

2 VEIOS DRENANTES

De acordo com IS 9429 (1999), os veios drenantes são às vezes aplicados nos espaldares a montante e a jusante para reduzir as pressões nos poros durante a construção e condições de rebaixamento rápido e também após chuvas prolongadas. Segundo Fell *et al.* (2014), os veios drenantes, dependendo do espaldar (montante/jusante), podem desempenhar funções distintas. No talude de jusante, eles possuem o objetivo dissipar o excesso de poropressão durante a construção. No talude de montante, têm como objetivo dissipar a poropressão durante o rebaixamento rápido do reservatório e prevenir o carreamento de finos na direção de montante, quando não existe a possibilidade de acesso para reparos.

No Brasil, até onde se tem conhecimento por parte dos autores, existe apenas um relato de uma barragem com a presença de veios drenantes internos, que é a Barragem do Iraí – Curitiba/PR. (Rodrigues e Lobo, 2023) A Figura 1 ilustra a seção transversal desta estrutura com os respectivos drenos.

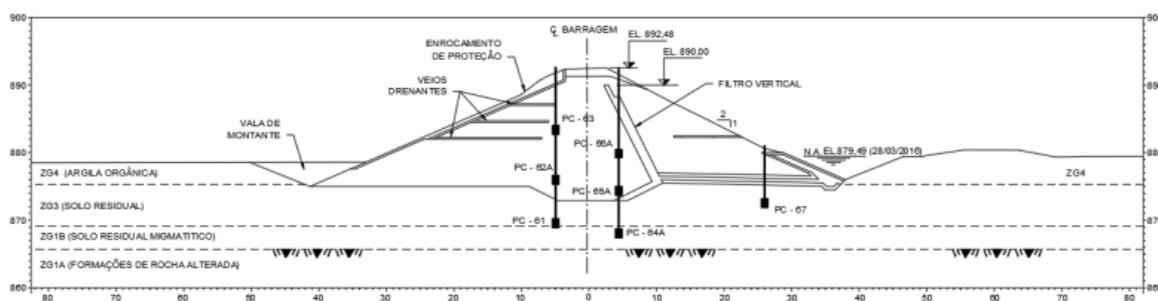


Figura 1. Seção transversal de barragem de terra com veios drenantes

Fonte: Rodrigues e Lobo (2023)

Em termos de projeto, os veios drenantes podem, tipicamente, ser dispostos em camadas de 0,6 m de espessura e espaçamentos verticais de cerca de 6 m. Geralmente é considerado adequado no caso de camadas de veios drenantes nas zonas a montante, para reduzir a poropressão da água durante o esvaziamento. As camadas de filtro precisam se estender até as inclinações externas do aterro para drenar a água acumulada, e não devem ser conectadas a filtros inclinados ou verticais. Um espaço mínimo recomendado de 2,0 m ou mais precisa ser mantido entre a face do filtro inclinado/vertical e a camada de filtro intermediária a jusante (IS 9429, 1999).

Segundo IS 9429 (1999), o dimensionamento dos veios drenantes podem ser realizado usando as equações (1) e (2) conjuntamente com o ábaco da Figura 2:

$$D = \frac{4.L^2 K_{vi}}{\pi^2 \alpha K_{hz}} \quad (1)$$

$$T = \frac{c_v t}{D^2} \quad (2)$$

Onde:

L = Comprimento da camada de filtro;

K_{vi} = Condutividade hidráulica vertical do filtro;

K_{hz} = Condutividade hidráulica Horizontal do filtro;

c_v = Coeficiente de consolidação do material;

t = Período de tempo ao final do qual a eficiência desejada deve ser alcançada;

α = metade da espessura da camada de filtro.

Os outros dois termos no gráfico são:

n = eficiência dos filtros quanto ao rebaixamento da freática, ao final do tempo (t), e

h = metade da distância entre duas camadas de filtro.

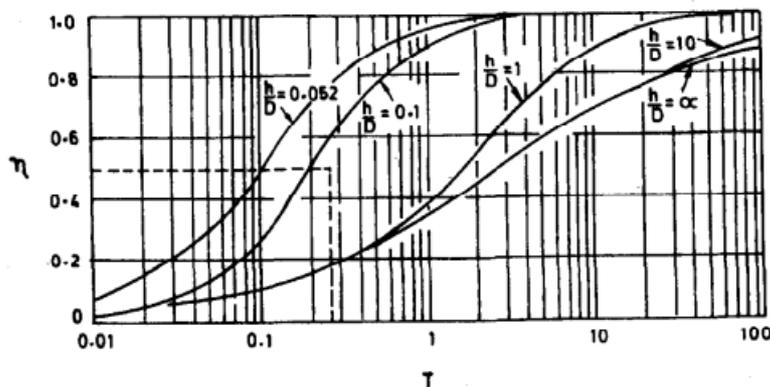


Figura 2. Avaliação da eficiência de drenagem (n) com o fator tempo (t) para carga crescente linearmente
 Fonte: IS 9429 (1999)

3 MÉTODO

No presente trabalho, o estudo para avaliação do efeito dos veios drenantes foi realizada usando o pacote Geotudio. O Seep/W e Slope/W são os módulos de simulações para análise de percolação e estudo de estabilidade de taludes, respectivamente. A abordagem de cálculo ocorre em termos de tensões efetivas, uma vez que este método permite realizar uma análise acoplada de fluxo seguido de uma análise de estabilidade. Dessa maneira, é possível utilizar os resultados da análise de fluxo em termos de poropressões e utilizar como *input* das análises de estabilidade para cada instante do rebaixamento (através da simulação de fluxo

transiente), em contraponto a uma abordagem clássica, na qual as poropressões são calculadas a partir da distância vertical entre a linha freática e a base da fatia.

Em uma análise não acoplada, quando o rebaixamento se inicia, as pressões intersticiais serão maiores que no caso de uma análise acoplada pois essa abordagem não considera as mudanças a que o maciço estabilizador está sujeito em termos de tensões logo imediatamente após o esvaziamento se iniciar (Pinyol *et al.*, 2008).

Para avaliação do comportamento dos veios drenantes, foram escolhidos dois cenários para a fundação da barragem, sendo eles: a) perfil com uma camada única, representada por um material menos permeável (ver Figura 3) e parâmetros referentes à camada inferior (ver Tabela 1) e b) perfil representado por uma camada superficial mais permeável seguida de outra camada menos permeável (ver Figura 4 e Tabela 1).



Figura 3. Estudo comparativo entre a barragem de terra com e sem veios drenantes apoiada sobre um solo homogêneo

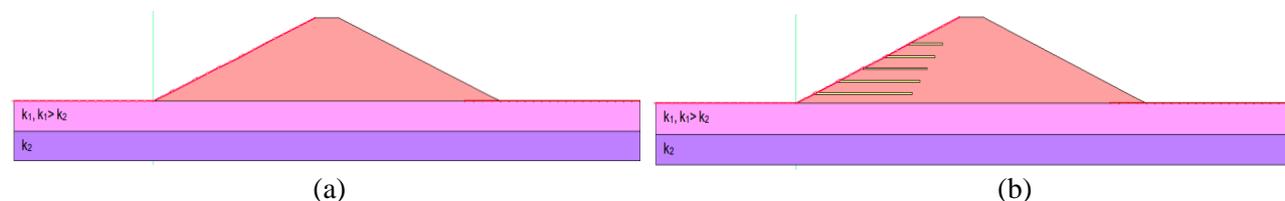


Figura 4. Estudo comparativo entre a barragem de terra com e sem veios drenantes apoiada sobre um solo com diferentes condutividade hidráulicas.

A geometria adotada foi de uma barragem homogênea com 28 m de altura e 10 m de comprimento da crista, com inclinação dos taludes de montante e de jusante igual a 2,5H: 1V. Nesta estrutura foi considerada a presença de um dreno de pé para todos os cenários, o qual foi representado por uma condição de contorno. Como pode ser visualizado nas figuras supracitadas, foi analisado efeito da variação dos materiais e espessuras da fundação no comportamento da estabilidade da estrutura em função da dissipação gerada pelo rebaixamento rápido. Para tanto, a barragem que está em contato com uma camada de fundação possui 20 m de profundidade e no cenário de camada composta da fundação, esta foi dividida em duas camadas de 10 m cada.

A Tabela 1 indica todos aos parâmetros utilizados nas análises do presente estudo, sendo: K_x (condutividade hidráulica saturada na direção x); K_y (condutividade hidráulica saturada na direção y); c' (intercepto coesivo efetiva); φ' (ângulo de atrito efetivo); e γ (peso específico do solo).

Tabela 1. Parâmetros adotados nas análises de percolação (Seep/W) e estabilidade (Slope/W).

Parâmetro	Maciço	Veio drenante	Fundação	
			(camada superior)	(camada inferior)
K_x (cm/s)	1×10^{-5}	2×10^{-2}	1×10^{-4}	5×10^{-5}
K_x/K_y	2	1	1	1
γ (kN/m ³)	21	19	16	19
c' (kPa)	10	0	0	6,2
φ' (°)	31	35	25	29

Antes de analisar o rebaixamento rápido do reservatório, modelou-se uma fase de cálculo designada por fluxo permanente, com o objetivo de simular a situação em que a barragem se encontra na situação de pleno

armazenamento, ou seja, com o nível de água do reservatório constante a uma cota elevada durante um longo período. Para esta etapa, assumiu-se que uma lâmina d'água de 24 m e taxa de rebaixamento 1m/dia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao analisar o comportamento de fluxo da estrutura sobre fundação homogênea, observa-se que à medida que o nível de água no reservatório diminui, os vetores de fluxo tendem a se deslocar em direção ao talude de montante, como indicado nas Figura 5 e Figura 6. Quando há veios drenantes presentes (ver Figura 6), fica evidente a influência dessas estruturas no fluxo do maciço e na fundação. Os veios tendem a tornar as linhas equipotenciais mais horizontais próximas à superfície do solo e a aumentar a dissipação de água no talude de montante, ao mesmo tempo em que reduzem o fluxo na fundação e na saída do sistema de drenagem a jusante da barragem. Além disso, as linhas freáticas, atendem uma geometria semelhante, porém na estrutura com veio drenante, a geração das poropressões positivas ocorrem na extremidade interna a uma certa distância da face do talude de montante.

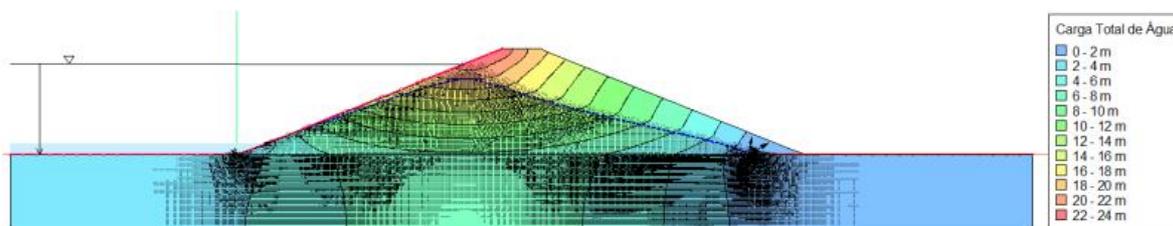


Figura 5. Análise de percolação , com base em MEF, da barragem de terra homogênea sem veios drenantes com fundação em solo homogêneo

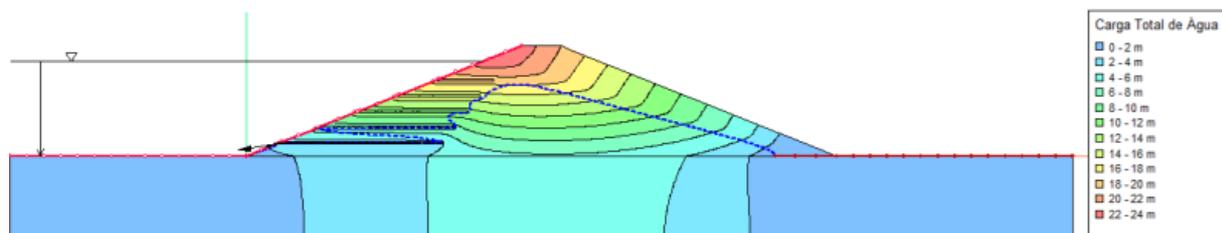


Figura 6. Análise de percolação , com base em MEF, da barragem de terra homogênea com veios drenantes com fundação em solo homogêneo

Ao comparar a Figura 7 e Figura 8, nota-se que as superfícies potenciais de ruptura entre a estrutura com veio drenante e sem veio drenante apresentaram extensões distintas, como também fatores de segurança diferentes. Em termos de fator de segurança, a seção homogênea com veios drenantes resultou, em média, fatores de segurança 12% maiores do que a seção homogênea sem veios drenantes.

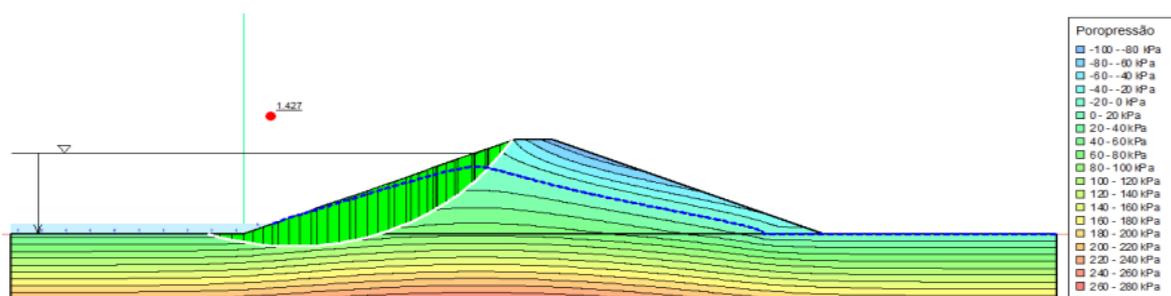


Figura 7. Análise de estabilidade, com base em MEF, da barragem de terra homogênea sem veios drenantes com fundação em solo homogêneo

A presença dos veios interferiram na resposta do fator de segurança, de modo houve uma mudança de 1,427 (sem veios drenantes) para 1,595 (com veios drenantes), o que demonstra o efeito favorável da dissipação da poropressões pela presença de veior dreneantes.

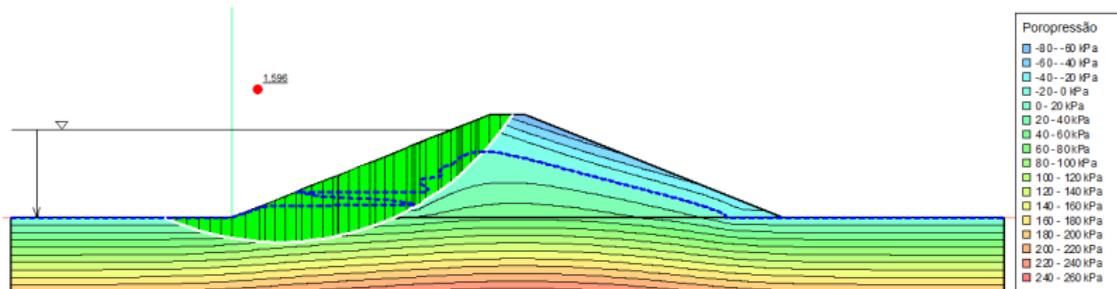


Figura 8. Análise de estabilidade, com base em MEF, da barragem de terra homogênea com veios drenantes com fundação em solo homogêneo

Quando existe a presença dos veios drenantes fica evidente a influência dessas estruturas no fluxo no interior do maciço e na fundação heterogênea, como pode ser verificado ao se comparar a Figura 9 com a Figura 10. Pode ser observado que a curva de carga total aparentemente mantém alguma semelhança com a curva sem veios drenantes, porém no espaldar montante, os veios dissiparam o excesso de poropressão no talude de montante, alterando a posição da freática nesta região, bem como diminuindo o fluxo na fundação e na saída do sistema de drenagem a jusante da barragem.

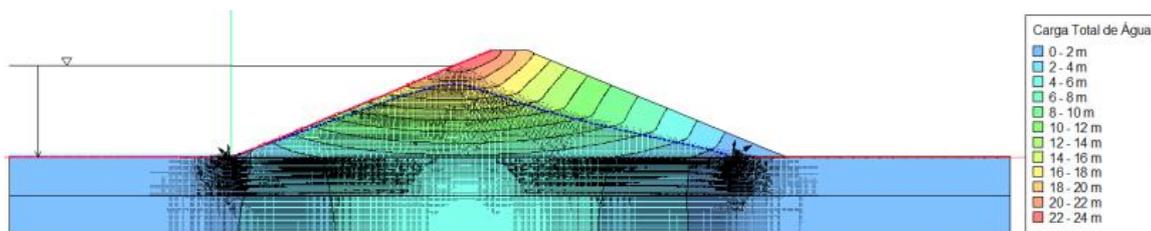


Figura 9. Análise de percolação, com base em MEF, da barragem de terra homogênea sem veios drenantes com fundação em solo heterogêneo

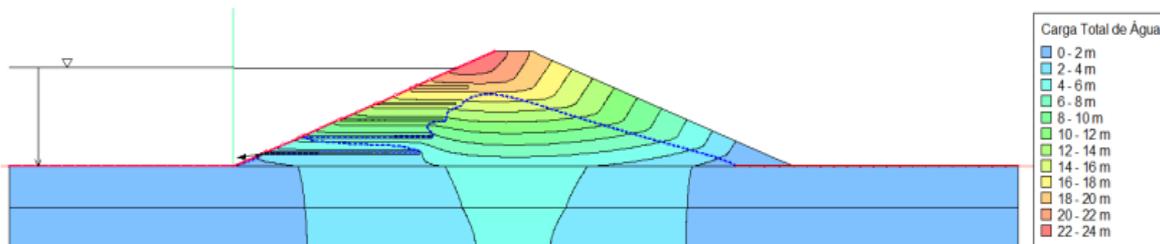


Figura 10. Análise de percolação, com base em MEF, da barragem de terra homogênea com veios drenantes com fundação em solo heterogêneo

Ao comparar as simulações de estabilidade da Figura 11 e da Figura 12, foi observado que a seção homogênea com veios drenantes (FS=1,296) resultou em fatores de segurança 6% maiores do que a seção homogênea sem veios drenantes (FS=1,224). Os veios drenantes não foram tão eficientes necessário, ainda que, no espaldar a montante, reduzisse significativamente o efeito do excesso de poropressão positiva, a instabilidade global desencadeou uma mobilização de massa semelhante ou levemente superior ao modelo sem veios drenantes.

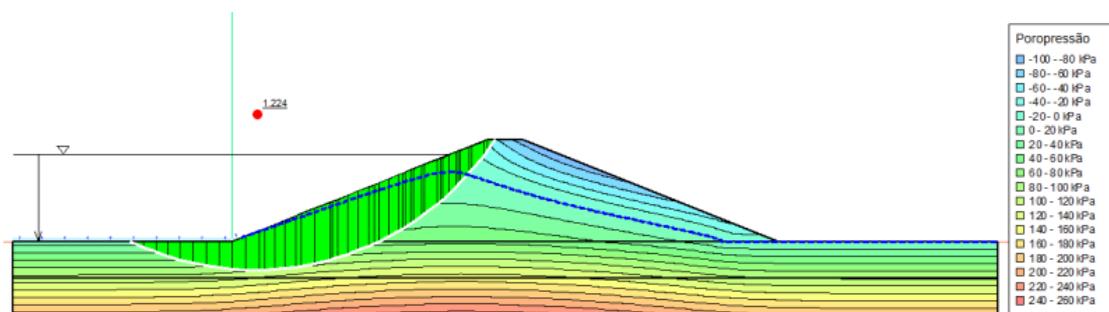


Figura 11. Análise de estabilidade, com base em MEF, da barragem de terra homogênea sem veios drenantes com fundação em solo heterogêneo

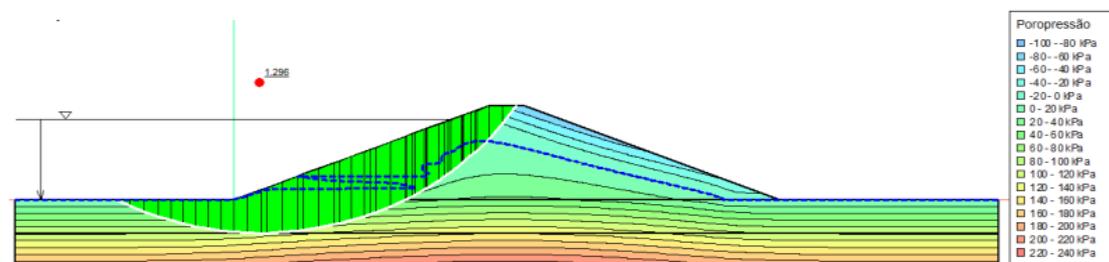


Figura 12. Análise de estabilidade, com base em MEF, da barragem de terra homogênea com veios drenantes com fundação em solo heterogêneo

5 CONCLUSÕES

Após avaliar os cenários simulatórios das análises de percolação e de estabilidade, algumas conclusões podem ser declaradas, sendo elas:

- A partir da análise de percolação, foi observado que, na barragem sem veios drenantes, uma linha freática elevada se desenvolve no espaldar de montante. Na presença de veio drenante, verificou-se uma posição mais baixa da linha freática. Os veios drenantes possibilitaram que ocorresse um afastamento da linha freática da face montante em função da facilidade de dissipação do excesso de poropressão;
- Foi observado que os veios drenantes elevaram o FS dos espaldares a montante. No caso de fundação em solo homogêneo, o FS aumentou em 12% e no caso de fundação em solo heterogêneo o FS aumentou 6%. Essas reduções são válidas para os casos avaliados e podem diferir em outras situações, que devem ser avaliadas segundo suas características específicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam os seus agradecimentos ao CNPQ (Conselho Nacional de Pesquisa) e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo fomento a pesquisa no Brasil. Além disso, os pesquisadores agradecem ao PPGE/UFPR (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) pelo espaço físico e pelas instruções do corpo técnico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fell, R.; Macgregor, P.; Stapledon, D.; Bell, G.; Foster, M. (2014) *Geotechnical Engineering of Dams*. Taylor and Francis: London, 1348 p.

Gaioto, N. (2003) *Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento*. USP: São Paulo, 126 p.

Indian Standard (1999). IS 9429. Drainage system for earth and rockfill dams - Code of Practice. New Delhi.

Massad, F. (2010) *Obras de Terra: Curso básico de Geotecnia*. Oficina de Textos: São Paulo, 216 p.

Pinyol, N. M. ; Alonso, E. E. ; Olivella, S. (2008) Rapid drawdown in slopes and embankments. *Water Resources Research*, 44.

Rodrigues, R. De L.; Lobo, A. V. De L. (2023) Estudo de rebaixamento rápido de reservatório em uma barragem de abastecimento. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu. *Anais...* CBDB. v. 1, p. 1-13.

Sandroni, S. S.; Guidicini, G. (2021) *Barragens Terra e Enrocamento*. Oficina de Textos: São Paulo, 167 p.