

# Modelagem numérica com interação solo-atmosfera em uma pilha de rejeitos filtrados

Ágatha Ribeiro Hauck  
Universidade de Brasília/Samarco, [agatha.hauck@samarco.com](mailto:agatha.hauck@samarco.com)

Felipe Rodrigues  
Universidade de Brasília, [felipe.henrique.fr@gmail.com](mailto:felipe.henrique.fr@gmail.com)

Juliana Meza  
Progen, [C0628142@vale.com](mailto:C0628142@vale.com)

Nilthson Noreña  
Vale, [nilthson.norena@vale.com](mailto:nilthson.norena@vale.com)

Manoel Porfírio Cordão Neto  
Universidade de Brasília, [porfirio@unb.br](mailto:porfirio@unb.br)

**RESUMO:** A mineração é uma atividade essencial para o Brasil, mas os recentes acidentes aumentaram a pressão social por soluções mais seguras e sustentáveis na disposição dos rejeitos. Nesse cenário, as pilhas de rejeitos filtrados emergem como uma alternativa promissora às tradicionais barragens de rejeitos. Devido às suas particularidades, essas estruturas exigem considerações específicas nos projetos. Os rejeitos compactados, mantidos próximos à umidade ótima, permanecem predominantemente não saturados durante a maior parte da vida útil da pilha. Em regiões tropicais, como o Brasil, altos índices pluviométricos podem criar zonas de saturação, afetando a estabilidade das pilhas. Este artigo apresenta uma modelagem numérica de uma pilha de rejeitos filtrados, levando em conta a sua condição não saturada, a interação solo-atmosfera típica de climas tropicais com base nos dados históricos de uma estação meteorológica do INMET. A metodologia proposta busca preencher uma lacuna no conhecimento sobre o comportamento dessas estruturas em regiões tropicais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pilha de rejeitos filtrados, solos não saturados, interação solo-atmosfera, tensão-deformação-poropressão, modelo hidromecânico acoplado.

**ABSTRACT:** Mining is an essential activity for Brazil, although recent accidents have increased social pressure for safer and more sustainable solutions for tailings disposal. In this context, filtered tailings stacks emerge as a promising alternative to traditional tailings dams. Due to their specific characteristics, these structures require particular considerations in their design. Compacted tailings, maintained close to their optimum moisture content, remain predominantly unsaturated for most of the stack's operational life. In tropical regions like Brazil, high rainfall indices can create zones of increased saturation, affecting the stability of the stacks. This paper presents a numerical modeling of a filtered tailings stack, taking into account its unsaturated condition, the soil-atmosphere interaction typical of tropical climates based on historical data from an INMET meteorological station. The proposed methodology aims to fill a knowledge gap regarding the behavior of these structures in tropical regions.

**KEYWORDS:** Filtered tailings pile, unsaturated soils, soil-atmosphere interaction, stress-strain-pore pressure, coupled hydromechanical model.

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel crucial no desenvolvimento econômico do Brasil, com a exploração do minério de ferro sendo sua principal fonte de receita (IBRAM, 2023). Contudo, o processo de beneficiamento a úmido gera volumes significativos de rejeitos, especialmente em Minas Gerais, onde a concentração do minério está em declínio devido à idade das minas, aumentando ainda mais a produção desses rejeitos.

Os acidentes recentes aumentaram a pressão da sociedade por soluções mais seguras e sustentáveis para a disposição desses rejeitos, levando a indústria mineradora a buscar alternativas que priorizem esses aspectos em seus projetos. Nesse contexto, as pilhas de rejeitos filtrados surgem como uma alternativa promissora às barragens tradicionais, oferecendo vantagens como a reutilização da água no processo de produção, redução do fluxo de contaminantes, menor impacto ambiental devido à necessidade de menores áreas para disposição, e menor risco de liquefação estática e dinâmica (Lupo & Hall, 2010).

Inicialmente, essas estruturas foram recomendadas para projetos em regiões áridas. No entanto, sua aplicação expandiu-se para locais com climas tropicais, como no Brasil, onde há elevados índices pluviométricos ao longo do ano. Portanto, as particularidades dessas estruturas implantadas no Brasil devem ser cuidadosamente consideradas nos projetos. O principal fator a ser considerado é conciliar a velocidade de alteamento das pilhas para atender às altas taxas diárias de produção de rejeitos nas usinas, dentro de um cenário de elevadas precipitações anuais (MEND, 2017).

Além dos desafios operacionais, é essencial compreender o comportamento geotécnico dessas estruturas em condições não saturadas, especialmente durante períodos chuvosos que podem afetar suas propriedades hidráulicas e mecânicas. O presente artigo propõe a aprofundar essa análise, considerando a interação solo-atmosfera em climas tropicais e os aspectos operacionais do processo de disposição dos rejeitos. Um modelo numérico acoplado será utilizado para simular as tensões, deformações e fluxos em uma pilha hipotética, trazendo uma representação mais próxima do que acontece durante o processo de compactação das camadas da pilha e durante os regimes hidrológicos que a estrutura atravessa.

## 2 EMPILHAMENTO DE REJEITOS FILTRADOS

Os rejeitos são subprodutos do beneficiamento do minério de ferro, com propriedades variáveis conforme a frente de lavra e o processo industrial. Classificam-se conforme teor de sólidos em lamas (30-40% de sólidos), espessados (45-65%) e tortas (80-85%) (Davies, 2011). Para cada porcentagem alvo, utilizam-se diferentes técnicas de desaguamento e métodos de disposição.

O método de disposição dos rejeitos em pilhas demanda a filtragem da polpa, onde a separação dos sólidos em solução aquosa é realizada com a aplicação de uma força sobre as partículas. Essa força pode ser obtida por gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação, permitindo assim a passagem do líquido (filtrado) e retraindo os sólidos (torta) (Chaves, 2004).

A disposição de rejeitos filtrados era inicialmente atrativa em regiões áridas, onde o reuso da água no processo é importante; em locais com restrição de área ou com atividade sísmica intensa e em locais frios, onde o manejo da água é dificultado em determinados períodos do ano (Davies, 2011; Lupo & Hall, 2010). Atualmente essas pilhas têm sido adotadas também em regiões de clima tropical, como no Brasil. Os principais desafios para esses projetos brasileiros estão atrelados às altas taxas de produção de rejeitos por dia, além das elevadas precipitações anuais.

As pilhas de rejeitos filtrados são compactadas em condições próximas à umidade ótima do material, portanto, esses rejeitos se encontram em grande parte da vida útil da estrutura em condição não saturada. A mecânica dos solos não saturados é tida como uma abordagem generalizada da mecânica dos solos clássica, onde os solos saturados representam apenas um caso particular.

A resposta mecânica do solo, dada pela resistência ao cisalhamento e deformabilidade, está diretamente relacionada ao seu estado de tensões. Nos solos saturados, a resistência mecânica é dada pela tensão efetiva, definida como o excesso de tensão aplicada em relação à poro pressão (Terzaghi, 1996). Fredlund e Morgestern (1977) propuseram uma análise teórica para definição do estado de tensão em solos não saturados, onde é necessária a definição de duas variáveis, a tensão líquida e a sucção mátrica.

Nos solos não saturados, há uma grande interdependência entre seu comportamento mecânico e hidráulico, e a representação desses comportamentos em conjunto só é possível através análises hidromecânicas acopladas. Nessas análises acopladas, as equações de equilíbrio e fluxo são expressas em termos das variáveis básicas de deslocamento e poro pressão e são resolvidas simultaneamente (Farias e Cordão Neto, 2010).

As análises acopladas em meios saturados vêm evoluindo desde a teoria de adensamento unidirecional de Terzaghi em 1923, enquanto os trabalhos em solos não saturados nessa temática iniciaram apenas na década de 90 (Cordão Neto, 2005). Os avanços na modelagem para os solos não saturados de forma geral abrangem formas de prever o comportamento mecânico do solo durante o processo de molhagem. Isso é possível por meio da utilização de métodos numéricos, tais como o Método dos Elementos Finitos. Tais métodos permitem ainda que sejam aplicadas as mais diferentes condições de contorno no decorrer do tempo, como chuvas, evaporação, influência da irradiação e vento, etc.

Embora seja possível encontrar na literatura trabalhos relevantes apresentando modelagens hidromecânicas acopladas para barragens de terra (Cordão Neto, 2005; Farias e Cordão Neto, 2010; Saad e Mitri, 2011; Naeini e Akhtarpour, 2018), não foram encontradas referências de trabalhos semelhantes realizados em pilhas de rejeitos filtrados. Portanto, este artigo tem como objetivo realizar a análise numérica acoplada para uma pilha hipotética instalada em região tropical.

### 3 METODOLOGIA

O Método do Equilíbrio Limite (MEL) calcula o fator de segurança de uma estrutura geotécnica dividindo a superfície de ruptura potencial do talude em fatias e calculando as equações de equilíbrio para cada fatia. No entanto, devido à natureza hiperestática do problema, são necessárias hipóteses simplificadoras, como as apresentadas por Morgenstern e Price (1965), para viabilizar a solução. As hipóteses simplificadoras, como a obtenção dos campos de tensões e poropressões, podem ser aprimoradas, especialmente durante a fase de construção do aterro da pilha, onde coeficientes empíricos (como o parâmetro  $r_{ij}$ ) são necessários. Além disso, as poropressões variam com o tempo, exigindo a escolha de um instante específico para calcular o fator de segurança, resultando em uma série temporal de FS em vez de um único valor.

O modelo rígido-perfeitamente-plástico do MEL, inadequado para representar o comportamento do solo, pode ser melhorado com análises tensão-deformação utilizando o método dos elementos finitos (MEF) combinado com o MEL. Naylor e Farias (1998) propuseram o Método do Equilíbrio Limite Aperfeiçoado, que utiliza o campo de tensões obtido por elementos finitos. Cordão-Neto (2005) e Farias e Cordão-Neto (2010) demonstraram a aplicação dessa metodologia para problemas não saturados. Para obter o fator de segurança a partir de uma análise hidromecânica acoplada, duas etapas são necessárias: a análise de tensão-deformação-poropressão via método dos elementos finitos e a obtenção do fator de segurança ao longo do ciclo de vida da pilha utilizando o Método do Equilíbrio Limite Aperfeiçoado, conforme metodologia apresentada na Figura 1.

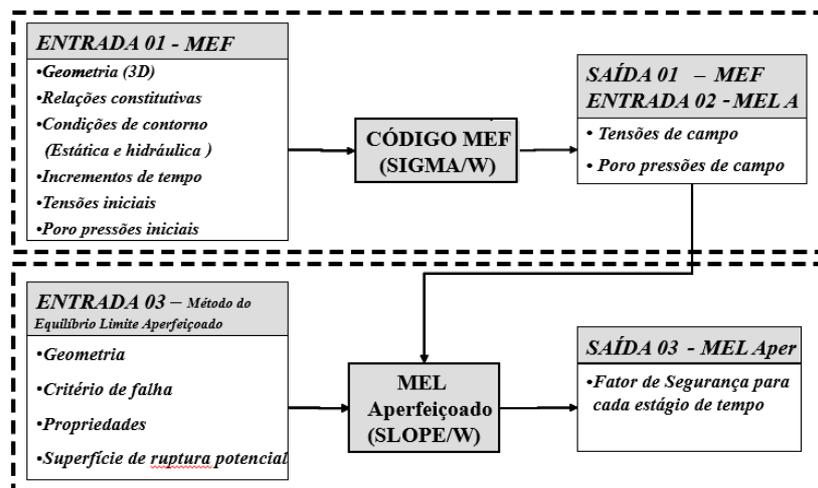


Figura 1. Metodologia utilizada para o cálculo do fator de segurança (Farias e Cordão-Neto, 2010, adaptado).

### 3.1 Condições de Contorno

Considerando que a pilha passará por períodos chuvosos e de estiagem ao longo do tempo, a resolução do problema será transiente, ou seja, as condições de contorno mudarão ao longo do tempo. Foi necessária a definição de condições de contorno não convencionais, como a infiltração de água no solo devido às chuvas, poropressões nas fronteiras do aterro geradas durante a construção, drenos, entre outros.

A definição das condições de contorno transientes para construção de aterros foi apresentada por Cordão-Neto et al. (2004), Cordão-Neto (2005) e Farias e Cordão-Neto (2010) e está ilustrada na Figura 2. O valor da poropressão estabelecida no topo da nova camada deve ser compatível com o valor da poro pressão relacionado ao teor de umidade utilizado na compactação do material. À medida que o aterro é alteado, as condições de contorno para as camadas existentes devem ser atualizadas para construção da nova camada.

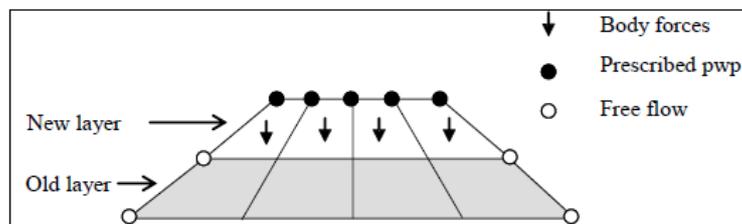


Figura 2. Forças e condição de contorno para construção de aterros (Farias e Cordão-Neto, 2010).

Além das etapas de construção, é necessário impor condições de contorno para representar as condições climáticas que a estrutura estará submetida durante os anos. Muños et al. (2017) e Muños et al (2018) apresentaram uma metodologia para aplicação de uma série temporal de 30 anos, considerando os dados de precipitação, interceptação e evapotranspiração locais. Quando uma taxa de infiltração é aplicada (condição de contorno natural), há o aumento gradativo da poropressão, até que esta atinja um valor predefinido como limite, então, muda-se a condição de contorno para poropressão prescrita (condição de contorno essencial).

## 4 MODELO NUMÉRICO

A modelagem do problema foi realizada no pacote de programas Geostudio, da Seequent. Para a primeira etapa, que consistiu em obter as tensões e poro pressões de campo, foram utilizados o SIGMA/W e o SEEP/W. A segunda etapa, por sua vez, foi realizada no SLOPE/W, para obtenção dos fatores de segurança da pilha em suas diferentes etapas construtivas. A metodologia completa é encontrada em Rodrigues (2023).

### 4.1 Contextualização do Problema

A configuração adotada na análise foi a de uma pilha de rejeitos filtrados hipotética com 100 metros de altura, dividida entre 10 camadas de 10 metros, onde cada camada construída corresponde a um ano de operação (Figura 3). Foram utilizados dois materiais na construção do problema, sendo o primeiro a fundação (em amarelo) e o segundo, os rejeitos (em verde). Na base e lateral os deslocamentos horizontais e verticais foram restringidos.

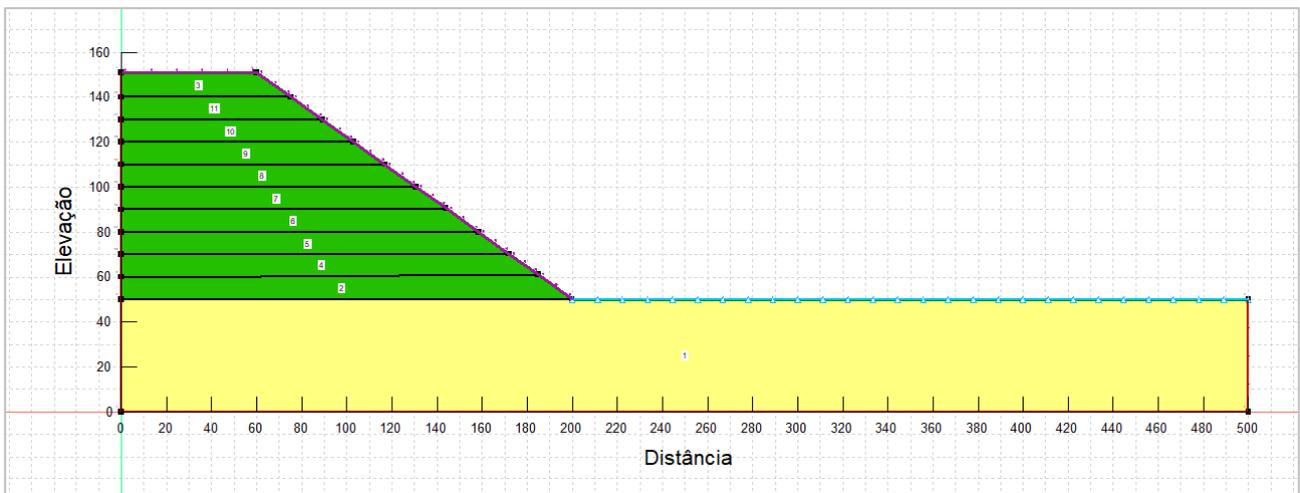
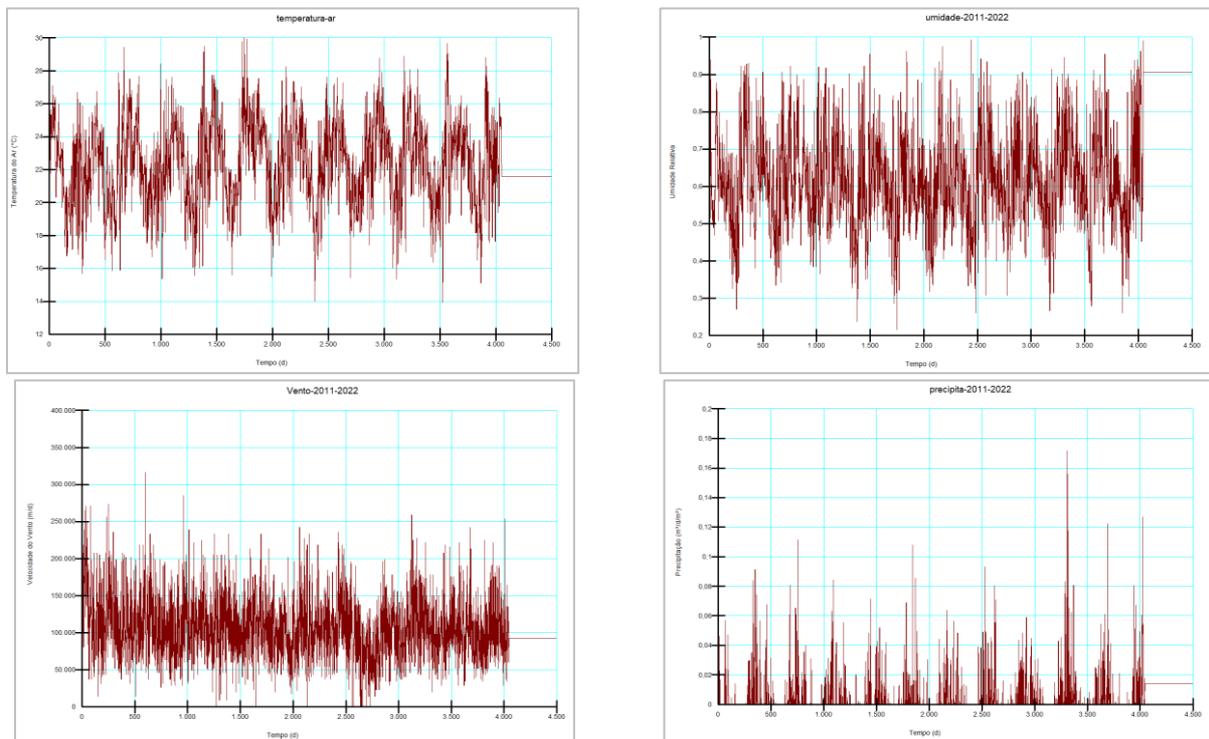


Figura 3. Geometria da pilha

Para a análise com interação solo-atmosfera (referente às condições de contorno da atmosfera), foram inseridos os gráficos com os dados meteorológicos obtidos no portal do INMET, para a estação meteorológica de Belo Horizonte, com a data de corte compreendida entre os anos de 2011 e 2022. Na análise apresentada, a variável de vegetação não foi considerada. Para a condição de contorno atmosférica, é necessária ainda a avaliação da temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação e fluxo líquido de radiação.

A interação solo-atmosfera é realizada pela integração do Método de Penman-Wilson no Método do Equilíbrio Limite (MEL) e no Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizados no programa, para a determinação do fluxo real de evaporação (GeoSlope International Ltd., 2014). Os gráficos inseridos no modelo estão apresentados na Figura 4. Os parâmetros utilizados para os materiais do modelo estão sintetizados na Tabela 1.



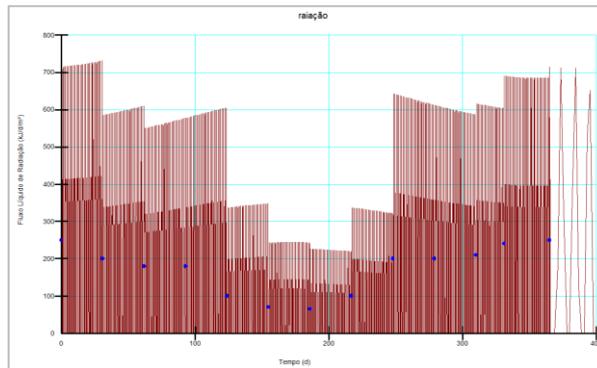


Figura 4. Gráficos de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação e radiação, respectivamente (Rodrigues, 2023).

Tabela 1. Parâmetros dos materiais utilizados na análise (Rodrigues, 2023).

Material	Índice de vazios inicial	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Elasticidade efetiva (kPa)	Poisson	a(kPa)	n	Compressibilidade (kPa <sup>-1</sup> )	TUV Sat	TUV Res
Fundação	0,9	23	100.000	0,3	300	1,3	1x10 <sup>-6</sup>	0,4	0,05
Rejeito	1,0	25	30.000	0,4	30	1,3	0,0001	0,5	0,05

Os gráficos da Figura 5 apresentam uma comparação entre as propriedades hidráulicas (permeabilidade e curva de retenção) do rejeito e da fundação. A fundação se aproxima do modelo elástico linear, enquanto os rejeitos se aproximam do modelo rígido-perfeitamente-plástico de Mohr-Coulomb, o que justifica a diferença entre a elevação do teor de umidade volumétrica em comparação com as poropressões.

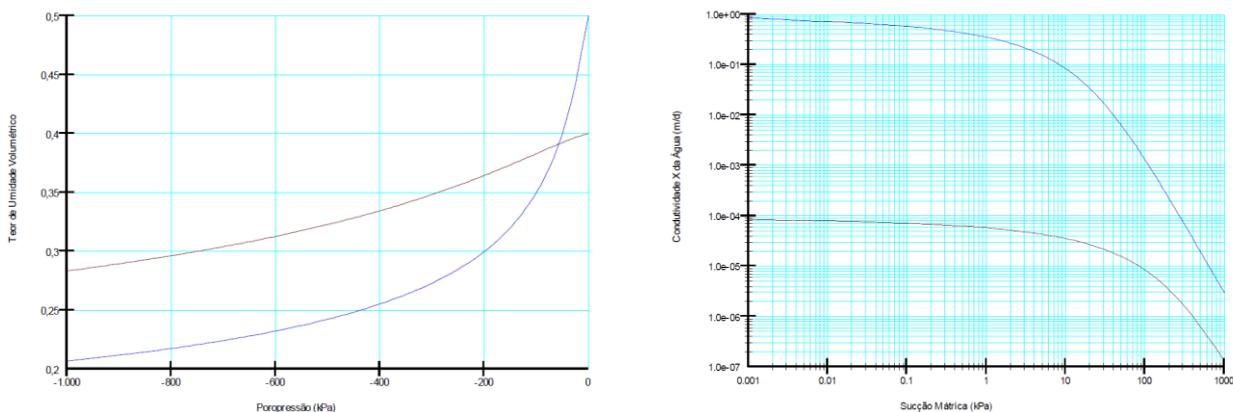


Figura 5. À esquerda: relação entre o teor de umidade volumétrica e as poropressões para fundação (em vermelho) e os rejeitos (em azul). À direita: Curvas de retenção da fundação e dos rejeitos (Rodrigues, 2023).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Poropressões

O objetivo da análise das poropressões foi avaliar a influência das condições de contorno atmosféricas durante as diferentes fases construtivas da pilha. Foram modeladas as poropressões para a quinta e nona camada, correspondentes ao quinto e nono ano de operação, respectivamente. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 6 e 7.

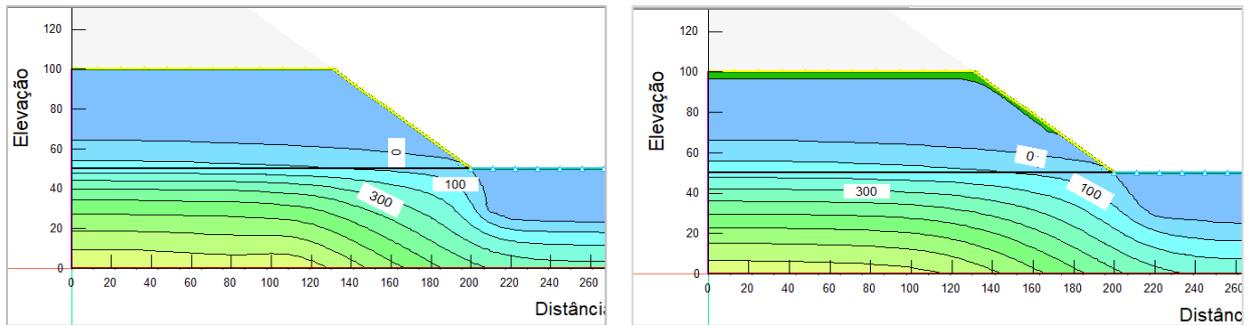


Figura 6. Poro pressões no quinto ano construtivo da pilha, sem consideração das condições de contorno atmosféricas (à esquerda) e considerando a interação solo-atmosfera (à direita).

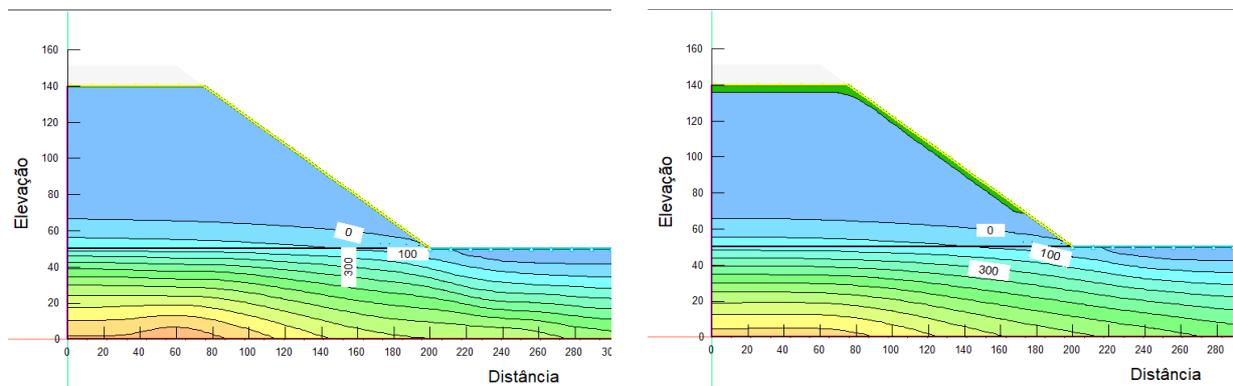


Figura 7. Poro pressões no nono ano construtivo da pilha, sem consideração das condições de contorno atmosféricas (à esquerda) e considerando a interação terra-clima (à direita).

As figuras 6 e 7 mostram que não houve alteração marcante nas poropressões durante as diferentes fases construtivas da pilha quando considerada a condição de contorno atmosférica. A base da pilha, por sua vez, pode gerar algum excesso de poro pressão durante as etapas construtivas, sendo recomendável a instalação e o monitoramento da estrutura durante toda sua vida útil com piezômetros. Segundo o modelo, as tensões totais serão iguais às efetivas, uma vez que não há geração de poropressão em praticamente todo corpo da pilha.

## 5.2 Fator de Segurança

Foram realizadas análises de estabilidade para a estrutura para cada ano de construção. A Figura 8 apresenta o fator de segurança obtido para o ano 9.

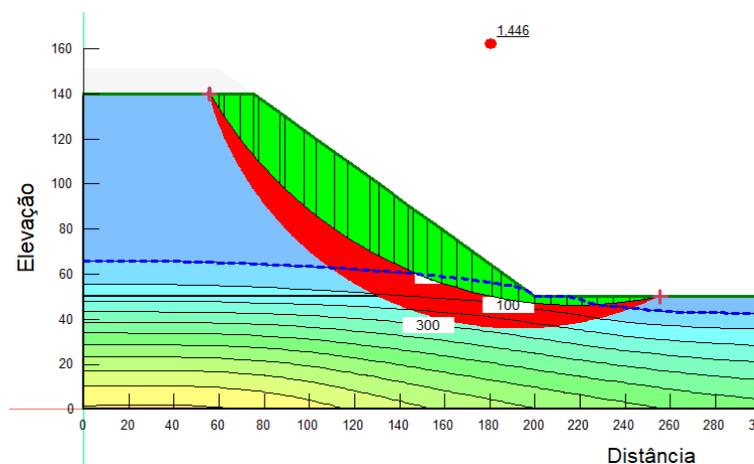


Figura 8. Fator de segurança da pilha – nono ano de construção

É importante observar que, para a configuração proposta e com os parâmetros utilizados, o fator de segurança obtido para a pilha não atende às Normas vigentes no Brasil, uma vez que estes que deveriam estar acima de 1,5 para esse tipo de estrutura geotécnica.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que, para o caso avaliado, as condições de contorno atmosférica não alteraram significativamente as poropressões nas diferentes fases construtivas da pilha. No entanto, a base da pilha pode gerar algum excesso de poropressão durante as etapas construtivas, justificando a necessidade de monitoramento contínuo.

Para a configuração proposta e com os parâmetros utilizados, o fator de segurança obtido no modelo não se enquadra nos mínimos estabelecidos pela Norma de pilhas, ABNT NBR 13.029 - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Dessa forma, ajustes na geometria da pilha seriam necessários para aumentar sua estabilidade.

Por fim, é possível obter estimativas para o comportamento da estrutura no longo prazo, partindo das mesmas premissas apresentadas neste artigo. Embora as pesquisas sobre pilhas de rejeitos filtrados tenham crescido nos últimos anos, ainda há temáticas que podem ser tecnicamente aprofundadas para uma melhor compreensão do comportamento dessas estruturas ao longo de toda sua vida útil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chaves, A. P. (2004). *Teoria e prática do tratamento de minérios*.
- Cordão Neto, M. P. C. (2005) *Análise hidro-mecânica de barragens de terra construídas com materiais colapsíveis*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.
- Davies, M. (2011) Filtered dry stacked tailings: the fundamentals. *Proceedings of Tailings and Mine Waste*.
- Farias, M. M.; Cordão Neto, M. P. (2010) Advanced numerical simulation of collapsible earth dams. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 47, p. 1351-1364.
- Fredlund, D. G.; Morgenstern, N. R. (1977) Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of the geotechnical engineering division*, v. 103, n. 5, p. 447-466.
- FREDLUND, Delwyn G.; MORGENSTERN, Norbert R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of the geotechnical engineering division*, v. 103, n. 5, p. 447-466.
- Geoslope International Ltd. (2012). “Seepage Modeling with SEEP/W – An Engineering Methodology”. Geoslope International Ltd., Calgary, Alberta, Canadá.
- IBRAM. Infográfico - Mineração em números – 2022. Disponível em: < <https://ibram.org.br/publicacoes/page/2/#publication> > Acessado em 07/11/2023.
- Lupo, J.; Hall, J. (2010) *Dry stack tailings—design considerations*. *Proceedings Fourteenth International Conference on Tailings and Mine Waste*, Vail, Colorado, USA, AA Balkema, The Netherlands. p. 327-334.
- MEND – Mine environment neutral drainage Project. (2017) MEND Report 2.50.1 Study of Tailings Management Technologies. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC), Canadá.
- Rodrigues, F. (2023). *Análise de Pilha de Rejeito Filtrado Construída em Regiões de Clima Tropical*. Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
- Terzaghi, K., Peck, R.B.; Mesri, G. (1996) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, 1996.