



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Jonathan da Silva Sousa

Análise da Estabilidade de Barragem de Terra Construída com Solo Residual
Derivado do Gabro

CARAÚBAS

2025

Jonathan da Silva Sousa

**Análise da Estabilidade de Barragem de Terra Construída com Solo Residual
Derivado do Gabro**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Francisco Felinto De
Lima Neto

CARAÚBAS
2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva data. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S725a Sousa, Jonathan da Silva.

Análise da estabilidade de barragem de terra
construída com solo residual derivado do gablo /
Jonathan da Silva Sousa. - 2025.

77 f. : il.

Orientadora: Francisco Felinto de Lima Neto.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Barragem de terra. 2. Estabilidade
geotécnica. 3. Solo residual. 4. Geostudio. 5.
Semiárido. I. Lima Neto, Francisco Felinto de,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com
AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas

Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra

CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Jonathan da Silva Sousa

**Análise da Estabilidade de Barragem de Terra Construída com Solo Residual
Derivado do Gabro**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 31 / 07 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Francisco Felinto De Lima Neto, Prof. Esp. (UFERSA)
Presidente

Leonete Cristina de Araujo Ferreira Medeiros Silva, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

Pedro Henrique Silva de Campos, Mr.
Membro Examinador

Dedico este trabalho ao meu pai, que sempre esteve ao meu lado, acreditando em meu potencial e inspirando-me a ir além dos meus limites. Ainda que não esteja aqui para celebrar esta conquista, cada vitória alcançada é fruto dos seus ensinamentos, do seu amor e da confiança inabalável que depositou em mim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me concedeu a vida, sustentou-me com sua graça e foi meu refúgio nos momentos de incerteza. Esta conquista é graças a Ele; a Ele toda honra, toda glória e todo louvor.

Ao meu orientador, Prof. Especialista Francisco Felinto de Lima Neto, deixo minha profunda gratidão pela orientação criteriosa, paciência inabalável e apoio constante. Sua dedicação e sabedoria foram essenciais para o aperfeiçoamento deste trabalho.

À minha namorada, Áquila Maynara, minha eterna gratidão por seu amor, compreensão e incentivo diários. Sua presença e empatia tornaram possível superar cada desafio.

À minha mãe, Jaqueline Sousa, agradeço pelas orações, palavras de conforto e cuidado mesmo à distância. Seu carinho foi um pilar de força e motivação.

Por fim, dedico este trabalho ao meu pai, Francisco Sousa, que sempre acreditou em mim e me inspirou com seu exemplo de determinação. Cada conquista aqui celebrada reflete a confiança e o apoio que ele me ofereceu ao longo de toda a minha vida.

“Cada etapa é um degrau no caminho, e cada degrau, uma conquista que nos aproxima do destino.”

Autor Desconhecido.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a estabilidade geotécnica de uma barragem de terra construída com solo residual derivado do gabro, visando comprovar sua viabilidade técnica para aplicação em áreas do Semiárido brasileiro. A pesquisa consistiu em uma detalhada caracterização geotécnica dos materiais disponíveis na região, incluindo areia bem graduada (SW), areia mal graduada (SP), argila flexível (CL) e argila rígida (CL). Para a investigação, foram realizados ensaios laboratoriais para determinação das propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos, que embasaram simulações numéricas rigorosas por meio dos softwares GeoStudio, nos módulos SEEP/W para análise do fluxo de água e SLOPE/W para avaliação da estabilidade dos taludes. Entre os principais resultados obtidos destacam-se a identificação das misturas mais adequadas para assegurar a estabilidade estrutural da barragem. A combinação da areia bem graduada (SW) com a argila flexível (CL) demonstrou desempenho satisfatório, apresentando fatores de segurança superiores aos mínimos recomendados pelas normas vigentes tanto para condições permanentes quanto transitórias. Por outro lado, as análises indicaram que a mistura de areia mal graduada (SP) com argila rígida (CL) resultou em fatores de segurança mais baixos, ainda que aceitáveis em certas condições operacionais. Além disso, a modelagem tridimensional revelou-se uma ferramenta essencial, permitindo uma representação fiel das características geométricas e estruturais da barragem proposta. Dessa forma, os resultados obtidos comprovam a viabilidade técnica da construção da Barragem do Alívio, destacando seu potencial para aumentar significativamente a segurança hídrica regional frente às estiagens frequentes. O estudo também reforça a importância do emprego de técnicas locais e materiais regionais na construção civil, visando otimizar custos e garantir sustentabilidade econômica e ambiental.

Palavras-chave: barragem de terra; estabilidade geotécnica; solo residual; geostudio; semiárido.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the geotechnical stability of an earth dam constructed with residual soil derived from gabbro, to demonstrate its technical feasibility for application in the Brazilian Semi-Arid region. The research involved a detailed geotechnical characterization of locally available materials, including well-graded sand (SW), poorly graded sand (SP), flexible clay (CL), and rigid clay (CL). Laboratory tests were performed to determine the mechanical and hydraulic properties of the soils, supporting rigorous numerical simulations conducted using GeoStudio software, specifically the SEEP/W module for water flow analysis and the SLOPE/W module for slope stability assessment. The key findings identified the most suitable soil mixtures to ensure the structural stability of the dam. The combination of well-graded sand (SW) with flexible clay (CL) exhibited satisfactory performance, presenting safety factors above the minimum recommended by current standards under both permanent and transient conditions. Conversely, analyses indicated that the mixture of poorly graded sand (SP) with rigid clay (CL) resulted in lower safety factors, although still acceptable under certain operational conditions. Additionally, three-dimensional modeling proved essential, enabling accurate representation of the proposed dam's geometric and structural characteristics. Thus, the results confirm the technical feasibility of constructing the Alívio Dam, highlighting its significant potential to enhance regional water security in response to frequent droughts. The study also underscores the importance of employing local techniques and regional materials in civil construction to optimize costs and ensure economic and environmental sustainability.

Keywords: earth dam; geotechnical stability; residual soil; geostudio; semi-arid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Barragem Homogênea Modificada.....	20
Figura 2: Barragem de Seção Zonada	21
Figura 3: Barragem Mista.....	21
Figura 4: Altura de Segurança e as Ondas Formadas no Reservatório	25
Figura 5: Fetch de um Lago de uma Barragem.....	26
Figura 6: Esquemático de Seção Lateral dos parâmetros gerais de dimensionamento de uma Barragem de Terra.....	27
Figura 7: Detalhamento de Camadas Riprap	30
Figura 8: Esquema de seção para dimensionamento do Dreno de Pé	33
Figura 9: Função de força entre fatias de meio seno	34
Figura 10: Fator de Segurança versus λ	35
Figura 11: Superfície de deslizamento circular	36
Figura 12: Superfície de deslizamento planar	36
Figura 13: Superfície de deslizamento composta.....	37
Figura 14: Superfície de deslizamento em bloco (cross-over)	37
Figura 15: Esquema do Método de Entrada e Saída	41
Figura 16: Esquema do Método de Grade	41
Figura 17: Esquema do Método de Raio.....	42
Figura 18: Malha de elementos finitos para análise de fluxo.....	43
Figura 19: Representação das linhas de fluxo e linha piezométrica.....	44
Figura 20: Linhas de Fluxo em uma Análise de Estado Estacionário Antes da Drenagem do Reservatório	45
Figura 21: Mapa de Região dos Estudos	48
Figura 22: Mapa de Classificação do Solo da Região	49
Figura 23: Localização da Região de Estudo no Mapa Brasileiro	50
Figura 24: Mapa geológico do local de coleta de amostra SW.....	50
Figura 25: Mapa de Localização das coletas feitas por Campos (2024)	51
Figura 26: Mapa de elevação da região com dados do Global Mapper	53
Figura 27: Estudo de Inundação 2D, Curvas de Nível A Partir de 150m	54
Figura 28: Estudo de Inundação 2D, Curvas de Nível A Partir de 165m	54
Figura 29: Estudo de escoamento da bacia hidrográfica.	55
Figura 30: Perfil topográfico da região do corte de elevação	56

Figura 31: Curvas de nível geradas para a região de estudo.....	56
Figura 32: Modelagem 3D do reservatório	57
Figura 33: Seção de Corte Transversal do Modelo da Barragem do Alívio	60
Figura 34: Detalhamento do Dreno de Pé na Barragem	60
Figura 35: Vista do topo da barragem no local proposto.....	61
Figura 36: Vista em Perspectiva Superior da Barragem.....	61
Figura 37: Resultado da Análise de Fluxo Permanente - Areia bem graduada SW + Amostra 19 - Argila Flexível CL	63
Figura 38: Resultado de Análise de Estabilidade do Talude de Montante - Areia bem graduada SW + Amostra 19 - Argila Flexível CL	64
Figura 39: Resultado da Análise de Fluxo Transiente (dia 0-150) - Areia bem graduada SW + Amostra 19 - Argila Flexível CL	64
Figura 40: Resultado da Análise de Estabilidade de Talude em Regime Transiente (Dia 0-150) - Areia bem graduada SW + Amostra 19 - Argila Flexível CL.....	65
Figura 41: Fator de Segurança X Tempo (d) - Areia bem graduada SW + Amostra 19 - Argila Flexível CL	65
Figura 42: Resultado da Análise de Fluxo Permanente - Areia bem graduada SW + Amostra 21 - Argila Rígida CL	66
Figura 43: Resultado da Análise de Estabilidade do Talude de Montante - Areia bem graduada SW + Amostra 21 - Argila Rígida CL	66
Figura 44: Resultado da Análise de Fluxo Transiente (Dia 0-150) - Areia bem graduada SW + Amostra 21 - Argila Rígida CL	66
Figura 45: Resultado da Análise de Estabilidade de Talude em Regime Transiente (Dia 0-150) - Areia bem graduada SW + Amostra 21 - Argila Rígida CL.....	67
Figura 46: Fator de Segurança X Tempo (d) - Areia bem graduada SW + Amostra 21 - Argila Rígida CL	67
Figura 47: Resultado da Análise de Fluxo Permanente - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 19, Argila Flexível CL	68
Figura 48: Resultado da Análise de Estabilidade de Talude - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 19, Argila Flexível CL	68
Figura 49: Resultado da Análise de Fluxo Transiente (Dia 0-150) - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 19, Argila Flexível CL.....	68
Figura 50: Resultado da Análise de Estabilidade de Talude em Regime Transiente (Dia 0-150) - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 19, Argila Flexível CL	69

Figura 51: Fator de Segurança X Tempo (d) - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 19, Argila Flexível CL	69
Figura 52: Resultado da Análise de Fluxo Permanente - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 21, Argila Rígida CL	70
Figura 53: Resultado da Análise de Estabilidade de Talude - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 21, Argila Rígida CL	70
Figura 54: Resultado da Análise de Fluxo Transiente (Dia 0-150) - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 21, Argila Rígida CL.....	70
Figura 55: Resultado da Análise de Estabilidade de Talude em Regime Transiente (Dia 0-150) - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 21, Argila Rígida CL	71
Figura 56: Fator de Segurança X Tempo (d) - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 21, Argila Rígida CL	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de Barragens, Aplicações Típicas e Vantagens	21
Tabela 2: Valores típicos de K e C para diferentes tipos de características da bacia	25
Tabela 3: Altura de Segurança Adequada em Função da Dimensão do Lago	26
Tabela 4: Pré-dimensionamento dos taludes conforme tipo de solo	29
Tabela 5: Coeficiente C para diferentes declividades de talude	30
Tabela 6: Peso específico do tipo de rocha (δ).....	31
Tabela 7: Recomendações de Inclinações para Taludes de Núcleo.....	32
Tabela 8: Fatores de segurança mínimos recomendados para estabilidade de taludes, conforme ABNT NBR 11682:2009.....	38
Tabela 9: Equações de equilíbrio estático satisfeitas pelos métodos	38
Tabela 10: Características e relações das forças entre fatias	39
Tabela 11: Propriedades das amostras analisadas para o maciço da barragem.....	52
Tabela 12: Parâmetros geotécnicos dos demais solos utilizados.....	52
Tabela 13: Resultados de Dimensionamento Vertedouro.....	58
Tabela 14: Resultados de Dimensionamento dos Taludes da Barragem	58
Tabela 15: Resultados de Dimensionamento dos Taludes do Núcleo	58
Tabela 16: Demais Resultados Dimensionamento da Barragem	59
Tabela 17: Volumes dos Componentes da Barragem	62
Tabela 18: Resumo dos Resultados de Fator de Segurança	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDiA	Banco de Dados de Imagens Aéreas
CH	Argila de alta compressibilidade (Clay, High compressibility)
CL	Argila de baixa compressibilidade (Clay, Low compressibility)
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
USBR	United States Bureau of Reclamation (agência federal dos EUA responsável por projetos hídricos e irrigação)
GLE	<i>General Limit Equilibrium</i> (Limite de Equilíbrio Geral)
FS	<i>Fator de Segurança</i>
Revit	Software de modelagem tridimensional (BIM)
Global Mapper	Software de mapeamento e informações geográficas
GeoStudio	Pacote de software geotécnico
SEEP/W	Módulo do GeoStudio voltado à simulação de fluxo de água em meios porosos
SLOPE/W	Módulo do GeoStudio voltado à análise de estabilidade de taludes
ML	Silte de baixa compressibilidade (Silt, Low compressibility)
MH	Silte de alta compressibilidade (Silt, High compressibility)
SP	Areia mal graduada (Sand, Poorly graded)
SW	Areia bem graduada (Sand, Well graded)

LISTA DE SÍMBOLOS

- A** Área de contribuição da bacia hidrográfica (km^2)
- B** Largura do coroamento da barragem (m)
- C** Coeficiente de concentração da vazão (adimensional)
- Cd** Coeficiente de descarga do vertedouro (adimensional)
- c** Coesão do solo (kPa)
- c'** Coesão efetiva do solo (kPa)
- e₁** Espessura da camada de enrocamento (m)
- F** Folga (freeboard) (m)
- FS** Fator de segurança (adimensional)
- Ff** Fator de segurança (forças) (adimensional)
- Fm** Fator de segurança (momentos) (adimensional)
- g** Aceleração da gravidade (m/s^2)
- γ** Peso específico do solo (kN/m^3)
- h** Altura de onda (m)
- H** Altura do maciço da barragem (m)
- K** Coeficiente de escoamento superficial (adimensional)
- Kx** Condutividade hidráulica horizontal (m/s)
- Ky** Condutividade hidráulica vertical (m/s)
- k** Coeficiente de permeabilidade do solo (m/s)
- L** Comprimento do curso d'água principal / fetch / largura do vertedouro (km / m)
- λ** Parâmetro de distribuição de forças entre fatias (adimensional)
- ϕ** Ângulo de atrito interno do solo ($^\circ$)
- V** Velocidade de propagação da onda (m/s)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REFERÊNCIA LITERÁRIA	19
2.1	BARRAGENS	19
2.1.1	Barragens de terra e sua estrutura	22
2.1.2	Métodos para Controle do Fluxo de Água em Barragens de Terra: Mitigação de Percolação	23
2.2	DIMENSIONAMENTO DE UMA BARRAGEM DE TERRA	24
2.2.1	Vertedouro	24
2.2.2	Barragem de terra.....	25
2.3	ESTUDO DE ESTABILIDADE DE TALUDES	34
2.3.1	Limite de Equilíbrio Geral (GLE).....	34
2.4	FORMAS DE SUPERFÍCIE DE DESLIZAMENTO	35
2.4.1	Circular	35
2.4.2	Planar	36
2.4.3	Superfície em bloco (Block).....	37
2.4.4	Métodos de fator de segurança	38
2.4.5	Método de Entrada e Saída	40
2.4.6	Método de Grade.....	41
2.4.7	Método de Raio	42
2.4.8	Resistência do Maciço.....	42
2.4.9	Análise de Fluxo	43
2.4.10	Análise de fluxo permanente e transiente.....	45
3	METODOLOGIA.....	46
3.1	PLANEJAMENTO DO ESTUDO.....	47
3.2	Levantamento Bibliográfico e Delimitação do Escopo Metodológico.....	47
3.3	Caracterização da Área de Estudo	48
3.4	Fontes de Solo para Composição do Maciço	50
3.5	ESTUDO DE ELEVAÇÃO, ESCOAMENTO E CURVAS DE NÍVEL	53
4	RESULTADOS:	57
4.1	Dimensionamento da Barragem e Vertedouro.....	58
4.2	Modelagem 3D da Barragem.....	59
4.3	Análise de Fluxo da Água e Estabilidade dos Taludes do Modelo.....	62
4.4	Análise Das Amostras De Areia Bem Graduada SW	63

4.5	Análise Da Amostra 20 De Areia Mal Graduada SP	67
4.6	Discussão	72
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
6	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	75

1 INTRODUÇÃO

As barragens são obras civis essenciais para o manejo dos recursos hídricos, consistindo em maciços de materiais dispostos em camadas, projetados para suportar pressões hidráulicas e geomecânicas e garantir estabilidade e durabilidade ao longo de sua vida útil (Pinto, 2006). Além de reter líquidos como água, rejeitos ou detritos, essas estruturas formam reservatórios que permitem regular vazões e atender a usos diversos, tais como abastecimento humano, irrigação, geração de energia e contenção de materiais sólidos (Sayão, 2009).

Na região semiárida brasileira, caracterizada por elevada variabilidade pluviométrica, as mudanças climáticas têm intensificado a gravidade das estiagens, agravando o risco hídrico local (Marengo et al., 2015). Estudos do IPEA apontam que a irrigação se tornou condição indispensável à sustentabilidade produtiva do semiárido e tem sido objeto de políticas de fomento desde a década de 1980 (IPEA, 2018). No Agreste potiguar, a dependência exclusiva das chuvas compromete a produção agrícola, impactando diretamente a segurança alimentar e o desenvolvimento socioeconômico das comunidades (Castro, 2017).

Historicamente, a construção de barragens emergiu como estratégia de mitigação dos efeitos da seca, assegurando reservação e distribuição de água mesmo em períodos críticos (Faria, 1978; Molle, 1994). O projeto da Barragem do Alívio, formalizado em 2021 por meio de Termo de Execução Descentralizada entre DNOCS e UFRN, visa melhorar a segurança hídrica da comunidade de Alívio e municípios vizinhos, como Pedro Avelino e Angicos. Infraestruturas análogas, como a Barragem de Oiticica, demonstram que reservatórios de médio porte podem assegurar o abastecimento urbano e fomentar a expansão da irrigação familiar, promovendo o desenvolvimento regional sustentável (Jesus & Fae, 2023).

No entanto, barragens que apresentem deficiências em seu projeto ou que não recebam manutenção e monitoramento adequados podem gerar impactos ambientais e sociais severos, expondo populações adjacentes a riscos e comprometendo investimentos substanciais (Sayão, 2009). Ocorrências recentes, como o rompimento da Barragem de Algodões I (Piauí, 2009) e o colapso da Barragem do Fundão (Minas Gerais, 2015), evidenciam fragilidades nos sistemas de fiscalização e inspeção periódica, reforçando a necessidade urgente de aprimoramento das práticas de

engenharia, gestão e supervisão aplicadas a essas estruturas (Massad, 2021; Morgenstern, 2018).

A escolha de materiais locais e a aplicação de técnicas regionais podem reduzir custos de implantação e reforçar a resiliência hídrica, além de promover a sustentabilidade econômica e ambiental da obra. O uso de recursos locais minimiza a necessidade de transporte de materiais, reduzindo a pegada de carbono e contribuindo para a sustentabilidade. Estudos sobre solos residuais na área de Alívio indicam características geomecânicas adequadas à construção de barragens, conferindo robustez ao dimensionamento geotécnico e à modelagem numérica em ambientes como o GeoStudio (Lima, 2016; Fredlund, 1977; Shields, 1977; Bauer et al., 1981; Saran et al., 1989; Morgenstern, 2018).

Nesse contexto, surge a proposta deste trabalho, cujo objetivo é a avaliação da viabilidade de construção da Barragem do Alívio por meio de análises de fluxo de água e de estabilidade geotécnica.

Para tanto, a metodologia adotada consistiu inicialmente na modelagem tridimensional da geometria da Barragem do Alívio, de forma a representar com precisão suas dimensões e características estruturais. Em seguida, procedeu-se à delimitação da bacia hidrográfica associada ao empreendimento, com a extração das curvas de nível necessárias para subsidiar as análises. Por fim, foram realizadas simulações numéricas de escoamento e de estabilidade geotécnica, utilizando softwares especializados, a fim de avaliar o comportamento hidráulico e estrutural da barragem nas diferentes condições operacionais previstas.

2 REFERÊNCIA LITERÁRIA

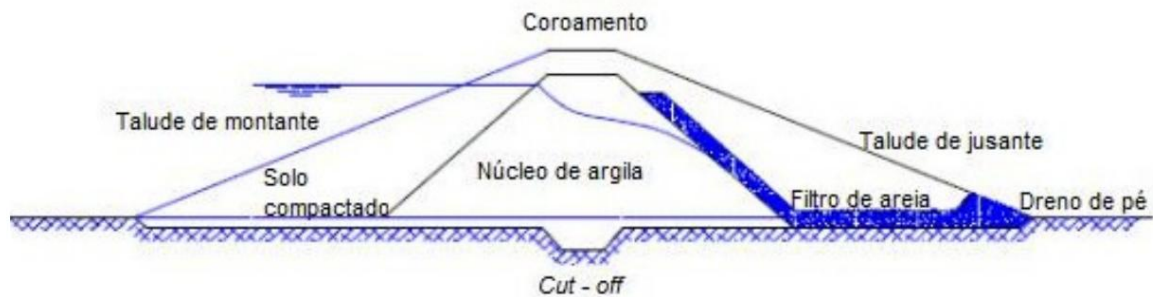
Neste capítulo será abordado de maneira sistemática o levantamento da tipologia e das classificações de barragens, os métodos de estabilidade de taludes e as técnicas de análise de fluxo, até as diretrizes de dimensionamento e caracterização geotécnica, integrando fundamentos clássicos e ferramentas computacionais.

2.1 BARRAGENS

As barragens são estruturas artificiais destinadas à retenção de água, construídas com o objetivo de regular fluxos, armazenar recursos hídricos e prover segurança à jusante. A dimensão básica de uma barragem é sua altura, definida como

Barragens zoneadas: seções transversais divididas em zonas de materiais com permeabilidades distintas, otimizando o uso de recursos disponíveis (Lança, 1997), como demonstrado na Figura 2.

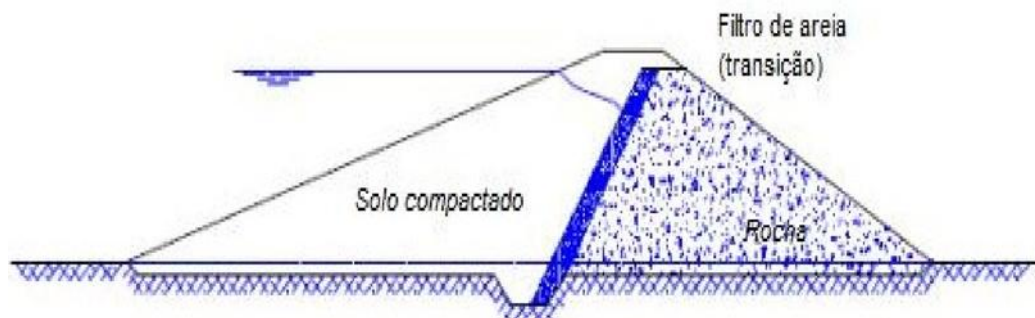
Figura 2: Barragem de Seção Zonada



Fonte: Lança, 1997.

Barragens mistas: combinam ombreiras de terra com núcleo ou face de enrocamento (ou concreto/asfalto) para aproveitar materiais locais e condições do vale (Tariq, 2008), como demonstrado na figura 3.

Figura 3: Barragem Mista.



Fonte: Lança, 1997.

Na Tabela 1 estão descritos, de forma detalhada, as aplicações típicas e as principais vantagens de cada tipo de barragem, facilitando a comparação entre as diferentes modalidades abordadas no texto.

Tabela 1: Tipos de Barragens, Aplicações Típicas e Vantagens

TIPO DE BARRAGEM	APLICAÇÕES TÍPICAS	VANTAGENS
BARRAGEM DE TERRA	Reservatórios de pequeno porte para irrigação e abastecimento rural (MEIRELLES, 2011)	Utiliza materiais locais, baixo custo de implantação e facilidade na execução em camadas compactadas (MIRANDA, 2016.)
BARRAGEM DE ENROCAMENTO	Obras de grande porte, como usinas hidrelétricas e controle de cheias (MEIRELLES, 2011)	Permite taludes mais íngremes, elevada estabilidade estrutural e

BARRAGEM MISTA

Situações que demandam otimização de materiais locais, combinando núcleo impermeável e suporte de enrocamento (MEIRELLES, 2011)

durabilidade em condições severas.

Alia boa impermeabilidade ao corpo de aterro com estabilidade proporcionada pelo enrocamento, equilibrando custo e desempenho (MEIRELLES, 2011)

Fonte: Autoria própria, 2025

2.1.1 Barragens de terra e sua estrutura

As barragens de terra são construídas principalmente com materiais naturais como solo e rocha. Esses maciços são formados por camadas sucessivas de materiais escolhidos por sua baixa permeabilidade e adequada coesão, que em termos geotécnicos, significa escolher e compactar o material de modo que o valor de coesão (parâmetro c no critério de Mohr-Coulomb) seja grande o bastante para impedir percolação excessiva, evitar rupturas por cisalhamento nos taludes e manter a resistência mínima mesmo sob variações de umidade. Essa característica assegura ainda boa conformação das camadas durante a compactação e reduz o risco de fissuras ou assentamentos diferenciais, atendendo aos requisitos de segurança estabelecidos em norma e aos limites de vazão admissível e altura da barragem definidos em projeto.

Existem duas principais categorias de barragens de aterro: barragens de terra e barragens de enrocamento. As barragens de terra podem ser classificadas em dois tipos: homogênea e zoneada (MEIRELLES, 2011; MIRANDA, 2016). Essas barragens possuem componentes essenciais, como os taludes de montante e jusante, a crista e o núcleo impermeável. O talude de montante é frequentemente protegido com revestimentos ou enrocamentos, enquanto o talude de jusante é reforçado com proteção vegetal ou Riprap. A crista, que deve ter largura mínima de 3 a 5 metros, facilita a manutenção e a drenagem da barragem (MIRANDA, 2016). A compactação do maciço é realizada em camadas de 20 a 30 cm, utilizando equipamentos pesados, como rolos compactadores, para garantir a densidade necessária. Adicionalmente, a trincheira de vedação (cut-off) e o núcleo impermeável são implementados para controlar o fluxo de água e assegurar a estabilidade da estrutura.

2.1.2 Métodos para Controle do Fluxo de Água em Barragens de Terra: Mitigação de Percolação

A movimentação da água dentro do corpo de uma barragem de terra, conhecida como percolação, pode representar uma ameaça significativa à sua estabilidade. Para mitigar os efeitos do fluxo de água de montante à jusante, diversas técnicas de impermeabilização e controle de percolação são empregadas no projeto e construção dessas estruturas. Tais medidas são fundamentais para assegurar a segurança estrutural da barragem e prevenir problemas como a erosão interna ou a falha de fundação (Meirelles, 2011; Gaioto, 2003).

Uma das principais técnicas utilizadas é o núcleo impermeável, geralmente composto por argila de alta plasticidade ou outros materiais com baixa permeabilidade. O núcleo é instalado ao longo do eixo da barragem, formando uma barreira que impede a passagem excessiva de água para o interior do maciço (Meirelles, 2011). Em barragens de aterro homogêneas, a impermeabilidade é alcançada pela uniformidade do material, enquanto em barragens zoneadas, o núcleo impermeável é cercado por ombreiras de material mais coeso (MIRANDA, 2016).

Além do núcleo impermeável, outras medidas como os tapetes impermeabilizantes a montante, filtros e drenos são utilizados para controlar o fluxo de água e garantir a drenagem adequada do maciço.

O tapete impermeabilizante é uma camada de material colocada no talude de montante, que visa prevenir a infiltração da água proveniente do reservatório, enquanto os filtros e drenos são dispostos para permitir a saída controlada da água que atravessa o maciço, evitando que a pressão excessiva de percolação afete a estabilidade da estrutura (Gaioto, 2003; Gedeon, 2004).

A trincheira de vedação, também chamada de cut-off, é outro componente essencial em muitas barragens. Essa estrutura é uma barreira construída na fundação da barragem para evitar a migração de água através da base do maciço. Sua implementação é especialmente importante em terrenos permeáveis, onde pode ser necessário impedir o fluxo vertical ou horizontal da água que poderia comprometer a estabilidade da barragem (SANTOS, 2015).

Esses métodos são frequentemente analisados por meio de modelagem numérica, como os softwares SEEP/W e SLOPE/W, que permitem a simulação precisa do comportamento do fluxo de água e a análise da estabilidade das barragens (GEO-SLOPE, 2015). A integração dessas ferramentas no planejamento de barragens

de terra contribui para a previsão de problemas de infiltração e a definição das melhores práticas para mitigar riscos relacionados à percolação.

2.2 DIMENSIONAMENTO DE UMA BARRAGEM DE TERRA

2.2.1 Vertedouro

Para dimensionar o vertedouro, são consideradas duas etapas principais: a definição da Cheia Máxima de Projeto (Q_s) e o cálculo da largura necessária do vertedouro (L).

A vazão de projeto Q_s , é obtida usando a equação 1.

$$Q_s = \frac{1050 \times A}{\sqrt{LK} \times [120 + (LCK)]} \quad (1)$$

Onde,

Q_s = Cheia Máxima de Projeto (m^3/s)

A = área de contribuição da bacia (km^2)

L = comprimento do canal principal (km), definido como a distância medida ao longo do perfil longitudinal do leito de fundo principal, desde a nascente mais distante até o ponto de exutório da bacia (US Geological Survey, 1968)

K = coeficiente de escoamento superficial (adimensional), obtido em tabelas conforme tipo de solo e cobertura vegetal.

C = coeficiente de concentração da vazão (adimensional), também tabelado segundo características da bacia.

Já para o dimensionamento da largura do vertedouro de crista livre L adota a equação 2.

$$L = \frac{Q_s}{C_d \times H_0^{3/2}} \quad (2)$$

L = largura do vertedouro (m)

C_n = coeficiente de descarga (adimensional), que reúne perdas de energia na entrada e no escoamento sobre a crista

H_0 = carga hidráulica sobre a crista, ou altura da lâmina d'água acima da soleira (m)

Pode-se determinar os valores do coeficiente de escoamento superficial K e do coeficiente de concentração da vazão C, através da tabela 2.

Tabela 2: Valores típicos de K e C para diferentes tipos de características da bacia

<i>Características da bacia</i>	<i>Tipo</i>	<i>U</i>	<i>K</i>	<i>C</i>
<i>Pequena, íngreme e rochosa</i>	1	1,30	0,10	0,85
<i>Bem acidentada sem depressões evaporativas</i>	2	1,20	0,15	0,95
<i>Média</i>	3	1,00	0,20	1,00
<i>Ligeiramente acidentada</i>	4	0,80	0,30	1,05
<i>Ligeiramente acidentada com depressões evaporativas</i>	5	0,70	0,40	1,15
<i>Quase plana, terreno argiloso</i>	6	0,65	0,65	1,30
<i>Quase plana, terreno variável ordinário</i>	7	0,60	1,00	1,45
<i>Quase plana, terreno arenoso</i>	8	0,50	2,50	1,60

Fonte: AGUIAR, A. M. (1940).

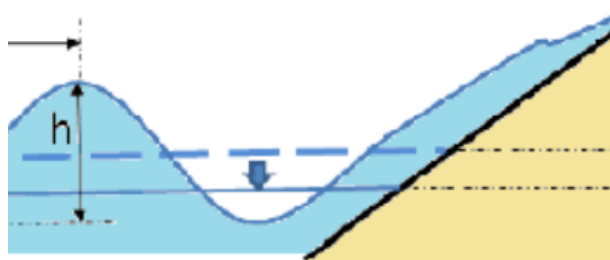
2.2.2 Barragem de terra

Segundo Meirelles (2011), o dimensionamento de uma barragem de terra envolve a consideração de parâmetros como a altura de onda, folga, altura do maciço, inclinação dos taludes, largura do coroamento, e o uso de elementos como RIPRAP, filtros verticais e horizontais, e drenagem de pé. A estabilidade e segurança da barragem dependem da escolha adequada desses elementos e da análise das condições geotécnicas do terreno.

2.2.2.1 Altura de onda (h)

A altura de onda corresponde à distância vertical entre a crista e o vale de uma onda, conforme ilustrado na Figura 4, e representa o esforço que o vento impõe à lâmina d'água, influenciando diretamente o dimensionamento da barragem.

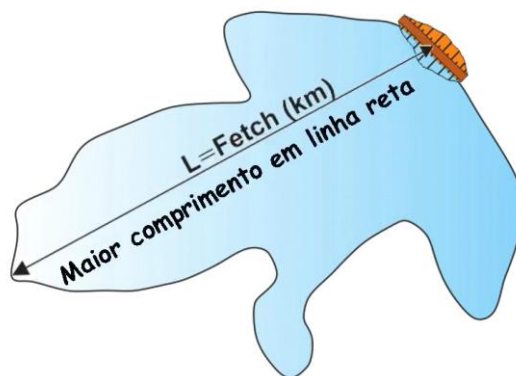
Figura 4: Altura de Segurança e as Ondas Formadas no Reservatório



Fonte: Sandoval, 2011

O fetch (L) é a extensão livre de obstáculos sobre a qual o vento atua para gerar ondas no reservatório. Quanto maior o fetch, maior tende a ser a altura da onda (Ochi, 1998), como ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Fetch de um Lago de uma Barragem



Fonte: LEME (2019)

A partir do valor de *fetch* calculado, torna-se possível determinar a altura de segurança adequada em função da dimensão do lago, utilizando como referência os parâmetros apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Altura de Segurança Adequada em Função da Dimensão do Lago

<i>Fetch (km)</i>	<i>Altura de Segurança Indicada (m)</i>	<i>Altura de Segurança Mínima (m)</i>
< 1,5	1,2	1,0
≈ 1,5	1,5	1,2
≈ 5,0	2,0	1,5
≈ 7,0	2,5	1,8
≈ 15,0	3,0	2,0

Fonte: Hradilek et, (2002)

A equação para calcular a altura de onda (h), proposta por Gaillard e adotada por Meirelles (2011), pode-se calcular usando a equação 3.

$$h = 0,75 + 0,34\sqrt{L} - 0,264\sqrt[4]{L} \quad (3)$$

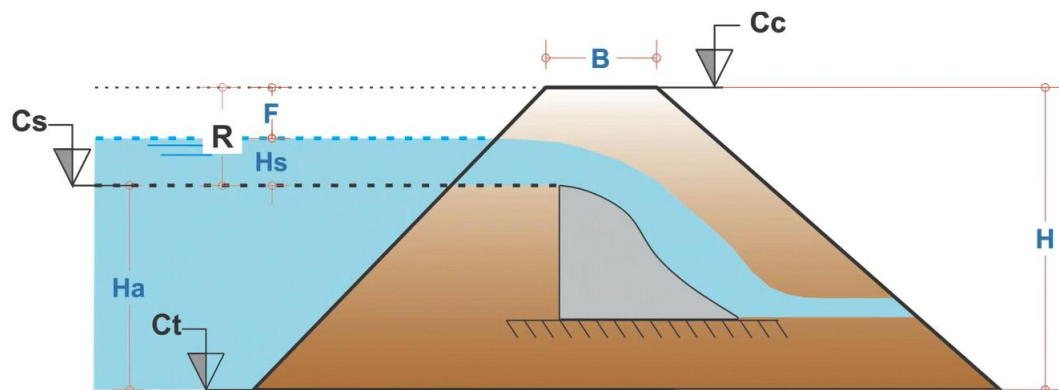
h = é a altura da onda gerada pelo vento (m);

L = é o comprimento efetivo de fetch, isto é, a distância (km) perpendicular ao eixo da barragem sobre a qual o vento atua para formação de ondas.

2.2.2.2 Folga (F)

Como ilustrado na Figura 6, a folga (freeboard) corresponde à distância vertical entre o nível máximo de água, já considerando a altura das ondas, e o coroamento da barragem, garantindo margem de segurança contra transbordamentos (Meirelles, 2011).

Figura 6: Esquemático de Seção Lateral dos parâmetros gerais de dimensionamento de uma Barragem de Terra.



Fonte: LEME (2019)

Já a velocidade de propagação da onda (V) na superfície é estimada usando a equação 4.

$$V = 1,5 + 2h \quad (4)$$

V = é a velocidade de propagação da onda na superfície (m/s);

h = é a altura da onda (m), conforme equação de Gaillard.

Para estimar a folga, adota-se a equação 5.

$$F = 0,75h + \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

F = folga mínima (m);

h = altura da onda gerada pelo vento (m);

V = velocidade de propagação da onda (m/s);

g = aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$).

2.1.2.2 Cota de coroamento (C_c)

A cota de coroamento corresponde à elevação da crista da barragem acima do nível de referência do terreno e deve garantir a sobrelevação mínima definida pelo nível normal, pela folga contra ondas e pelo nível morto do reservatório (Figura 6). É calculada usando a equação 6.

$$C_c = C_s + F + H_s \quad (6)$$

C_s = cota do nível normal de água (m);

F = folga ou freeboard (m);

H_s = cota da lâmina morta ou nível mínimo operacional (m) (Meirelles, 2011).

2.2.2.3 Altura do maciço (H)

A altura do maciço é a distância vertical entre a face inferior da fundação e a crista da barragem, determinante para o volume de material requerido e para análises estruturais (Figura 6). Obtém-se pela diferença entre a cota de coroamento e a cota da fundação usando a equação 7.

$$H = C_c - C_t \quad (7)$$

C_t = cota da base da fundação (m) (Meirelles, 2011).

2.2.2.4 Largura do coroamento (B)

A largura do coroamento (B) corresponde à dimensão horizontal da crista da barragem, garantindo espaço para inspeção, acesso de veículos leves e acomodação de eventuais vias de serviço. Na Figura 6, B está representado como a distância máxima entre as verticais que tangenciam a crista do maciço.

Três métodos empíricos consagrados no dimensionamento de barragens de terra são utilizados as equações, 8, 9 e 10.

Método Bureau of Reclamation (USBR, 1967)

$$B = 0,20H + 3,00 \quad (8)$$

Método Knappen (Meirelles, 2011)

$$B = 1,65\sqrt{H} \quad (9)$$

Método Preece (Meirelles, 2011)

$$B = 1,1\sqrt{H} + 1 \quad (10)$$

Em que H é a altura total do maciço (m).

Dentre os três, o método de Preece tornou-se o mais empregado devido à sua facilidade de aplicação, à confiabilidade dos resultados para barragens de terra pequenas e médias. Por ter sido incluído no livro-texto “Princípios de Engenharia de Barragens” (Meirelles, 2011) e citado em diversos cursos de engenharia civil no Brasil, o método de Preece passou a ser referencial em salas de aula e em manuais de projeto. Além disso, a Portaria DNPM n.º 70/83 e o DNIT EM 128/2001 mencionam explicitamente a possibilidade de uso de fórmulas empíricas validadas nacionalmente, das quais Preece é a principal.

Para projetos de maior complexidade ou em solos com comportamento hidrológico muito específico, pode-se recorrer aos métodos USBR ou Knappen, mas, no uso cotidiano, Preece satisfaz o tripé qualidade–segurança–custo de forma mais eficiente.

2.2.2.5 Inclinação de taludes da barragem

A estabilidade dos taludes depende diretamente da inclinação adotada, expressa pela razão horizontal/vertical (H:V), que varia conforme as características do solo. Em geral, os taludes de montante são mais planos para reduzir a percolação de água, enquanto os de jusante podem ser um pouco mais íngremes por estarem sujeitos a menores carregamentos hidráulicos. As inclinações recomendadas para o pré-dimensionamento encontram-se na Tabela 4 (Meirelles, 2011).

Tabela 4: Pré-dimensionamento dos taludes conforme tipo de solo

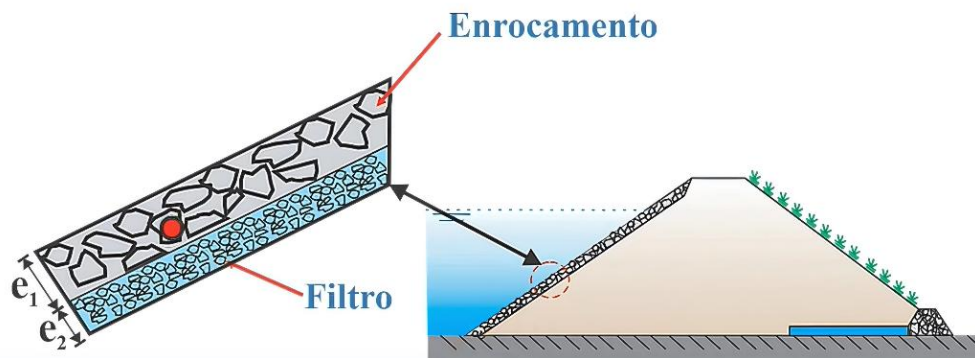
<i>Tipo de solo</i>	<i>Sigla</i>	<i>Inclinação Montante (H:V)</i>	<i>Inclinação Jusante (H:V)</i>
<i>Solo argiloso</i>	CL/CH	3:1	2:1
<i>Solo silto-argiloso</i>	ML/MH	2,5:1	2:1
<i>Solo arenoso</i>	SP/SW	2:1	1,5:1
<i>Solo pedregoso</i>	GP/GW	1,5:1	1,3:1
<i>Solo heterogêneo (mistura)</i>	—	2:1	1,7:1

Fonte: Meirelles (2011).

2.2.2.6 RIPRAP

O Riprap (ou enrocamento) é uma técnica de proteção dos taludes de montante (e, em alguns casos, jusante), cuja função principal é absorver a energia de impacto das ondas e minimizar a ação erosiva da água sobre o maciço (Meirelles, 2011). Executa-se em duas camadas, como demonstra a figura 7:

Figura 7: Detalhamento de Camadas Riprap



Fonte: LEME, (2019).

2.2.2.7 Nível de água máximo e mínimo

Camada de Enrocamento (e_1): A camada superior de blocos de rocha é dimensionada pela equação 11.

$$e_1 = C \times V^2 \quad (11)$$

onde e_1 representa a espessura mínima requerida do riprap, C é o coeficiente empírico relacionado à geometria do talude e às propriedades do material rochoso, e V (m/s) é a velocidade de onda calculada em 2.4.2. Para determinar o valor de C , recorre-se aos dados tabulados na Tabela 5, que relaciona diferentes declividades de talude com o peso específico da rocha (δ).

Tabela 5: Coeficiente C para diferentes declividades de talude

Relação do Talude (V:H)	$\delta = 2,50$	$\delta = 2,65$	$\delta = 2,80$
1 / 12	0,024	0,022	0,020
1 / 4	0,027	0,024	0,022
1 / 3	0,028	0,025	0,023
1 / 2	0,031	0,028	0,026
1 / 1,5	0,036	0,032	0,030
1 / 1	0,042	0,041	0,038

Fonte: Tennessee Valley Authority (TVA).

Para determinar o coeficiente C, deve ser selecionado δ conforme o tipo de rocha usado no riprap, a Tabela 6 traz esses valores.

Tabela 6: Peso específico do tipo de rocha (δ)

<i>Tipo de Rocha</i>	<i>Gravidade Específica (δ\deltaelta)</i>
<i>Basalto</i>	2,85
<i>Granito (Gnaiss)</i>	2,70
<i>Calcário</i>	2,65
<i>Arenito (não friável)</i>	2,40

Fonte: Tennessee Valley Authority (TVA).

Esses valores seguem recomendações da Tennessee Valley Authority (TVA) e são amplamente utilizados em projetos de proteção geotécnica de taludes.

Para garantir intertravamento e resistência, recomenda-se que 50 % das pedras tenham diâmetro médio $\geq 0,50$ m (Costa & Lança, 2001).

Camada de Transição (e_2): Posiciona-se sob o enrocamento para filtrar o maciço e evitar a perda de solo pelos vazios. Sua espessura usual varia entre 0,20 e 0,30 m, sendo composta em partes iguais por areia grossa e brita (MIRANDA, 2016).

O Nível de Água Máximo (NA_{max}) corresponde à cota máxima admitida para o espelho d'água durante a operação normal, garantindo que a sobrelevação (folga) e o nível morto sejam respeitados. É dado pela equação 12.

$$NA_{max} = H - H_s \quad (12)$$

No qual, H é a altura total do maciço e H_s é a cota da lâmina morta (Meirelles, 2011). Na Figura 6, NA_{max} está indicado abaixo da crista e acima da base do núcleo.

O Nível de Água Mínimo (NA_{min}) representa a cota mínima operacional, assegurando volume de reserva para usos múltiplos (abastecimento, ecológico, segurança). Adota-se como fração do nível máximo a equação 13.

$$NA_{min} = 0,60 \times NA_{max} \quad (13)$$

(60% de NA_{max}) (Meirelles, 2011). Na Figura 6, NA_{min} está logo acima da base do núcleo, garantindo o mínimo volume de água armazenada.

2.2.2.8 Núcleo

Para Hradilek, o núcleo corresponde à zona impermeável central do maciço, responsável por barrar o fluxo de água através da barragem e minimizar a percolação interna. Em barragens zoneadas, a forma e a inclinação dos taludes do núcleo variam conforme sua função e as características da fundação, sendo definidas pela Tabela 7 adaptada de (Hradilek, 2002).

Tabela 7: Recomendações de Inclinações para Taludes de Núcleo

<i>Tipo de núcleo</i>	<i>Esvaziamento rápido</i>	<i>Solo Aceito</i>	<i>Inclinação Montante</i>	<i>Inclinação Jusante</i>
<i>Núcleo mínimo "A"</i>	Não importa	GC, GM, SC, SM, CL, ML, CH ou MH	2:1	2:1
<i>Núcleo máximo (sem cut-off)</i>	Não	GC, GM	2:1	2,25:1
		SC, SM	2,5:1	3:1
		CL, ML	2:1	2,25:1
		CH, MH	2,5:1	3:1
<i>Núcleo máximo (com cut-off)</i>	Sim	GC, GM	2,5:1	2:1
		SC, SM	2,5:1	2,25:1
		CL, ML	3:1	2,5:1
		CH, MH	3,5:1	3:1

Fonte: Hradilek (2002)

2.2.2.9 Filtro vertical e horizontal

Os filtros em barragens de terra são camadas de solo granular graduado que têm a função de interceptar e conduzir os fluxos de percolação do maciço, evitando o transporte de partículas finas que possam comprometer a estabilidade interna (ABNT NBR 8044:1983).

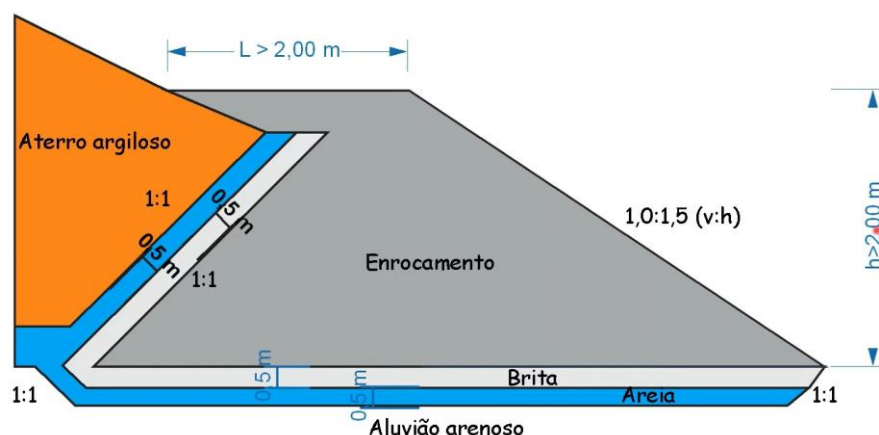
O filtro vertical é posicionado na interface entre o núcleo impermeável e o talude de jusante, o filtro vertical intercepta as linhas de fluxo ascendentes, impedindo a erosão interna e guiando a água para os drenos de pé, enquanto o filtro horizontal, localiza-se na base do talude de jusante, disposto em continuidade ao filtro vertical, coletando e conduzindo a água interceptada até pontos de saída controlada.

Para ambos os filtros, adota-se espessura padrão de 1,00 m, conforme critérios de granulometria, capa de retenção de finos e permeabilidade definidos em ABNT NBR 8044:1983.

2.2.2.10 Dreno de pé

Segundo Nunes (2016), o dreno de pé constitui o principal sistema de drenagem interna em barragens de terra, sendo projetado para interceptar a água de infiltração no contato entre o talude de jusante e o terreno natural e conduzi-la, por meio de um tubo drenante disposto em um canal filtrante, até um ponto de descarga a jusante (NUNES, 2016).

Figura 8: Esquema de seção para dimensionamento do Dreno de Pé



Fonte: Barragem LEME (2019)

Na Figura 8, observa-se que a camada de material filtrante situada imediatamente à montante da tubulação possui espessura mínima superior a 2,00 m, garantindo captura e difusão da água de percolação sem risco de colmatagem. A altura total do dreno, medida da base até o encontro com o talude de enrocamento, também deve exceder 2,00 m, assegurando a captação de toda a coluna de água infiltrada.

A inclinação do talude interno do dreno é projetada em 1 vertical para 2 horizontais, o que facilita a compactação e a estabilidade do filtro. No interior dessa zona de drenagem, o tubo coletor é envolto por uma camada de brita e outra de areia grossa, cada uma com cerca de 0,50 m de espessura, de modo a impedir que partículas fines obstruam o sistema. Essa configuração, em transição suave para o alúvio arenoso natural, garante que a água seja conduzida por gravidade até o ponto de descarga a jusante, prevenindo o aumento excessivo da pressão de poros no maciço (NUNES, 2016).

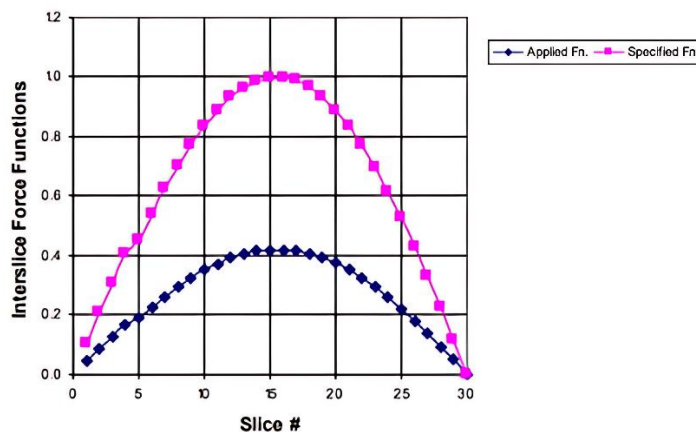
2.3 ESTUDO DE ESTABILIDADE DE TALUDES

2.3.1 Limite de Equilíbrio Geral (GLE)

De acordo com o manual do SLOPE/W (Seequent, 2022), a análise de estabilidade de taludes baseada na formulação de Limite de Equilíbrio Geral (GLE) é realizada de forma totalmente automatizada pelo software, que resolve simultaneamente as equações de equilíbrio de momento e de força horizontal para cada fatia do maciço e calcula, para cada valor do parâmetro λ , os fatores de segurança correspondentes, apresentando graficamente a variação desses fatores em função de λ , de modo que o ponto de interseção das curvas de momento e de força indica o valor final do fator de segurança adotado.

No SLOPE/W, utiliza-se por padrão a função meio seno, mostrada na Figura 9, para modelar a distribuição das forças de cisalhamento entre fatias no método de Morgenstern-Price, concentrando as tensões entre fatias na região central do talude e reduzindo-as junto à crista e ao pé.

Figura 9: Função de força entre fatias de meio seno

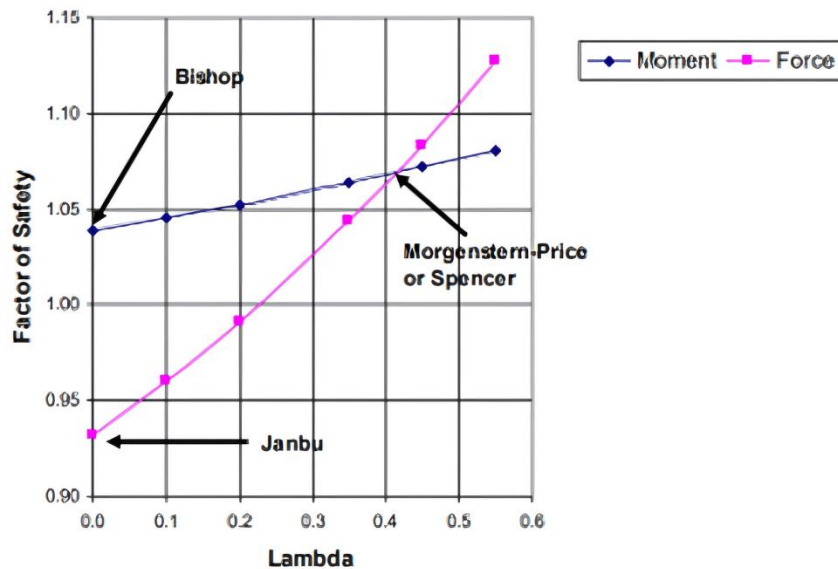


Fonte: Seequent, (2022).

Após selecionar a função meio seno para modelar as forças entre fatias (Figura 9), o software percorre iterativamente o parâmetro λ , calculando, para cada valor, os fatores de segurança referentes ao equilíbrio de momento (F_m) e ao equilíbrio de força horizontal (F_f), e apresenta graficamente a variação desses fatores em função de λ (Figura 10). Essa representação serve para identificar o valor de λ que iguala F_m e F_f , definindo o fator de segurança final da superfície de ruptura, bem como para avaliar a sensibilidade da estabilidade do talude à distribuição das forças entre fatias,

otimizando a aplicação dos métodos de limite de equilíbrio ao ambiente computacional (Seequent, 2022).

Figura 10: Fator de Segurança versus λ



Fonte: Seequent, (2022).

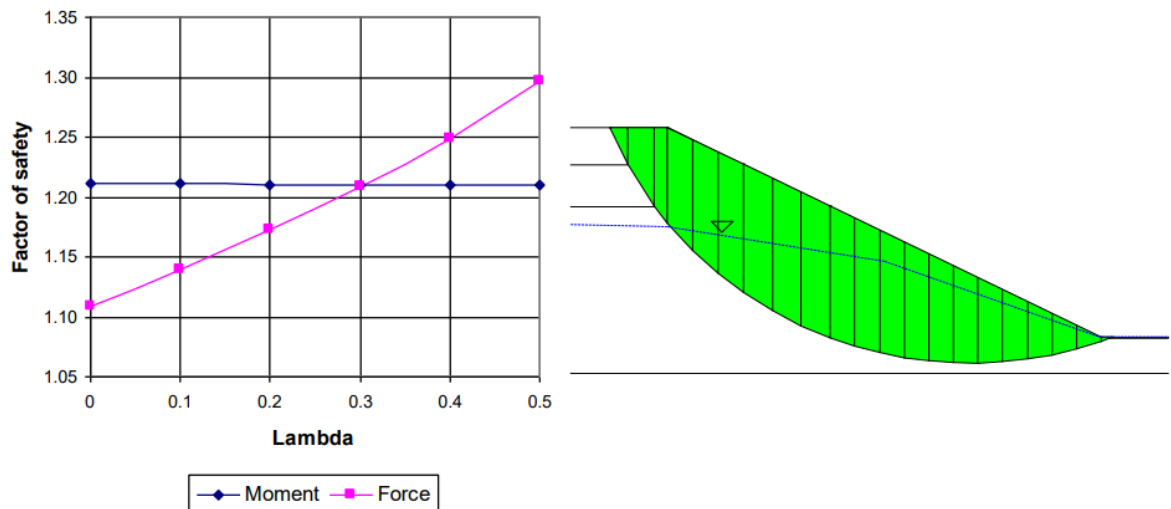
2.4 FORMAS DE SUPERFÍCIE DE DESLIZAMENTO

As superfícies de deslizamento representam as geometrias potenciais de ruptura de um talude e, no SLOPE/W, são geradas automaticamente segundo diferentes critérios de tentativa, permitindo ao analista avaliar uma série de formas de “trial slip surfaces” e determinar aquela que apresenta o menor fator de segurança (Seequent, 2022).

2.4.1 Circular

A superfície de deslizamento circular é constituída por um arco de círculo definido a partir de uma malha de centros e raios especificada pelo usuário, sobre a qual o software gera as tentativas e calcula o fator de segurança correspondente. Nesse método, o equilíbrio de momento é independente do cisalhamento entre fatias, resultando em uma curva horizontal para F_m , enquanto o equilíbrio de forças varia com o cisalhamento entre fatias (Seequent, 2022), conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Superfície de deslizamento circular

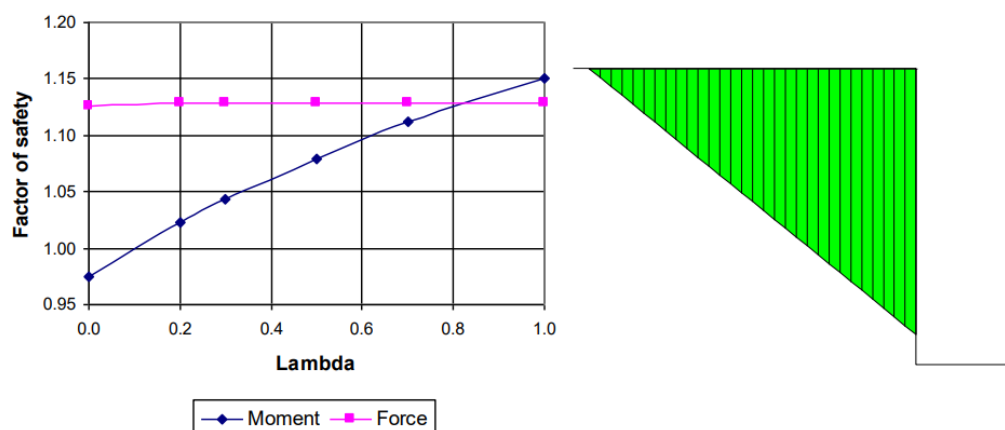


Fonte: Seequent, (2022).

2.4.2 Planar

A superfície de deslizamento planar é definida por um segmento reto que corta o maciço, gerado ao se projetar fatias ao longo de uma mesma inclinação. Nesse caso, o equilíbrio de forças torna-se independente do cisalhamento entre fatias, enquanto o equilíbrio de momentos é sensível a essas forças, refletindo a necessidade de grande deslizamento entre fatias para que o bloco se mova (Seequent, 2022), conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12: Superfície de deslizamento planar

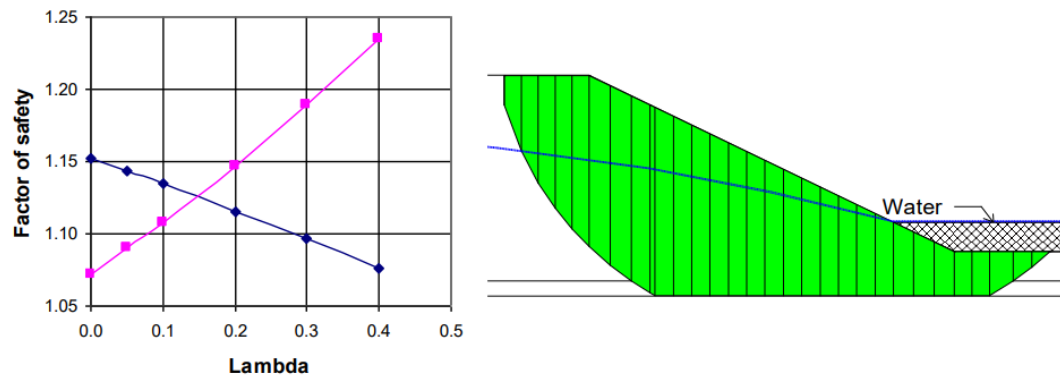


Fonte: Seequent, (2022)

A superfície de deslizamento composta combina um arco de círculo com um segmento planar, adaptando-se a situações em que uma camada fraca guia parte da ruptura. No SLOPE/W, essa forma é obtida ao seccionar a superfície em dois trechos,

circular e planar, e calcular simultaneamente o fator de segurança para cada trecho, evidenciando a influência das forças entre fatias em ambas as porções do caminho de ruptura (Seequent, 2022). Conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13: Superfície de deslizamento composta

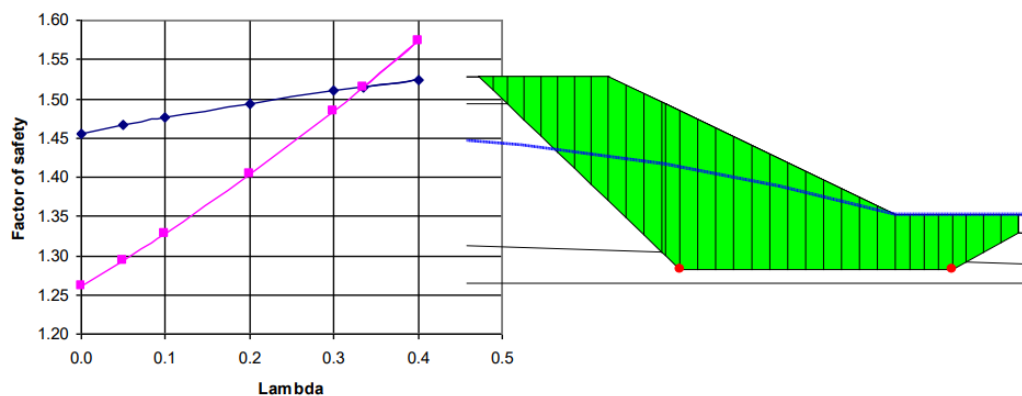


Fonte: Seequent, (2022).

2.4.3 Superfície em bloco (Block)

A superfície de deslizamento em bloco é formada por três segmentos lineares: dois projetados à superfície em ângulos especificados e um trecho central que une pontos de grade à esquerda e à direita. O SLOPE/W gera essa forma definindo dois blocos de grade e varrendo as combinações de pontos e ângulos, produzindo inúmeras tentativas de análise e destacando a sensibilidade ao cisalhamento entre fatias para ambas as condições de (Seequent, 2022). Conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14: Superfície de deslizamento em bloco (cross-over)



Fonte: Seequent, (2022).

2.4.4 Métodos de fator de segurança

Conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 11682:2009, que trata da estabilidade de taludes, os fatores de segurança mínimos recomendados para análises de estabilidade de taludes variam de acordo com o nível de segurança desejado, considerando os riscos de danos a vidas humanas e danos materiais e ambientais. A tabela 8 sintetiza essas recomendações:

Tabela 8: Fatores de segurança mínimos recomendados para estabilidade de taludes, conforme ABNT NBR 11682:2009.

<i>Nível de Segurança contra Danos a Vidas Humanas</i>	<i>Nível de Segurança contra Danos Materiais e Ambientais</i>	<i>Fator de Segurança Mínimo</i>
<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	1,5
<i>Alto</i>	<i>Médio</i>	1,5
<i>Alto</i>	<i>Baixo</i>	1,4
<i>Médio</i>	<i>Alto</i>	1,5
<i>Médio</i>	<i>Médio</i>	1,4
<i>Médio</i>	<i>Baixo</i>	1,3
<i>Baixo</i>	<i>Alto</i>	1,4
<i>Baixo</i>	<i>Médio</i>	1,3
<i>Baixo</i>	<i>Baixo</i>	1,2

Fonte: ABNT NBR 11682, (2009)

Os métodos de fator de segurança disponíveis no SLOPE/W são apresentados nas Tabelas 9 e 10, que indicam, respectivamente, as equações de equilíbrio estático satisfeitas por cada método e as características das forças entre fatias.

Tabela 9: Equações de equilíbrio estático satisfeitas pelos métodos

<i>Método</i>	<i>Equilíbrio de Momento</i>	<i>Equilíbrio de Força</i>
<i>Ordinário ou Fellenius</i>	Sim	Não
<i>Bishop simplificado</i>	Sim	Não
<i>Janbu simplificado</i>	Não	Sim
<i>Spencer</i>	Sim	Sim
<i>Morgenstern-Price</i>	Sim	Sim
<i>Corps of Engineers – 1</i>	Não	Sim
<i>Corps of Engineers – 2</i>	Não	Sim
<i>Lowe-Karafiath</i>	Não	Sim
<i>Janbu generalizado</i>	Sim (por fatia)	Sim
<i>Sarma – fatias verticais</i>	Sim	Sim

Fonte: Seequent, (2022).

Tabela 10: Características e relações das forças entre fatias

<i>Método</i>	<i>Normal entre fatias (E)</i>	<i>Cisalhamento entre fatias (X)</i>	<i>Inclinação do resultante X/E e relação X–E</i>
<i>Ordinário ou Fellenius</i>	Não	Não	Sem forças entre fatias
<i>Bishop simplificado</i>	Sim	Não	Horizontal
<i>Janbu simplificado</i>	Sim	Não	Horizontal
<i>Spencer</i>	Sim	Sim	Constante
<i>Morgenstern-Price</i>	Sim	Sim	Variável; função definida pelo usuário
<i>Corps of Engineers – 1</i>	Sim	Sim	Inclinação de linha da crista à base
<i>Corps of Engineers – 2</i>	Sim	Sim	Inclinação da superfície no topo da fatia
<i>Lowe-Karafiath</i>	Sim	Sim	Média entre superfície e base da fatia
<i>Janbu generalizado</i>	Sim	Sim	Diretriz de empuxo e momentos locais
<i>Sarma – fatias verticais</i>	Sim	Sim	$X = C + E \tan \varphi$

Fonte: Seequent, (2022).

No SLOPE/W, o método ordinário de Fellenius satisfaz apenas o equilíbrio de momento, resultando em fatores de segurança geralmente mais elevados do que aqueles obtidos por métodos que consideram forças entre fatias; por esse motivo, situa-se abaixo do rigor do método de Morgenstern-Price, que equilibra simultaneamente momento e força horizontal.

O método simplificado de Bishop incorpora o equilíbrio de momento e considera parcialmente a normal entre fatias, mas mantém $\lambda = 0$ para o cisalhamento, o que produz resultados ligeiramente conservadores em relação ao método padrão. Já o método simplificado de Janbu baseia-se exclusivamente no equilíbrio de forças horizontais, desconsiderando o equilíbrio de momentos, o que leva a fatores de segurança distintos que diferem do ponto de cruzamento de curvas de Morgenstern-Price.

O método de Spencer satisfaz ambas as equações por meio de função constante X/E , oferecendo maior rigor que Bishop e Janbu, mas apresenta menor

flexibilidade que Morgenstern-Price, que pode utilizar funções arbitrárias de relação entre fatias.

Os métodos Corps of Engineers (1 e 2) adotam diferentes inclinações para a resultante entre fatias, um da linha da crista, outro da superfície no topo da fatia mantendo o equilíbrio duplo, mas com efeitos distintos sobre o fator de segurança. O método Lowe-Karafiath combina a inclinação da superfície de terreno com a da base da fatia, equilibrando forças de forma semelhante aos métodos rigorosos; o Janbu generalizado amplia o Janbu simplificado ao incluir mobilização entre fatias de forças normais e cortantes locais; por fim, o método de Sarma para fatias verticais cumpre ambas as equações em geometria distinta, definindo fatias verticais.

Em virtude de sua capacidade de admitir funções variáveis de relação entre fatias e satisfazer integralmente as equações de equilíbrio, o método de Morgenstern-Price permanece como pré-seleção padrão no SLOPE/W, oferecendo o melhor compromisso entre precisão e flexibilidade computacional (Seequent, 2022).

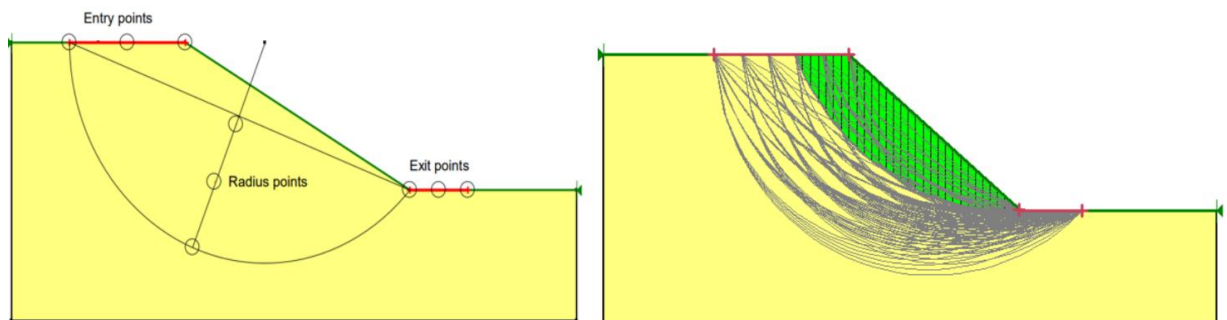
2.4.4.1 Métodos de pesquisa de superfície

Os métodos de pesquisa de superfície no SLOPE/W definem como o software gera automaticamente uma série de geometrias de tentativa de ruptura ao longo do talude, permitindo ao usuário explorar diferentes disposições de superfícies de deslizamento antes de selecionar a crítica (Seequent, 2022).

2.4.5 Método de Entrada e Saída

O método de Entrada e Saída especifica diretamente as regiões do terreno onde as superfícies de deslizamento devem “entrar” e “sair”. O usuário define dois segmentos no perfil do maciço, um de entrada e outro de saída, e indica o número de pontos a serem discretizados em cada segmento. O SLOPE/W então conecta cada ponto de entrada a cada ponto de saída, traça ao longo do trecho intermediário uma linha perpendicular em seu ponto médio e posiciona sobre ela os pontos de raio que completarão a circunferência de cada tentativa de superfície circular. Dessa forma, obtêm-se centenas de superfícies de ruptura controladas pelas zonas de entrada e saída, garantindo que todas entrem e saiam dentro dos limites do perfil conforme mostrado na figura 15.

Figura 15: Esquema do Método de Entrada e Saída

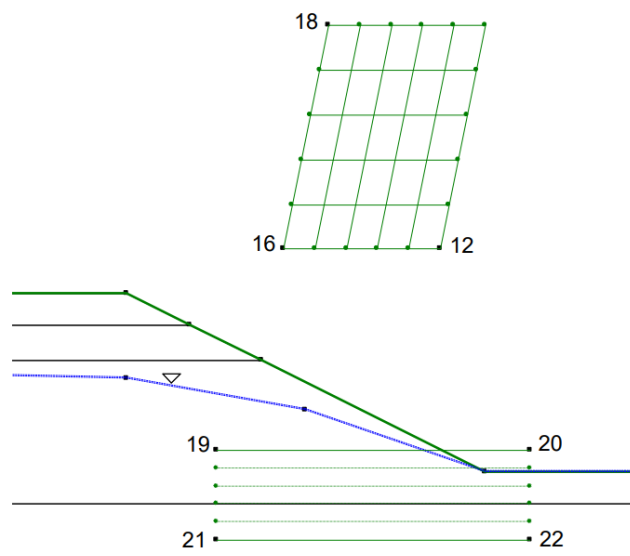


Fonte: Seequent, (2022).

2.4.6 Método de Grade

No método de Grade, define-se uma malha retangular de centros de rotação acima do talude como mostra a Figura 16, especificada por três pontos que delimitam o canto superior esquerdo, o canto inferior esquerdo e o canto inferior direito da grade. Cada ponto da malha atua como centro de uma circunferência de tentativa de superfície de deslizamento, cuja variação de raio será definida pelo método de Raio (Figura 17). Essa abordagem garante cobertura uniforme de toda a área de investigação, sendo especialmente útil para identificar regiões críticas sem impor restrições geométricas prévias.

Figura 16: Esquema do Método de Grade

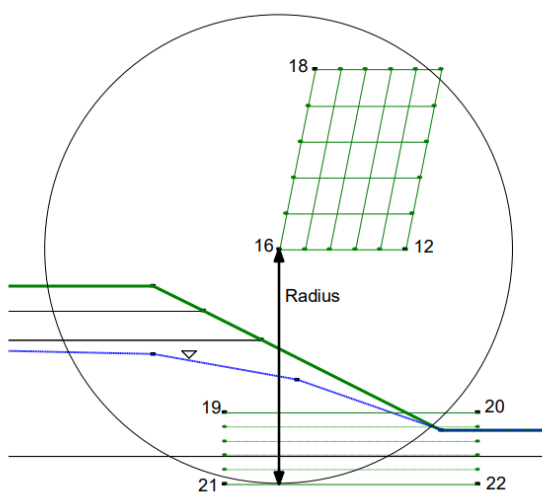


Fonte: Seequent, (2022).

2.4.7 Método de Raio

O método de Raio complementa o de Grade ao definir as linhas tangentes que determinam o raio de cada circunferência de tentativa. O usuário especifica um “box” de quatro vértices (que pode colapsar a um ponto ou a uma linha), sobre o qual são distribuídos incrementos de raio. Para cada linha tangente, o SLOPE/W calcula a distância perpendicular de cada centro da grade até essa linha, atribuindo-a como raio da circunferência de ruptura. Essa técnica possibilita controlar o alcance das superfícies circulares, focando em modos específicos de ruptura definidos por pontos ou faixas de raio.

Figura 17: Esquema do Método de Raio



Fonte: Seequent, (2022).

2.4.8 Resistência do Maciço

O modelo utilizado para determinar a resistência ao cisalhamento do material no SLOPE/W é o modelo de Mohr-Coulomb, no qual a resistência é calculada automaticamente a partir da expressão.

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (14)$$

O “c” é a coesão e “φ” o ângulo de atrito interno do solo, sem necessidade de manipulação manual das equações (Seequent, 2022). O software gera a envoltória de falha (Mohr-Coulomb failure envelope) e aplica esse critério em cada fatia do talude para avaliar a mobilização da resistência ao cisalhamento.

Para análises não drenadas, como em dosagens rápidas de nível d’água ou estudos pseudoestáticos, adota-se a “envoltória R”, em que $\varphi=0$ e o parâmetro de

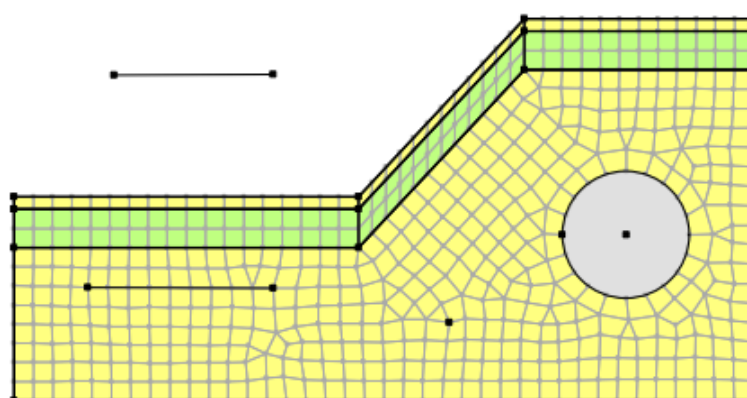
resistência não drenada C_R é especificado, permitindo a representação adequada nessas condições especiais (Seequent, 2022).

2.4.9 Análise de Fluxo

A análise de fluxo em barragens de terra é uma etapa fundamental para a compreensão dos comportamentos hidráulicos associados à percolação da água através do maciço. Nesse contexto, o software SEEP/W tem se consolidado como uma ferramenta robusta, capaz de simular com precisão os processos de fluxo em meios porosos, tanto saturados quanto não saturados, utilizando a técnica do método dos elementos finitos para resolver numericamente as equações diferenciais governantes.

O primeiro passo na simulação com SEEP/W consiste na definição da geometria do modelo, seguida pela geração da malha de elementos finitos. A malha é composta por elementos triangulares ou quadrangulares, cuja densidade pode ser ajustada conforme a necessidade de refinamento da análise em áreas críticas, como a proximidade de núcleos impermeáveis ou zonas de contato entre materiais heterogêneos. A distribuição dos nós e elementos na malha influencia diretamente a resolução espacial do fluxo, sendo essencial para garantir a acurácia dos resultados. A Figura 18 ilustra um exemplo de malha utilizada em análise de fluxo.

Figura 18: Malha de elementos finitos para análise de fluxo



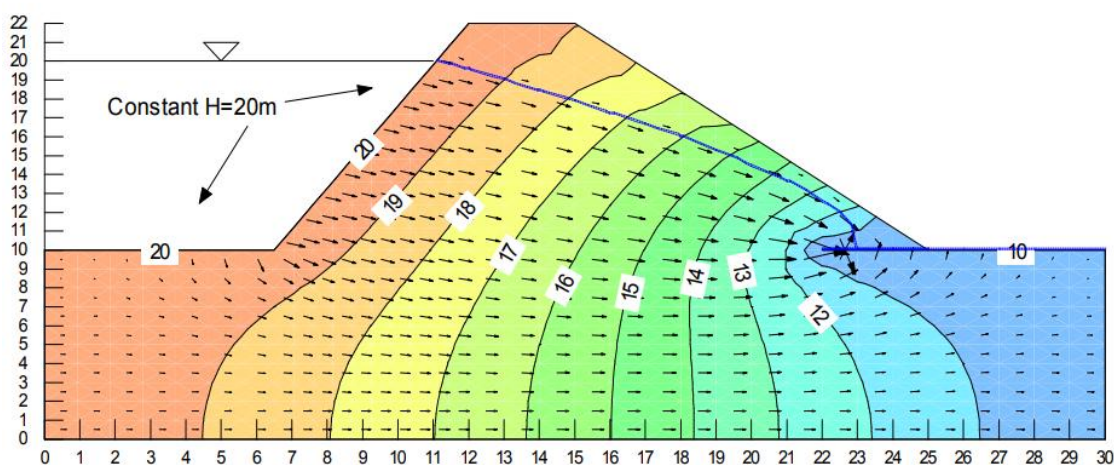
Fonte: GEO-SLOPE (2015)

Dentro desse sistema discretizado, o SEEP/W calcula o potencial hidráulico total em cada nó, a partir do qual são determinadas as linhas de fluxo e as equipotenciais. As linhas de fluxo são representações gráficas do caminho seguido pela água dentro do solo, movendo-se do montante para a jusante conforme os

gradientes de energia. Essas linhas não são inseridas manualmente, mas são resultado da interpolação dos vetores de velocidade obtidos nos elementos da malha, considerando o gradiente hidráulico local e a condutividade hidráulica do solo. A malha, portanto, não apenas organiza o domínio de cálculo, mas também direciona a precisão com que essas trajetórias são determinadas.

A linha piezométrica, por sua vez, é uma das saídas mais relevantes em modelos de fluxo. No SEEP/W, ela é construída automaticamente com base no ponto em que a pressão neutra é igual a zero, ou seja, onde o total head (carga hidráulica total) é igual à elevação. A correta definição da linha piezométrica permite identificar o nível freático e, conseqüentemente, avaliar os riscos de instabilidade relacionados à pressão intersticial ao longo do talude. A Figura 19 mostra uma representação típica da linha de fluxo e linha piezométrica resultantes de um modelo numérico.

Figura 19: Representação das linhas de fluxo e linha piezométrica



Fonte: GEO-SLOPE (2015)

É importante destacar que a análise de fluxo realizada por meio do SEEP/W contempla tanto condições de fluxo em regime permanente quanto em regime transiente. Essa distinção será aprofundada nos subtópicos seguintes, onde serão analisadas as implicações da variação temporal no comportamento hidráulico dos materiais e como o software incorpora essa variação em suas simulações, principalmente nos casos em que há mudanças sazonais no nível do reservatório ou alterações na recarga do solo.

Dessa forma, a malha, as linhas de fluxo e a linha piezométrica são elementos integrados e fundamentais na construção e interpretação do modelo numérico de

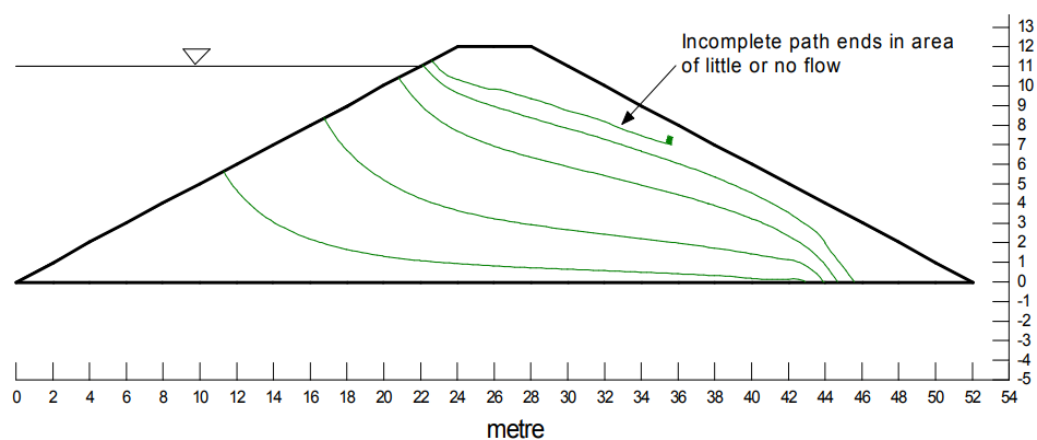
fluxo, servindo como base conceitual e estrutural para as análises específicas de regime permanente e transitório que serão apresentadas a seguir.

2.4.10 Análise de fluxo permanente e transiente

A simulação do fluxo de água em barragens de terra exige a consideração das diferentes condições a que o maciço pode ser submetido ao longo do tempo. No SEEP/W, essa análise é estruturada a partir da distinção entre regimes de fluxo permanente (steady-state) e fluxo transiente (transient), ambos baseados nas mesmas equações diferenciais de fluxo, porém com diferentes condições de contorno e temporalidade na solução.

O regime permanente representa uma condição na qual as cargas hidráulicas e os limites do sistema permanecem constantes ao longo do tempo. Nesse cenário, a distribuição de pressão intersticial e as linhas de fluxo atingem um estado de equilíbrio, que não se altera com o passar dos dias. Esse tipo de análise é comumente aplicado em situações em que o nível do reservatório se mantém estável, como em períodos sem variações sazonais significativas ou em sistemas operacionais com controle rígido do nível d'água. O SEEP/W resolve essa condição por meio da aplicação de cargas hidráulicas fixas e sem necessidade de integração temporal. A Figura 20 ilustra um modelo numérico em regime permanente, evidenciando a distribuição estabilizada das linhas de fluxo.

Figura 20: Linhas de Fluxo em uma Análise de Estado Estacionário Antes da Drenagem do Reservatório



Fonte: GEO-SLOPE (2015).

Por outro lado, o regime transiente considera as variações no tempo das condições hidráulicas, sendo particularmente importante em casos de enchimento rápido do reservatório, esvaziamentos programados, eventos de recarga por chuvas intensas ou alterações sazonais no lençol freático. Esse tipo de análise envolve a definição de condições iniciais, como a linha piezométrica antes de um evento, e a aplicação de funções dependentes do tempo nas fronteiras do modelo. A simulação é então processada em etapas temporais, com o SEEP/W utilizando técnicas de integração numérica para atualizar o estado do sistema em cada intervalo de tempo.

A modelagem transiente requer atenção especial à definição da malha, uma vez que a resolução espacial deve ser compatível com a resolução temporal adotada. Além disso, o tempo de análise deve ser suficiente para que o sistema atinja novamente uma condição de equilíbrio ou revele o comportamento crítico esperado.

Tanto na condição permanente quanto na transiente, a evolução da linha piezométrica e a distribuição de pressões neutras têm papel central na avaliação da segurança de barragens. Em fluxos permanentes, o comportamento hidráulico está associado à manutenção contínua de pressões ao longo do tempo. Já em fluxos transientes, os picos de pressão podem surgir de forma abrupta, comprometendo a estabilidade momentânea dos taludes, exigindo, portanto, uma análise mais detalhada e criteriosa.

A escolha entre modelagem permanente e transiente está diretamente relacionada ao objetivo do estudo. Em avaliações iniciais ou simplificadas, o regime permanente pode ser suficiente. Já para estudos que visam representar fielmente a realidade operacional e climática da estrutura, a abordagem transiente oferece resultados mais robustos e próximos do comportamento real.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, descreve-se o planejamento do estudo em três etapas: definição dos objetivos de pesquisa, levantamento bibliográfico e caracterização da área de estudo na região de Alívio (Sousa, 2025). Em seguida, apresentam-se os procedimentos adotados para a modelagem geométrica da barragem no Revit, a extração de curvas de nível e delimitação da bacia hidrográfica no Global Mapper e as simulações numéricas de fluxo e estabilidade no GeoStudio (SEEP/W e SLOPE/W). Detalham-se ainda as propriedades geotécnicas das amostras de solo

utilizadas: areia SW (PEROBA, 2023) e as argilas CL 19 e CL 21 (CAMPOS, 2024), bem como os parâmetros de entrada empregados nas análises (por exemplo, método de Morgenstern-Price, condições de contorno e malha de elementos finitos).

3.1 PLANEJAMENTO DO ESTUDO

O planejamento deste trabalho foi estruturado em três etapas principais: definição da demanda e dos objetivos da pesquisa, levantamento bibliográfico e delimitação do escopo metodológico, e caracterização da área de estudo. Cada etapa baseou-se nos fundamentos conceituais apresentados nos capítulos de Introdução e Revisão Literária, de modo a garantir coerência entre as necessidades identificadas e os procedimentos adotados.

3.2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E DELIMITAÇÃO DO ESCOPO METODOLÓGICO

Procedeu-se ao levantamento sistemático da literatura sobre tipologias de barragens, classificações, métodos de estabilidade de taludes e técnicas de análise de fluxo em meios porosos, conforme detalhado no capítulo de Referência Literária. Dentre as fontes consultadas, destacam-se Eletrobrás (2000) e Lança (1997) para tipologia de barragens, Seequent (2022) para métodos de limite de equilíbrio e Geo-Slope (2015) para modelagem de escoamento. Com base nessa revisão, definiu-se o uso dos seguintes softwares e etapas metodológicas:

O processamento topográfico foi realizado no software Global Mapper, responsável pela extração das curvas de nível e delimitação da bacia. Na modelagem geométrica, recorreu-se ao Revit para a construção do modelo tridimensional da barragem. A análise de fluxo foi conduzida no SEEP/W, contemplando simulações em regime permanente e transiente. Já a avaliação da estabilidade dos taludes foi feita com o SLOPE/W, empregando o método de Morgenstern-Price, escolhido por satisfazer simultaneamente as condições de equilíbrio de forças e momentos, permitindo modelar interações entre fatias com funções flexíveis e maior realismo. Essa capacidade o torna especialmente adequado para o estudo de taludes de barragens de terra sob condições de fluxo permanente e transiente, nas quais há variação significativa das pressões neutras e distribuição não uniforme das forças, garantindo maior confiabilidade no fator de segurança calculado.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O local de estudo está situado na região do Alívio, no município de Lajes, no estado do Rio Grande do Norte, conforme ilustrado na Figura 21, foi delimitado inicialmente uma circunferência mais ampla, com área de 1277.6 km². Esta área está localizada entre as cidades de Lajes e Jardim de Angicos, e foi definida para um estudo mais abrangente da região do Alívio, local esse determinado para a construção da barragem, conforme anunciado pela Secretaria da Agricultura, Pecuária e Pesca do Estado do Rio Grande do Norte (2021). A escolha do local foi fundamentada pela análise de diversos fatores, incluindo a disponibilidade hídrica e as condições geológicas favoráveis para a construção da barragem (EMPARN, 2024).

Figura 21: Mapa de Região dos Estudos

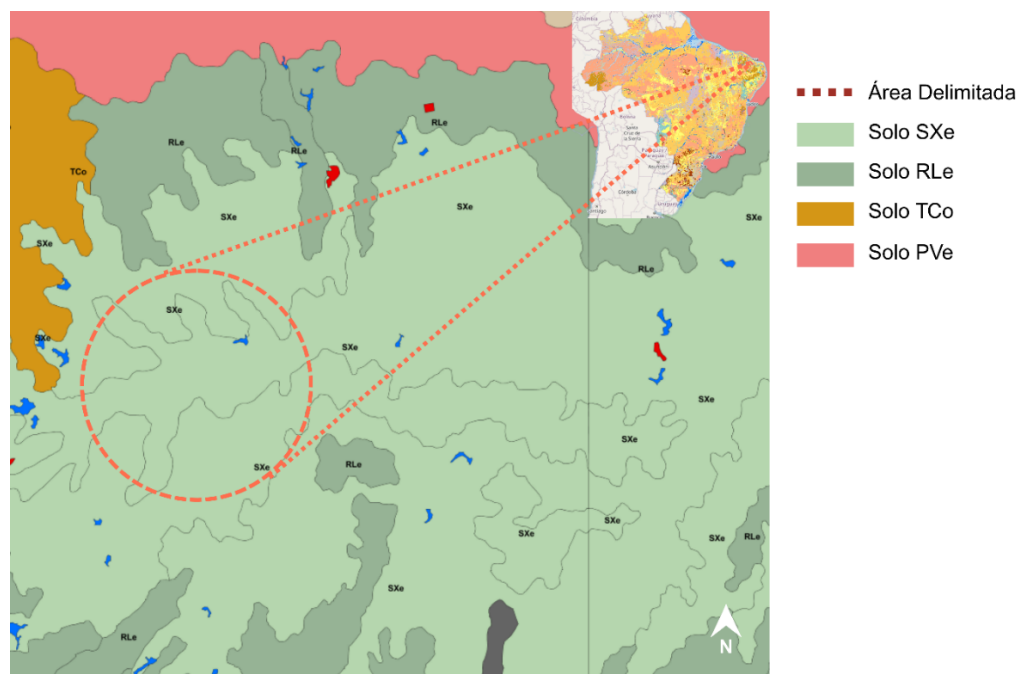


Fonte: Autoria própria, através do banco de dados de imagem de satélite online do Global Mapper, 2025.

As informações climatológicas da região segundo o estudo de Comportamento Hidroclimatológico do Estado do Rio Grande do Norte e do Município de Caicó (Lucena et al., 2017) e do Relatório de Precipitação Anual por Estação de Coleta (EMPARN, 2024), fornecem dados pluviométricos cruciais para a avaliação da viabilidade do projeto. Segundo Lucena et al. (2017), a região de Alívio apresenta um padrão de precipitação com altas taxas de evaporação, o que caracteriza o clima semiárido predominante, com escassez de chuvas durante boa parte do ano.

Segundo o Banco de Dados e Informações Ambientais (BDiA, 2025), geologicamente, o solo predominante na área de estudo é classificado como SXe, conforme mapeamento geológico realizado na Figura 22. O solo SXe se trata de um Planossolos Háplicos. Em 2013, foi realizado estudos de caracterização do solo Planossolos Háplicos por Antonio Raimundo de Sousa no Agreste Pernambucano para o IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco), que classificou como um solo argilo-arenosa (Sousa, 2013). A predominância deste solo, combinada com os dados geológicos da região, garante que a área selecionada seja adequada para o projeto da barragem.

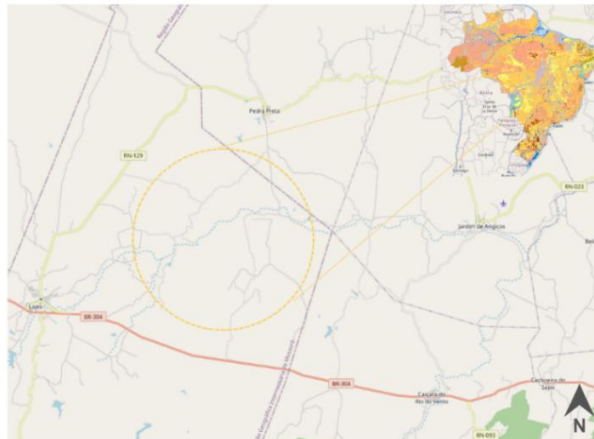
Figura 22: Mapa de Classificação do Solo da Região



Fonte: Autoria própria através do BDiA, 2025.

Em adição, a Figura 23 ilustra a localização exata do ponto de construção, destacando as principais vias de acesso que conectam as cidades de Lajes e Jardim de Angicos, facilitando a logística para a realização das obras e a futura manutenção da barragem.

Figura 23: Localização da Região de Estudo no Mapa Brasileiro



Fonte: Autoria própria através do BDIA, 2025.

3.4 FONTES DE SOLO PARA COMPOSIÇÃO DO MACIÇO

As fontes de solo selecionadas para compor o maciço da barragem foram definidas com base em estudos anteriores conduzidos na região. Em 2023, Paula Peroba realizou um estudo sobre o comportamento mecânico do solo residual local, obtendo sua caracterização geotécnica, curva de compactação e coeficiente de permeabilidade. A amostra analisada apresentou classificação SW-SM pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), correspondendo a uma areia siltosa bem graduada. A localização exata da retirada da amostra está ilustrada na Figura 24.

Figura 24: Mapa geológico do local de coleta de amostra SW



Fonte: Autoria própria a partir de mapa geológico de Peroba (2023)

Posteriormente, em 2024, Pedro Campos realizou outro estudo na região de Jardim de Angicos, no Nordeste Brasileiro, com o objetivo de realizar a caracterização geomecânica de solos residuais compactados provenientes de gabro. Nesse estudo, foram coletadas 21 amostras, dentre as quais destacaram-se três, descritas a seguir de acordo com a classificação SUCS:

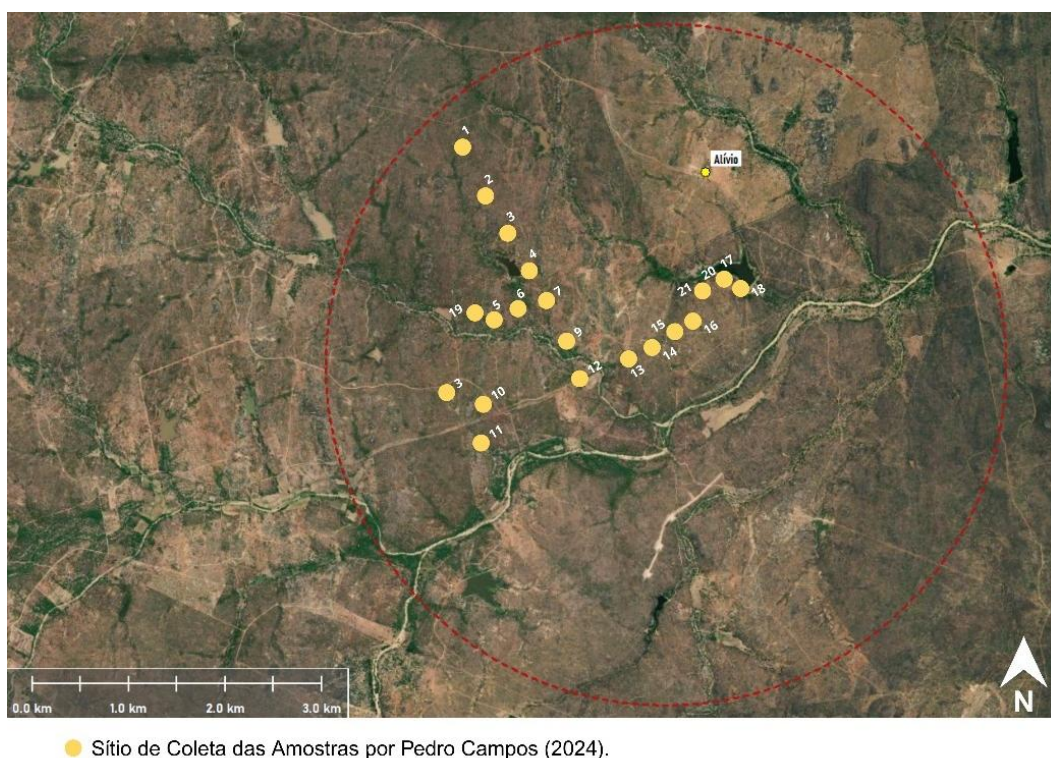
Amostra 19: CL – Argila inorgânica de baixa a média plasticidade;

Amostra 20: SP – Areia mal graduada;

Amostra 21: CL – Argila inorgânica de baixa a média plasticidade.

A localização das amostras coletadas por Campos (2024) está apresentada na Figura 25.

Figura 25: Mapa de Localização das coletas feitas por Campos (2024)



Fonte: Autoria própria a partir de mapa geológico de Campos (2024)

Dessa forma, a composição do maciço da barragem será definida com base nas características geotécnicas obtidas por Peroba (2023) e Campos (2024). A Tabela 11 apresenta de maneira resumida os principais parâmetros relacionados ao fluxo e à estabilidade das amostras selecionadas, que servirão como referência para a execução das análises subsequentes.

Tabela 11: Propriedades das amostras analisadas para o maciço da barragem

<i>Propriedade</i>	<i>Amostra Areia SW (PEROBA)</i>	<i>Amostra 19 Argila Flexível CL (CAMPOS)</i>	<i>Amostra 20 Areia SP (CAMPOS)</i>	<i>Amostra 21 Argila Rígida CL (CAMPOS)</i>
<i>Teor de Umid. Vol. Saturada (%)</i>	29,6	39,4	42,5	40,45
<i>Diâmetro D10 (mm)</i>	0,15	0,03	0,12	0,04
<i>Diâmetro D60 (mm)</i>	1,8	1,1	2,3	1,15
<i>Limite de Liquidez LL (%)</i>	0	39	0	39
<i>Compressibilidade (índice Cc)</i>	0,1	0,28	0,26	0,31
<i>Condutividade hidr. sat. Kx (m/s)</i>	4,4e-07	2,08e-09	1e-09	2,35e-09
<i>Anisotropia Ky/Kx</i>	1	1	1	1
<i>Peso Específico (γ, kN/m³)</i>	21,80	20,9	21,4	21,4
<i>Coesão Efetiva c'(kPa)</i>	29,76	57,6	57,8	57,6
<i>Ângulo de Atrito Efetivo</i>	35,6	0,5	0,5	0,6

Fonte: Autoria própria, com base nos estudos de PEROBA (2023) e CAMPOS (2024).

As amostras coletadas de PEROBA (2023) e CAMPOS (2024) serão utilizadas para realizar as simulações numéricas de estabilidade e fluxo dentro do software GeoStudio, mais especificamente nas ferramentas SEEP/W e SLOPE/W. A amostra de Areia bem graduada SW (PEROBA, 2023) e Areia mal graduada SP (CAMPOS, 2024), serão utilizadas para compor os taludes da barragem durante as análises de estabilidade e comportamento de escoamento superficial. A amostra 19 de argila flexível CL e 21 Argila Rígida CL (CAMPOS, 2024), serão empregadas no núcleo da barragem, devido à sua capacidade de vedação, e será analisada quanto ao comportamento de permeabilidade e resistência ao cisalhamento.

Para as demais regiões da barragem, utilizaram-se parâmetros geotécnicos gerais dos solos, obtidos a partir dos estudos realizados por Domenico (1990) e Holtz (2011). Esses parâmetros estão resumidos na Tabela 12, e serviram como referência para as análises técnicas subsequentes.

Tabela 12: Parâmetros geotécnicos dos demais solos utilizados

<i>Material</i>	<i>Aplicação</i>	<i>Peso Específico (kN/m³)</i>	<i>Coesão Efetiva (kPa)</i>	<i>Ângulo de Atrito Efetivo (°)</i>
<i>Areia</i>	Filtro vertical, horizontal e camada Riprap	17	0	35

<i>Brita 1</i>	Camada de transição e dreno de pé	20	0	38
<i>Brita 3</i>	Riprap	20	0	38
<i>Pedregulho</i>	Dreno de pé e Riprap	19	0	40
<i>Solo SXe</i>	Silto arenoso (solo local)	16	12	25

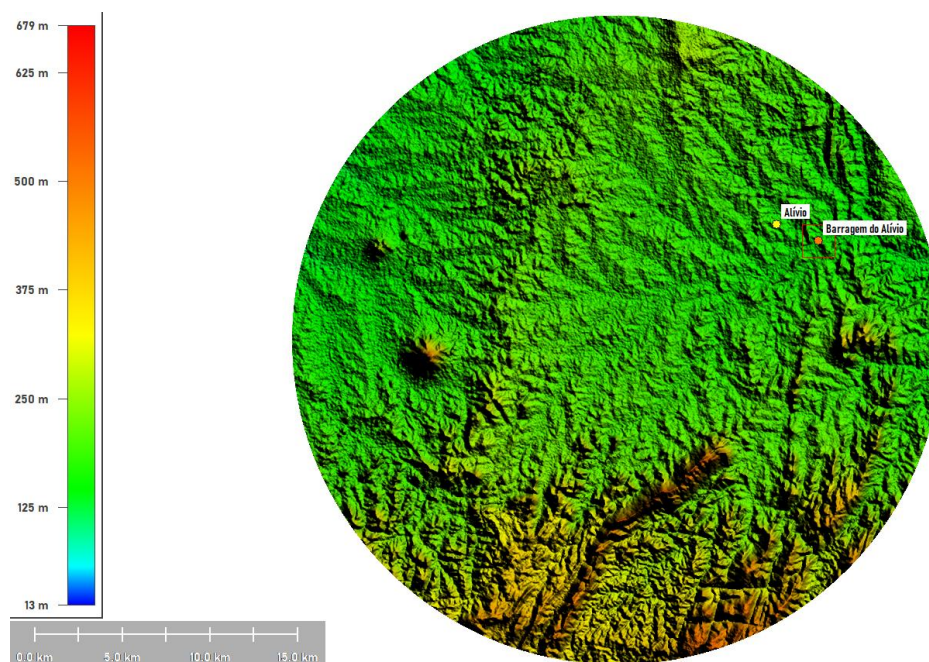
Fonte: Adaptado de Domenico (1990); Holtz (2011).

Essas amostras irão possibilitar a modelagem do comportamento do maciço da barragem em condições reais de campo, fornecendo parâmetros essenciais para a análise de segurança e desempenho da estrutura.

3.5 ESTUDO DE ELEVAÇÃO, ESCOAMENTO E CURVAS DE NÍVEL

Para realizar o estudo altimétrico da região selecionada, utilizou-se o software Global Mapper, acessando o banco de dados online *SRTM Worldwide Elevation Data (1-arc-second Resolution, SRTM Plus V3)*, que permitiu obter informações detalhadas da topografia local. O mapa de elevação gerado, ilustrado na Figura 26, evidencia as variações altimétricas da área estudada.

Figura 26: Mapa de elevação da região com dados do Global Mapper

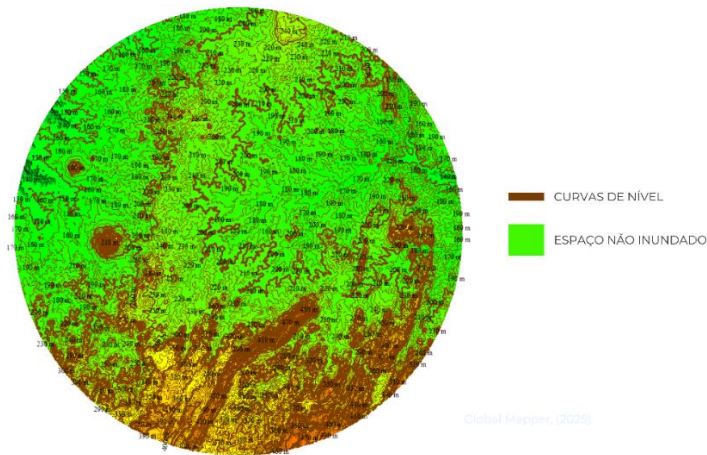


Fonte: Autoria própria, 2025.

A partir deste mapa altimétrico, foram extraídas as curvas de nível, inicialmente considerando uma altura mínima de 150 m, com o objetivo de realizar um estudo

preliminar de inundação bidimensional (2D). Neste cenário inicial, não foi constatada qualquer inundação, conforme demonstrado na Figura 27.

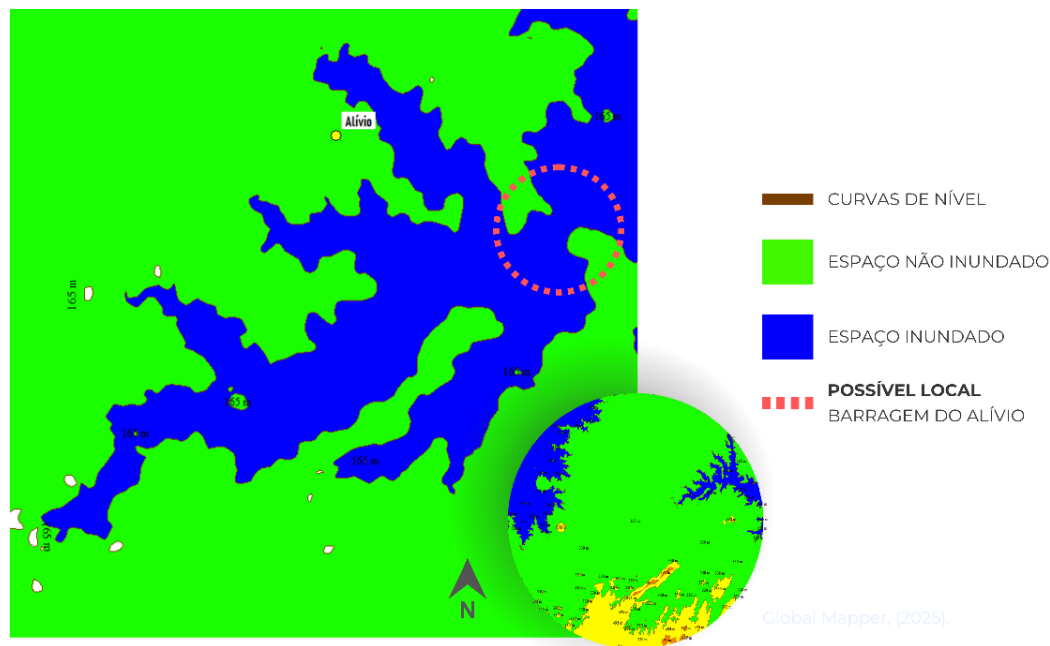
Figura 27: Estudo de Inundação 2D, Curvas de Nível A Partir de 150m



Fonte: Autoria própria 2025.

Posteriormente, foi adotada uma altura mínima de 165 m para a geração das curvas de nível. Nesse novo cenário, observou-se a formação de um reservatório natural e identificou-se um local promissor para a implantação da barragem, conforme evidenciado na Figura 28.

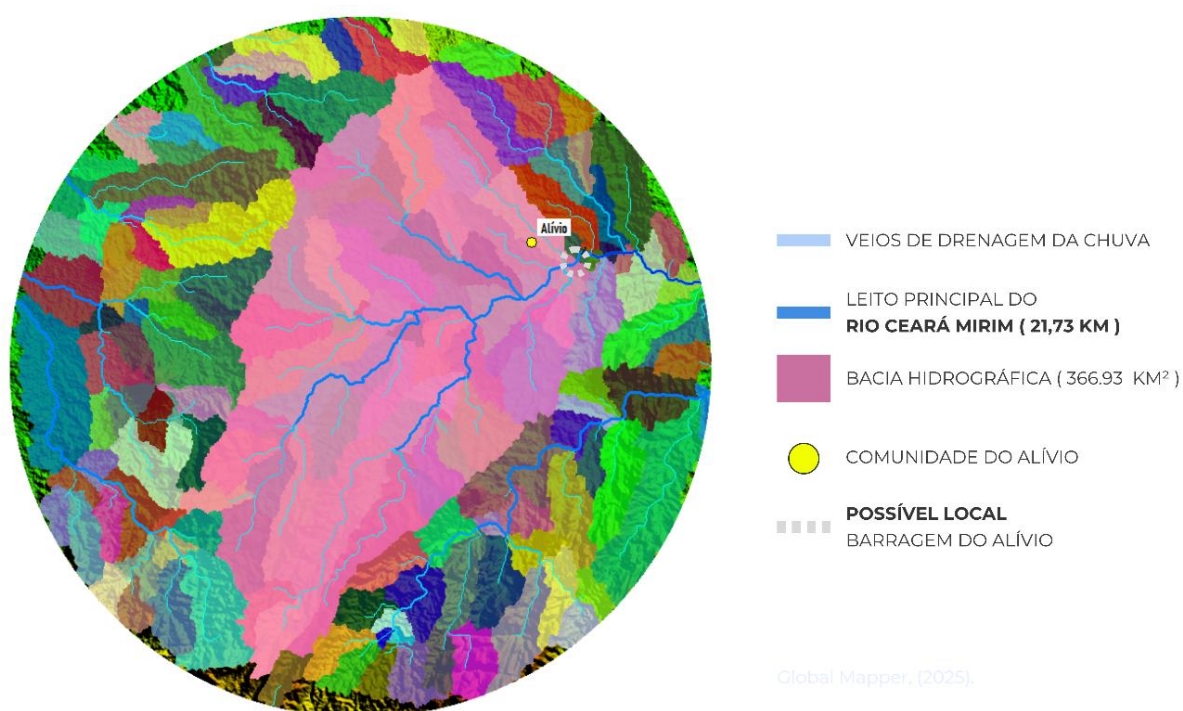
Figura 28: Estudo de Inundação 2D, Curvas de Nível A Partir de 165m



Fonte: Autoria própria, 2025.

Definido o local mais adequado para a construção da estrutura, procedeu-se à análise das vias de drenagem existentes na região selecionada. Como pode ser observado na Figura 29, através do estudo de escoamento verificou-se que as principais vias de drenagem confluem para um ponto à frente do Rio Ceará-Mirim, localizado na coordenada UTM 818950.995, 9375229.000 (Latitude 5° 38' 42.6480" S, Longitude 36° 07' 15.5604" W). A partir desta constatação, foi possível delimitar a área total da bacia hidrográfica, que abrange aproximadamente 366,93 km².

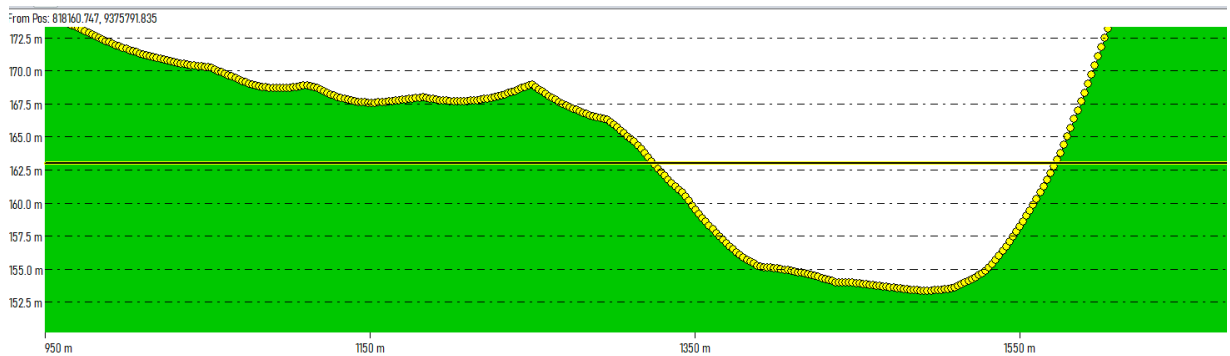
Figura 29: Estudo de escoamento da bacia hidrográfica.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Com a área da bacia hidrográfica estabelecida, realizou-se, em seguida, um corte do perfil topográfico na região escolhida para a construção da barragem, conforme apresentado na Figura 30. Esse perfil permitiu determinar o nível da base do corte altimétrico em 153 m, além de possibilitar uma análise detalhada da variação do relevo ao longo da área estudada, essencial para o planejamento técnico da barragem.

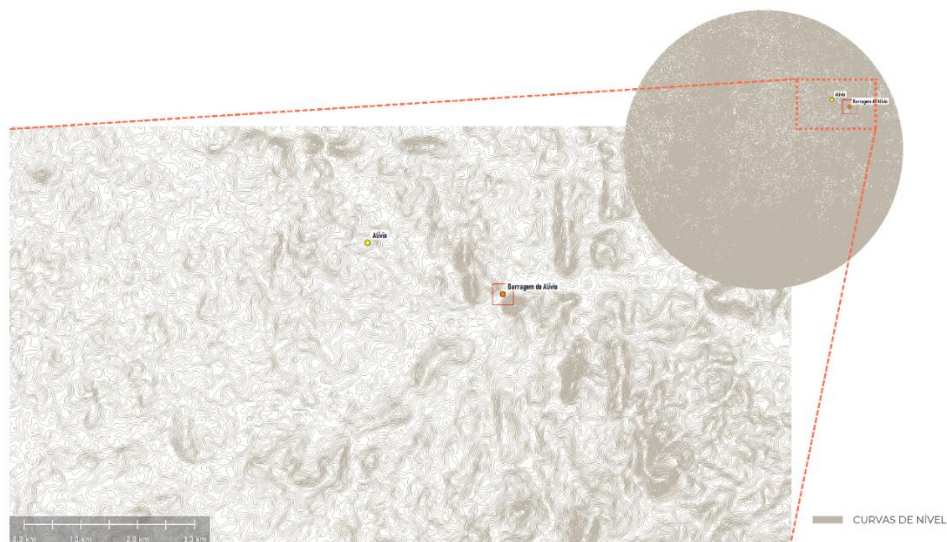
Figura 30: Perfil topográfico da região do corte de elevação



Fonte: Autoria própria, 2025

Utilizando as informações das curvas de nível do mapa de elevação, foi possível gerar as curvas de nível da região, conforme exibido na Figura 31. Essas curvas foram ajustadas para um intervalo de 1 metro, o que garante um nível de detalhe preciso para o desenvolvimento da modelagem. O conjunto dessas curvas de nível foi exportado em formato DWG e vinculado no Revit para criar a modelagem 3D da área.

Figura 31: Curvas de nível geradas para a região de estudo.

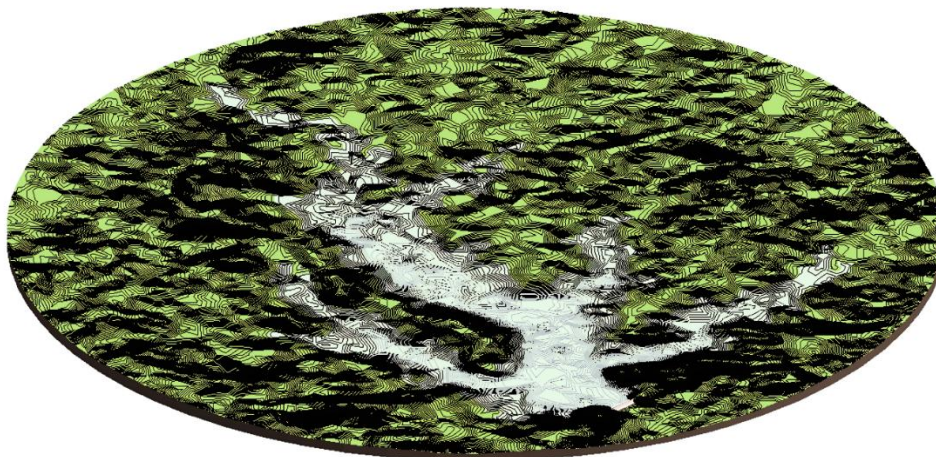


Fonte: Autoria própria, 2025

A modelagem 3D foi então criada utilizando o Revit, com a ferramenta de massa e terreno. Um cilindro 3D foi modelado na categoria de parede, com as seguintes dimensões: a base superior do cilindro foi definida a 163 m, 10 metros acima do nível da base do corte de perfil, e a base inferior foi definida a 153 m. A modelagem foi

cortada pelo sólido topográfico gerado pelas curvas de nível, resultando no modelo 3D mostrado na Figura 32. O volume total do reservatório gerado foi de 29.716.024,67 m³, com uma área de 7,31 km².

Figura 32: Modelagem 3D do reservatório



Fonte: Autoria própria, 2025

Os resultados obtidos a partir do dimensionamento da barragem, assim como as análises realizadas sobre o comportamento geotécnico e hidráulico da região, serão detalhadamente apresentados na seção de Resultados. Nessa etapa, serão discutidos os dados obtidos com a modelagem 3D, as simulações de escoamento e as análises de estabilidade, que permitirão avaliar a viabilidade da construção da Barragem do Alívio, assegurando a segurança e a eficiência do projeto.

4 RESULTADOS:

Nesta seção, expõem-se os principais achados obtidos a partir das simulações e dos cálculos desenvolvidos. Inicia-se pelo dimensionamento do vertedouro e dos taludes, cujos valores são resumidos na Tabela 13, 14, 15 e 16, seguido pela modelagem tridimensional da barragem e pelo cálculo dos volumes de cada componente. Em sequência, apresentam-se as análises de fluxo permanente e transiente e os fatores de segurança resultantes das investigações de estabilidade de taludes, evidenciando o desempenho dos diferentes arranjos de solo para o corpo e o núcleo da barragem. Esses resultados fundamentam a avaliação da viabilidade geotécnica da Barragem do Alívio.

4.1 DIMENSIONAMENTO DA BARRAGEM E VERTEDOIRO

No dimensionamento da Barragem do Alívio, foram realizados cálculos baseados nas diretrizes discutidas na seção de Referência Literária sobre barragens e vertedouros. As tabelas a seguir resume os principais resultados obtidos a partir dos cálculos realizados, aplicando-se as fórmulas, mencionadas nas tabelas, de dimensionamento de vertedouro, estabilidade de taludes e outros parâmetros essenciais para a definição da geometria da barragem e seus componentes.

As Tabelas 13, 14, 15 e 16 apresentam os resultados detalhados, incluindo o dimensionamento do vertedouro, taludes e características do núcleo, com os cálculos e parâmetros necessários para garantir a segurança e o desempenho da estrutura projetada. Esses resultados são fundamentais para a análise do comportamento hidráulico e geotécnico da barragem e do vertedouro, determinando a eficiência da estrutura no controle de vazões e na estabilidade da obra.

Tabela 13: Resultados de Dimensionamento Vertedouro

VERTEDOIRO		
Parâmetro	Valor Obtido	Método de Cálculo
Área de contribuição (A)	5,98 km ²	Dado retirado do Revit
Coefficiente de escoamento (k)	0,25	Utiliza-se a tabela 2
coeficiente de concentração (C)	0,5	Utiliza-se a tabela 2
Vazão máxima (Qs)	21,95 m ³ /s	Utiliza-se a Equação (1)
Comprimento do vertedouro (L)	21,73 km	Utiliza-se a Equação (2)

Fonte: Autoria própria 2025.

Tabela 14: Resultados de Dimensionamento dos Taludes da Barragem

PRÉ-DIMENSIONAMENTO TALUDES DA BARRAGEM		
Parâmetro	Valor Obtido	Método de Cálculo
Montante 3H : 1V	43,1 m	Inclinação do talude de montante, tabela 3
Jusante 2H : 1V	28,7 m	Inclinação do talude de jusante, tabela 3
Total (L + i + B)	76,93 m	Dimensão horizontal total da barragem

Fonte: Autoria própria, 2025.

Tabela 15: Resultados de Dimensionamento dos Taludes do Núcleo

PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS TALUDES DO NÚCLEO		
Parâmetro	Valor Obtido	Método de Cálculo
Montante 2H : 1V	20,00 m	Inclinação do talude de montante do núcleo, tabela 4

Jusante 2H : 1V

20,00 m

Inclinação do talude de jusante do núcleo,
tabela 4

Fonte: Autoria própria, 2025.

Tabela 16: Demais Resultados Dimensionamento da Barragem

PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA BARRAGEM DE TERRA

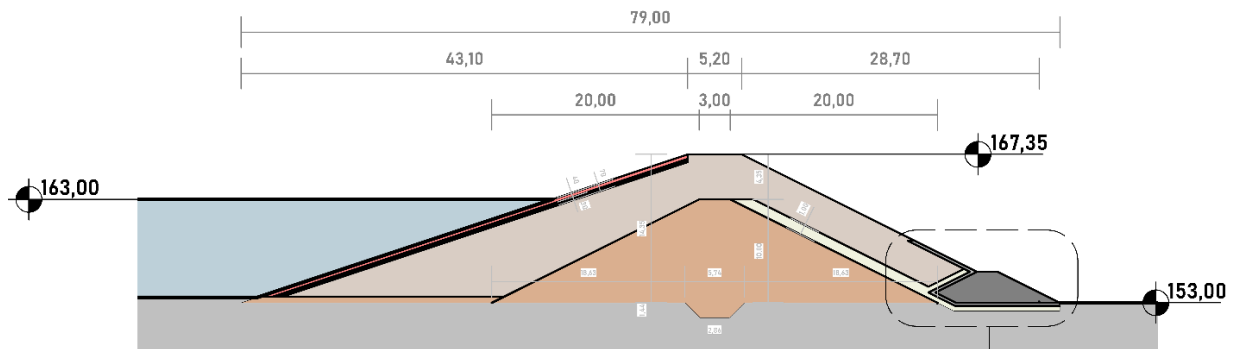
<i>Parâmetro</i>	<i>Valor Obtido</i>	<i>Método de Cálculo</i>
<i>Altura De Onda (H)</i>	6,9 km	Altura da onda formada no reservatório, Equação (3)
<i>Velocidade De Onda (V)</i>	4,125 m/s	Velocidade de propagação da onda, Equação (4)
<i>Folga (F)</i>	1,853 m	Distância de segurança do nível máximo, Equação (5)
<i>Cota De Terreno (Ct)</i>	153 m	Nível Base do local da Barragem
<i>Lâmina D'água (Cs)</i>	163 m	Altura da Lâmina D'água
<i>Cota de Sangria (Hs)</i>	2,50 m	Tabela 3
<i>Cota de Coroamento (Cc)</i>	167,35 m	Equação 6
<i>Nível de Água Máximo (NAmáx)</i>	11,85 m	Equação 12
<i>Nível de Água Mínimo (NAmin)</i>	7,11 m	Equação 13
<i>Altura Do Maciço (H)</i>	14,35 m	Altura do maciço da barragem, Equação 7
<i>Espessura Do Coroamento (B)</i>	5,9 m	Espessura do coroamento calculada por Bureau de Reclamation, Equação 8
	6,3 m	Espessura do coroamento calculada por Knappen, Equação 9
	5,2 m (Preece)	Espessura do coroamento calculada por Preece, Equação 10

Fonte: Autoria própria, 2025.

4.2 MODELAGEM 3D DA BARRAGEM

Com base nos resultados obtidos nos cálculos de dimensionamento e nas análises realizadas nas seções anteriores, foi gerado o modelo tridimensional da Barragem do Alívio. O modelo, conforme ilustrado na Figura 33, apresenta a estrutura da barragem, incluindo as dimensões do maciço, taludes e a crista. A modelagem foi realizada utilizando o software Revit, que permitiu uma representação precisa das características geométricas da barragem, levando em conta os parâmetros definidos para a altura, largura e inclinação dos taludes.

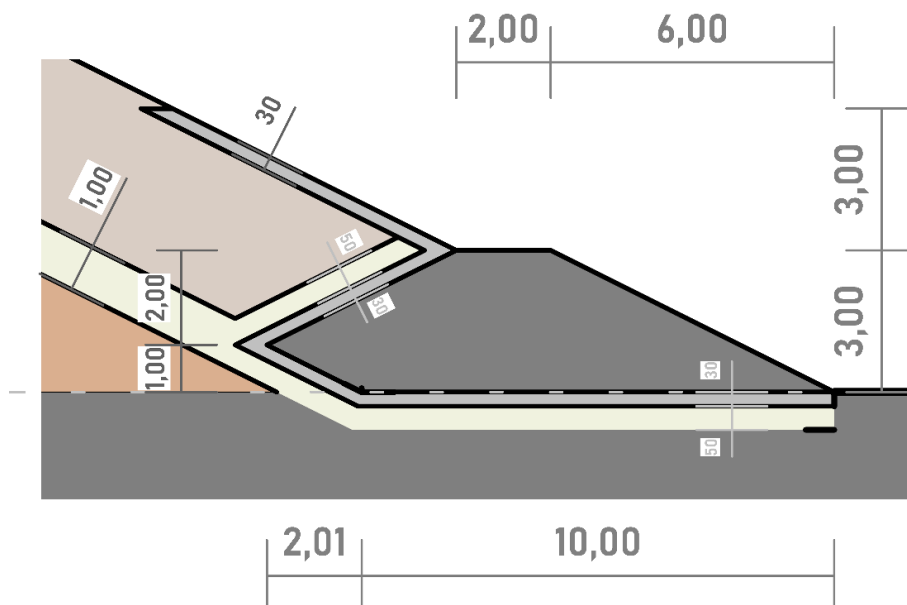
Figura 33: Seção de Corte Transversal do Modelo da Barragem do Alívio



Fonte: Autoria própria, com base nos dados de dimensionamento, 2025.

Além disso, foi realizado o detalhamento do sistema de drenagem, como ilustrado na Figura 34, que mostra o dreno de pé, um dos componentes essenciais para garantir a drenagem adequada da água infiltrada na barragem. O dreno foi modelado em conformidade com as especificações de segurança hidráulica, buscando minimizar a pressão interna e evitar falhas no maciço devido à percolação.

Figura 34: Detalhamento do Dreno de Pé na Barragem

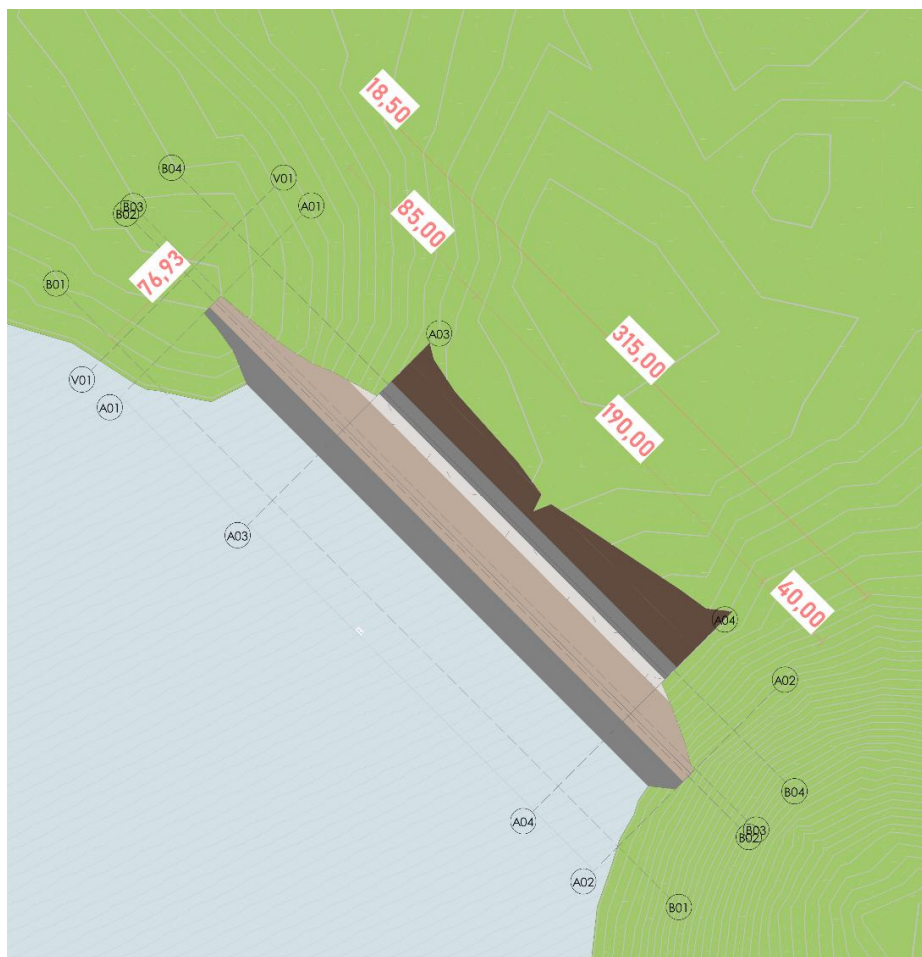


Fonte: Autoria própria, com base no projeto da barragem, 2025.

O modelo do maciço foi inserido no local proposto para a barragem, conforme descrito na seção de Materiais e Metodologia. As Figura 35 e 36 ilustram a vista do 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

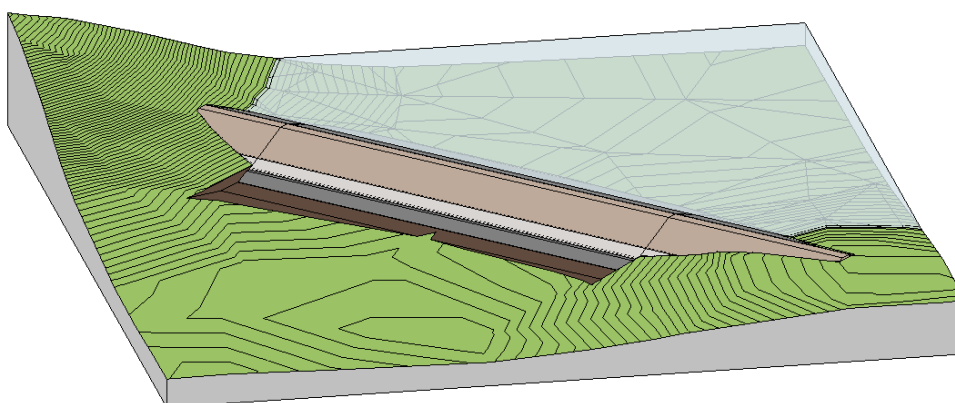
topográficos obtidos, garantindo a integração do projeto ao contexto geográfico e geológico da área.

Figura 35: Vista do topo da barragem no local proposto.



Fonte: Autoria própria, com base nos dados topográficos e de modelagem, 2025.

Figura 36: Vista em Perspectiva Superior da Barragem



Fonte: Autoria própria, com base no projeto da barragem, 2025.

A Tabela 17 a seguir, apresenta os volumes estimados para os principais componentes da Barragem do Alívio, considerando os materiais utilizados em sua construção, como o dreno de pé, o núcleo de argila, o Riprap, entre outros. Esses volumes foram obtidos a partir da modelagem tridimensional da barragem e são essenciais para a quantificação dos materiais necessários para a execução da obra. Os dados fornecem uma visão detalhada da distribuição volumétrica dos materiais, permitindo uma gestão eficiente dos recursos e do processo de construção.

Tabela 17: Volumes dos Componentes da Barragem

<i>Componente</i>	<i>Volume (m³)</i>
<i>Dreno de Pé - Pedregulhos</i>	4182,11 m ³
<i>Dreno de Pé Brita - Camada Filtro</i>	1356,51 m ³
<i>Filtro Vertical e Horizontal</i>	5871,17 m ³
<i>Núcleo Argila</i>	49542,97 m ³
<i>Riprap Areia</i>	1458,48 m ³
<i>Riprap Brita</i>	1499,25 m ³
<i>Riprap Pedras</i>	4074,44 m ³
<i>Solo Taludes</i>	61770,24 m ³
<i>TOTAL</i>	129761,10 m ³

Fonte: Autoria própria, 2025.

Esses modelos tridimensionais, juntamente com as informações de volume apresentadas na tabela, fornecerão uma base sólida para a avaliação e o monitoramento da estabilidade geotécnica da barragem. Além disso, eles são fundamentais para a análise do comportamento do fluxo de água, permitindo prever cenários operacionais e otimizar o gerenciamento do reservatório. Com essas informações, será possível garantir a segurança da estrutura e a eficiência da barragem ao longo de sua vida útil.

4.3 ANÁLISE DE FLUXO DA ÁGUA E ESTABILIDADE DOS TALUDES DO MODELO

A vista da seção transversal da barragem foi importada do Revit para o software GeoStudio, em formato DWG, com o objetivo de realizar as análises de estabilidade e escoamento de água. Para a análise de estabilidade, adotou-se o método de Morgenstern-Price, reconhecido por sua abordagem avançada ao considerar simultaneamente as forças de momento e cisalhamento de maneira variável. Essa

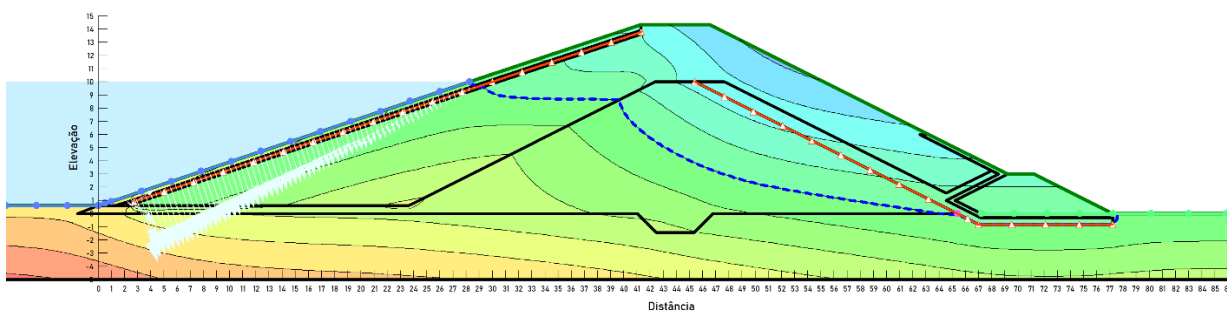
técnica proporciona uma avaliação detalhada e precisa da estabilidade dos taludes, permitindo a análise das condições tanto permanentes quanto transientes durante a operação da barragem.

Após a definição da geometria no GeoStudio, foram atribuídas as propriedades dos materiais e estabelecidas as condições de contorno necessárias. Em seguida, selecionou-se o Método de Entrada e Saída para a identificação das superfícies críticas de deslizamento. Esse método possibilita a avaliação detalhada não somente dos taludes da barragem, mas também das áreas adjacentes, resultando em uma compreensão mais ampla da estabilidade global da estrutura.

4.4 ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE AREIA BEM GRADUADA SW

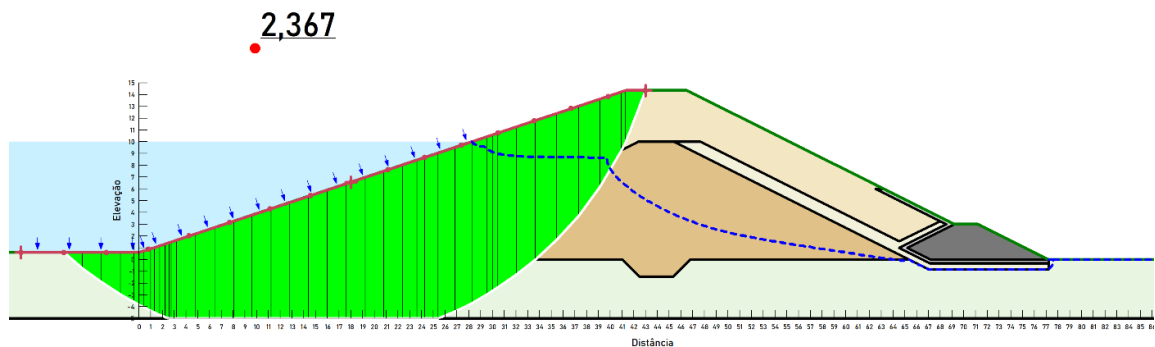
A análise inicial envolveu o estudo do fluxo de água com o reservatório a um nível de 10 metros, representando o "dia 0", onde o reservatório está completamente cheio, conforme ilustrado na Figura 37 enquanto a Figura 38 mostra a análise de estabilidade do talude de montante para esse fluxo de água permanente. Para essa análise, foram utilizados os dados disponíveis na tabela 11, da amostra de Areia bem graduada SW, conforme os estudos de Paula (PEROBA, 2023), e as amostras de solo CL de Argila Flexível 19 e Argila Rígida 21, do estudo de Pedro (CAMPOS, 2024), para o núcleo da barragem.

Figura 37: Resultado da Análise de Fluxo Permanente - Areia bem graduada SW + Amostra 19 - Argila Flexível CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

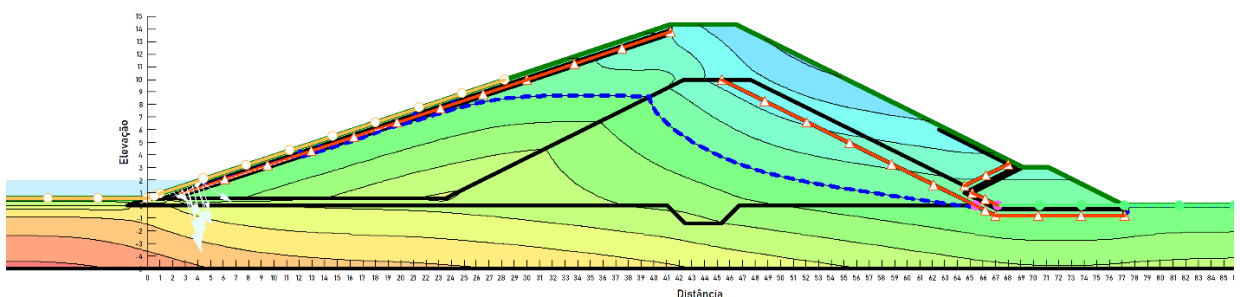
Figura 38: Resultado de Análise de Estabilidade do Talude de Montante - Areia bem graduada SW + Amostra 19 - Argila Flexível CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

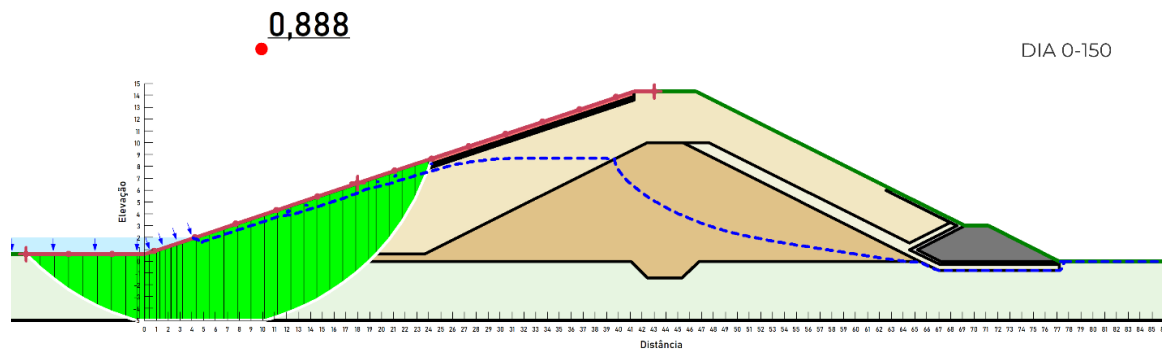
A Figura 39 mostra a análise do fluxo após um rebaixamento do nível da água de 10 para 2 metros ao longo de um período de 150 dias (5 meses). O rebaixamento da água ocorreu durante os primeiros 120 dias (4 meses), e o comportamento do maciço foi analisado 30 dias após o rebaixamento, observando as variações nas condições de estabilidade e fluxo. Os resultados da análise de estabilidade do talude de montante com base na análise de fluxo transiente durante o período de rebaixamento e o comportamento do maciço após essa alteração no nível da água são apresentados na Figura 40, por fim, o gráfico que correlaciona o fator de segurança obtido durante os 150 dias é mostrado na Figura 41.

Figura 39: Resultado da Análise de Fluxo Transiente (dia 0-150) - Areia bem graduada SW + Amostra 19 - Argila Flexível CL



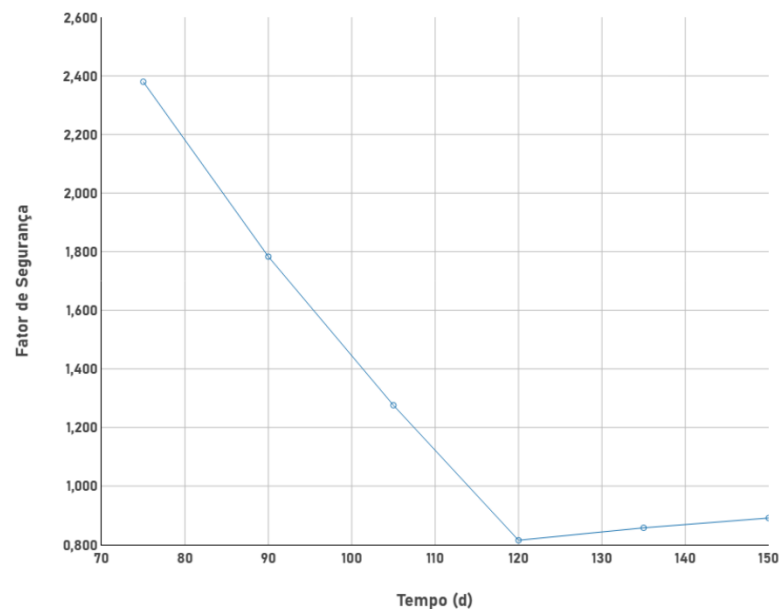
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 40: Resultado da Análise de Estabilidade de Talude em Regime Transiente (Dia 0-150) - Areia bem graduada SW + Amostra 19 - Argila Flexível CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

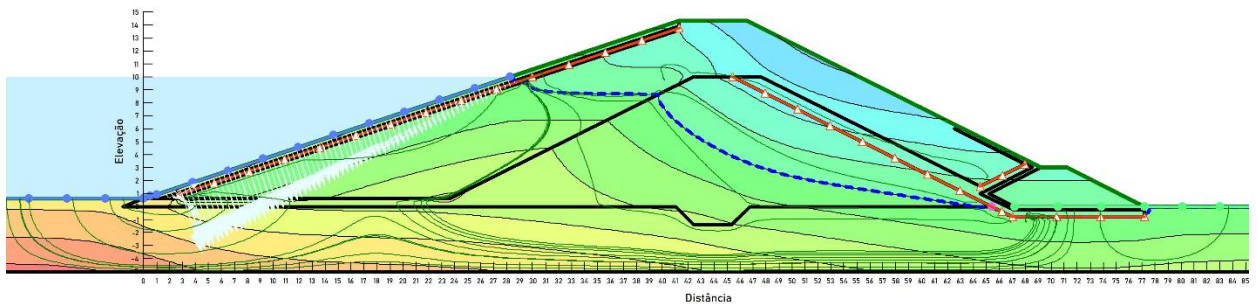
Figura 41: Fator de Segurança X Tempo (d) - Areia bem graduada SW + Amostra 19 - Argila Flexível CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

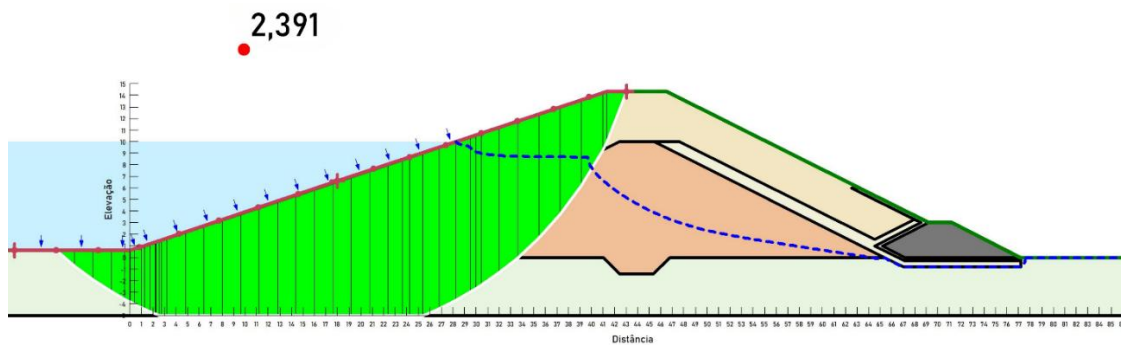
Em seguida, é apresentado os resultados de fluxo permanente como mostra a Figura 42 e de estabilidade de talude correspondente a essa análise de fluxo, como apresentado na Figura 43. A análise foi realizada ainda utilizando a amostra de Areia bem graduada SW para os taludes, porém, para o núcleo foi utilizado a amostra 21 de argila CL rígida.

Figura 42: Resultado da Análise de Fluxo Permanente - Areia bem graduada SW + Amostra 21 - Argila Rígida CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

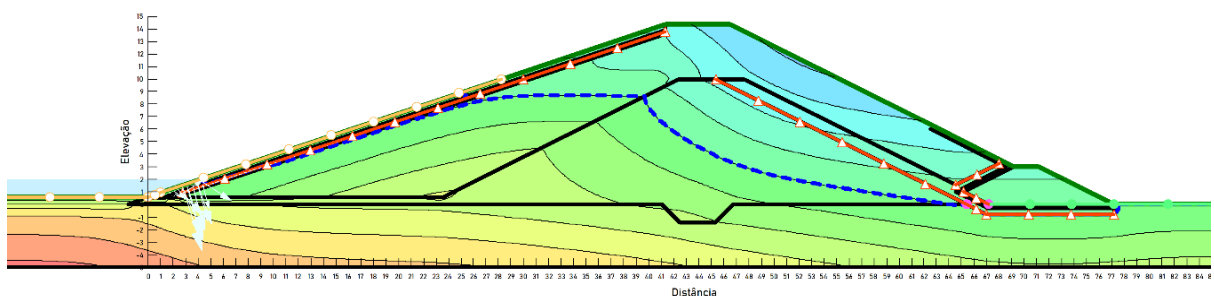
Figura 43: Resultado da Análise de Estabilidade do Talude de Montante - Areia bem graduada SW + Amostra 21 - Argila Rígida CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

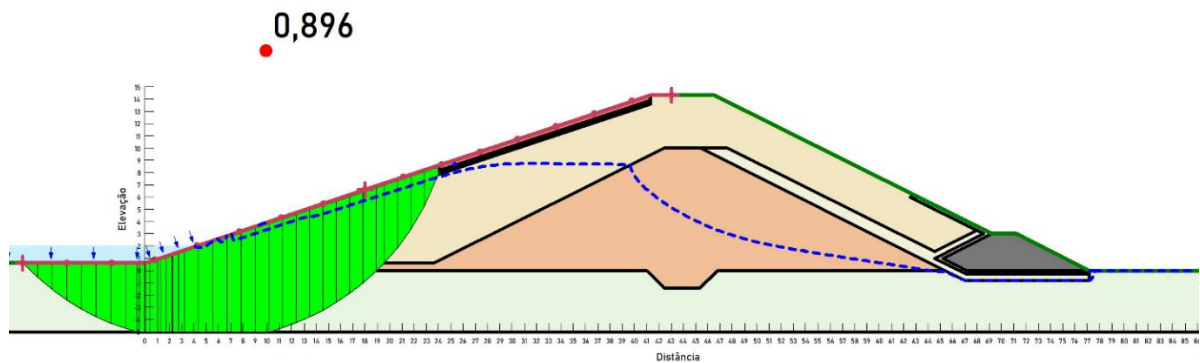
Posteriormente, é exibido os resultados de fluxo transiente na Figura 44 e de estabilidade talude na Figura 45. A análise foi realizada utilizando a amostra de Areia bem graduada SW para os taludes, e para o núcleo foi utilizado a amostra 21 de argila CL rígida, por fim, o gráfico que correlaciona o fator de segurança obtido durante os 150 dias é mostrado na Figura 46.

Figura 44: Resultado da Análise de Fluxo Transiente (Dia 0-150) - Areia bem graduada SW + Amostra 21 - Argila Rígida CL



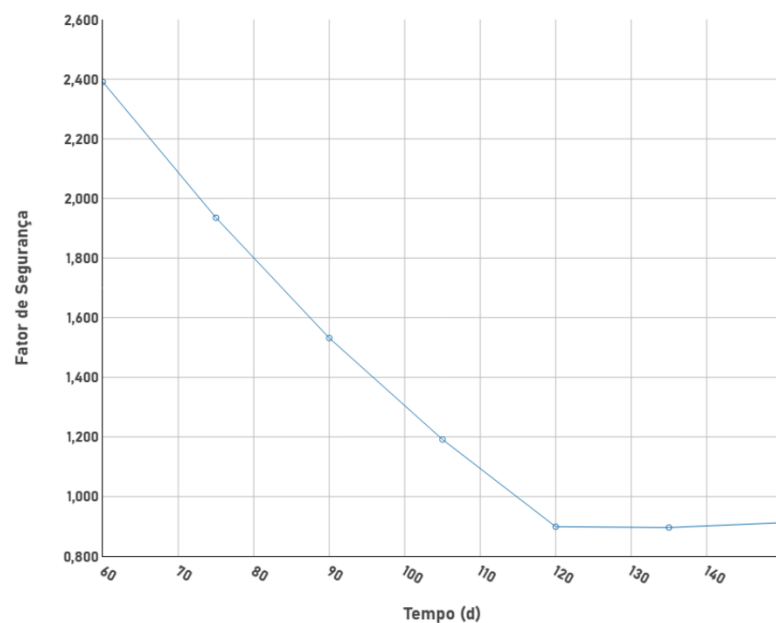
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 45: Resultado da Análise de Estabilidade de Talude em Regime Transiente (Dia 0-150) - Areia bem graduada SW + Amostra 21 - Argila Rígida CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 46: Fator de Segurança X Tempo (d) - Areia bem graduada SW + Amostra 21 - Argila Rígida CL

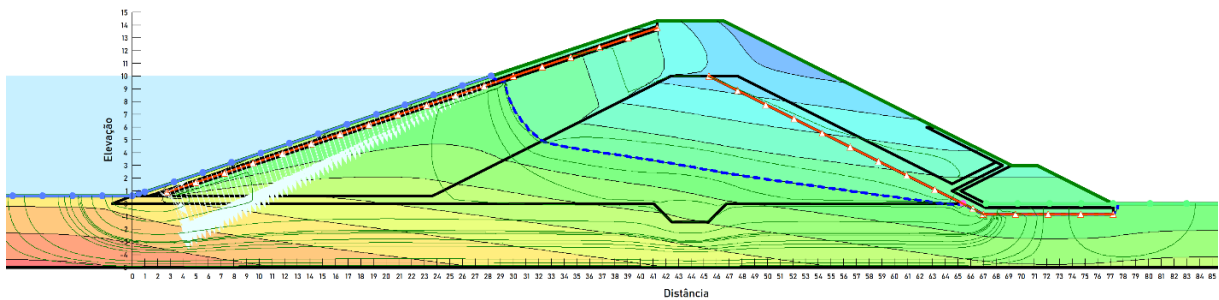


Fonte: Autoria própria, 2025.

4.5 ANÁLISE DA AMOSTRA 20 DE AREIA MAL GRADUADA SP

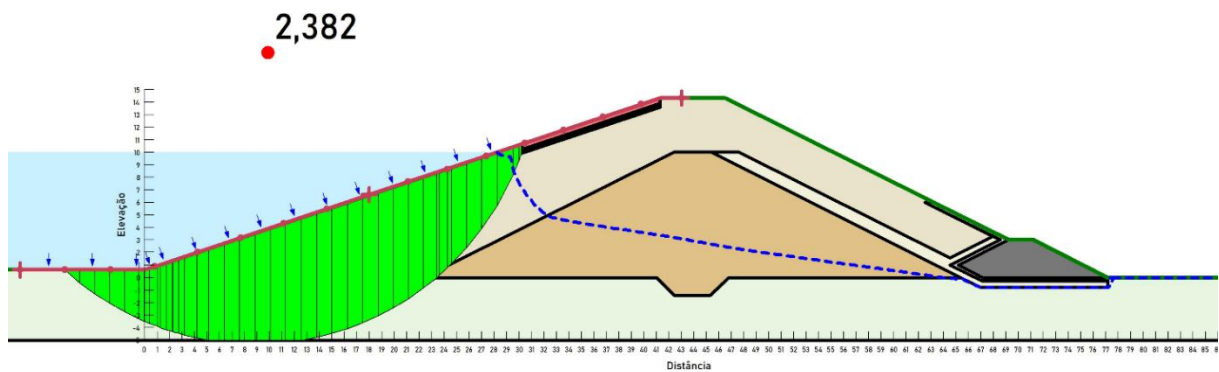
A segunda análise seguiu procedimento da análise anterior, porém utilizando a amostra 20 de areia mal graduada SP, para compor os taludes da barragem e para o núcleo a amostra 19 de argila CL flexível. O resultado do fluxo Permanente é mostrado na Figura 47, nessa análise o reservatório está cheio, com 10 metros de água do nível do terreno, representando o "dia 0". Na Figura 48 mostra a análise estabilidade de talude dessa análise de fluxo.

Figura 47: Resultado da Análise de Fluxo Permanente - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 19, Argila Flexível CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

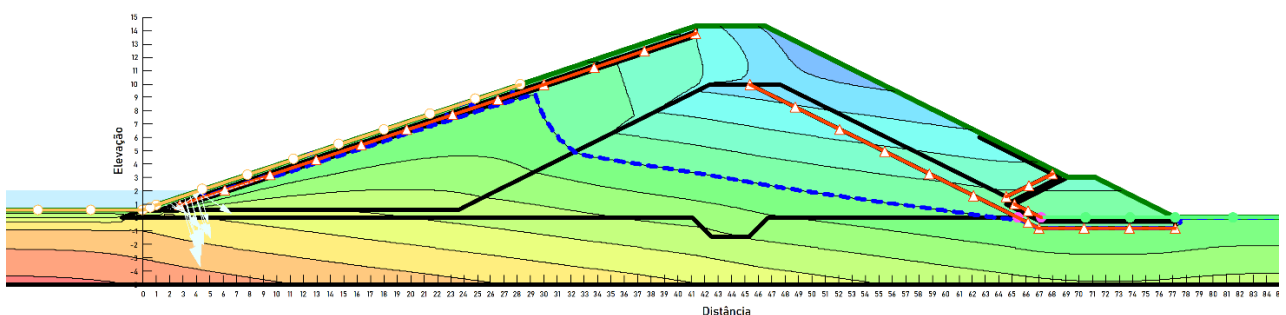
Figura 48: Resultado da Análise de Estabilidade de Talude - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 19, Argila Flexível CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

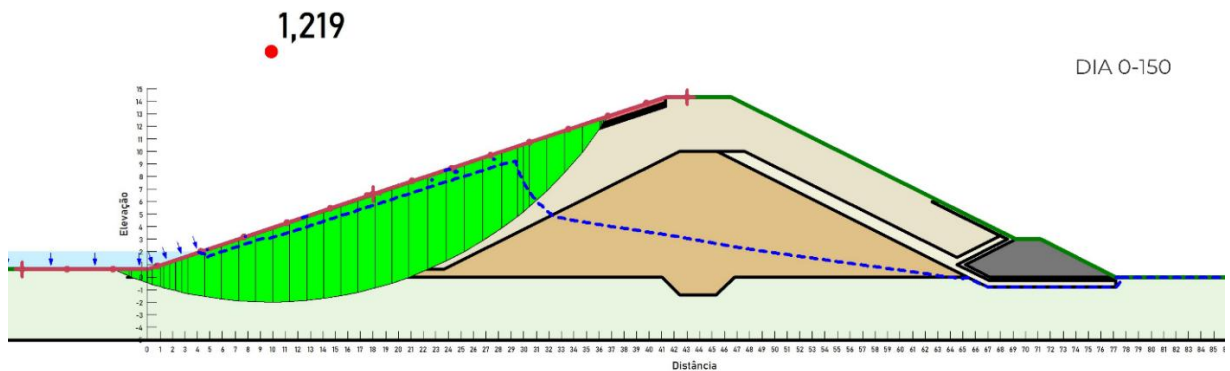
Na Figura 49 é exibido o resultado da análise de fluxo transiente durante o período de 0 a 150 dias, enquanto na Figura 50 mostra o resultado da análise de estabilidade de talude do estudo de fluxo transiente, já o gráfico que correlaciona o fator de segurança obtido durante os 150 dias é mostrado na Figura 51.

Figura 49: Resultado da Análise de Fluxo Transiente (Dia 0-150) - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 19, Argila Flexível CL



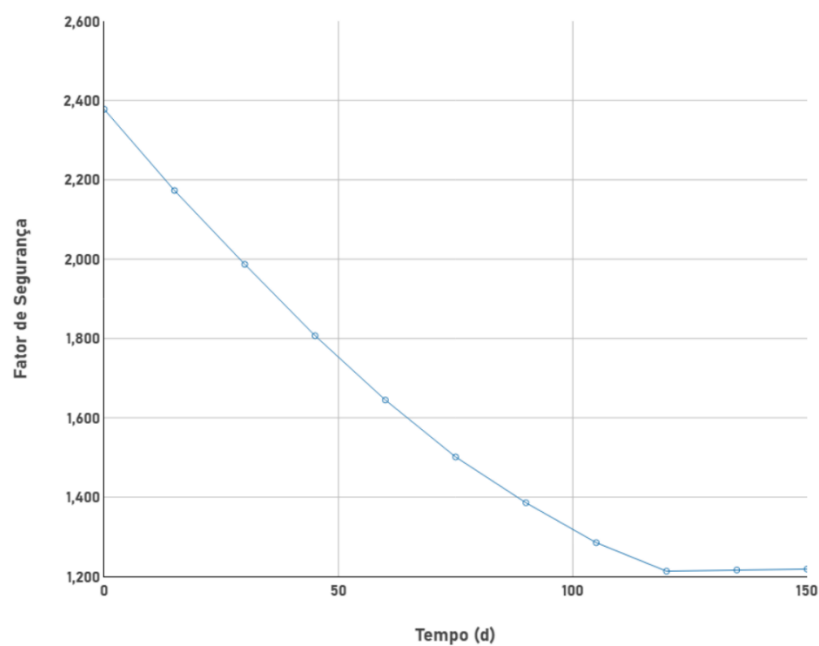
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 50: Resultado da Análise de Estabilidade de Talude em Regime Transiente (Dia 0-150) - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 19, Argila Flexível CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

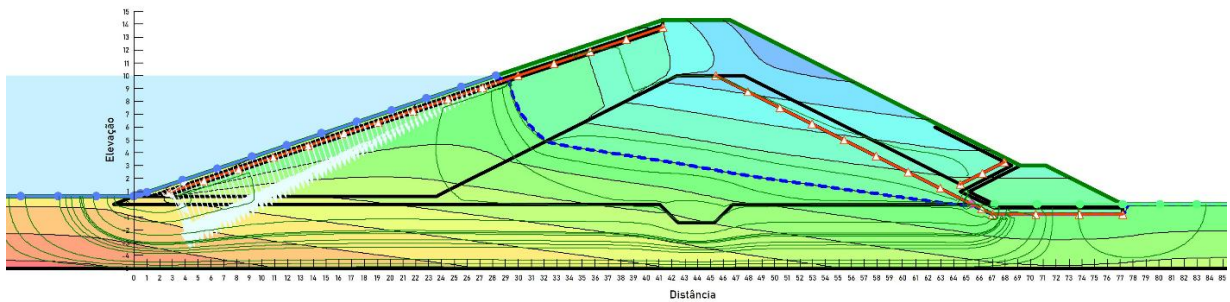
Figura 51: Fator de Segurança X Tempo (d) - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 19, Argila Flexível CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

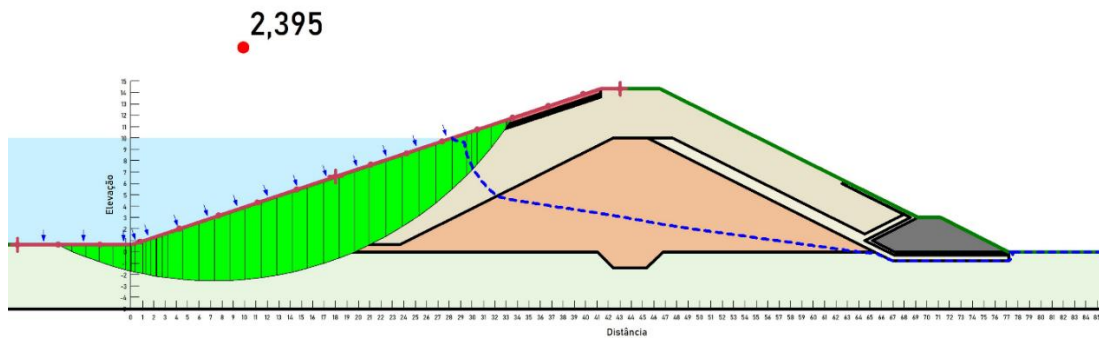
A seguir, é mostrado os resultados de fluxo permanente e estabilidade do talude no “dia 0”, onde o reservatório se encontra cheio (mostrado nas Figuras 52 e 53). A análise foi feita utilizando a amostra 20 de Areia mal graduada SP para os taludes, porém, para o núcleo foi utilizado a amostra 21 de argila CL rígida.

Figura 52: Resultado da Análise de Fluxo Permanente - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 21, Argila Rígida CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

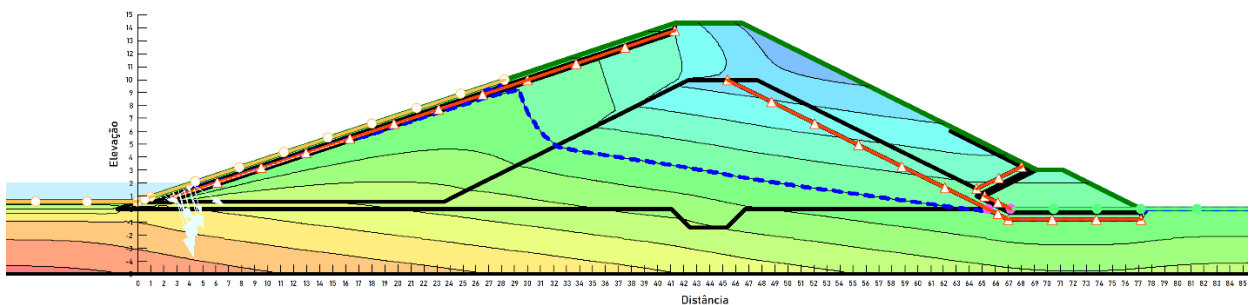
Figura 53: Resultado da Análise de Estabilidade de Talude - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 21, Argila Rígida CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

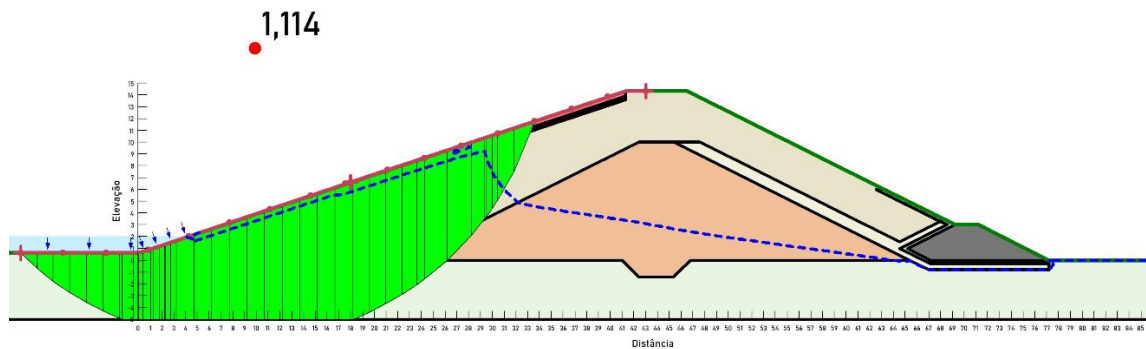
Nas Figuras 54 e 55 são apresentados os resultados das análises de fluxo transiente e estabilidade do talude da barragem, empregando ainda, a amostra 20 de areia mal graduada SP para os taludes e a amostra 21 de Argila CL para o núcleo.

Figura 54: Resultado da Análise de Fluxo Transiente (Dia 0-150) - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 21, Argila Rígida CL



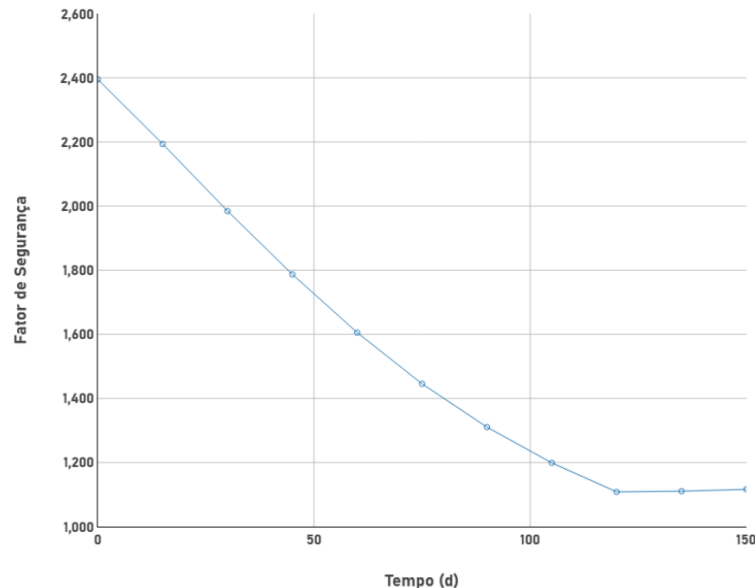
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 55: Resultado da Análise de Estabilidade de Talude em Regime Transiente (Dia 0-150) - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 21, Argila Rígida CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 56: Fator de Segurança X Tempo (d) - Amostra 20, Areia mal graduada SP + Amostra 21, Argila Rígida CL



Fonte: Autoria própria, 2025.

Por último, a tabela X mostra o resumo dos resultados de fatores de segurança obtidos durante as análises de estabilidade de talude durante os testes de fluxo permanente e transiente realizados.

Tabela 18: Resumo dos Resultados de Fator de Segurança

Taludes	Núcleo	FS Permanente	FS Transiente
Solo SW	Amostra 19 CL	2,367	0,888
Amostra 20	Amostra 19 CL	2,382	1,219
Solo SW	Amostra 21 CL	2,391	0,896
Amostra 20	Amostra 21 CL	2,395	1,114

Fonte: Autoria própria, 2025.

4.6 DISCUSSÃO

As análises realizadas evidenciam que o comportamento hidráulico e a estabilidade da barragem de terra são fortemente influenciados pelas pressões neutras internas geradas durante regimes de fluxo permanente e transiente. Em condições permanentes, com nível d'água constante no reservatório (10 m), as pressões neutras estabilizam-se dentro da barragem, resultando em fatores de segurança elevados (em torno de 2,37 a 2,39), indicando uma estrutura bem dimensionada para o equilíbrio estático. Entretanto, no regime transiente, caracterizado pelo rebaixamento rápido do nível d'água de 10 m para 2 m em 150 dias, ocorre uma intensa redistribuição das pressões internas. Nesse cenário crítico, a redução do nível externo não é acompanhada instantaneamente pela dissipação da pressão de poros interna, ocasionando altas poropressões que persistem no núcleo e no talude de montante. Isso gera uma face de infiltração ativa no talude, reduzindo drasticamente a estabilidade devido à perda do suporte hidráulico externo e à manutenção dessas pressões internas elevadas. O resultado desse fenômeno é uma significativa redução do fator de segurança para valores críticos inferiores a 1,0 (0,888 para argila flexível e 0,896 para argila rígida), configurando situação de instabilidade iminente durante o rebaixamento. A resposta hidráulica comparativa entre as argilas CL flexível (Amostra 19) e rígida (Amostra 21) revelou que, apesar de ambas apresentarem comportamento semelhante, a argila rígida exibiu desempenho discretamente melhor devido à sua maior eficiência na dissipação das pressões neutras internas.

Porém a análise da barragem composta por taludes de areia mal graduada (SP) e núcleo argiloso (CL - flexível e rígido) sob condições de fluxo permanente e transiente revelou que a pressão neutra desempenha papel determinante na estabilidade da estrutura. No fluxo permanente, as poropressões estabilizaram-se, proporcionando alto fator de segurança ($FS \sim 2,3$), indicando estabilidade satisfatória em longo prazo. Porém, durante o fluxo transiente, decorrente do rebaixamento rápido do nível d'água, verificou-se significativa redução temporária do fator de segurança, com valores mínimos variando entre 1,11 e 1,22. A alta permeabilidade dos taludes em areia SP permitiu uma dissipação relativamente rápida das pressões neutras internas, garantindo que a estabilidade fosse mantida acima dos níveis críticos ($FS > 1,0$). Observou-se também que o tipo de argila no núcleo teve influência secundária, sendo a argila flexível ligeiramente mais eficiente na dissipação de

poropressões do que a rígida. Esses resultados reforçam a importância de se projetar sistemas eficazes de drenagem interna e controlar a velocidade de rebaixamento do reservatório, visando mitigar impactos negativos das pressões neutras em condições transientes críticas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho conclui que a estabilidade de barragens de terra está intrinsecamente ligada à interação solo-fluxo, especialmente durante regimes de escoamento transiente provocados por rebaixamentos rápidos do nível d'água. Em condições permanentes, com reservatório estabilizado, tanto núcleos em argila flexível ou rígida quanto taludes em areia bem graduada (SW) ou mal graduada (SP) apresentam fatores de segurança elevados ($FS > 2,3$), refletindo margens robustas de estabilidade. Entretanto, sob fluxo transiente, a dissipação retardada de poropressões internas ocasiona redução drástica do fator de segurança, chegando a valores críticos ($FS < 1,2$) em cenários com taludes SW, independentemente do tipo de argila no núcleo. Ademais, o estudo de caso evidenciou que o mecanismo de ruptura transiente se desenvolve no contato entre o maciço e o solo de fundação, revelando fragilidade local, e que a falta de informações sobre a profundidade da rocha sã compromete a modelagem do fluxo subterrâneo e impede a definição precisa de medidas de mitigação, como cutoff ou cortinas de impermeabilização.

Em contraponto, a combinação de taludes em areia SP (amostra 20) com núcleo em argila flexível (amostra 19) resultou em FS transiente de 1,219, atendendo ao critério mínimo de 1,2 previsto na ABNT NBR 11682:2009 para barragens de baixo risco. Nessa configuração, o fator de segurança em regime permanente alcançou 2,382, demonstrando que, sob controle operacional rigoroso e com reforços adequados, tal solução pode ser considerada marginalmente satisfatória.

Com base nesses achados, recomenda-se a realização de sondagens geotécnicas detalhadas para identificação da cota e profundidade da rocha sã, de modo a modelar corretamente o escoamento profundo e dimensionar interventivas de cutoff ou cortinas de vedação que impeçam seepage indesejado. Caso a situação o exija, o engenheiro deverá considerar técnicas de reforço do solo de fundação, tais como jet grouting, injeção de cimento ou estacas de contenção, visando o aumento de rigidez e a redução de permeabilidade da base. A seleção dos materiais de aterro

deve priorizar núcleos argilosos com características de permeabilidade e compressibilidade que favoreçam a rápida dissociação de poropressões, enquanto taludes em areia SP garantem escoamentos externos mais céleres, assegurando FS transiente superior a 1,2. Ainda, elementos de drenagem interna — mantos drenantes, filtros, bermas de alívio e drenos verticais ou horizontais — devem ser incorporados para acelerar o alívio de pressões neutras durante variações de nível.

6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABNT. **NBR 11682:2009** – Barragens – Projeto e construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT. **NBR 8044:1983** – Projeto geotécnico – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

AGUIAR, Antônio Mário. **Estudo hidrométrico do Nordeste Brasileiro: classificação hidrológica de bacias segundo os coeficientes U, K e C**. Recife: Departamento Nacional de Obras Contra as Secas, 1940.

BAUER, J.; CARRUBBA, P.; KIM, S. Centrifuge modeling of slope stability for footings on slopes. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 18, n. 3, p. 573–581, 1981.

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.

ELETRONBRAS, Centrais Elétricas do Brasil. **Diretrizes para projetos de PCHs**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2000.

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

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 4. ed. New York: Macmillan College Publishing Company, 2001.

FREDLUND, D. G. **History and development of Slope/W: the first numerical limit equilibrium solution**. Saskatoon: GeoSlope International Ltd., 1977.

GEDEON, Gilbert G., P.E. **Engineer Manual EM 1110-2-2300: General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams**. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers, 30 jul. 2004.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. **Seepage Modeling with SEEP/W: an engineering methodology** [documento eletrônico]. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd., jun. 2015. Disponível em: <seep-modeling-June2015.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2025.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An Introduction to Geotechnical Engineering**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2011.

HRADILEK, Peter et al. **Avaliação de pequenas barragens**. Brasília: Bureau of Reclamation – United States Department of Interior, 2002. (Manual de Irrigação, v. 6). INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS APLICADAS (IPEA). **Sobre a agricultura irrigada no semiárido**. Brasília: IPEA, 2018.

JESUS, I. R. D. de; FAE, V. A. **Relatório de avaliação dos impactos de soluções tecnológicas geradas pela Embrapa: barragem subterrânea: uma opção de sustentabilidade para o Semiárido do Nordeste**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2023.

LANÇA, Rui. **Projecto de Investigação Aplicada em Construção: Capítulo III – Tipologias, Condicionantes e Ações em Barragens de Aterro**. Faro: Universidade do Algarve, Escola Superior de Tecnologia, CESE em Engenharia Civil, 1997.

LEME, Rosiel Ferreira. **Apresentação da disciplina Barragens**. Universidade Federal do Ceará, 2019. Vídeo disponível em: YouTube. Acesso em: 05 ago. 2025.

LIMA, A. de O. **Barragens subterrâneas no semiárido potiguar**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFRN, Natal, 2016.

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.

MASSAD, FAICAL. "Dynamic driving formulas and static loadings in the light of wave equation solutions." **Soils and Rocks**, [S.l.], v. 44, n. 2, p. e2021061921, 2021. Disponível em:

https://www.academia.edu/105823948/Dynamic_driving_formulas_and_static_loadings_in_the_light_of_wave_equation_solutions. Acesso em: 5 ago. 2025.

MIRANDA, Antonio Nunes de. **Inspeção de barragens de aterro: notas de aula do Curso Inspeção e Segurança de Barragens. Parte II**. Foz do Iguaçu; Brasília: Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil; Agência Nacional de Águas, 2016.

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

MORGENSTERN, Norbert R. Geotechnical risk, regulation, and public policy. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 41, n. 2, p. 107–129, 2018. Disponível em: https://www.soilsandrocks.com.br/soils-androcks/SR41-2_107-129.pdf. Acesso em: 5 ago. 2025.

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

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos: em 16 aulas – com exercícios resolvidos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SARAN, M.; MAHESHWARI, S.; BHAIYA, R. Analytical bearing capacity of footings on slope crests. **Soils and Foundations**, v. 29, n. 3, p. 45–55, 1989.

SCHOKLITSCH, Armin. **Tratado de Arquitetura Hidráulica**. Tomo II. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1946.

SEEUQUENT. **Stability Modeling with SLOPE/W** [documento eletrônico]. [S.l.]: Seequent Limited; The Bentley Subsurface Company, 2022.

SHIELDS, G. L.; BATES, D. E. Experimental investigations of strip footings placed adjacent to slopes. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 14, n. 2, p. 128–137, 1977.

SOUZA, Antonio Raimundo de et al. **Caracterização e interpretação para uso agrícola de um Planossolo Háplico Eutrófico Sódico do Agreste pernambucano**. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.l.], v. 1, p. 1-10, 2023. Disponível em: ... Acesso em: 5 ago. 2025.

TARIQ, **Dam and Reservoir Engineering**, 2008. Disponível em: <http://dc372.4shared.com/doc/SU6wdPjm/preview.html>. Acesso em: 05 ago. 2025.

DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. **Physical and Chemical Hydrogeology**. 2. ed. New York: Wiley, 1990.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Wind-wave Generation on Restricted Fetches**. Washington, DC: USACE, 1991.

USBR – Bureau of Reclamation, United States Department of Interior. **Diseño de Presas Pequeñas**. México: Compañía Editorial Continental, 1967.

VNCOLD. **Guidelines for Design High Concrete Face Rock Fill Dams (Draft)**. 2008. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/337482828/CFRDGuide-1>. Acesso em: 7 ago. 2025.