

Avaliação do Comportamento Hidráulico e Geotécnico de Talude de Barragem em Diferentes Condições de Operação

Luis Henrique Rambo

Doutorando, FECFAU/UNICAMP, Campinas/SP, Brasil, l202359@dac.unicamp.br

Felipe Augusto Ferreira das Chagas

Graduando Eng Civil, CEC/UNIFAP, Macapá/AP, Brasil, felipe.ferreira@lummienergia.com.br

Pedro Antônio Masiero Júnior

Engenheiro Civil, Lummi Energia, Oiapoque/AP, Brasil, pedro.masiero@lummienergia.com.br

Paulo José Rocha de Albuquerque

Professor Titular, FECFAU/UNICAMP, Campinas/SP, Brasil, pjra@unicamp.br

Fernando Feitosa Monteiro

Professor Doutor, FECFAU/UNICAMP, Campinas/SO, Brasil, feitosam@unicamp.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma análise do comportamento hidráulico e geotécnico de um talude de barragem de terra localizado em região tropical, por meio de modelagens numéricas bidimensionais utilizando o software RS2. O estudo considerou diferentes condições operacionais da estrutura, incluindo fase de operação permanente, rebaixamento rápido do nível do reservatório e eventos extremos simulados por fluxo transiente. Foram avaliadas as distribuições de poropressão, as direções de fluxo e os fatores de segurança obtidos por métodos clássicos de equilíbrio limite. Os resultados evidenciaram que, mesmo sob rebaixamentos bruscos, os fatores de segurança permaneceram acima dos limites mínimos recomendados, embora tenha sido observada concentração de poropressões em zonas críticas da estrutura. As simulações reforçam a importância de sistemas de drenagem internos eficientes e do monitoramento contínuo em estruturas geotécnicas sujeitas a variações hidrodinâmicas, especialmente em solos residuais tropicais. A abordagem adotada confirma a utilidade de ferramentas numéricas como suporte técnico na avaliação da estabilidade e na gestão de riscos em barragens de pequeno porte.

PALAVRAS-CHAVE: barragem, fluxo transiente, estabilidade, taludes, modelagem

ABSTRACT: This paper presents an analysis of the hydraulic and geotechnical behavior of an earth dam slope located in a tropical region, using two-dimensional numerical modeling performed with RS2 software. The study evaluated different operational conditions of the structure, including steady-state operation, rapid reservoir drawdown, and transient events. The analysis focused on pore pressure distributions, flow directions, and safety factors obtained through classical limit equilibrium methods. The results showed that, even under rapid drawdown conditions, the safety factors remained above recommended minimum values, although pore pressure concentration was observed in critical zones of the structure. The simulations highlight the relevance of efficient internal drainage systems and continuous monitoring in geotechnical structures exposed to hydrodynamic variations, especially in tropical residual soils. The adopted approach confirms the value of numerical tools as technical support in the stability assessment and risk management of small-scale dams.

KEYWORDS: dam, transient flow, stability, slopes, modeling

1 INTRODUÇÃO

As barragens de terra construídas em regiões tropicais demandam muita atenção quanto à estabilidade de seus taludes, especialmente sob condições operacionais variáveis e cenários climáticos extremos. O aumento da frequência de eventos como chuvas intensas e rebaixamentos rápidos do nível de água tem



desafiado os métodos tradicionais de avaliação de estabilidade, exigindo modelagens mais refinadas e análises específicas de fluxo em regime transiente podendo contribuir para a previsão de comportamento dos materiais sob tais regimes e pressões induzidas por oscilações no nível do reservatório.

Desta forma, o comportamento hidráulico e geotécnico de taludes de barragens de terra sob diferentes condições de operação é uma temática crítica dentro da engenharia geotécnica, especialmente diante do aumento de eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas.

De acordo com (Goulart; Oliveira; Miranda, 2022) as chuvas são reconhecidas como um dos principais agentes causadores de movimentos de massa, principalmente em regiões de clima tropical. Outros estudos como o de (Tha, 2007) na barragem da margem esquerda de Itaipu demonstraram que apenas parte da água infiltrada pela fundação é efetivamente captada pelos sistemas de drenagem, evidenciando a complexidade dos caminhos de fluxo subterrâneo e a importância da instrumentação adequada para validação de modelos numéricos.

Nas últimas décadas, avanços computacionais permitiram o uso de ferramentas numéricas robustas, como o RS2 (RS2 – Slope Stability Verification Manual, 2023), que possibilitam a simulação de cenários operacionais diversos e a avaliação de parâmetros críticos, como pressão neutra, linha de fluxo e fatores de segurança.

O uso de modelos numéricos tridimensionais para barragens de rejeitos, sedimentos ou água, principalmente em grandes projetos, pode ser uma importante ferramenta para conhecimento do comportamento geral da barragem bem como sua interação com os solos/rochas da base como apontado por (Ribeiro, 2018), que ressaltam a importância da calibração de modelos com dados reais e da interpretação cuidadosa dos resultados para a tomada de decisão.

No presente estudo, apresenta-se um caso real de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) localizada em solo tropical, com solos residuais sobrepostos a rochas parcialmente alteradas.

Os dados foram obtidos a partir de relatórios técnicos do projeto executivo da barragem e de ensaios de campo, incluindo sondagens, ensaios de permeabilidade in situ e levantamentos geológicos.

O objetivo principal é avaliar a influência de diferentes regimes operacionais – construção, estado permanente, rebaixamento rápido e eventos extremos – na estabilidade de taludes, com base em modelagens bidimensionais no software RS2, conforme metodologia adotada em trabalhos como o de (Leme, 2009) e (Montes, 2003).

Além de contribuir com a compreensão dos mecanismos de instabilidade em barragens de terra, o estudo visa propor boas práticas de simulação e interpretação de resultados, reforçando a importância de medidas preventivas e monitoramento contínuo para mitigação de riscos.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada baseou-se na realização de modelagens numéricas bidimensionais com o software RS2® (Rocscience Inc., 2021), buscando avaliar o comportamento hidráulico e a estabilidade do talude de jusante da barragem da PCH Salto Cafesoca em diferentes condições operacionais.

As simulações incluíram os seguintes cenários: fase final de construção, regime permanente de operação, rebaixamento rápido do reservatório e condições transientes representativas de eventos extremos.

As análises utilizaram os dados reais do projeto executivo, incluindo sondagens a trado e SPT, ensaios de permeabilidade in situ e ensaios de laboratório, conforme relatórios técnicos fornecidos pela empresa responsável pela execução da obra.

O talude analisado possui aproximadamente 19,8 metros de altura, com inclinação média de 1V:2,5H no trecho de jusante. A geometria adotada na modelagem foi baseada no perfil típico do projeto executivo.

Foram considerados três principais estratos de solo: uma camada superficial de solo residual argiloso, uma camada intermediária de solo residual laterítico com características silto-arenosas, e uma camada de transição com rocha parcialmente alterada.

Os parâmetros hidráulicos foram definidos a partir de estimativas baseadas na granulometria e na permeabilidade obtida em campo.

As análises de estabilidade foram realizadas utilizando o método de redução da resistência ao cisalhamento (Shear Strength Reduction – SSR), disponível no RS2®, permitindo obter os fatores de segurança em cada cenário. Os efeitos de poro-pressão ao longo do tempo foram integrados às simulações transientes,

com condições de contorno representando as fases de rebaixamento rápido e variações de carga hidráulica, conforme metodologia similar à utilizada por (Leme, 2009) e (Montes, 2003).

Cabe destacar que, embora alguns dados utilizados neste estudo tenham como base informações reais de uma obra localizada no município de Oiapoque/AP, o objetivo do trabalho não é comparar os resultados obtidos com os projetos executivos originais.

Por questões de confidencialidade e respeito às diretrizes éticas, certos parâmetros foram ajustados ou anonimizados, mantendo-se, contudo, a representatividade técnica necessária para o desenvolvimento de análises e extração de lições aplicáveis à engenharia geotécnica.

3 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi desenvolvido com base na barragem da PCH Salto Cafesoca, localizada na região Norte do estado do Amapá conforme figura 1. Trata-se de uma barragem de terra zonada com aproximadamente 19,8 metros de altura e taludes com inclinação média de 1V:2,5H no trecho de jusante.

O maciço possui um núcleo argiloso central e filtros drenantes em sua zona de jusante, segundo projeto executivo.

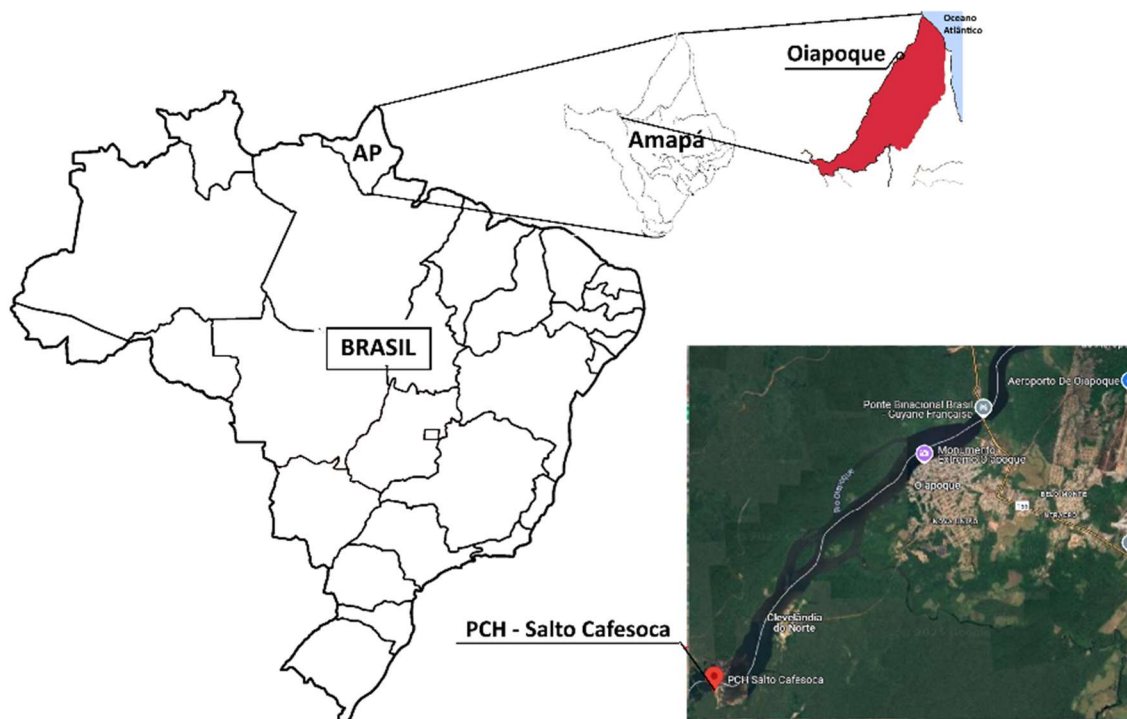


Figura 1. Localização do empreendimento. Fonte: autores 2025.

A fundação da barragem se desenvolve sobre um perfil típico da região amazônica, composto por uma sequência de solos residuais argilosos e siltosos com presença de materiais lateríticos, sobrepostos a uma camada de rocha alterada.

Os dados de campo foram obtidos por sondagens do tipo SPT e ensaios de permeabilidade realizados em furos específicos.

As condições hidrogeológicas da área foram investigadas por meio de levantamentos e ensaios específicos, sendo constatada a presença de um lençol freático com variações sazonais.

A presença de uma camada menos permeável na interface solo-rocha indicou a necessidade de atenção especial na definição do sistema de drenagem interna, com a inclusão de drenos horizontais e filtros invertidos para controle de poro-pressões.

A geometria adotada para modelagem no RS2 seguiu fielmente os perfis extraídos do projeto executivo, conforme a figura 2, incluindo as espessuras das camadas e as dimensões da crista e do pé do talude.

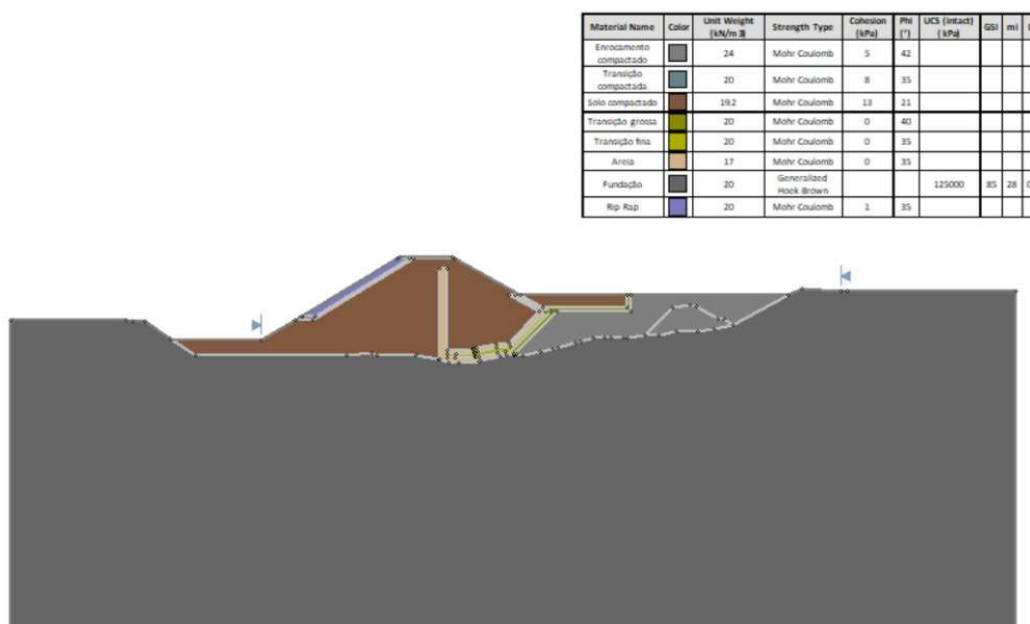


Figura 2. Seção da Barragem. Fonte: autores 2025.

Essa abordagem numérica fornece maior realismo às análises em comparação com métodos bidimensionais tradicionais, especialmente em estruturas com geometrias complexas como taludes de barragens.

Os parâmetros geotécnicos utilizados foram obtidos a partir dos relatórios técnicos de campo e descritos conforme as tabelas 1 e 2, na resistência de referências bibliográficas para materiais similares, conforme descrito na seção de metodologia.

Tabela 1 – Parâmetros Geotécnicos 1.

	Descrição	C (kPa)	$\Phi(^{\circ})$	$\gamma(\text{g/cm}^3)$
Rip-rap	-	5	42	2,40
Enrocamento Compactado	-	5	42	2,40
Transição Compactada	-	8	35	2,00
Solo Compactado	Arg Siltosa	13	21	1,92
Transição Grossa	-	8	35	2,00
Transição Fina	Brita 1	0	35	2,00
Areia	-	0	27	1,70
Fundação	Gnaíse	500	40	-

Tabela 2 – Parâmetros Geotécnicos 2.

	Resistência Uniaxial de Compressão (MPa)	Módulo de Deformabilidade (MPa)	GSI
Rip-rap	-	-	-
Enrocamento Compactado	-	-	-
Transição Compactada	-	-	-
Solo Compactado	-	-	-
Transição Grossa	-	-	-
Transição Fina	-	-	-
Areia	-	-	-
Fundação	125	37500	85

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises numéricas realizadas com o software RS2® permitiram avaliar o comportamento do talude da barragem da PCH Salto Cafesoca em diferentes condições operacionais. Os resultados mostraram variações significativas nos fatores de segurança e nas distribuições de poro-pressões, conforme o regime de fluxo adotado.

A Figura 3 apresenta a malha gerada para a análise pelo método dos elementos finitos, com detalhamento nas regiões de transição e entorno da fundação. As condições de contorno incluem a simulação de níveis d'água variáveis nas fases transientes.

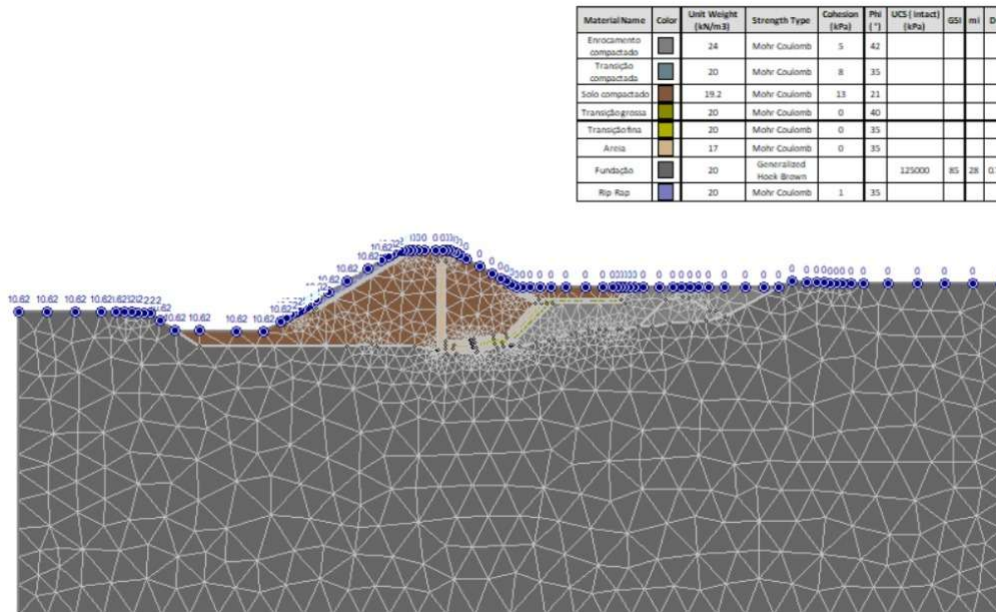


Figura 3. Malha de Elementos Finitos e Condições de Contorno.. Fonte: autores 2025.

As Figuras 4 a 6 mostram os contornos de poropressão para três estágios representativos: estágio inicial com nível máximo de água, estágio intermediário com redução gradual e estágio final após rebaixamento brusco. Observa-se aumento de poropressão relativa nas camadas de menor permeabilidade, especialmente próximas à base do talude.

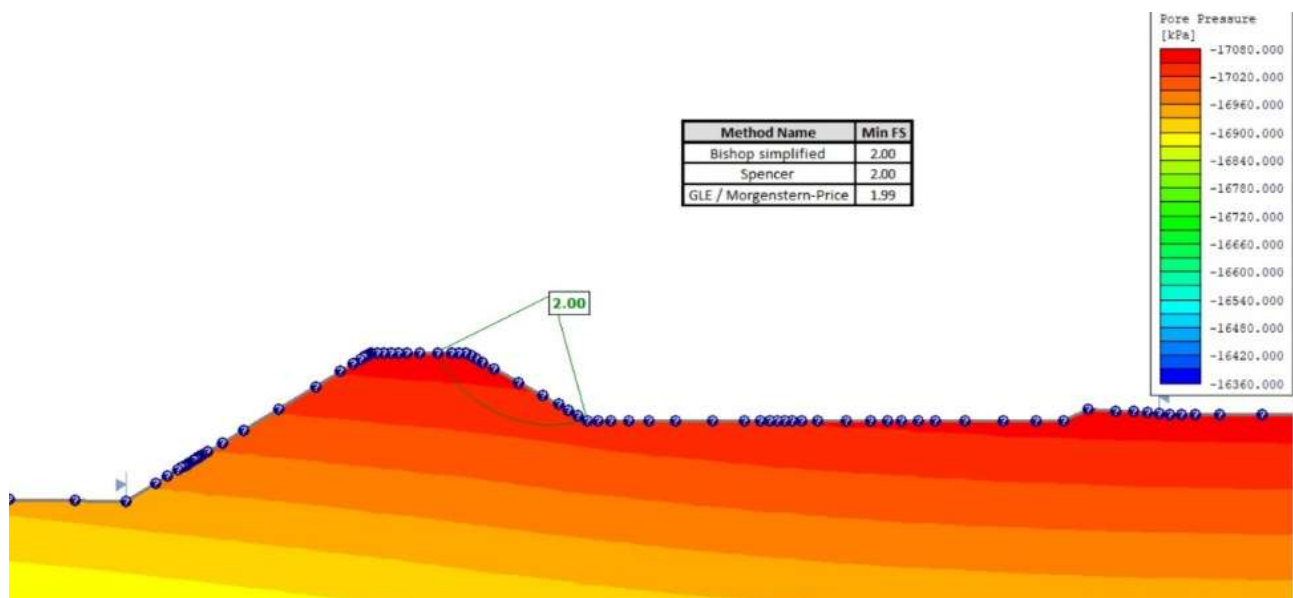


Figura 4. Poro-pressão – Estágio 1 (Inicial). Fonte: autores 2025.

A comparação entre os três cenários reforça a importância da avaliação conjunta do regime hidrológico com as características geotécnicas dos solos envolvidos, permitindo compreender a evolução dos potenciais mecanismos de instabilidade e seu desencadeamento sob diferentes condições operacionais da barragem.

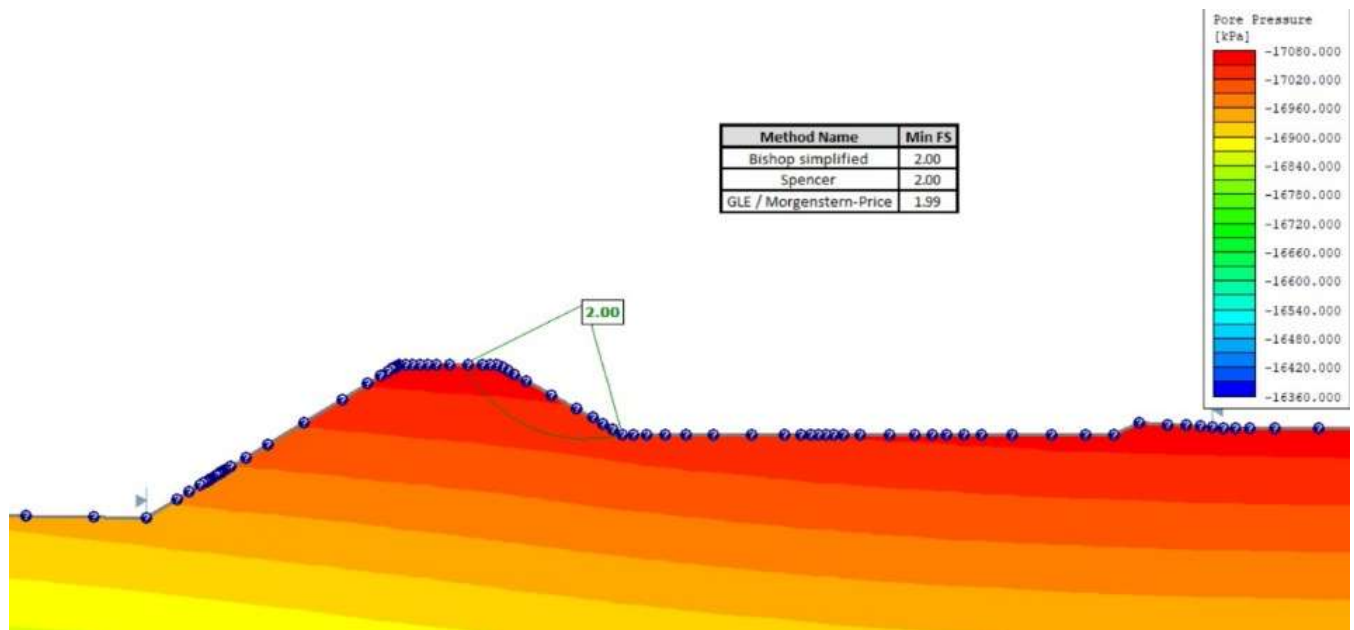


Figura 5. Poro-pressão – Estágio 2 (Intermediário). Fonte: autores 2025.

Já a Figura 6 evidencia o efeito do encharcamento prolongado, com o avanço da linha de saturação até a parte média do talude, gerando um campo de pressões neutras mais elevado e potencializando a perda de resistência cisalhante nos materiais finos.

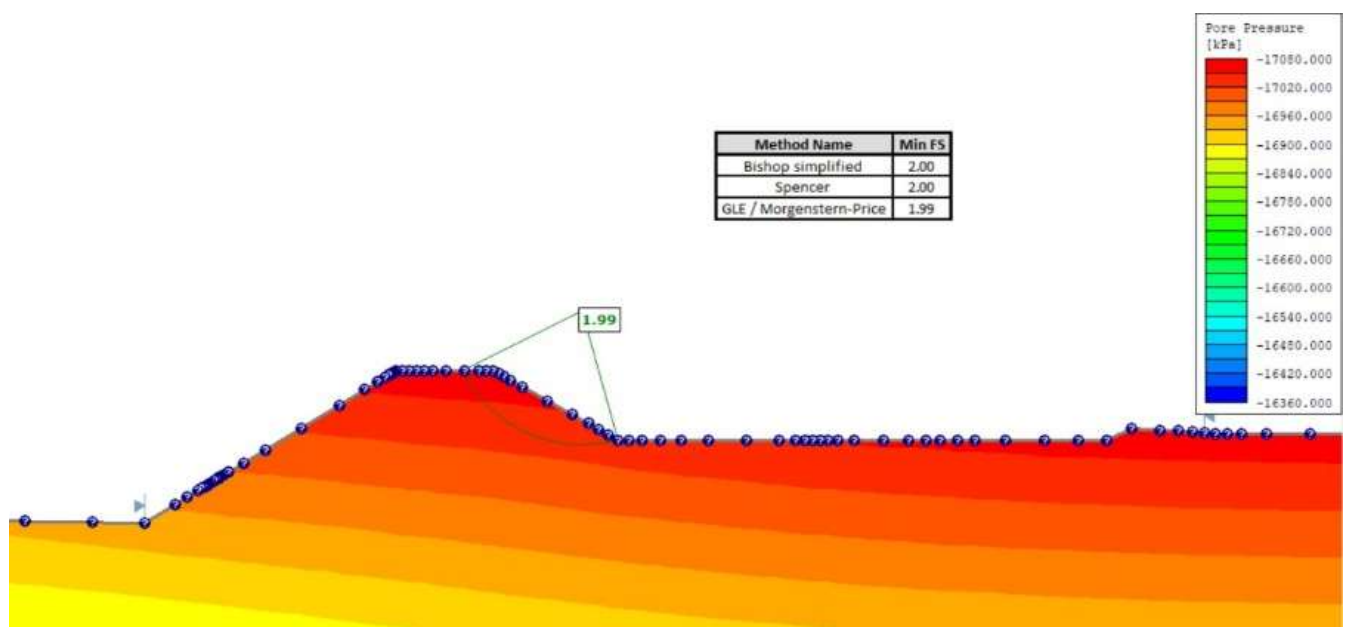


Figura 6. Poro-pressão – Estágio 3 (Final). Fonte: autores 2025.

A Figura 7 ilustra os vetores de fluxo, além das principais linhas que convergem para a região inferior do talude de jusante, indicando boa atuação dos filtros. Concentração de fluxo em interfaces menos permeáveis sugere zonas críticas para monitoramento.

Além disso, exibe as linhas de fluxo, representando as trajetórias preferenciais do escoamento subterrâneo.

Nota-se que os fluxos acompanham o gradiente hidráulico imposto, convergindo nas regiões de maior condutividade hidráulica. Essa configuração é típica em taludes saturados e evidencia zonas críticas de passagem de fluxo, que devem ser monitoradas principalmente em períodos de variação brusca de carga hidráulica.

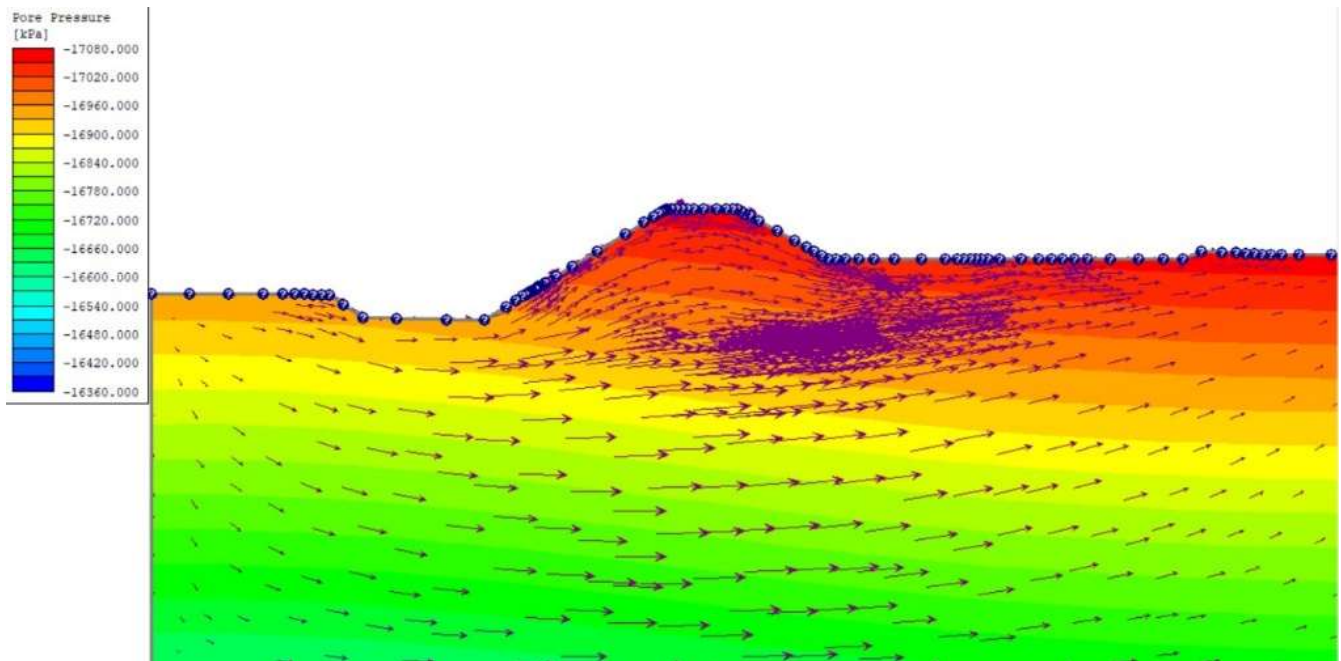


Figura 7. Linhas de Fluxo e Vetores de Direção. Fonte: autores 2025.

O comportamento conjunto das linhas equipotenciais e das linhas de fluxo sugere que, embora a condição inicial modelada não apresente risco iminente de instabilidade, existem zonas potenciais de atenção relacionadas à drenagem interna.

O uso do software permite representar com fidelidade o regime de percolação e as condições de contorno aplicadas, utilizando parâmetros de condutividade hidráulica e porosidade obtidos a partir da caracterização geotécnica e hidrogeológica do local.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou a aplicabilidade de modelagens numéricas transientes na avaliação do comportamento geotécnico e hidráulico de taludes de barragens em solo tropical, com base em um caso representativo da região amazônica.

A utilização do software RS2 possibilitou a análise de diferentes condições operacionais — incluindo operação permanente, rebaixamento rápido e eventos extremos — fornecendo informações fundamentais para o entendimento do desempenho da estrutura.

As simulações revelaram que, embora os fatores de segurança tenham se mantido acima dos limites de estabilidade recomendados ($FS \geq 1,5$), os gradientes de poropressão e a redistribuição do fluxo em situações transientes indicam a necessidade de atenção especial às interfaces entre camadas de baixa permeabilidade e à atuação do sistema de drenagem.

O uso de modelos numéricos bidimensionais, aliados a dados de campo e parâmetros representativos de materiais locais, mostrou-se eficaz para prever zonas críticas e apoiar decisões de projeto e operação.

Reforça-se, portanto, a importância de integrar modelagens hidráulicas e geotécnicas ao planejamento e à manutenção de estruturas de contenção, especialmente frente às incertezas climáticas e à variabilidade dos regimes hidrológicos.

Por fim, destaca-se que o monitoramento contínuo, aliado a retroanálises periódicas e calibração dos modelos, é essencial para garantir a segurança e a longevidade das barragens, principalmente em regiões tropicais onde os efeitos das chuvas e oscilações de lençol freático são mais intensos.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Goulart, N. G. P.; Oliveira, A. C. J. de; Miranda, T. C. (2022). *Efeito da Infiltração das Chuvas na Estabilidade de um Talude em Belo Horizonte*. In: VIII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - COBRAE. Porto de Galinhas/PE.: ABMS, 2022. v. 4 (parte 1), p. 8.
- Leme, R. F. (2009). *Influência da Sucção Mátrica nas Condições de Fluxo e Estabilidade de Taludes da Barragem Pesqueiro*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará/UFC, 149 p.
- Montes, C. C. P. (2003). *Estudos Piezométricos E Análise De Estabilidade De Taludes Da Barragem Bico Da Pedra*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Escola de Minas, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragens. Universidade Federal de Ouro Preto/UFOP, 136 f.
- Ribeiro, M. de C. A. (2018). *Aplicação de Modelos Numéricos para Estudos em Áreas de Barragens*. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Master Engenharia em Geotecnia – Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro - PUC/MG, 13 f.
- Rs2 – Slope Stability Verification Manual. (2023). Rocscience, Toronto. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/rs2/verification-theory/verification-manuals>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- Tha, P. D. C. (2007). *Estudo Das Condições De Fluxo Pela Barragem De Terra Da Margem Esquerda De Itaipu*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro - PUC/RJ, 99 f.