DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/3

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE TERRA COM SOLO RESIDUAL GABROIDE

Jonathan da Silva Sousa
Discente, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, Brasil, Jonathan.sousa@alunos.ufersa.edu.br

Saulo de Tasso Veras Filho
Discente, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Janduís, Brasil, saulo.filho@alunos.ufersa.edu.br

Rafael Vitor de Oliveira Queiroga
Discente, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Patu, Brasil, rafael.queiroga@alunos.ufersa.edu.br

Francisco Felinto de Lima Neto
Docente, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Natal, Brasil, eng.franciscolima96@gmail.com

Valteson da Silva Santos
Docente, Instituto Federal da Paraíba, Patos, Brasil, valteson.santos@ifpb.edu.br

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo avaliar a estabilidade geotécnica de uma barragem de terra construída com solo residual de Gabro no Semiárido brasileiro. A metodologia consistiu em uma detalhada caracterização geotécnica de solos locais incluindo areia bem graduada (SW), areia mal graduada (SP) e argila de baixa compressibilidade (CL), e na realização de simulações numéricas utilizando os softwares GeoStudio, nos módulos SEEP/W para análise de fluxo de água e SLOPE/W para avaliação da estabilidade dos taludes. O modelo digital da barragem foi criado no Revit, e o estudo de estabilidade empregou o método de Morgenstern-Price. Entre os principais aspectos analisados, verificou-se que, em regime permanente, os fatores de segurança (FS) foram elevados (2,37 a 2,39). No entanto, sob o regime transiente, a estabilidade foi reduzida devido à dissipação retardada das poropressões internas; em cenários com taludes de areia SW, o FS caiu para valores críticos inferiores a 1,0. A conclusão do estudo comprovou a viabilidade técnica do projeto e seu potencial para aumentar a segurança hídrica regional. A melhor combinação analisada, composta por taludes de areia mal graduada (SP) e núcleo de argila (CL), resultou em um FS transiente de 1,219, o que é considerado marginalmente satisfatório, atendendo ao critério mínimo de 1,2 da ABNT NBR 11682:2009 para barragens de baixo risco.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, Barragem de terra, Solo residual de Gabro, Simulação numérica, Semiárido.

ABSTRACT: This study aimed to evaluate the geotechnical stability of an earth dam constructed with residual soil derived from gabbro in the Brazilian semiarid region. The methodology consisted of a detailed geotechnical characterization of local soils, including well-graded sand (SW), poorly graded sand (SP), and low-compressibility clay (CL), along with numerical simulations using GeoStudio software. The SEEP/W module was used for seepage analysis, while SLOPE/W was applied to slope stability assessment. A three-dimensional model of the dam was developed in Revit, and the stability analysis employed the Morgenstern-Price method. Among the main findings, it was observed that under steady-state conditions, the safety factors (FS) were high, ranging from 2.37 to 2.39. However, under transient conditions, stability decreased due to the delayed dissipation of internal pore pressures; in scenarios involving SW sand slopes, the FS dropped to critical values below 1.0. The study concluded that the project is technically feasible and has significant potential to enhance regional water security. The best-performing configuration, consisting of poorly graded sand (SP) slopes and a clay (CL) core, resulted in a transient FS of 1.219, which is considered marginally satisfactory, meeting the minimum criterion of 1.2 established by ABNT NBR 11682:2009 for low-risk dams.

KEYWORDS: Slope stability, Earth dam, Residual gabbro soil, Numerical simulation, Semi-arid region.

1 INTRODUÇÃO

A região semiárida brasileira é marcada por uma variabilidade pluviométrica, que impõe um estado de risco hídrico crônico à população e ao desenvolvimento local. Este cenário é agravado pela intensificação das estiagens, um reflexo das mudanças climáticas (MARENGO *et al*., 2015). No contexto do Agreste potiguar, a sazonalidade das chuvas compromete severamente a segurança alimentar, a produção agrícola e o avanço socioeconômico (CASTRO, 2017).

Diante da escassez hídrica, a construção de barragens de terra consolidou-se historicamente como a principal estratégia de mitigação da seca no semiárido. Essas estruturas são vitais para o armazenamento e a distribuição de água em períodos críticos, essenciais para a resiliência das comunidades rurais (FARIA, 1978; MOLLE, 1994). Por sua natureza, as barragens de terra são obras de grande volume, cuja viabilidade econômica está diretamente ligada ao uso eficiente e seguro de materiais locais.

A garantia de segurança e longevidade nessas obras de engenharia depende de um projeto geotécnico rigoroso. Deficiências no dimensionamento estrutural ou a ausência de caracterização adequada do material de aterro podem levar a falhas de estabilidade, comprometendo investimentos e expondo populações a riscos ambientais e sociais (SAYÃO, 2009). Portanto, o aprimoramento contínuo das práticas de engenharia deve priorizar a modelagem precisa das condições de estabilidade e percolação.

Para aliar a necessidade de segurança estrutural à viabilidade econômica regional, é indispensável o aproveitamento dos recursos minerais disponíveis *in situ*. O solo residual derivado do Gabro, encontrado em abundância na região de estudo, emerge como uma alternativa construtiva de grande potencial. O uso correto deste material, após uma investigação geotécnica detalhada, permite reduzir custos de transporte e otimizar a construção, conferindo sustentabilidade ao projeto. No entanto, sua aplicação segura depende de um conhecimento aprofundado de suas propriedades geomecânicas e hidráulicas para garantir a estabilidade do aterro.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a estabilidade geotécnica de uma barragem de terra construída com solo residual derivado do Gabro. A análise visa comprovar a viabilidade técnica e fornecer subsídios para o uso seguro e otimizado deste material regional na engenharia hídrica do Semiárido. Para isso, foram realizadas simulações numéricas de fluxo de água (SEEP/W) e de estabilidade de taludes (SLOPE/W) em uma geometria representativa, garantindo uma avaliação robusta em condições de operação crítica.

2 METODOLOGIA

O trabalho seguiu um planejamento estruturado em três etapas principais: a caracterização da área de estudo, a definição dos parâmetros geotécnicos dos materiais e a realização de simulações numéricas para análises de fluxo e estabilidade.

2.1. Caracterização da Área e Processamento Topográfico

A área de construção da barragem é localizada na região do Alívio, no município de Lajes/RN, Figura 01, inserida no contexto do semiárido brasileiro. Os procedimentos topográficos e hidrológicos incluíram: Delimitação da Bacia Realizada no *software* Global Mapper, utilizando o banco de dados SRTM Worldwide Elevation Data, resultando em uma área de contribuição de 366,93 km² e a modelagem geométrica através das curvas de nível, com intervalos de 1 m, foram exportadas para o *software* Revit, no qual foi construído o modelo tridimensional da barragem e do reservatório, este último com volume estimado em 29.716.024,67 m³.

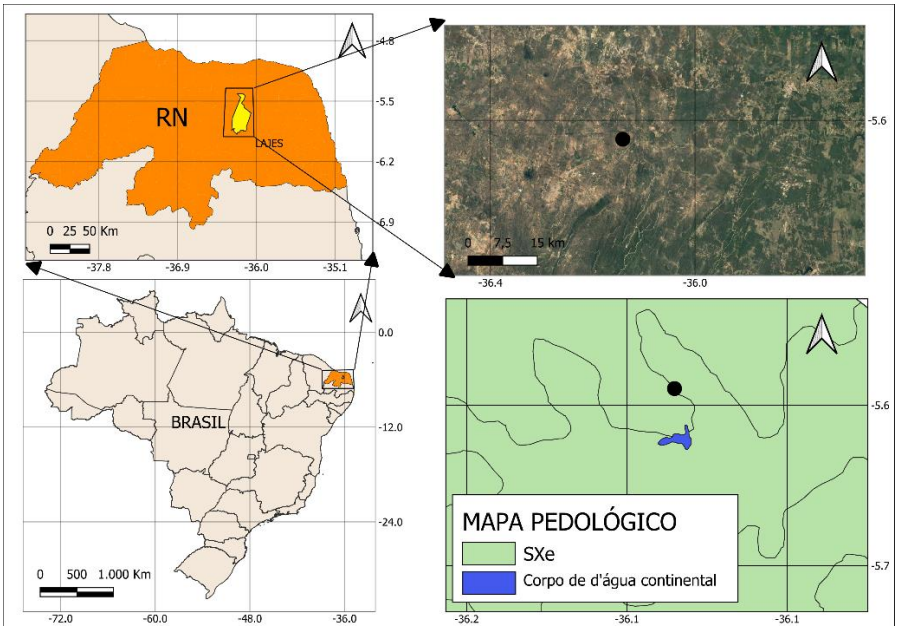


Figura 01: Mapa de Região dos Estudos

2.2. Caracterização Geotécnica dos Materiais

Para a composição do maciço e do núcleo da barragem, foram empregados solos residuais derivados da rocha gabro, cujas propriedades foram determinadas em estudos experimentais realizados por Peroba (2024) e Campos (2024). Os espaldares foram constituidos de solo arenoso bem graduado (SW). Já para o núcleo impermeável, utilizaram-se duas amostras de argila inorgânica de baixa compressibilidade (CL), designadas como Argila A e Argila B. A caracterização desses materiais para os modelos de cálculo seguiu o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, adotando-se como parâmetros de entrada o peso específico (γ), a coesão efetiva (*c*') e o ângulo de atrito efetivo (ϕ').

Os parâmetros extraídos para a modelagem da barragem estão dispostos na Tabela 1. A AM-01 foi o material escolhido para ser utilizado nos espaldares da barragem, pois possui uma boa resistência, com ângulo de atrito de 35,6° e condutividade hidráulica de $4{,}4 \times 10^{-7}$ m/s.

Para o núcleo impermeável, as argilas (AM-02 e AM-03), possuem baixa condutividade hidráulica na ordem de 10^{-9} m/s e alta coesão (57,6 kPa). Além disso, possui algulo de atrito não saturado e não drenado de 0,5° e 0,6°, respectivamente.

Tabela 1. Propriedades das amostras analisadas para o maciço da barragem

Propriedade	AM-01 Areia SW (Peroba, 2024)	AM-02 Argila A CL (Campos, 2024)	AM-03 Argila B CL (Campos, 2024)
Diâmetro D10 (mm)	0,15	0,03	0,04
Diâmetro D60 (mm)	1,8	1,1	1,15
Limite de Liquidez (%)	0	39	39
Compressibilidade (Cc)	0,1	0,28	0,31
Condutividade hidr. sat.Kx (m/s)	$4{,}4 \times 10^{-7}$	$2{,}08 \times 10^{-9}$	$2{,}35 \times 10^{-9}$
Peso Específico seco γ (kN/m³)	21,2	17,40	16,8
Coesão Efetiva não drenada c'(kPa)	29,76	57,6	57,6
Ângulo de Atrito não drenado ϕ' (º)	35,6	0,5	0,6

Fonte: Autores (2025)

2.3. Simulação Numérica e Critérios de Estabilidade

As análises hidráulicas e estruturais foram processadas por meio do pacote computacional GeoStudio 2015, integrando diferentes módulos de simulação. Inicialmente, realizou-se a análise de fluxo via SEEP/W, contemplando tanto a condição de regime permanente, com o reservatório em sua cota máxima de 11,85 m, quanto o regime transiente, simulando um rebaixamento rápido do nível d'água de 11,85 m para 2 m em um intervalo de 150 dias. A análise de estabilidade foi conduzida no módulo SLOPE/W através do método de Morgenstern-Price, o qual assegura o cumprimento simultâneo das equações de equilíbrio de momentos e forças. Para a identificação das superfícies de deslizamento com o menor Fator de Segurança (FS), aplicou-se o Método de Entrada e Saída na pesquisa da superfície crítica. Por fim, os resultados obtidos foram confrontados com os requisitos da norma ABNT NBR 11682:2009, que define os parâmetros mínimos de segurança para a estabilidade de taludes.

3. RESULTADOS

3.1. Dimensionamento da barragem e vertedouro

A Tabelas 02 apresenta o dimensionamento do vertedouro, espaldares, núcleo e informações gerais da barragem.

Tabela 2. Resultados de Dimensionamento

	Parametro	Valor Obtido
Vertedouro	Área de contribuição(A)	5,98 km²
	Coeficiente de escoamento (k)	0,25
	Coeficiente de concentração (C)	0,5
	Vazão máxima (Qs)	21,95 m³/s
	Comprimento do vertedouro (L)	21,73 m
Pré-dimensionamento dos espaldares da barragem	Montante 3H : 1V	43,1 m
	Jusante 2H : 1V	28,7 m
	Total (L + i + B)	76,93 m
Pré-dimensionamento dos taludes do núcleo	Montante 2H : 1V	20,00 m
	Jusante 2H : 1V	20,00 m
Pré-dimensionamento da barragem de terra	Altura De Onda (H)	0,69 m
	Velocidade De Onda (V)	4,125 m/s
	Folga (F)	1,853 m
	Cota De Terreno (Ct)	153 m
	Lâmina D'água (Cs)	163 m
	Cota de Sangria (Hs)	2,50 m
	Cota de Coroamento (Cc)	167,35 m
	Nível de Água Máximo (NAmax)	11,85 m
	Nível de Água Mínimo (NAmin)	7,11 m
	Altura Do Maciço (H)	14,35 m
	Largura Do Coroamento (B)	6,3 m

Fonte: Autores (2025)

3.3. Estudo de elevação, escoamento e curvas de nível

Foi adotada uma altura mínima de 165 m para a geração das curvas de nível. Nesse cenário, observou-se a formação de um reservatório natural e identificou-se um local promissor para a implantação da barragem, conforme evidenciado na Figura 3.

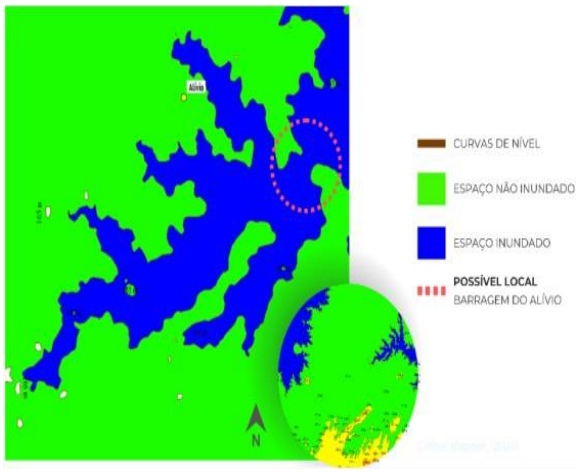


Figura 03. Estudo de inundação 2D, curvas de nível a partir de 165 m

Após a definição do local da barragem, realizou-se uma análise das vias de drenagem ilustrada na Figura 4, que identificou a convergência do escoamento para um ponto específico próximo ao Rio Ceará- Mirim. Essa verificação permitiu a delimitação precisa da bacia hidrográfica, cuja área total de contribuição foi calculada em aproximadamente 366,93 km².

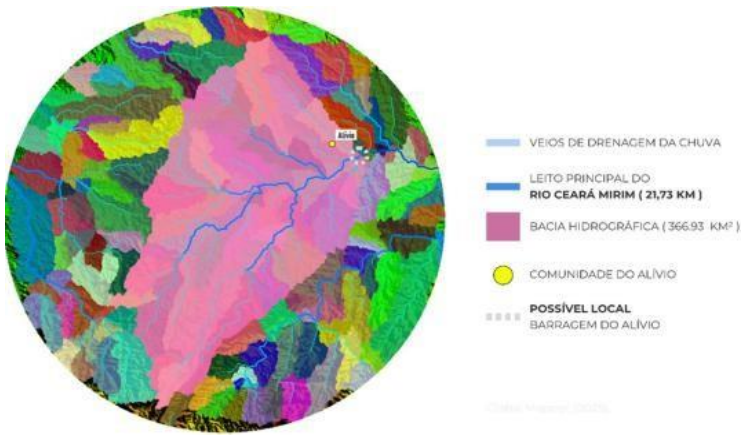


Figura 4. Estudo de escoamento da bacia hidrográfica.

Após a delimitação da bacia, foi realizado um corte no perfil topográfico do local escolhido para a obra (Figura 5-A), o que permitiu definir o nível da base da barragem em 153 m. Na Figura 5B é possível observar o topo da barragem, evidenciando a posição da estrutura no terreno e sua interação com o ambiente ao redor. A localização foi ajustada de acordo com os dados topográficos obtidos, garantindo a integração do projeto ao contexto geográfico e geológico da área.

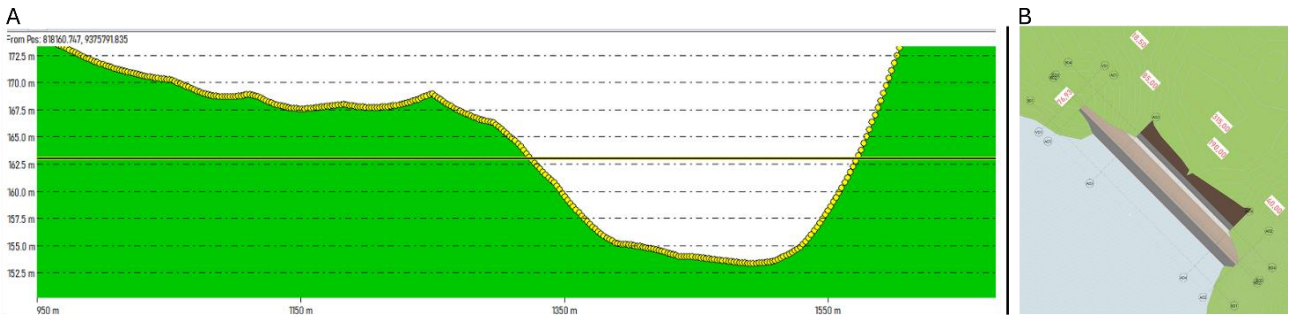


Figura 5. Perfil topográfico da região do corte de elevação (A) e Vista do topo da barragem (B)

3.4. Modelagem 3D da barragem

Utilizando o software Revit, foi desenvolvido o modelo tridimensional da Barragem com base nos resultados de dimensionamento e análises estruturais. O modelo, detalhado na Figura 6, apresenta de forma precisa as características geométricas da obra, integrando as dimensões do maciço, da crista e dos taludes, em estrita conformidade com os parâmetros de altura, largura e inclinação definidos para o projeto. Foi realizado o detalhamento do sistema de drenagem, como ilustrado na Figura 7, que mostra o dreno de pé.

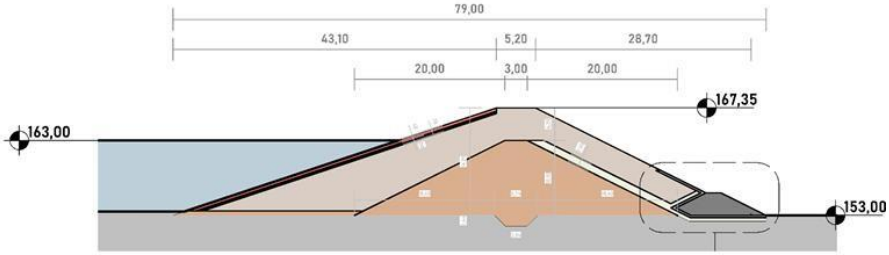


Figura 06: Seção de Corte Transversal do Modelo da Barragem

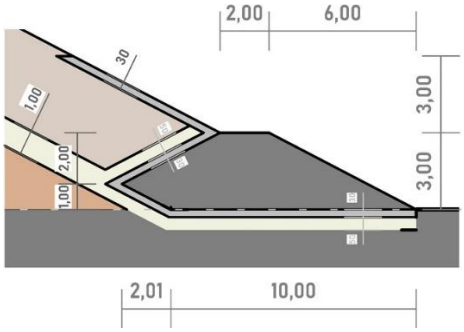


Figura 7. Detalhamento do Dreno de Pé na Barragem

Com base na modelagem tridimensional realizada no software Revit, a Tabela 3 detalha a distribuição volumétrica dos componentes da Barragem, incluindo o núcleo de argila, taludes e sistemas de proteção e drenagem. Estes dados são fundamentais para a quantificação precisa de materiais e para garantir uma gestão eficiente dos recursos durante a execução da obra, totalizando um volume de 129.761,10 m³.

Tabela 3. Volumes dos Componentes da Barragem

Componente	Volume (m³)
Dreno de Pé - Pedregulhos	4182,11
Dreno de Pé Brita - Camada Filtro	1356,51
Filtro Vertical e Horizontal	5871,17
Núcleo Argila	49542,97
Rip rap Areia	1458,48
Rip rap Brita	1499,25
Rip rap Pedras	4074,44
Solo Taludes	61770,24
TOTAL	129761,10

Fonte: Autores (2025)

3.4. Análise da Estabilidade dos Taludes

As simulações (Figura 8) indicaram que, em regime permanente, nível de cota de água em 10 m, a estrutura apresenta elevada estabilidade, com Fatores de Segurança (FS) variando entre 2,367 e 2,395.

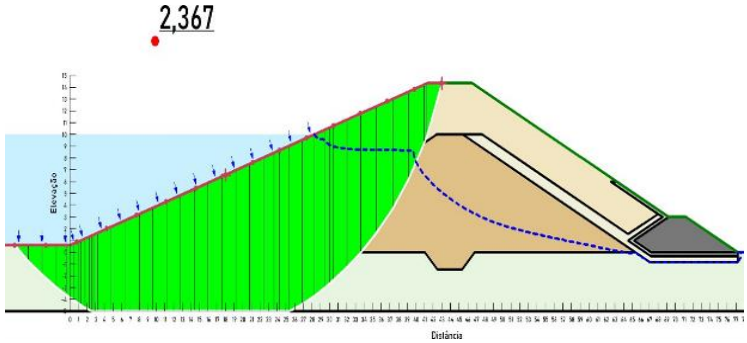


Figura 8. FS em regime permanente

Entretanto, o cenário de regime transiente, rebaixamento rápido de 10 m para 2 m em 150 dias, revelou comportamentos distintos: AM-01 apresentou instabilidade crítica, com FS abaixo da unidade (0,888 a 0,896), indicando ruptura iminente devido à retenção de poropressões e à formação de uma face de infiltração ativa conforme mostra a Figura 9. O resultado de FS versus o tempo indicou instabilidade a partir do dia 108, ficando com FS abaixo de 1,2.

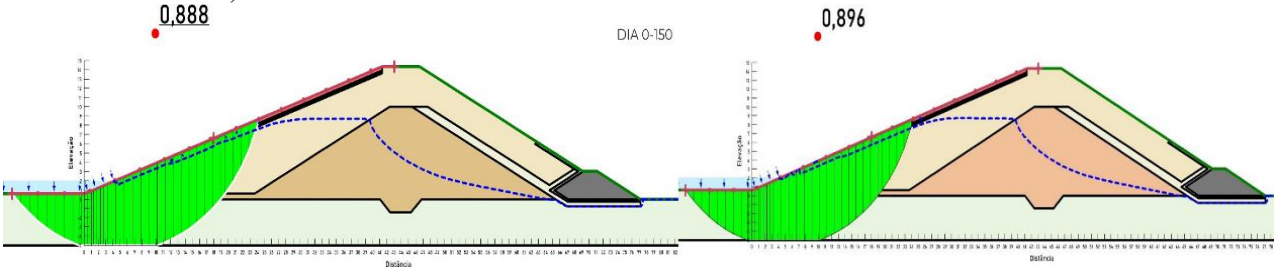
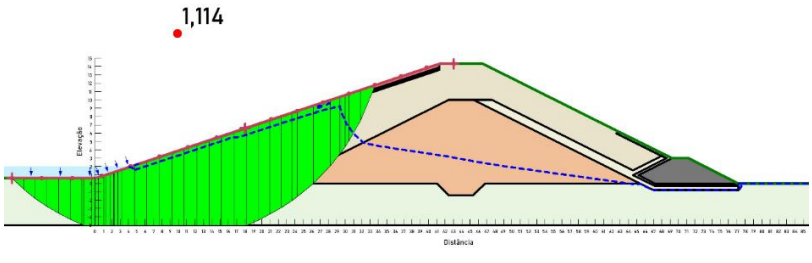
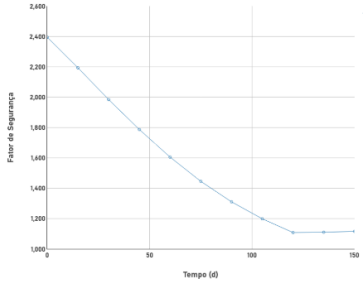


Figura 9. FS em regime transiente

Para solucionar o problema, foi utilizada uma areia mal graduada (AM-04) estudada por Campos (2024), com angulo de atrito não drenado (Su) de 0,5° e coesão efetiva de 57,6 kPa, que demonstrou desempenho superior ao permitir uma dissipação mais eficiente das pressões internas, mantendo o FS acima de 1,114 quando usado com núcleo de Argila B. Destaca-se que a combinação de areia SP com núcleo de argila A atingiu FS de 1,219, atendendo ao requisito mínimo estabelecido pela ABNT NBR 11682:2009, que é de 1,2 (Figura 10). O tipo de núcleo (argila A ou rígida) exerceu influência secundária na estabilidade global, embora o núcleo rígido tenha demonstrado leve superioridade na dissipação de pressões em cenários específicos.

Na Tabela 4 é possivel observar um resumo dos resultados obtidos no desempenho geral dos solos em regime permanente e transiente. Uma constatação feita, é que em casos de regime transiente, a estabilidade geral da barragem utilizando o núcleo de Argila B é perdida aos 105 dias de redução rápida na cota de água (Figura 10). Os problemas evidenciados na redução rápida do nível de água é devido à perda do peso da água no talude a montante, assim reduzindo a resistência do solo, enquanto isso, não há tempo suficiente para dissipar as poropressões no espaldar. Um dos motivos para que a areia mal graduada possua uma maior resistência, é devido ela possuir uma boa resistência não drenada (Su), enquanto a areia bem graduada depende exclusivamente do seu ângulo de atrito efetivo.





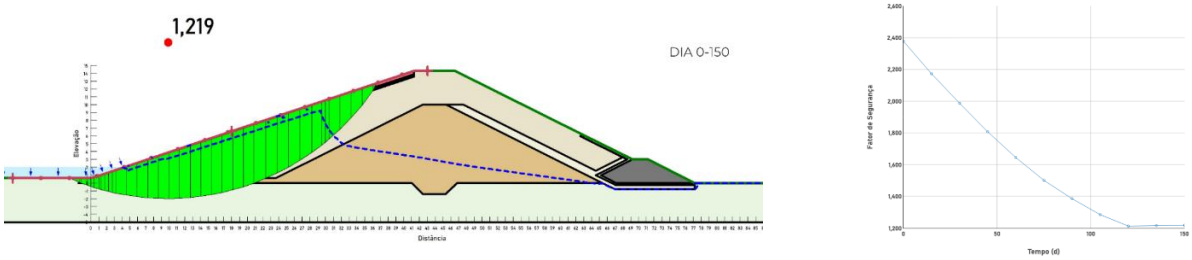


Figura 10. FS em regime transiente e redução do fator de segurança no tempo

Tabela 4. FS da barragem em regime transiente e permanente

Taludes	Núcleo	FS Permanente	FS Transiente
AM-01	AM-02	2,367	0,888
AM-04	AM-02	2,382	1,219
AM-01	AM-03	2,391	0,896
AM-04	AM-03	2,395	1,114

Fonte: Autores (2025)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que a estabilidade da barragem é condicionada pela interação solo-fluxo, especialmente em regime transiente de rebaixamento rápido. Enquanto em regime permanente todas as configurações apresentaram elevados fatores de segurança (FS > 2,3), o cenário transiente revelou-se crítico para taludes em areia bem graduada, com FS inferior a 1,2. A configuração técnica mais favorável consistiu no uso de areia mal graduada com núcleo de argila A, atingindo FS de 1,219, em conformidade com a ABNT NBR 11682:2009. Ressalta-se a necessidade de investigações geotécnicas detalhadas sobre a profundidade da rocha sã para o dimensionamento preciso de dispositivos de vedação (cut-off) e drenagem interna, visando a aceleração da dissipação de poropressões e a mitigação de riscos de ruptura na fundação. Além dos materiais empregados, destaca-se que o grau de compactação do aterro e o controle tecnológico durante a execução da barragem constituem fatores fundamentais para o desempenho hidráulico e a estabilidade geotécnica da estrutura, devendo ser considerados em estudos futuros e na fase executiva da obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11682: Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro, 2009.

CAMPOS, P. H. S. de. *Caracterização geomecânica de um solo residual compactado de gabro no Nordeste brasileiro*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – UFRN, Natal, 2024.

CASTRO, Francimar G. de. *Planejamento e gestão de barragens de terra no Agreste Potiguar: impactos na segurança alimentar e no desenvolvimento socioeconômico das comunidades.* Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – UFRN, Natal, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/…. Acesso em: 30 jul. 2025.

FARIA, O. L. *Os açudes dos sertões do Seridó. Natal: Coedição Fundação José Augusto/Coleção Mossoroense*, 1978.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; CUCHA, C. N. *Mudanças climáticas e recursos hídricos no Nordeste brasileiro*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 1, p. 63–72, 2015.

MOLLE, F. *Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento*. Recife: SUDENE, DPG. PRN. HME, 1994. (Série Hidrologia, n. 30)

PEROBA, P. M. E. *Comportamento mecânico de um solo residual gabroide compactado.* Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – UFRN, Natal, 2023.