DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/40

Estabilidade de uma barragem de rejeito pós-descaracterização: Integração de fluxo saturado–não saturado e análise limite numérica

CARLOS EDUARDO COUTO CONEGUNDES
Doutorando, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, Brasil, carlos.conegundes@aluno.ufop.edu.br

GUILHERME JOSÉ CUNHA GOMES
Professor, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, Brasil, guilhermejcg@ufop.edu.br

DAVID SEBASTIAN CALPA JUAJINOY
Pesquisador, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, Brasil, sebastiancalpaj@usp.br

RESUMO: Os recentes colapsos catastróficos em barragens de mineração no Brasil elevaram as exigências regulatórias, impondo o desafio de promover a descaracterização de um grande número de estruturas, com vistas à mitigação de riscos. No entanto, ainda são incipientes as abordagens que integrem o fluxo em regime parcialmente saturado à análise de estabilidade de estruturas descaracterizadas. Este estudo apresenta a implementação de um código computacional em MATLAB para a avaliação da estabilidade de barragens descaracterizadas sem a remoção total do maciço, integrando simulações de fluxo em domínio parcialmente saturado, baseadas na equação de Richards, e análises de estabilidade por meio da Análise Limite Numérica (ALN). A metodologia foi aplicada a uma barragem real descaracterizada e validada com dados de instrumentação de campo. O estudo determinou a evolução temporal das poropressões e dos fatores de segurança (FS), que apresentaram variação anual da ordem de 2%. Os resultados demonstram a capacidade do modelo de subsidiar o monitoramento de longo prazo e o aprimoramento dos protocolos de avaliação de risco aplicáveis a essas estruturas geotécnicas.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de rejeito; Descaracterização; Análise Limite; Fluxo Saturado-Não Saturado.

ABSTRACT: Recent catastrophic failures of tailings dams in Brazil have resulted in more stringent regulatory requirements, imposing the challenge of decharacterizing a large number of existing structures as a risk mitigation measure. However, methodologies that explicitly couple partially saturated flow processes with the stability assessment of decharacterized tailings dams remain limited. This study presents the development and implementation of a MATLAB-based computational framework for evaluating the stability of decharacterized tailings dams without complete removal of the embankment mass. The approach integrates transient seepage analyses in a partially saturated domain, governed by Richards' equation, with stability assessment through Numerical Limit Analysis (NLA). The proposed methodology was applied to a real decharacterized tailings dam and validated against field instrumentation data. The simulations enabled the assessment of the temporal evolution of pore-water pressures and corresponding safety factors (SF), which exhibited annual variations on the order of 5×10^{-2}. The results demonstrate the capability of the proposed model to support long-term performance assessment and to enhance risk evaluation protocols for decharacterized tailings storage facilities.

KEYWORDS: Tailings Dams, Decharacterization, Numerical Limit Analysis, Saturated-Unsaturated Flow.

1 INTRODUÇÃO

Os colapsos de barragens de rejeito na última década no Brasil precipitaram uma mudança de paradigma na geotecnia nacional, resultando em requisitos regulatórios rigorosos que exigem a descaracterização de estruturas para eliminação de riscos residuais. Em diversos empreendimentos, essa intervenção mantém o

maciço, total ou parcialmente. Tais soluções impõem desafios técnicos significativos, especialmente na garantia da estabilidade física sob regimes hidrológicos distintos das condições originais de projeto.

Nesse contexto, a dinâmica da água no interior de estruturas descaracterizadas que mantêm o maciço como elemento permanente envolve, de forma recorrente, a coexistência de zonas saturadas e não saturadas, submetidas a variações temporais do regime hidrológico, especialmente em resposta a eventos pluviométricos intensos. Nessas condições, a presença de poropressões negativas no solo exerce influência direta sobre a resistência ao cisalhamento, uma vez que a sucção contribui para o aumento das tensões de contato entre os grãos. Assim, para uma avaliação fisicamente baseada da estabilidade de maciços remanescentes pós-descaracterização, torna-se fundamental integrar simulações transientes de fluxo, capazes de representar a evolução espacial e temporal das poropressões, a métodos de análise de estabilidade que incorporem explicitamente esses efeitos hidráulicos.

Entre as abordagens disponíveis, a Análise Limite Numérica (ALN) apresenta-se como uma alternativa aos métodos tradicionais, pois, fundamentada nos teoremas da plasticidade, permite determinar o fator de segurança crítico e identificar mecanismos de colapso sem a necessidade de pré-definir a geometria da superfície de ruptura. No entanto, apesar da eficiência demonstrada pela ALN na análise de barragens de rejeito e taludes naturais (Sloan, 2013; Camargo et al., 2016; Gomes et al., 2017; Whittle et al., 2022), ainda são escassos estudos aplicados que integrem sistematicamente essa técnica a modelos transientes de fluxo saturado-não saturado no contexto específico de descaracterização.

Diante dessa lacuna, o presente trabalho apresenta uma metodologia para a avaliação da estabilidade física de barragens de rejeito descaracterizadas com manutenção de maciço, baseada na integração entre simulações de fluxo saturado–não saturado e análises de estabilidade por Análise Limite Numérica. A abordagem é implementada por meio de um código computacional desenvolvido em ambiente MATLAB, no qual a equação de Richards (1931) é utilizada para a determinação transiente das poropressões, cujos resultados alimentam as análises de estabilidade via ALN, resolvidas por meio de programação cônica de segunda ordem. A metodologia é aplicada ao estudo de caso da Barragem B2, estrutura de contenção de rejeitos de grafita localizada no estado de Minas Gerais. A estrutura passou por um processo de descaracterização que incluiu o preenchimento do reservatório e a implantação de sistemas de drenagem para desvio das águas superficiais. A partir desse estudo de caso, avaliou-se a evolução temporal do fator de segurança da estrutura descaracterizada ao longo de um ano hidrológico.

2 METODOLOGIA E FORMULAÇÃO NUMÉRICA

A metodologia adotada neste trabalho fundamenta-se na integração numérica de análises de fluxo transiente em meios saturados e não saturados com análises de estabilidade de taludes. Para tanto, foi implementado um código computacional, desenvolvido em ambiente MATLAB, permitindo o acoplamento unidirecional (hidráulico → mecânico) entre a distribuição de poropressões e o cálculo de fatores de segurança via Análise Limite Numérica (ALN), seguindo a formulação implementada por Camargo et al. (2016) e aplicada a problemas de fluxo saturado-não saturado por Gomes et al. (2017).

2.1 Modelo de Fluxo em Meios Porosos

O fluxo no maciço e na fundação foi simulado considerando condição variavelmente saturada, regida pela equação de Richards (1931) em sua formulação em carga de pressão. Essa abordagem permite representar a evolução transiente das poropressões em meios parcialmente saturados, sendo particularmente adequada para a análise da resposta hidromecânica da estrutura sob eventos pluviométricos.
Para um domínio tridimensional, a equação governante pode ser escrita como:

$$C(\psi)\frac{\partial \psi}{\partial t} + S_s\, S(\psi)\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K(\psi)\frac{\partial \psi}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K(\psi)\frac{\partial \psi}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\psi)\left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1\right)\right], \quad (1)$$

em que $\psi[L]$é a carga de pressão matricial, $C(\psi)[L^{-1}]$é a capacidade específica de água do solo, $S_s[L^{-1}]$é o armazenamento específico, $S(\psi)[-]$ é o grau de saturação, $K(\psi)[L/T]$é a condutividade hidráulica não saturada e $t[T]$é o tempo.

O grau de saturação é definido por:

$$S(\psi) = \frac{\theta(\psi)}{\theta_s}, \tag{2}$$

em que $\theta(\psi)[L^3/L^3]$ corresponde ao teor volumétrico de umidade e $\theta_s[L^3/L^3]$ ao teor volumétrico de umidade na saturação.

As relações constitutivas de retenção de água e de condutividade hidráulica não saturada foram representadas segundo o modelo de van Genuchten-Mualem. A saturação efetiva S_eé dada por:

$$S_e(\psi) = \frac{\theta(\psi)-\theta_r}{\theta_s-\theta_r} = \begin{cases} (1+ \mid \alpha\psi \mid^n)^{-m}, & \psi \leq 0 \\ 1, & \psi > 0 \end{cases} \tag{3}$$

enquanto a função de condutividade hidráulica é expressa por:

$$K(\psi) = K_{sat}\, S_e^{\,l} \left[1-\left(1-S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \tag{4}$$

em que $\theta_r[L^3/L^3]$ é o teor volumétrico de umidade residual, $K_{sat}[L/T]$ é a condutividade hidráulica saturada, $\alpha[L^{-1}]$, ne $m[-]$ são parâmetros empíricos de ajuste, comumente adotando-se $m = 1 - 1/n$, e $l[-]$ é o parâmetro de conectividade de poros.

Essa formulação permite obter a distribuição espacial e temporal de poropressões no interior do maciço ao longo do período de simulação, fornecendo a base hidrológica necessária para as análises subsequentes de estabilidade em condição transiente.

2.2 Análise de Estabilidade via Análise Limite Numérica

A avaliação da estabilidade é realizada por meio da Análise Limite Numérica. Whittle et al. (2022) demonstraram a eficácia desta técnica para barragens de rejeito, destacando sua capacidade de identificar mecanismos de ruptura complexos (esféricos, planares ou arbitrários) sem as hipóteses restritivas dos métodos de Equilíbrio Limite (MEL). Diferentemente dos MEL, que requerem hipóteses prévias sobre a superfície de ruptura, a ALN busca o campo de tensões ou o campo de velocidades que satisfaça as condições de equilíbrio, compatibilidade e o critério de resistência do material (Sloan, 2013).

Neste trabalho, utiliza-se uma formulação em que o domínio é discretizado em elementos finitos e o campo de tensões é otimizado para maximizar o fator de colapso ou o fator de segurança, respeitando as condições de contorno e o critério de escoamento. O problema é resolvido via Programação Cônica de Segunda Ordem (SOCP), que oferece alta eficiência computacional e garantia de convergência para o ótimo global (Camargo et al., 2016).

O critério de ruptura adotado para os materiais geotécnicos foi o de Mohr-Coulomb.

2.3 Integração Computacional e Estratégia de Solução

A integração entre os módulos hidráulico e mecânico ocorre por meio de um acoplamento sequencial no tempo, no qual os campos de poropressão e de sucção matricial obtidos a partir da análise transiente de fluxo são associados às análises de estabilidade. Nesse procedimento, não há retroalimentação do modelo hidráulico a partir da resposta mecânica. Considera-se que a geometria e as propriedades hidráulicas do domínio permanecem inalteradas ao longo das análises de estabilidade, sendo a evolução temporal da resposta do sistema controlada exclusivamente pelas variações do regime hidráulico.

O procedimento numérico adotado foi recentemente aprimorado por Calpa et al. (2025, 2026), sendo composto pelas seguintes etapas:

i. Análise Transiente de Fluxo 3D: A cada incremento de tempo, a distribuição de poropressões é calculada em todo o domínio simulado.
ii. Mapeamento de pressões: Os campos de poropressão são interpolados para os pontos de integração da malha de estabilidade tridimensional.
iii. Cálculo do FS: O algoritmo de ALN determina o mínimo Fator de Segurança global para o estado hidráulico em cada passo de tempo.

Este procedimento permite avaliar a evolução da estabilidade da estrutura diante do avanço da frente de umedecimento e da perda de sucção matricial durante eventos pluviométricos, superando as limitações de abordagens simplificadas baseadas em estados estacionários.

3 ESTUDO DE CASO: BARRAGEM B2

A metodologia proposta foi aplicada à avaliação da estabilidade da Barragem de Rejeitos denominada B2. Trata-se de uma estrutura de contenção de rejeitos de mineração de grafita, localizada no município de Itapecerica, no estado de Minas Gerais. A escolha desse estudo de caso justifica-se pela complexidade hidromecânica associada às obras de descaracterização, bem como pela ampla disponibilidade de dados de monitoramento, que possibilitaram a adequada calibração das análises.

3.1 Histórico e Descaracterização

A Barragem B2 foi originalmente construída em 1975 como um maciço homogêneo compactado, com a finalidade de armazenar água e rejeitos. Entre 1988 e 1989, a estrutura foi submetida a um alteamento executado pelo método de jusante.

Em atendimento aos requisitos regulatórios recentes relacionados à segurança de barragens, a estrutura passou por um processo de descaracterização que promoveu alterações significativas em sua geometria e em seu regime hidrológico. Esse processo teve como objetivo eliminar as características funcionais de barragem, de modo que a estrutura deixasse de possuir capacidade de contenção e acumulação de rejeitos, sedimentos e água. As principais intervenções compreenderam o preenchimento do antigo reservatório com solo semicompactado, de forma a impedir o acúmulo de água na estrutura, bem como a implantação de um sistema de drenagem superficial destinado tanto ao escoamento das águas pluviais incidentes sobre a área quanto ao desvio de eventuais contribuições superficiais provenientes das regiões adjacentes. Esse sistema, constituído por um canal de cintura, foi projetado para conduzir livremente as vazões de montante para jusante, estabelecendo conexão com o extravasor existente.

3.2 Modelo Numérico

A geometria da barragem e do terreno natural foi discretizada por meio de uma malha tridimensional de elementos finitos. O código, executado em ambiente MATLAB, dispõe de um conjunto de rotinas destinadas à geração automática de malhas compostas por elementos prismáticos triangulares de seis nós, empregados nas análises de fluxo, e por elementos prismáticos quadrangulares de oito nós, utilizados na ALN. As Figuras 1(a) e 1(b) ilustram, respectivamente, a malha composta por 23.120 elementos prismáticos triangulares adotada na análise de fluxo e a malha constituída por 11.560 elementos prismáticos quadrangulares empregada na ALN. O modelo reflete a topografia pós-descaracterização, incorporando as camadas de fundação, o maciço, o filtro vertical e o aterro lançado sobre o reservatório.

A definição dos parâmetros hidráulicos adotados no modelo numérico de simulação de fluxo foi fundamentada na integração de dados provenientes de investigações de campo, especificamente valores de condutividade hidráulica obtidos por meio de sondagens do tipo *Standard Penetration Test* (SPT), com um processo de calibração manual baseado nos registros históricos de nível d'água de quatro piezômetros do tipo Casagrande (PZ-3, PZ-4, PZ-13 e PZ-14). A calibração consistiu no ajuste iterativo dos parâmetros de fluxo, buscando-se a maior proximidade entre os gráficos de carga hidráulica nos pontos simulados e os registros de

leitura dos instrumentos, por meio da minimização visual das discrepâncias e da compatibilização das tendências temporais observadas. As localizações desses instrumentos encontram-se indicadas na Figura 2.

Para as análises de estabilidade, foram adotados os parâmetros de resistência definidos a partir de ensaios SPT e triaxiais. Os parâmetros geotécnicos e hidráulicos adotados são apresentados na Tabela 1.

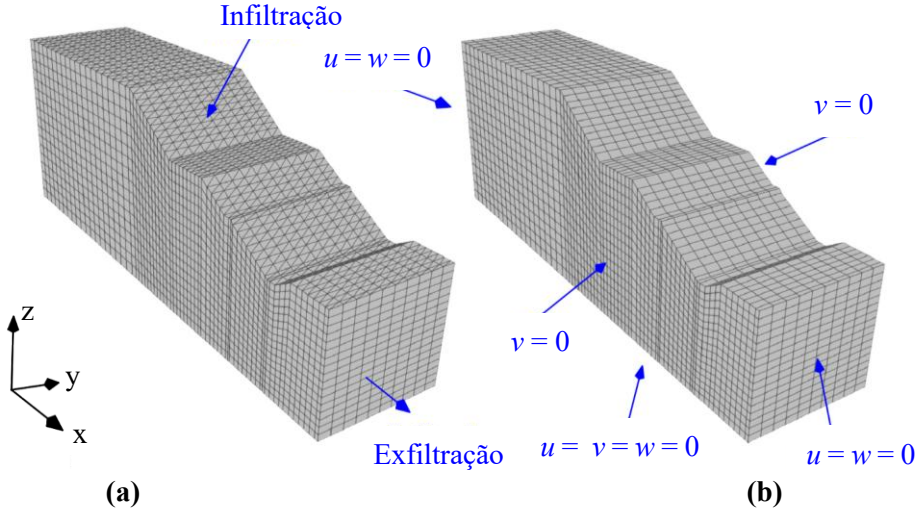


Figura 1. Modelo da Barragem B2: (a) malha de elementos prismáticos de 6 nós empregada na análise de fluxo, com indicação das condições hidráulicas de contorno: infiltração na superfície superior e face de exfiltração a jusante, sendo as demais fronteiras consideradas impermeáveis (fluxo nulo); (b) malha de elementos prismáticos de 8 nós utilizada na Análise Limite Numérica (ALN), com indicação (; de deslocamento, mantendo-se a superfície superior livre.

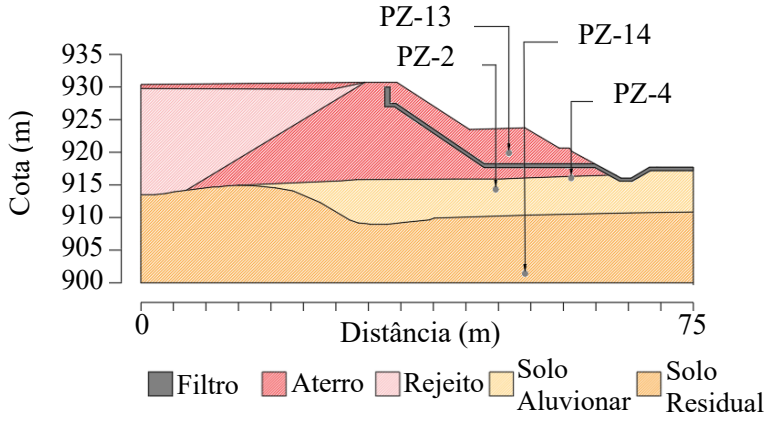


Figura 2. Seção transversal crítica da barragem indicando o zoneamento dos materiais geotécnicos e a localização dos piezômetros (PZ) utilizados na calibração do modelo transiente.

Tabela 1. Parâmetros hidráulicos e geotécnicos dos materiais.

Material	$\gamma\ (kN/m^3)$	$c'\ (kPa)$	ϕ' (°)	$Ksat\ (m/s)$	θs	θr	$\alpha\ (m^{-1})$	n
Rejeito	30	3	35	$3{,}7 \times 10^{-4}$	0,48	0,05	1,0	2,5
Maciço	18	17	24	$5{,}5 \times 10^{-5}$	0,48	0,05	1,0	2,5
Filtro	23	4,5	45	4,0	0,40	0,04	2,0	3,5
Solo Residual	20	30	37	$4{,}2 \times 10^{-4}$	0,44	0,18	0,05	1,5
Solo Aluvionar	18	37	22	$5{,}0 \times 10^{-4}$	0,42	0,08	0,15	1,8

3.2 Condições de Contorno

Para a análise transiente de fluxo, simulou-se um ano hidrológico contínuo, com base em dados pluviométricos medidos no local ao longo de 366 dias consecutivos, entre 2024 e 2025. A precipitação foi

aplicada na superfície como fluxo prescrito variável no tempo, enquanto a face de jusante foi modelada como superfície de exfiltração (*seepage face*). As demais fronteiras foram consideradas impermeáveis (fluxo nulo), conforme ilustrado na Figura 1(a).

Nas análises de estabilidade (ALN), as condições de contorno de deslocamento foram definidas para representar o confinamento e a continuidade do maciço. Os nós da base tiveram os deslocamentos integralmente restringidos ($u = v = w = 0$). Nos planos laterais, foram impostas restrições aos deslocamentos u e w nas faces normais à direção x, e apenas ao deslocamento v nos planos normais à direção y, conforme a Figura 1(b).

4 RESULTADOS

A análise permitiu avaliar o desempenho da barragem sob condições transientes, correlacionando a resposta hidrológica da estrutura descaracterizada com sua estabilidade física.

4.1 Calibração do Modelo de Fluxo

A validação do modelo de fluxo saturado-não saturado foi realizada através da comparação entre as cargas hidráulicas simuladas e as medidas pelos instrumentos de campo durante o período monitorado. A Figura 3 apresenta a evolução das cargas piezométricas para os instrumentos PZ-2, PZ-4, PZ-13 e PZ-14 em comparação com os resultados das simulações numéricas.

Observa-se que o modelo numérico capturou satisfatoriamente a tendência sazonal e as amplitudes de variação dos níveis d'água em resposta aos eventos de precipitação.

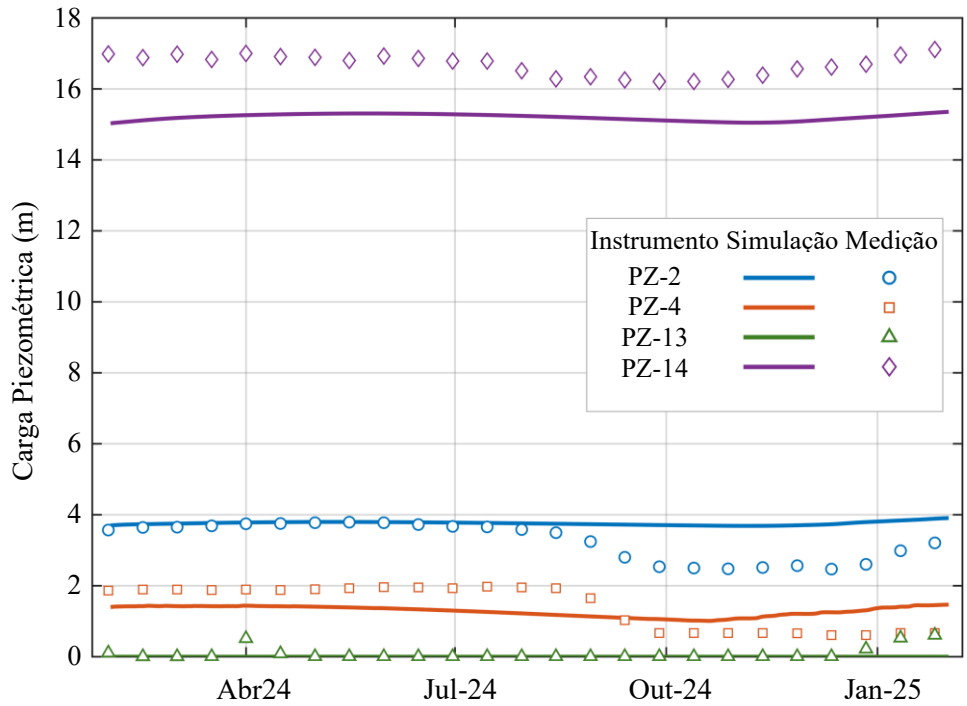


Figura 3. Calibração do modelo transiente: Comparação entre as cargas hidráulicas simuladas (linhas contínuas) e os dados de instrumentação de campo (linhas tracejadas) para os piezômetros PZ-2, PZ-4, PZ-

4.2 Análise de Estabilidade Transiente

A cada passo de tempo da simulação hidrológica, o campo de poropressões (positivas e negativas) foi mapeado para o modelo de estabilidade, resultando na evolução do Fator de Segurança (FS) apresentada na Figura 4.

A análise demonstra que o FS da barragem descaracterizada mantém-se em níveis elevados ao longo de todo o ano hidrológico simulado, com variação anual da ordem de 5×10^{-2}. Identifica-se uma leve redução do FS nos períodos de maior acumulação pluviométrica, reflexo da perda de sucção matricial nas camadas superficiais e da elevação localizada do nível freático. No entanto, os sistemas de drenagem interna e superficial, bem como o aterro sobre o reservatório mostraram-se eficazes em amortecer os impactos de eventos pluviométricos, impedindo a formação de superfícies freáticas críticas que pudessem comprometer a estabilidade global.

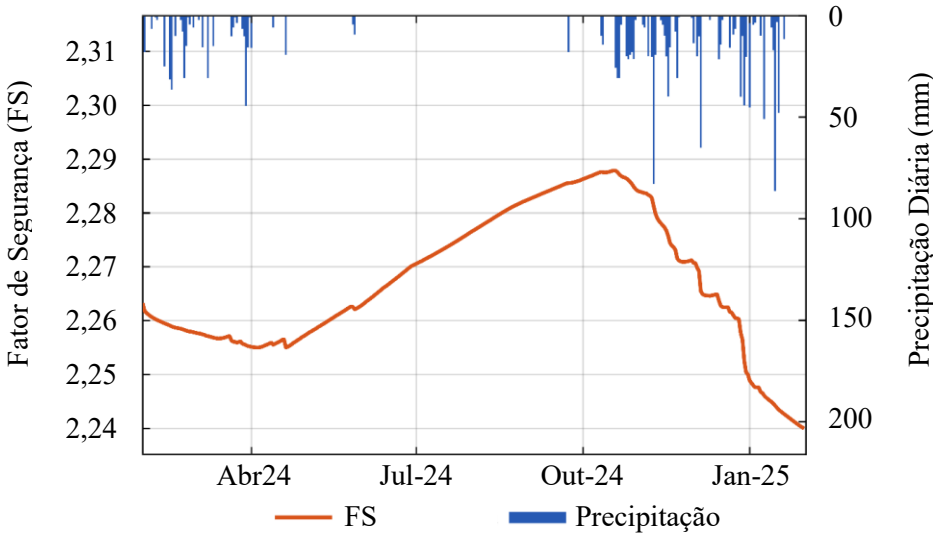


Figura 4. Evolução temporal do Fator de Segurança (FS) obtido via Análise Limite Numérica (eixo esquerdo) e sua correlação com a precipitação diária registrada (eixo direito invertido).

4.3 Mecanismos de Ruptura

Uma das principais vantagens da utilização da ALN reside na determinação automática da superfície crítica de ruptura, sem a necessidade de predefinição geométrica arbitrária. A Figura 5 ilustra o estado crítico da estrutura para o instante de menor fator de segurança (tempo = 366 dias), integrando: (a) o campo de poropressões resultante da análise transiente de fluxo e (b) o mecanismo de colapso representado pelo campo de velocidades.

A análise da figura revela a formação de uma superfície de ruptura composta, que se inicia próximo à crista da barragem, atravessa o maciço e intercepta a fundação. Nota-se que a ALN capturou uma banda de cisalhamento bem definida, que se ajusta à zona de menor resistência efetiva mobilizável, evitando as regiões com poropressão negativa mais intensa e atravessando preferencialmente o maciço e a porção mais rasa da fundação.

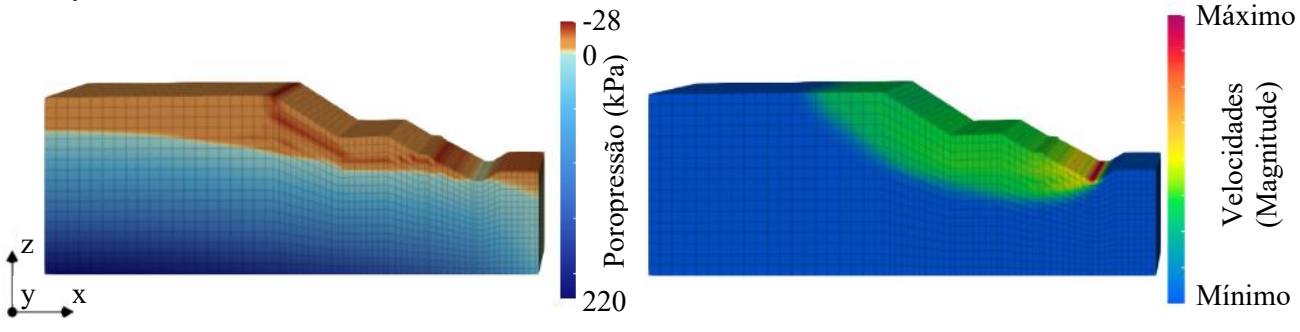


Figura 5. Resultados para o instante crítico: (a) campo de poropressões gerado via equação de Richards; (b) mecanismo de ruptura (campo de velocidades) identificado automaticamente pela ALN.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou que a integração entre simulações de fluxo transiente em regime variavelmente saturado e a Análise Limite Numérica (ALN) constitui uma abordagem tecnicamente consistente para a avaliação da segurança de barragens descaracterizadas com manutenção de maciço. A aplicação ao estudo de caso da Barragem B2 validou a eficácia do modelo, que reproduziu satisfatoriamente as tendências de poropressão observadas em campo, reforçando a adequação da equação de Richards para representar a dinâmica hidrológica pós-obras.

Os resultados indicaram fatores de segurança elevados e estáveis, inclusive durante os picos de precipitação ao longo do período simulado. Esse comportamento evidencia a eficiência dos sistemas de drenagem e do aterro do reservatório na limitação de superfícies freáticas críticas. Adicionalmente, a ALN permitiu identificar automaticamente mecanismos de ruptura e superfícies de cisalhamento não circulares, ajustadas às zonas de maior poropressão, superando as limitações geométricas inerentes aos métodos tradicionais de Equilíbrio Limite.

Em suma, a metodologia proposta apresenta-se como uma ferramenta útil para subsidiar o monitoramento e a gestão da estabilidade de longo prazo de barragens descaracterizadas. As conclusões reportadas auxiliam na avaliação de desempenho das soluções de engenharia adotadas e podem contribuir para o aprimoramento dos protocolos de avaliação de risco para estruturas geotécnicas similares.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES). Agradecemos à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pelo apoio institucional, bem como à Agência Nacional de Mineração (ANM) e à Nacional de Grafite pelo fornecimento dos dados essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Calpa, D. S., Gomes, G. J. C., Vargas Jr., E. A., Velloso, R. Q. e Fernández, F. (2025) Assessing rainfall-triggered landslides considering small-scale depth to bedrock uncertainty: A random field approach. Computers and Geotechnics, v. 178, p. 106913.

Calpa, D. S., Gomes, G. J. C., Vargas Jr., E. A., Velloso, R. Q., Fernández, F. e Miqueletto, M. (2026) Joint spatial variability of depth to bedrock, hydraulic, and shear strength parameters in 3D landslide prediction. Computers and Geotechnics, v. 189, p. 107662.

Camargo, J., Velloso, R. Q. e Vargas Jr., E. A. (2016) Numerical limit analysis of three-dimensional slope stability problems in catchment areas. *Acta Geotechnica*, v. 11, n. 6, p. 1369–1383.

Gomes, G. J. C., Vrugt, J. A., Vargas Jr., E. A., Camargo, J. T., Velloso, R. Q. e van Genuchten, M. Th. (2017) The role of uncertainty in bedrock depth and hydraulic properties on the stability of a variably-saturated slope. *Computers and Geotechnics*, v. 88, p. 222–241.

Marotti, J. C., Gomes, G. J. C., Velloso, R. Q., Vargas Jr., E. A., Nunes, R. S. e Fernandes, N. F. (2023) Exploring extreme rainfall-triggered landslides using 3D unsaturated flow, antecedent moisture and spatially distributed soil depth. *Catena*, v. 229, p. 107241.

Richards, L. A. (1931) Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, v. 1, n. 5, p. 318–333.

Sloan, S. W. (2013) Geotechnical stability analysis. *Géotechnique*, v. 63, n. 7, p. 531–571.

Van Genuchten, M. Th. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, n. 5, p. 892–898.

Whittle, A. J., El-Naggar, H. M., Akl, S. A. Y. e Galaa, A. M. (2022) Stability Analysis of Upstream Tailings Dam Using Numerical Limit Analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 148, n. 6.