



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JONNATA ANGELO SOARES LIMA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA CLIMÁTICA NA ESTABILIDADE DE TALUDES
DE SOLO NÃO SATURADO SOB REGIMES EXTREMOS DA REGIÃO
SEMIÁRIDA: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM CASTRO**

FORTALEZA

2026

JONNATA ANGELO SOARES LIMA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA CLIMÁTICA NA ESTABILIDADE DE TALUDES DE
SOLO NÃO SATURADO SOB REGIMES EXTREMOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA:
ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM CASTRO

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.

FORTALEZA – CE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L698a Lima, Jonnata Angelo Soares.
Avaliação da Influência climática na estabilidade de taludes de solo não saturado sob regimes extremos da região semiárida : estudo de caso da Barragem Castro / Jonnata Angelo Soares Lima. – 2026.
97 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.
1. Barragens de terra. 2. Solos não saturados. 3. Estabilidade de taludes. 4. Sucção matricial. 5. Análise transiente. I. Título.

CDD 620

JONNATA ANGELO SOARES LIMA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA CLIMÁTICA NA ESTABILIDADE DE TALUDES
GRANULARES EM REGIÕES SEMIÁRIDAS: INTEGRAÇÃO DE MODELAGEM
NUMÉRICA

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em: 23/01/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho (Examinador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me^a. Cíntia Lopes de Castro (Examinadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à força maior que rege a vida, por ter me concedido saúde, resiliência e perseverança ao longo de toda a graduação, tornando possível a conclusão deste trabalho.

À minha família, deixo meu mais sincero agradecimento por todo o suporte, cuidado e incentivo ao longo da minha trajetória acadêmica. Em especial, agradeço à minha mãe, Linvanilde, e ao meu pai, Sebastião, pelo amor, dedicação e sacrifícios que tornaram possível a conclusão desta etapa, bem como aos meus irmãos, Joyce Aline, pelo apoio diário, conselhos e convivência durante quase toda a graduação, e Jorge Alysson, por todo o auxílio, cuidado e presença constante ao longo dos anos.

Às minhas tias Fausta e Senhorinha, registro um agradecimento especial por terem me acolhido e me dado um lar no primeiro ano da graduação. Ressalto que foi graças à ajuda e ao apoio delas que consegui iniciar o curso em Fortaleza, sendo essenciais para que essa jornada pudesse começar.

À instituição de ensino na qual realizei minha graduação, deixo meus agradecimentos por toda a estrutura, suporte acadêmico e oportunidades oferecidas, que foram fundamentais para a minha formação profissional e pessoal.

Ao meu professor e orientador, Dr. Rosiel Ferreira Leme, um agradecimento especial pela orientação, disponibilidade, paciência e contribuições técnicas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, sendo fundamental para o seu aprimoramento e conclusão.

Agradeço também a todos os amigos que fiz ao longo da graduação, que tornaram essa caminhada mais leve e significativa. Em especial, agradeço a Alanna, Luiz, Pedro, Guilherme, José Artur, Viny e John Peter, pela convivência, companheirismo e apoio ao longo do curso. Aos amigos que seguiram comigo até o final dessa jornada, Allef Sandro, Cirlane e Walisson, deixo minha gratidão por transformarem os últimos dias, mesmo difíceis, em momentos mais leves, de parceria e superação.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação acadêmica e pessoal e para a realização deste trabalho.

RESUMO

As barragens de terra localizadas em regiões semiáridas estão sujeitas a condições climáticas marcadas por longos períodos secos intercalados com eventos de precipitação concentrada, o que influencia diretamente o comportamento hidráulico e a estabilidade de seus taludes. Nesse contexto, este trabalho avalia a estabilidade de taludes granulares não saturados de uma barragem de terra situada no semiárido nordestino, considerando a influência das ações climáticas e das variações do nível do reservatório ao longo do tempo. O estudo de caso foi desenvolvido a partir de dados reais de uma barragem representativa da região, com análises realizadas para anos hidrológicos distintos, selecionados em função de suas diferenças no regime de precipitação. A metodologia baseou-se em modelagem numérica transiente utilizando o pacote GeoStudio, com aplicação integrada dos módulos SEEP/W e SLOPE/W, permitindo a simulação acoplada do fluxo não saturado e da estabilidade dos taludes. Foram adotados parâmetros hidráulicos e mecânicos de solos granulares não saturados, incluindo curva característica solo-água, permeabilidade dependente da sucção e parâmetros de resistência ao cisalhamento com incorporação do efeito da sucção matricial. Os resultados demonstram que o fator de segurança apresenta variação significativa ao longo do tempo, acompanhando as oscilações do nível d'água do reservatório e as respostas hidráulicas do maciço frente aos eventos de chuva. Observou-se redução do fator de segurança em períodos de precipitação intensa, associada à diminuição da sucção e ao aumento das pressões neutras, evidenciando a importância da análise transiente para a avaliação da segurança dessas estruturas. Conclui-se que a consideração explícita das condições climáticas e do comportamento não saturado do solo é fundamental para uma avaliação mais realista da estabilidade de barragens de terra em regiões semiáridas.

Palavras-chave: barragens de terra; solos não saturados; estabilidade de taludes; sucção matricial; análise transiente.

ABSTRACT

Earth dams located in semi-arid regions are subjected to climatic conditions characterized by prolonged dry periods interspersed with concentrated rainfall events, which directly affect the hydraulic behavior and slope stability of these structures. In this context, this study evaluates the stability of unsaturated granular slopes of an earth dam located in the Brazilian semi-arid region, considering the influence of climatic actions and reservoir water level fluctuations over time. The case study was developed using real data from a representative earth dam, with analyses performed for distinct hydrological years selected based on differences in rainfall regimes. The methodology was based on transient numerical modeling using the GeoStudio software package, with integrated application of the SEEP/W and SLOPE/W modules, enabling coupled simulation of unsaturated flow and slope stability. Hydraulic and mechanical parameters of unsaturated granular soils were adopted, including the soil–water characteristic curve, suction-dependent permeability, and shear strength parameters incorporating the effect of matric suction. The results show that the safety factor varies significantly over time, following reservoir water level oscillations and the hydraulic response of the embankment to rainfall events. A reduction in the safety factor was observed during periods of intense precipitation, associated with suction reduction and increased pore-water pressures, highlighting the importance of transient analyses for safety assessment. It is concluded that explicitly considering climatic conditions and unsaturated soil behavior is essential for a more realistic evaluation of earth dam stability in semi-arid regions.

Keywords: earth dams; unsaturated soils; slope stability; matric suction; transient analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aterro com drenagem vertical e horizontal.....	18
Figura 2 – Delimitação do Semiárido Brasileiro (2024).	20
Figura 3 – (A) Representação da classificação climática de Köppen-Geiger aplicada à região Nordeste, com identificação das principais sub-regiões geográficas (Zona da Mata, Agreste, Sertão e Meio-Norte). (B) Distribuição espacial da temperatura média na região Nordeste. ...	23
Figura 4 – Mapa de solos da região semiárida cearense do Brasil.	25
Figura 5 – Elemento de solo não saturado com a fase gasosa contínua.	27
Figura 6 – Relação não linear do comportamento da sucção e do teor de umidade.....	29
Figura 7 – Curvas características de diferentes solos.	30
Figura 8 – Relação entre: (a) curva característica e (b) variação de ϕ^b com a sucção.....	35
Figura 9 – Variação da intensidade chuva e do Fator de Segurança ao longo do tempo.	39
Figura 10 –FS em função da temperatura para (a) argila; (b) silte; e (c) areia.....	41
Figura 11 – Fluxograma metodológico adotado para o estudo.	45
Figura 12 – Localização no contexto estadual.....	46
Figura 13 – Localização no contexto municipal.....	47
Figura 14 – Arranjo do Açude Castro.	48
Figura 15 – Seção transversal máxima (Projeto as built).	49
Figura 16 – Chuva máxima por município – 2009 e 2012.	52
Figura 17 – Gráfico de precipitações diárias para os anos de 2009 e 2012.....	53
Figura 18 – Gráfico de precipitações mensais para os anos de 2009 e 2012.	53
Figura 19 – Seção adotada nas análises de fluxo.....	57
Figura 20 – Malha de Elementos Finitos.....	57
Figura 21 – Gráfico da curva característica de retenção de água.	59
Figura 22 – Gráfico da função da permeabilidade pela sucção para o solo compactado.	61
Figura 23 - Gráfico de enchimento e rebaixamento do Açude Castro.	63
Figura 24 – Gráfico de precipitações mensais referentes aos anos de 2009 e 2012.....	64
Figura 25 – Gráfico com dados de temperatura tratados dos anos de 2009 e 2012.	66
Figura 26 – Gráfico com dados de evapotranspiração potencial dos anos de 2009 e 2012	67
Figura 27 – Gráfico com dados de umidade relativa dos anos de 2009 e 2012.	68
Figura 28 – Distribuição das poropressões na seção da barragem condição inicial (2009)	73
Figura 29 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 60 dias (2009)	74
Figura 30 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 120 dias (2009)	74

Figura 31 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 180 dias (2009)	74
Figura 32 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 240 dias (2009)	75
Figura 33 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 300 dias (2009)	75
Figura 34 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 360 dias (2009)	75
Figura 35 – Distribuição das poropressões na seção da barragem condição inicial (2012)	77
Figura 36 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 60 dias (2012)	77
Figura 37 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 120 dias (2012)	77
Figura 38 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 180 dias (2012)	78
Figura 39 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 240 dias (2012)	78
Figura 40 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 300 dias (2012)	78
Figura 41 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 360 dias (2012)	79
Figura 42 – Evolução do FS durante o ciclo de operação do reservatório em 2009 e 2012. ...	80
Figura 43 – Variação do fator de segurança ao longo do tempo sob efeitos climáticos.	82
Figura 44 – Evolução do fator de segurança e da precipitação diária no ano de 2009.....	83
Figura 45 – Evolução do fator de segurança e da precipitação diária no ano de 2012.....	83
Figura 46 – Poropressões na superfície crítica de 2009 no dia de menor estabilidade (149)...	86
Figura 47 – Poropressões na superfície crítica de 2012 no dia de menor estabilidade (117)...	86
Figura 48 – Gráfico da relação da poropressão pelo tempo de 2009.	87
Figura 49 – Gráfico da relação do grau de saturação pelo tempo de 2009.	87
Figura 50 – Gráfico da relação da poropressão pelo tempo de 2012.	88
Figura 51 – Gráfico da relação do grau de saturação pelo tempo de 2012.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição e função das zonas de barragens de aterro adaptado.	18
Tabela 2 – Valores típicos de permeabilidade para diferentes tipos de solos.	31
Tabela 3 – Propriedades hidráulicas dos materiais.....	62
Tabela 4 – Resultados de 1500 ensaios realizados pelo <i>U. S. BUREAL OF RECLAMATION</i>	70
Tabela 5 – Dados geotécnicos utilizados na análise de estabilidade.....	71
Tabela 6 – Valores do fator de segurança nos cenários com e sem interação terra-clima.....	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Considerações iniciais	12
1.2	Motivação e problema de pesquisa.....	13
1.3	Justificativa.....	14
1.4	Objetivos.....	15
1.4.1	Objetivo geral	15
1.4.2	Objetivos específicos	15
1.5	Estrutura da monografia	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Barragens de terra	17
2.2	Semiárido	19
2.3	Clima semiárido.....	21
2.3.1	Características do clima semiárido	21
2.3.2	Balço hídrico, evaporação e implicações para o solo	23
2.4	Solos do semiárido.....	24
2.5	Solos não saturados.....	26
2.5.1	Sucção matricial.....	27
2.5.2	Curva de retenção de água	29
2.5.3	Permeabilidade	31
2.6	Resistência ao cisalhamento de solos não saturados	33
2.7	Estabilidade de taludes em solos não saturados	36
2.7.1	Fundamentos da estabilidade de taludes em condição não saturada	36
2.7.2	Mecanismos hidromecânicos de instabilidade.....	37
2.7.3	Evolução temporal do fator de segurança.....	37
2.8	Influência climática na estabilidade de taludes em solos não saturados	38
2.8.1	Regime de precipitação como agente desencadeador.....	38
2.8.2	Influência da temperatura e da evaporação no regime hídrico do solo	40
2.8.3	Implicações para barragens de terra em regiões semiáridas	42
2.9	Modelagem numérica aplicada à estabilidade de barragens de terra.....	42

3	MÉTODO.....	44
3.1	Estrutura metodológica da pesquisa	44
3.2	Barragem Castro	46
3.2.1	Localização e acesso.....	46
3.2.2	Histórico e finalidade do empreendimento	47
3.2.3	Características físicas da barragem.....	47
3.2.4	Seção transversal típica.....	48
3.2.5	Características hidrológicas do reservatório	49
3.2.6	Vertedouro e tomada d'água.....	49
3.3	Caracterização Climática da Região	50
3.3.1	Fontes dos dados climáticos	50
3.3.2	Seleção dos anos climáticos extremos	51
3.3.3	Organização dos dados climáticos.....	54
3.3.4	Representatividade climática dos dados adotados	54
3.4	Análises numéricas	55
3.4.1	Caracterização geral da abordagem metodológica	55
3.4.2	Definição da geometria e da seção típica analisada.....	56
3.4.3	Discretização do domínio e malha de elementos finitos	57
3.4.4	Caracterização hidráulica dos materiais	57
3.4.5	Condições de contorno	62
3.4.6	Tratamento e integração dos dados climáticos	63
3.4.7	Modelagem do fluxo não saturado sob condições climáticas.....	68
3.4.8	Definição dos parâmetros geotécnicos para a análise de estabilidade.....	69
3.4.9	Análises de estabilidade dos taludes.....	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1	Comportamento hidráulico do maciço ao longo do tempo.....	73
4.1.1	Ano de 2009 – Regime climático úmido	73
4.1.2	Ano de 2012 – Regime climático seco	76
4.2	Influência das condições climáticas na estabilidade dos taludes.....	79
4.2.1	Estabilidade dos taludes sem considerar a interação terra-clima	79
4.2.2	Análises de estabilidade considerando a influência da interação terra-clima.....	81

4.2.3	Análise da resposta hidráulica na superfície crítica sob interação terra-clima	85
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA PESQUISAS FUTURAS	90
5.1	Conclusões	90
5.2	Limitações do estudo	91
5.3	Sugestões para pesquisas futuras	92
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

As barragens de terra constituem o principal tipo de estrutura de armazenamento hídrico em operação no Brasil, desempenhando papel estratégico no abastecimento humano, na irrigação e na regularização de vazões, especialmente em regiões sujeitas à elevada variabilidade climática. Segundo o Relatório de Segurança de Barragens 2024–2025, esse tipo de barragem representa a maior parcela das estruturas cadastradas no país e concentra, de forma recorrente, a maioria dos registros de incidentes e acidentes notificados no âmbito da Política Nacional de Segurança de Barragens (ANA, 2025). No ano de 2021, por exemplo, os eventos reportados estiveram majoritariamente associados a barragens de terra, com destaque para mecanismos de falha como galgamento, processos de instabilização ou danos em taludes, percolação na interface entre estruturas e o maciço de terra e falhas em sistemas de descarga, evidenciando a vulnerabilidade dessas obras frente a condições hidrológicas e operacionais adversas (ANA, 2025).

O mesmo relatório aponta que a maior parte dos acidentes e incidentes registrados foi causada ou agravada por eventos de precipitação intensa, indicando que a segurança dessas estruturas não pode ser dissociada da atuação direta do clima. Em resposta a esse diagnóstico, o RSB recomenda o fortalecimento das exigências técnicas relacionadas ao projeto, à execução, à operação e à manutenção de barragens, bem como a ampliação de iniciativas de preparação para períodos chuvosos, com envolvimento tanto do poder público quanto dos empreendedores (ANA, 2025). Esses dados reforçam que a estabilidade dos taludes de barragens de terra constitui um problema técnico recorrente e de relevância nacional, diretamente condicionado pelas ações climáticas impostas ao longo da vida útil dessas estruturas.

Esse condicionamento climático assume caráter ainda mais crítico no Semiárido brasileiro, região onde a dependência de barragens para garantia da segurança hídrica é estrutural. A delimitação oficial do Semiárido, atualizada pelo IBGE (2021) em conformidade com as Resoluções nº 107 e nº 115 da SUDENE, abrange 1.262 municípios distribuídos por dez estados, incluindo o Ceará, sendo tecnicamente definida pela convergência de três critérios: precipitação média anual igual ou inferior a 800 mm, índice de aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50 e percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%. Esse enquadramento evidencia um regime hidrológico caracterizado por longos períodos de estiagem, elevados déficits hídricos e chuvas concentradas em curtos intervalos de tempo,

impondo condições severas às infraestruturas de terra expostas às ações atmosféricas.

Estudos de base climática indicam ainda que o Semiárido nordestino tem apresentado tendência de aumento na ocorrência e na intensidade de eventos de precipitação extrema, mesmo em um contexto de baixos totais anuais médios, o que intensifica a alternância entre períodos prolongados de secagem e episódios de chuva concentrada (de OLIVEIRA *et al.*, 2013; IPCC, 2023). Esse padrão climático reforça a exposição dos taludes de barragens de terra a ciclos hidrológicos extremos, nos quais a resposta do solo ao molhamento ocorre após longos períodos de déficit hídrico, configurando um cenário particularmente desfavorável do ponto de vista da estabilidade.

Nesse contexto, destaca-se como estudo de caso a Barragem Castro, localizada no município de Itapiúna–CE, inserida em área representativa do Semiárido cearense e submetida a regime climático caracterizado por elevada variabilidade pluviométrica, longos períodos de estiagem e ocorrência de eventos de precipitação concentrada. Trata-se de uma barragem de terra destinada à regularização hídrica regional, cujo comportamento hidráulico e estabilidade dos taludes são diretamente influenciados pelos ciclos sucessivos de secagem e molhamento impostos pelas condições climáticas locais. Assim, a Barragem Castro configura-se como um exemplo típico das estruturas de terra em operação no Semiárido brasileiro, reunindo características que tornam pertinente a investigação da influência das ações climáticas sobre o regime de fluxo e a estabilidade em condição não saturada.

1.2 Motivação e problema de pesquisa

Grande parte das barragens de terra em operação no Brasil foi concebida sob a premissa da estacionariedade climática, segundo a qual os padrões hidrológicos e meteorológicos observados no passado seriam representativos do comportamento futuro. Entretanto, esse pressuposto tem sido progressivamente questionado diante da intensificação da variabilidade climática e da maior frequência de eventos extremos, como períodos prolongados de estiagem seguidos por precipitações intensas e concentradas, fenômeno amplamente reconhecido em avaliações climáticas globais recentes (IPCC, 2023).

Esse novo regime climático impõe às estruturas geotécnicas solicitações cíclicas mais severas do que aquelas consideradas nos projetos originais, uma vez que a intensificação de eventos extremos de precipitação e de períodos prolongados de seca altera de forma significativa o comportamento hidromecânico dos solos utilizados em barragens de terra (LI *et al.*, 2018). No entanto, observa-se que a prática convencional de engenharia ainda se apoia, em

grande medida, em abordagens determinísticas e em modelos fundamentados na mecânica dos solos saturados, os quais podem conduzir a avaliações simplificadas da segurança estrutural quando submetidas a condições climáticas variáveis e incertas (PREZIOSI; MICIC, 2012).

Esses modelos não representam adequadamente os processos físicos associados à interação solo-atmosfera na zona não saturada, tais como a infiltração dependente da sucção matricial, a evaporação e a variação temporal da permeabilidade hidráulica, fatores essenciais para a compreensão do comportamento real de barragens de terra submetidas a ações climáticas transientes (GHOSH *et al.*, 2024).

Como consequência, os efeitos cumulativos da variabilidade climática sobre o comportamento hidráulico dos solos — incluindo a evolução da sucção matricial, a redistribuição da umidade e a variação das poropressões ao longo do tempo — podem não ser plenamente capturados nas avaliações tradicionais de segurança, comprometendo a confiabilidade das análises ao longo da vida útil da estrutura (SHAH *et al.*, 2024).

No contexto do Semiárido brasileiro, essa limitação assume caráter particularmente relevante, uma vez que a região abriga um grande número de barragens de terra construídas com solos locais e técnicas construtivas simplificadas, frequentemente expostas a ciclos intensos de seca e precipitação concentrada, o que potencializa mecanismos progressivos de degradação e instabilidade.

Dessa forma, o problema central que motiva este estudo reside na inadequação dos procedimentos convencionais de avaliação da segurança de barragens de terra para representar, de maneira consistente, os efeitos da variabilidade climática e da dependência temporal dos processos hidromecânicos em solos não saturados. Torna-se, portanto, fundamental investigar como a incorporação de análises de fluxo em regime transiente, associadas a dados climáticos reais, pode contribuir para avaliações mais realistas e robustas da estabilidade dessas estruturas (VILAYVONG *et al.*, 2019).

1.3 Justificativa

As barragens de terra constituem a principal infraestrutura de armazenamento e regularização hídrica em regiões semiáridas, sendo essenciais para o abastecimento humano, a segurança hídrica e o desenvolvimento socioeconômico das comunidades locais. Diante da elevada irregularidade pluviométrica e dos longos períodos de estiagem característicos dessas regiões, a segurança dessas estruturas assume relevância social direta, uma vez que eventuais falhas podem comprometer o fornecimento de água, aumentar a vulnerabilidade das populações

a jusante e agravar desigualdades socioambientais, reforçando a necessidade de estudos que contribuam para a avaliação e o aprimoramento da estabilidade dessas obras.

Do ponto de vista técnico, observa-se que a avaliação da estabilidade de taludes em barragens de terra ainda é, em muitos casos, conduzida com base em hipóteses hidráulicas simplificadas, nas quais o clima é tratado de forma indireta ou como um carregamento pontual. Essa abordagem não representa de forma adequada a natureza cumulativa e dependente do tempo dos processos de infiltração, evaporação e redistribuição da umidade no interior do maciço, podendo limitar a compreensão do comportamento hidráulico real dessas estruturas sob condições climáticas variáveis.

Em regiões de regime climático irregular, como o semiárido brasileiro, essa limitação assume maior relevância, uma vez que a alternância entre longos períodos de estiagem e eventos de precipitação concentrada intensifica a dependência temporal dos processos hidromecânicos que governam a estabilidade dos taludes. Nesse contexto, torna-se tecnicamente relevante aprofundar a análise da interação entre clima, fluxo em solos não saturados e estabilidade de barragens de terra, de modo a fornecer bases mais consistentes para a avaliação da segurança dessas estruturas.

Assim, a realização deste estudo justifica-se por contribuir para o aprimoramento das análises de estabilidade de barragens de terra inseridas em regiões semiáridas, oferecendo subsídios técnicos que podem auxiliar tanto a interpretação do comportamento dessas estruturas ao longo do tempo quanto a tomada de decisão associada à gestão da segurança e à avaliação do risco em obras de terra submetidas a condições ambientais complexas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Avaliar a influência das condições climáticas na estabilidade da Barragem Castro, localizada em Itapiúna–CE, por meio da análise do fluxo em regime transiente, considerando anos hidrológicos extremos com diferentes padrões de precipitação.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analisar a evolução temporal das variáveis hidráulicas internas do maciço, tais como sucção matricial, grau de saturação e poropressões, sob diferentes cenários climáticos;

- Avaliar a estabilidade do talude de jusante em regime operacional sob diferentes cenários climáticos representativos do semiárido nordestino;
- Identificar condições críticas de estabilidade associadas ao histórico climático prévio aos eventos de precipitação intensa.
- Avaliar a influência da modelagem terra-clima no comportamento hidráulico e de estabilidade da barragem.

1.5 Estrutura da monografia

Essa monográfica está estruturada de modo a apresentar, de forma lógica e progressiva, o desenvolvimento da análise proposta. O Capítulo 1 introduz o tema, contextualiza a problemática da estabilidade de barragens de terra sob influência climática, apresenta a justificativa do estudo e define os objetivos que orientam a pesquisa.

O Capítulo 2 reúne a fundamentação teórica necessária à compreensão do problema abordado, contemplando os conceitos relacionados ao comportamento hidráulico de solos não saturados, aos mecanismos de fluxo em barragens de terra e às abordagens de análise em regime transiente, bem como a influência das ações climáticas sobre a estabilidade de taludes.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos empregados no desenvolvimento do estudo, integrando a caracterização da Barragem Castro, localizada no município de Itapiúna-CE, a descrição das propriedades geotécnicas e hidráulicas dos materiais, os dados climáticos utilizados e os procedimentos adotados na modelagem numérica do fluxo e da estabilidade.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos, com foco na resposta hidráulica do maciço e na evolução da estabilidade dos taludes sob diferentes condições climáticas, permitindo a análise comparativa dos cenários avaliados e a identificação de comportamentos críticos.

Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições obtidas a partir das análises realizadas, bem como as considerações finais e recomendações para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

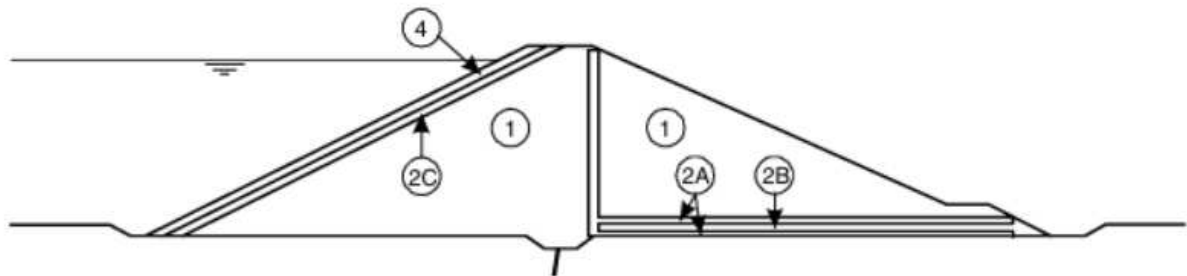
2.1 Barragens de terra

As barragens de terra e de enrocamento constituem estruturas singulares, uma vez que cada projeto resulta da combinação específica entre os materiais naturais disponíveis e as condições geológicas, hidrológicas e topográficas do local de implantação. Apesar dessa singularidade, o projeto e a construção dessas estruturas devem obedecer a princípios geotécnicos consolidados, os quais se refletem em critérios de projeto e em particularidades construtivas comuns a esse tipo de barragem. O avanço da Mecânica dos Solos e dos métodos de análise de estabilidade permitiu um aumento significativo no nível de segurança dessas estruturas, contribuindo para a compreensão do comportamento dos materiais e dos mecanismos de ruptura. Atualmente, o uso de modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos, aliado a sistemas de instrumentação e monitoramento, constitui prática corrente na engenharia de barragens de terra, possibilitando avaliações mais precisas do desempenho estrutural ao longo de sua vida útil (KUTZNER, 1997).

Existem diversos tipos de barragens de aterro, cujos projetos apresentam diferentes graus de conservadorismo, geralmente associados ao nível de controle da percolação no interior do maciço. Esse controle é obtido por meio da utilização de filtros e drenos, do emprego de enrocamento de alta permeabilidade no aterro e do tratamento da fundação, que pode incluir injeções, sistemas de drenagem e a execução de elementos de vedação, como cortinas de injeção. Dentre essas soluções, destaca-se a barragem de terra com dreno vertical e dreno horizontal, na qual a percolação proveniente do núcleo impermeável é interceptada pelo dreno vertical e conduzida de forma segura até o dreno horizontal, localizado próximo ao pé de jusante, contribuindo para a redução das pressões neutras e para o aumento da estabilidade do maciço. (Fell *et al.*, 2015).

A Figura 1 apresenta o esquema típico desse tipo de barragem, enquanto a Tabela 1 descreve as zonas constituintes e suas respectivas funções.

Figura 1 – Aterro com drenagem vertical e horizontal.



Fonte: adaptado Fell *et al.* (2015)

Tabela 1 – Descrição e função das zonas de barragens de aterro adaptado.

Zona	Descrição	Função
1	Aterro de solo (“núcleo”)	Controla a percolação através da barragem
2A	Filtro fino (filtro de dreno)	(a) Controla a erosão da Zona 1 pela água de percolação; (b) controla a erosão da fundação da barragem (quando utilizado como dreno horizontal); (c) controla o acúmulo de pressão neutra no talude de jusante quando utilizado como dreno vertical
2B	Filtro grosso (filtro de dreno)	(a) Controla a erosão da Zona 2A para o enrocamento; (b) permite a descarga da água de percolação coletada no dreno vertical ou horizontal
2C	(i) Filtro a montante (ii) Filtro sob o enrocamento de proteção (rip-rap)	(i) Controla a erosão da Zona 1 para o enrocamento a montante do núcleo da barragem; (ii) controla a erosão da Zona 1 através do enrocamento de proteção
4	Enrocamento de proteção (rip-rap)	Controla a erosão do talude de montante devido à ação das ondas e pode ser utilizado para controlar a erosão do pé de jusante causada por fluxos de retorno provenientes dos vertedouros

Fonte: adaptado Fell *et al.* (2015)

No Nordeste brasileiro, as barragens de terra constituem a tipologia predominante das obras de armazenamento hídrico, em função da ampla disponibilidade de materiais locais e da compatibilidade com as condições geológicas e climáticas regionais. A experiência histórica do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas evidencia que a implantação de açudes e barragens de terra foi determinante para a consolidação da infraestrutura hídrica do Semiárido, desempenhando papel central no enfrentamento das secas recorrentes (DNOCS, 2003).

De forma complementar, dados oficiais do Sistema de Acompanhamento de

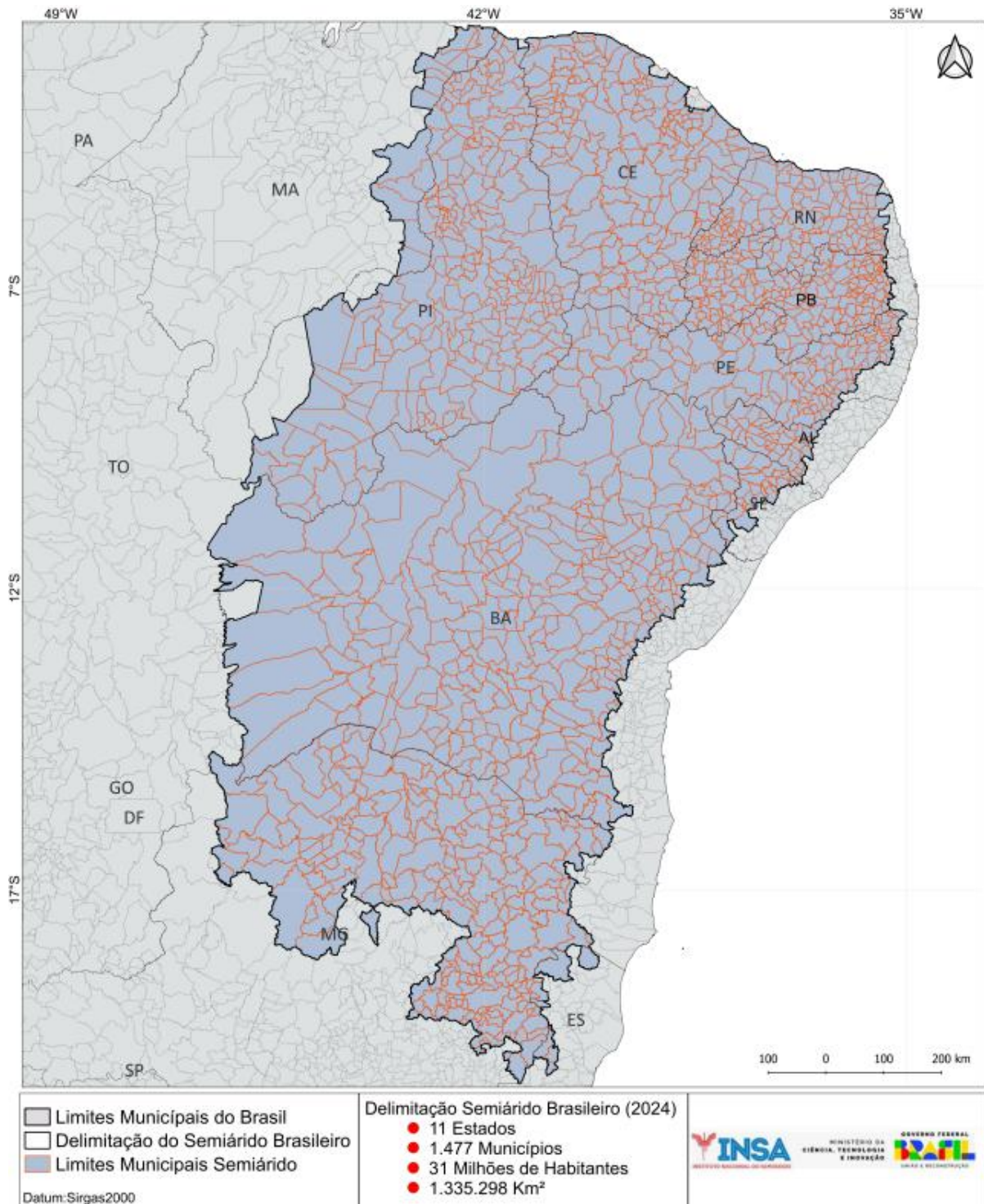
Reservatórios (SAR) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico indicam que o módulo Nordeste e Semiárido reúne mais de 500 reservatórios monitorados, com capacidade total próxima a 40 bilhões de metros cúbicos, evidenciando a elevada dependência regional dessas estruturas para a regularização dos recursos hídricos superficiais (ANA, 2025). Esse cenário reforça a necessidade de avaliações técnicas específicas aplicadas às barragens de terra, sobretudo quanto ao comportamento hidráulico do maciço e à estabilidade dos taludes sob condições variáveis de carregamento hidráulico.

Estudos baseados em históricos de falhas indicam que as barragens de terra e enrocamento concentram a maior parte dos registros de ruptura em escala mundial, em razão de sua maior susceptibilidade a processos hidromecânicos complexos. A análise de casos apresentada por Sharma e Kumar (2013) demonstra que os principais mecanismos de falha associados a esse tipo de estrutura estão relacionados ao galgamento, à erosão interna e ao *piping*, fenômenos fortemente condicionados pelo comportamento hidráulico do solo, pela permeabilidade do maciço e pelas condições de carregamento hidráulico ao longo do tempo. Os autores ressaltam ainda que uma parcela significativa dessas falhas ocorre durante o primeiro enchimento ou nos primeiros anos de operação, período em que alterações no regime de fluxo, no grau de saturação e na sucção matricial podem comprometer de forma relevante a estabilidade dos taludes (SHARMA; KUMAR, 2013).

2.2 Semiárido

O semiárido brasileiro constitui uma das maiores regiões semiáridas contínuas do mundo, abrangendo aproximadamente 1 milhão de km² e concentrando cerca de 28 milhões de habitantes, predominantemente no Nordeste do Brasil. Essa região integra o denominado Polígono das Secas e é caracterizada por um regime climático altamente irregular, com grande variabilidade espacial e temporal das precipitações, elevadas taxas de evapotranspiração potencial e recorrência de eventos de seca prolongada, fatores que condicionam fortemente a disponibilidade hídrica regional (SANTOS *et al.*, 2021). A Figura 2 ilustra a delimitação espacial do semiárido brasileiro, evidenciando sua concentração na região Nordeste e a abrangência em áreas do norte de Minas Gerais.

Figura 2 – Delimitação do Semiárido Brasileiro (2024).



Fonte: Instituto Nacional do Semiárido – INSA (2024).

O semiárido brasileiro caracteriza-se como uma região onde a disponibilidade hídrica superficial é limitada e fortemente dependente de sistemas artificiais de armazenamento, em razão da intermitência dos cursos d'água e da irregularidade natural da oferta hídrica. Ao longo

do processo histórico de ocupação do território, a expansão da infraestrutura de armazenamento de água, especialmente por meio de açudes e barragens, tornou-se o principal mecanismo para garantir o abastecimento humano, a produção agrícola e a segurança hídrica regional (PEREIRA *et al.*, 2024). Estudos recentes indicam que a evolução desses sistemas ocorreu de forma integrada às demandas sociais e econômicas, configurando um processo de coevolução entre sociedade e recursos hídricos, no qual a operação e a segurança das estruturas hidráulicas assumem papel central no funcionamento dos sistemas hídricos do semiárido brasileiro (PEREIRA *et al.*, 2024). Ademais, a gestão desses reservatórios é diretamente condicionada pelas características físicas das bacias hidrográficas, o que reforça a necessidade de estudos que considerem o comportamento hidrológico e geotécnico das estruturas de acumulação implantadas na região (KOLLING NETO *et al.*, 2024).

2.3 Clima semiárido

2.3.1 Características do clima semiárido

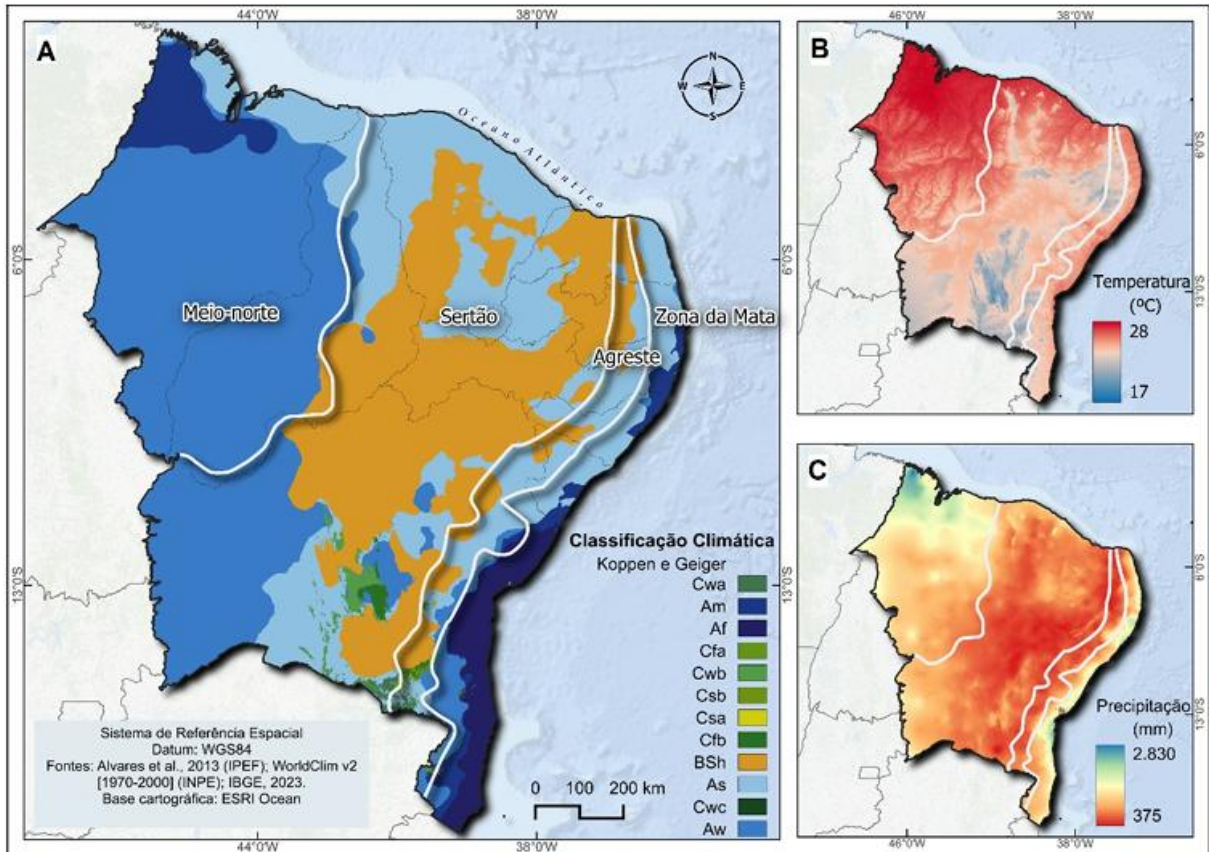
Do ponto de vista climatológico, o semiárido é definido pela relação entre a precipitação anual e a evapotranspiração potencial, frequentemente expressa por meio de índices de aridez. Com base na classificação climática de Thornthwaite, grande parte do semiárido brasileiro enquadra-se nas classes semiárida a árida, apresentando precipitações médias anuais geralmente entre 450 e 900 mm, enquanto a evapotranspiração potencial anual pode ultrapassar 2.000 mm, resultando em balanços hídricos persistentemente deficitários (SILVA *et al.*, 2023). Essa condição explica a predominância de cursos d'água intermitentes e a elevada dependência de reservatórios artificiais para regularização das vazões.

No Nordeste setentrional, incluindo o estado do Ceará, o regime pluviométrico apresenta forte sazonalidade, de modo que a estação chuvosa se concentra predominantemente no primeiro semestre do ano, estendendo-se, em geral, entre os meses de janeiro e junho, conforme indicado por estudos baseados em séries históricas de precipitação para a região. As chuvas ocorrem, majoritariamente, sob a forma de eventos intensos e de curta duração, seguidos por longos períodos de estiagem, característica típica do semiárido brasileiro. Esse padrão favorece respostas rápidas de escoamento superficial nas bacias hidrográficas e impõe condições críticas ao dimensionamento, à operação e à segurança de barragens de terra, especialmente quanto ao controle de cheias, percolação e estabilidade dos taludes (STOSIC *et al.*, 2025; KOLLING NETO *et al.*, 2024).

Ademais, o semiárido do Nordeste brasileiro apresenta temperaturas elevadas ao longo do ano, em função de sua posição em baixas latitudes e da elevada incidência de radiação solar. Dados do INMET indicam temperaturas médias anuais entre 20 °C e 28 °C, com baixa amplitude térmica sazonal. Comparações entre as normais climatológicas de 1961–1990 e 1981–2010 apontam um aumento médio da temperatura do ar da ordem de 1 °C, mais acentuado no interior da região, com maior elevação das temperaturas mínimas. Esse aquecimento contribui para o aumento da evapotranspiração potencial e para o agravamento do déficit hídrico, intensificando a severidade das secas quando associado à irregularidade das chuvas (MARENGO *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2025).

De forma integrada, a distribuição espacial dos elementos climáticos discutidos anteriormente evidencia a heterogeneidade climática da região Nordeste, resultante da interação entre fatores atmosféricos, geomorfológicos e geográficos. Conforme ilustrado na Figura 3A, a classificação climática de Köppen-Geiger permite identificar diferentes domínios climáticos distribuídos entre as sub-regiões da Zona da Mata, Agreste, Sertão e Meio-Norte, refletindo gradientes significativos de umidade e temperatura. Observa-se que as áreas correspondentes ao Sertão são predominantemente associadas a climas mais secos, enquanto a Zona da Mata apresenta condições mais úmidas. A distribuição espacial da temperatura média (Figura 3B) indica valores elevados em grande parte do interior nordestino, ao passo que o mapa de precipitação média anual (Figura 3C) evidencia a redução progressiva dos totais pluviométricos em direção ao interior, características que contribuem para a definição do semiárido e para a intensificação do déficit hídrico regional.

Figura 3 – (A) Representação da classificação climática de Köppen-Geiger aplicada à região Nordeste, com identificação das principais sub-regiões geográficas (Zona da Mata, Agreste, Sertão e Meio-Norte). (B) Distribuição espacial da temperatura média na região Nordeste.



Fonte: Alvares *et al.*, 2013 (IPEF, 2025); WorldClim v2 (INPE, 2025).

2.3.2 Balanço hídrico, evaporação e implicações para o solo

Como consequência direta das condições climáticas do semiárido discutidas anteriormente, o balanço hídrico regional passa a ser fortemente controlado pela elevada demanda evaporativa atmosférica, associada às altas temperaturas médias e aos baixos valores de umidade relativa do ar. Relatórios recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas indicam que o aumento sistemático das temperaturas observado nas últimas décadas tem intensificado os processos de evaporação e de evapotranspiração potencial, contribuindo para a ampliação da frequência e da duração de períodos de déficit hídrico em regiões áridas e semiáridas (IPCC, 2021).

No contexto da mecânica dos solos não saturados, essa elevada taxa evaporativa exerce papel fundamental na definição do estado hidráulico inicial do solo antes da ocorrência de

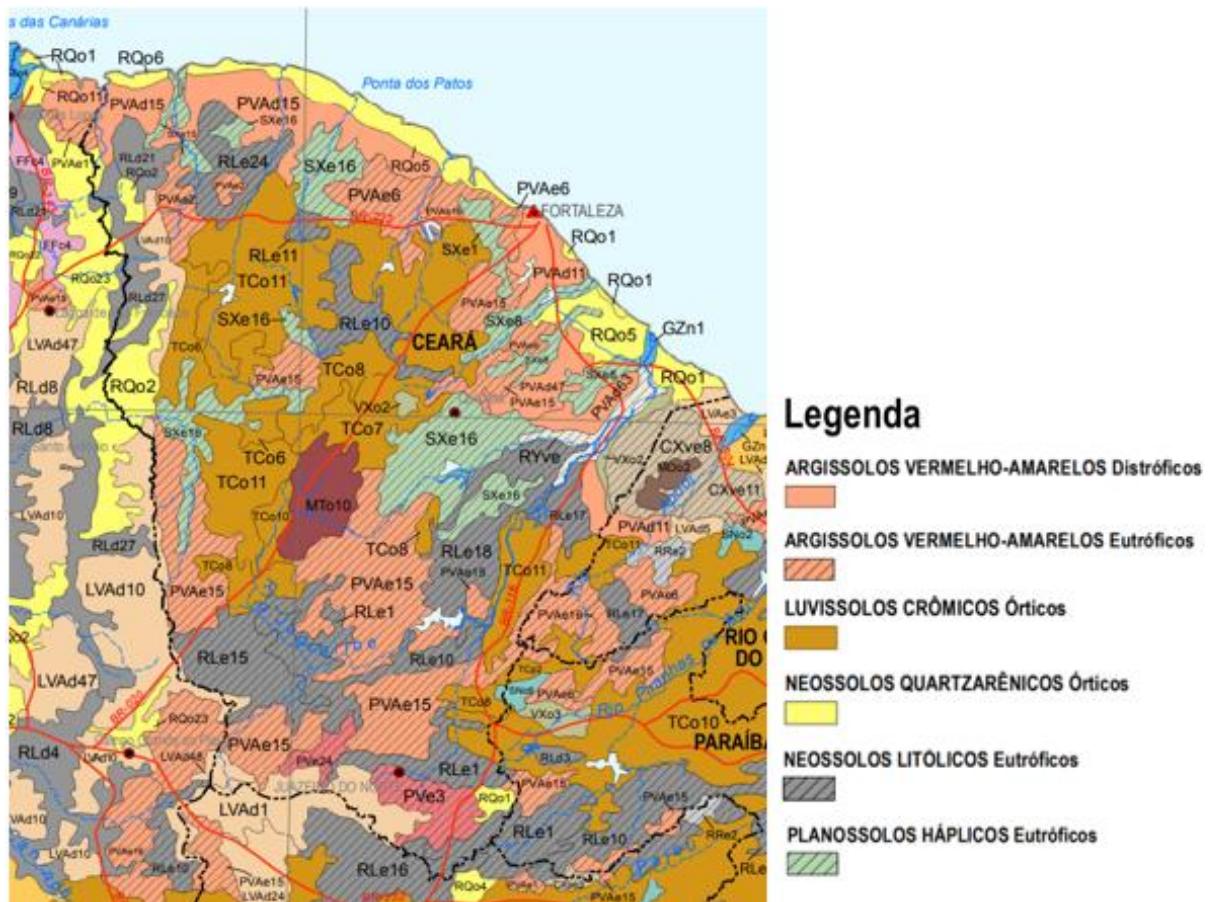
eventos de precipitação. Em ambientes caracterizados por secagem atmosférica persistente, o solo tende a permanecer grande parte do tempo em condição não saturada, sendo o teor de umidade antecedente um dos principais fatores controladores da resposta hidráulica durante episódios de chuva subsequentes, conforme destacado por Lu (2020).

Além disso, estudos desenvolvidos em regiões áridas e semiáridas demonstram que a evaporação governa a redistribuição vertical da água no perfil do solo, resultando em perfis de umidade altamente variáveis ao longo do tempo. Gutierrez-Jurado *et al.* (2006) evidenciam que, após eventos de precipitação, a água armazenada nas camadas superficiais pode ser rapidamente removida por evaporação, fazendo com que o solo retorne a condições de baixa umidade em curtos intervalos de tempo. Esse comportamento reforça o caráter transitório dos processos de umedecimento em regiões semiáridas e tem implicações diretas na evolução da sucção matricial e no comportamento hidromecânico dos solos.

2.4 Solos do semiárido

Os solos predominantes nas regiões semiáridas brasileiras apresentam forte controle do clima e do material de origem sobre seus processos pedogenéticos, resultando em perfis geralmente rasos, pouco desenvolvidos e com elevada variabilidade espacial. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, são frequentes encontrados nos semiáridos solos de classes como Luvisolos, Neossolos Regolíticos e Neossolos Litólicos, associados principalmente a materiais de origem cristalina e a condições de intemperismo limitado (EMBRAPA, 2018). No contexto cearense, a Figura 4 demonstra a disposição dos solos pelo território referente a sua região semiárida.

Figura 4 – Mapa de solos da região semiárida cearense do Brasil.



Fonte: Adaptado da EMBRAPA, (2011).

A seguir, são descritas as principais classes de solos identificadas na área de estudo, conforme os critérios taxonômicos e conceituais estabelecidos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, em sua 6ª edição revista e ampliada (EMBRAPA, 2025).

- **Argissolos Vermelho-Amarelos:** abrangem solos que apresentam horizonte B textural bem desenvolvido, caracterizado pelo acúmulo de argila em profundidade em relação aos horizontes superficiais A ou E. Podem ocorrer tanto sob condição distrófica, quando a saturação por bases é inferior a 50%, quanto eutrófica, quando esse valor é igual ou superior a 50%. Esses solos exibem contraste textural acentuado ao longo do perfil, coloração variando entre tons avermelhados e amarelados e ampla distribuição em diferentes regiões do Brasil, sob variados regimes climáticos.
- **Luvisolos Crômicos Órticos:** são solos que apresentam horizonte B textural com elevada saturação por bases, geralmente relacionados a materiais de origem ricos em minerais primários pouco intemperizados. A designação crômica está associada à

coloração mais intensa do perfil, decorrente da maior presença de óxidos de ferro. Esses solos são típicos de ambientes com clima seco a subúmido, onde o intemperismo químico é menos intenso.

- **Neossolos Quartzarênicos Órticos:** caracterizam-se por estágio inicial de desenvolvimento pedogenético, apresentando perfis profundos ou muito profundos compostos predominantemente por areia quartzosa. Possuem baixo teor de argila ao longo do perfil, pouca diferenciação de horizontes e reduzida capacidade de retenção de água e nutrientes, em função da textura essencialmente arenosa.
- **Neossolos Litólicos Eutróficos:** correspondem a solos rasos, nos quais o horizonte superficial repousa diretamente sobre rocha ou material pouco alterado. Apresentam elevada saturação por bases, refletindo a influência direta do substrato rochoso, e desenvolvimento pedogenético incipiente, condicionado pela pequena profundidade efetiva do solo.
- **Planossolos Háplicos Eutróficos:** distinguem-se pela ocorrência de horizonte B plânico, no qual há um aumento abrupto do teor de argila em relação ao horizonte superficial. Essa característica confere baixa permeabilidade interna ao perfil, favorecendo o acúmulo temporário de água. São solos com alta saturação por bases, comumente encontrados em áreas de relevo plano a suavemente ondulado.

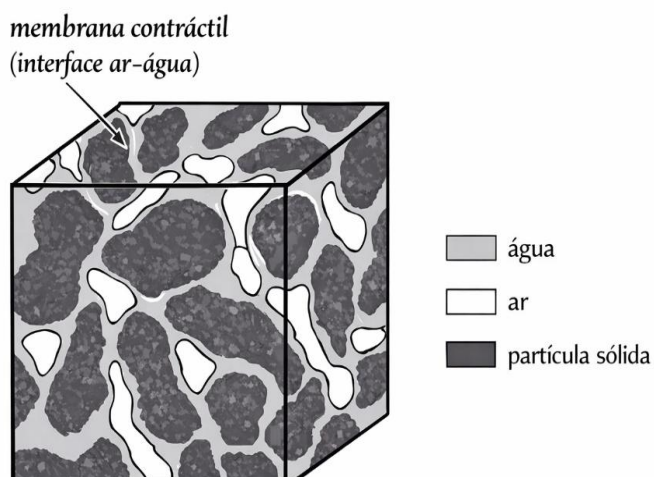
Em função das condições climáticas predominantes no Brasil, grande parte dos solos encontra-se, na maior parte do tempo, em estado não saturado, apresentando teores de umidade que variam sazonalmente dentro de uma zona superficial ativa. Essas flutuações no conteúdo de água exercem influência direta sobre as propriedades hidráulicas e mecânicas dos solos, alterando sua resposta ao longo do tempo. Dessa forma, a compreensão do comportamento dos solos não saturados torna-se fundamental para o correto planejamento, dimensionamento e manutenção de obras civis e de infraestrutura. (ABMS, 2023).

2.5 Solos não saturados

Solos não saturados são materiais porosos constituídos por uma estrutura multifásica, na qual coexistem as fases sólida, líquida e gasosa nos vazios, como pode ser observado na Figura 5. Nessa condição, a água não ocupa completamente o espaço poroso, resultando em pressões da água inferiores à pressão do ar, usualmente expressas na forma de sucção matricial. Essa situação é típica de solos localizados acima do nível freático, especialmente nas camadas superficiais do terreno, e representa a condição predominante em grande parte dos solos

naturais, sobretudo em regiões sujeitas a variações sazonais de umidade ou déficit hídrico prolongado. Dessa forma, a hipótese de saturação total mostra-se válida apenas para situações específicas, sendo insuficiente para representar adequadamente o comportamento hidráulico dos solos submetidos a condições ambientais variáveis (FREDLUND *et al.*,2012).

Figura 5 – Elemento de solo não saturado com a fase gasosa contínua.



Fonte: adaptado de Fredlund *et al.*, (2012).

Em solos não saturados, a interface ar-água comporta-se como uma membrana contrátil capaz de exercer tensões de tração, denominadas tensão superficial, sobre os materiais adjacentes, influenciando diretamente o comportamento mecânico do solo. Quando a fase gasosa é contínua, essa membrana interage com as partículas sólidas, passando a integrar o sistema resistente do meio poroso. Do ponto de vista mecânico, o solo não saturado pode ser interpretado como um sistema multifásico, no qual as partículas sólidas e a membrana contrátil estabelecem o equilíbrio tensional, enquanto a água e o ar constituem fases móveis sob a aplicação de gradientes de tensão. Embora, em análises massa-volume, o solo seja frequentemente tratado como um sistema trifásico, a consideração da interface ar-água como uma fase independente torna-se necessária em análises de estado de tensões, devido à sua influência significativa na resistência e na deformabilidade do solo (FREDLUND *et al.*,2012).

2.5.1 Sucção matricial

Em barragens de terra, o material do aterro é usualmente compactado em condições próximas à umidade ótima, resultando em um estado parcialmente saturado, no qual coexistem ar e água nos vazios do solo. Nessa condição, a presença da interface ar-água gera diferenças de pressão associadas à tensão superficial, fazendo com que a pressão da água nos poros seja

inferior à pressão do ar. A diferença entre essas pressões, definida como a diferença entre a pressão do ar e a pressão da água nos vazios, corresponde à sucção matricial, parâmetro de grande relevância no comportamento hidráulico e mecânico dos solos compactados (SANDRONI; GUIDICINI, 2022). Essa grandeza é expressa por:

$$\psi = u_a - u_w \quad (1)$$

Além dessa componente, existe a sucção osmótica, associada à concentração de sais dissolvidos na água intersticial; sendo a sucção total presente no solo constituída pelas duas parceladas expressa na equação a seguir:

$$s_t = s_m + s_o \quad (2)$$

Em que:

s_t = Sucção Total;

s_m = Sucção Mátrica;

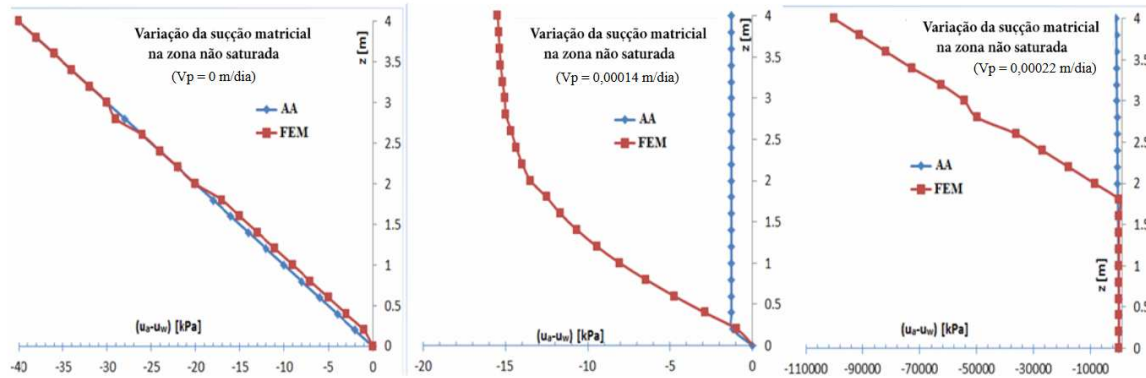
s_o = Sucção Osmótica.

Entretanto, sua variação torna-se significativa apenas quando ocorrem alterações químicas expressivas no fluido dos poros. Assim, nas análises de estabilidade de aterros de barragens de terra, as variações de sucção decorrentes de mudanças na umidade e no estado de tensões podem ser atribuídas predominantemente à sucção matricial, permitindo admitir que a variação da sucção total seja, essencialmente, equivalente à variação dessa componente (SANDRONI; GUIDICINI, 2022).

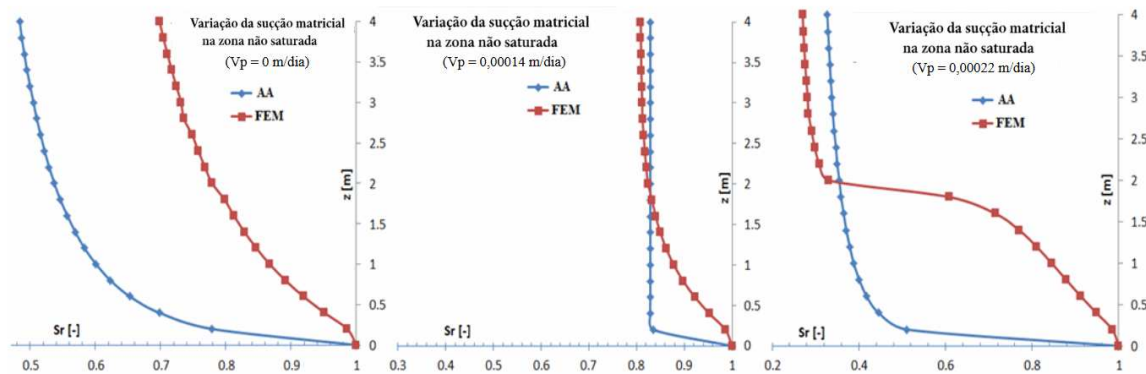
A relação entre sucção matricial e teor de umidade, expressa em termos de grau de saturação, foi analisada de forma comparativa por Chiorean (2017) para diferentes tipos de solo, incluindo areia, silte e argila, evidenciando o caráter fortemente não linear dessa interação. No estudo, a sucção matricial é avaliada a partir da curva característica de retenção de água no solo (SWCC), ajustada por meio do modelo de van Genuchten–Mualem, permitindo descrever a variação da sucção em função do grau de saturação ao longo da zona não saturada. Os resultados mostram que, para um mesmo grau de saturação, solos finos, como a argila, apresentam valores de sucção significativamente superiores aos observados em solos mais grossos, como areia e silte, refletindo sua maior capacidade de retenção de água.

Figura 6 – Relação não linear do comportamento da sucção e do teor de umidade.

Varição da sucção matricial ao longo da zona não saturada: AA/FEM; casos 1, 2 e 3 – Argila.



Varição do grau de saturação ao longo da zona não saturada: AA/FEM; casos 1, 2 e 3 – Argila.



Fonte: Chioren, (2017).

Em particular, a Figura 6 de Chiorean (2017) ilustra o comportamento da sucção matricial em solo argiloso, evidenciando um aumento acentuado da sucção à medida que o grau de saturação diminui, especialmente em faixas intermediárias da curva, o que destaca a elevada sensibilidade da sucção às variações de umidade nesse tipo de solo. Esse comportamento reforça a importância da SWCC como ferramenta fundamental para a representação do comportamento hidráulico de solos não saturados e para a correta avaliação da distribuição da sucção matricial em análises geotécnicas (MARINHO *et al.*, 2016; MAHMOOD *et al.*, 2016).

2.5.2 Curva de retenção de água

A curva característica de retenção de água no solo (Soil Water Characteristic Curve – SWCC) descreve a relação entre o estado hidráulico do solo e a energia com que a água é retida nos poros, expressa pela variação do teor de água ou do grau de saturação em função da sucção matricial. Essa curva representa a capacidade do solo de reter água sob diferentes níveis de sucção e reflete diretamente a distribuição e a conectividade dos poros, sendo fortemente

pontual em análises experimentais comparativas. Assim, a correta representação da SWCC é indispensável para a simulação adequada da variação da sucção matricial em análises transientes de solos não saturados (MAHMOOD *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2025).

2.5.3 Permeabilidade

A permeabilidade, ou coeficiente de permeabilidade (também denominada condutividade hidráulica), representa a capacidade de um solo permitir o escoamento da água através de seus vazios sob a ação de um gradiente hidráulico. Trata-se de uma propriedade não fundamental do solo, pois depende de diversos fatores físicos e estruturais, incluindo a distribuição granulométrica, a forma e textura das partículas, a composição mineralógica, o índice de vazios, o grau de saturação, a estrutura ou fábrica do solo, além das características do fluido percolante e da temperatura. Em barragens de terra, a permeabilidade exerce papel essencial no controle da percolação, no desempenho dos sistemas de drenagem e na estabilidade global do maciço, variando significativamente entre solos granulares e solos finos coesivos (FELL *et al.*, 2015).

Tabela 2 – Valores típicos de permeabilidade para diferentes tipos de solos.

		Coeficiente de permeabilidade m/s												
		$k = 1$	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
Características de drenagem		Boa				Pobre			Praticamente impermeável					
Classificação de permeabilidade		Alta		Média		Baixa		Muito baixa		Praticamente impermeável				
Tipo de solo geral		Pedregulhos		Areias limpas		Argilas fissuradas e intemperizadas		Areias muito finas ou siltosas		Argilas intactas				

Fonte: Adaptado Head (1985).

Na Tabela 2 são apresentados os principais intervalos de valores do coeficiente de permeabilidade (k) para diferentes tipos de solos. Conforme destacado por Head (1985), a permeabilidade do solo não constitui uma propriedade intrínseca, sendo influenciada por diversos fatores, dentre os quais se destacam a distribuição granulométrica, a forma e textura das partículas, a composição mineralógica, o índice de vazios, o grau de saturação, a estrutura ou fábrica do solo, bem como a natureza do fluido percolante, o tipo de escoamento e a temperatura.

Em solos saturados, o coeficiente de permeabilidade é usualmente tratado como constante, uma vez que a fase líquida ocupa integralmente os vazios e o escoamento ocorre sob condições hidráulicas estáveis. Entretanto, em solos não saturados, a permeabilidade não pode ser representada por um valor único, pois varia de forma significativa conforme o estado de tensão, assumindo caráter funcional. Embora diferentes variações tensoriais possam influenciar esse parâmetro, a sucção matricial exerce papel predominante, por controlar o teor de água no solo e a continuidade da fase líquida no meio poroso. Em função das dificuldades experimentais associadas à sua determinação direta, o coeficiente de permeabilidade em condição não saturada não é comumente medido em laboratório, sendo geralmente estimado a partir da combinação do coeficiente de permeabilidade saturado com a curva característica de retenção de água no solo (SWCC), conforme proposto por Fredlund *et al.* (2012).

Com base nessa abordagem funcional, a permeabilidade em solos não saturados é expressa na forma $k(\psi)$, representando a redução da condutividade hidráulica com o aumento da sucção matricial. Em análises numéricas transientes, a permeabilidade não saturada é estimada a partir da combinação entre o coeficiente de permeabilidade saturado e a curva característica de retenção de água no solo (SWCC). Nesse contexto, emprega-se a expressão proposta por Fredlund *et al.* (1994), apresentada na Equação (3), que relaciona a permeabilidade não saturada à sucção matricial e ao teor de umidade volumétrico, permitindo representar de forma contínua sua variação ao longo dos processos de umedecimento e secagem em análises de infiltração, percolação e estabilidade de taludes e barragens de terra.

$$k(\Psi) = k_s \frac{\int_{\ln(\Psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\Psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{a_{ev}}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (3)$$

Em que:

k = Permeabilidade não saturada (cm/s);

k_s = Permeabilidade saturada (cm/s);

$\Psi_{a_{ev}}$ = Sucção de entrada de ar (kPa);

Ψ = Sucção (kPa);

$b = \ln(10^6)$;

θ = Teor de umidade volumétrico;

θ_s = Teor de umidade volumétrico saturado;

$e = 2,71828$;

y = Variável de integração que representa o logaritmo da sucção;

θ' = A primeira derivada da equação de Fredlund e Xing (1994) para a curva característica.

Em condições não saturadas, os baixos valores iniciais de permeabilidade tendem a retardar a infiltração da água no solo, uma vez que a continuidade da fase líquida nos poros é limitada pela elevada sucção matricial. À medida que ocorre o umedecimento do solo durante eventos de precipitação, o aumento progressivo do teor de umidade promove elevação significativa da permeabilidade, controlando a velocidade de avanço da frente de umedecimento e o desempenho dos sistemas de drenagem (LU, 2020)

2.6 Resistência ao cisalhamento de solos não saturados

Em solos saturados, a resistência ao cisalhamento é tradicionalmente descrita pelo critério de Mohr–Coulomb em termos de tensões efetivas. No entanto, em solos não saturados, a presença simultânea das fases líquida e gasosa nos vazios exige a introdução de variáveis adicionais, uma vez que o comportamento resistente passa a depender do estado hidráulico do solo. Nesse contexto, a sucção matricial emerge como um parâmetro fundamental, responsável por modificar as forças interparticulares e, conseqüentemente, a resistência mobilizada. (ABMS, 2023)

A formulação clássica proposta por Fredlund, Morgenstern e Widger (1978) introduz duas variáveis de tensão independentes: a tensão normal líquida ($\sigma - u_a$) e a sucção matricial ($u_a - u_w$). Com base nessa abordagem, a resistência ao cisalhamento em solos não saturados pode ser expressa por:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (4)$$

em que:

- τ é a resistência ao cisalhamento do solo;
- c' é o intercepto coesivo efetivo, associado ao estado saturado do solo;
- σ é a tensão normal total atuante no plano de ruptura;
- u_a é a pressão do ar nos poros;
- u_w é a pressão da água nos poros;
- $(\sigma_n - u_a)$ representa a tensão líquida normal;
- $(u_a - u_w)$ corresponde à sucção matricial;
- ϕ' é o ângulo de atrito efetivo do solo;
- ϕ^b é o parâmetro que expressa a taxa de incremento da resistência ao cisalhamento em função da sucção matricial.

Nessa equação, o termo associado à sucção matricial representa o incremento de resistência decorrente das forças capilares, frequentemente interpretado como coesão aparente.

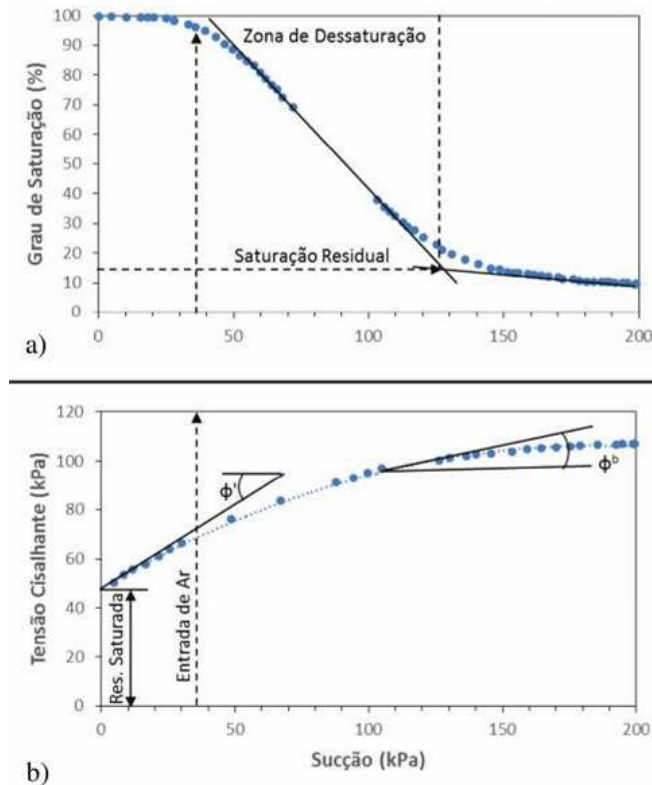
Estudos experimentais recentes corroboram essa interpretação, indicando que a sucção contribui majoritariamente para o aumento da coesão, enquanto o ângulo de atrito efetivo apresenta variações menos significativas. Ensaios triaxiais conduzidos por Deng *et al.* (2023) demonstraram que a coesão cresce de forma aproximadamente linear com o aumento da sucção matricial, ao passo que o ângulo de atrito permanece praticamente constante em uma ampla faixa de umidade.

Apesar de sua ampla utilização, pesquisas recentes evidenciam limitações associadas ao parâmetro ϕ^b , particularmente a suposição de que esse valor seja constante ao longo de toda a faixa de sucção. Resultados experimentais indicam que ϕ^b tende a assumir valores próximos a ϕ' em baixos níveis de sucção, diminuindo progressivamente à medida que a sucção aumenta, comportamento associado à perda de continuidade da fase líquida nos poros. Essa observação foi confirmada por Yang *et al.* (2024), que mostraram variações significativas de ϕ^b em função do grau de saturação, indicando que o modelo clássico pode superestimar a resistência em faixas elevadas de sucção.

Esse comportamento é ilustrado na Figura 8, na qual a curva característica de sucção do solo (Figura 8a) evidencia a transição entre os regimes de saturação e dessaturação, enquanto a resposta da resistência ao cisalhamento em função da sucção (Figura 8b) apresenta um aumento não linear. Observa-se que, após a entrada de ar e com a progressiva dessaturação do solo, a inclinação da curva $\tau \times$ sucção diminui, indicando uma redução da contribuição incremental da sucção para a resistência, frequentemente associada à diminuição do parâmetro ϕ^b em níveis elevados de sucção.

Ensaio laboratoriais em solos não saturados demonstram que a contribuição da sucção matricial para a resistência ao cisalhamento não é linear, sendo condicionada pelo grau de saturação, pela estrutura de poros e pela história hidráulica do material. À medida que ocorre a redução da sucção, especialmente durante processos de umedecimento, há diminuição das forças capilares associadas à água nos poros, resultando em perda progressiva de resistência, uma vez que apenas a água capilar, e não a água adsorvida, participa efetivamente da transferência de tensões (ZHAI *et al.*, 2019).

Figura 8 – Relação entre: (a) curva característica e (b) variação de ϕ^b com a sucção.



Fonte: Adaptado de Fredlund *et al.* (1995)

Como alternativa, modelos baseados no grau de saturação efetivo têm sido amplamente adotados. A formulação proposta por Vanapalli *et al.* (1996), fundamentada na curva característica de retenção de água no solo (SWCC), expressa a resistência ao cisalhamento como:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left(\frac{S_r - S_{r,res}}{1 - S_{r,res}} \right) \tan \phi^b \quad (5)$$

em que:

- τ é a resistência ao cisalhamento do solo;
- c' é a coesão efetiva do solo saturado;
- σ é a tensão normal total;
- u_a e u_w são as pressões do ar e da água nos poros;
- S_r é o grau de saturação do solo;
- $S_{r,res}$ é o grau de saturação residual;
- ϕ' é o ângulo de atrito efetivo do solo;
- $(u_a - u_w)$ corresponde à sucção matricial.

Essa abordagem elimina a necessidade de assumir um valor constante para ϕ^b e permite representar de forma contínua a contribuição da sucção à resistência ao cisalhamento. Estudos recentes indicam que essa formulação apresenta melhor ajuste experimental, sobretudo em faixas intermediárias de sucção, sendo amplamente empregada em análises numéricas de estabilidade de taludes em ambientes sujeitos a variações climáticas (Yang *et al.*, 2024).

Além da dependência instantânea do estado hidráulico, estudos evidenciam que a resistência ao cisalhamento pode sofrer degradação progressiva ao longo do tempo quando o solo é submetido a ciclos repetidos de umedecimento e secagem. Ensaio laboratoriais realizados por Ding *et al.* (2023) demonstraram reduções significativas da coesão e do ângulo de atrito após sucessivos ciclos seco-úmido, indicando que parte da perda de resistência é irreversível e está associada à alteração da estrutura interna do solo.

Do ponto de vista aplicado, estudos que consideram explicitamente a interação solo-atmosfera mostram que a dissipação da sucção durante eventos de infiltração é um dos principais mecanismos responsáveis pela redução do fator de segurança de taludes. Análises realizadas por Conceição *et al.* (2021) evidenciaram que os menores fatores de segurança ocorrem após períodos chuvosos, mesmo sem que o solo atinja a condição de saturação total, reforçando a necessidade de empregar modelos de resistência não saturada em avaliações de estabilidade.

2.7 Estabilidade de taludes em solos não saturados

2.7.1 Fundamentos da estabilidade de taludes em condição não saturada

A estabilidade de taludes em solos não saturados é controlada pela interação entre geometria, propriedades mecânicas e estado hidráulico do maciço. Diferentemente de taludes em condição saturada, nos quais a instabilidade está frequentemente associada ao aumento das pressões neutras positivas, em solos não saturados a ruptura pode ocorrer sem que haja saturação total do perfil, sendo desencadeada pela redução progressiva da resistência associada à sucção matricial (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Estudos numéricos recentes reforçam que essa resistência adicional exerce papel determinante na estabilidade global do talude. Mahmood *et al.* (2016) demonstraram que, para diferentes tipos de solo, taludes permanecem estáveis enquanto a sucção é mantida, mesmo sob carregamento hidráulico contínuo, evidenciando que a condição não saturada constitui um estado naturalmente mais resistente quando comparado ao solo saturado sob a mesma geometria.

No contexto de barragens de terra, essa condição é particularmente relevante, pois grandes volumes do maciço operam predominantemente em regime não saturado ao longo da vida útil da estrutura. Leme *et al.* (2016) mostraram que a consideração explícita da sucção matricial altera de forma significativa os fatores de segurança obtidos, indicando que análises baseadas exclusivamente na mecânica dos solos saturados não representam adequadamente o comportamento real de barragens localizadas em regiões semiáridas.

2.7.2 Mecanismos hidromecânicos de instabilidade

A instabilidade de taludes em solos não saturados está associada a processos hidromecânicos progressivos, desencadeados principalmente pela infiltração de água no maciço. A infiltração promove a redistribuição do campo de sucção, reduzindo gradualmente a resistência ao cisalhamento antes mesmo do surgimento de pressões neutras positivas. Rahardjo *et al.* (2012) destacam que a perda da sucção pode ser suficiente para mobilizar superfícies de ruptura, mesmo quando o solo permanece parcialmente saturado.

Resultados obtidos por Mahmood *et al.* (2016) indicam que a infiltração atua por meio do avanço de frentes de umedecimento, cuja profundidade e velocidade dependem das propriedades hidráulicas do solo, especialmente da condutividade hidráulica não saturada. Esses autores demonstraram que a redução localizada da sucção ao longo da frente de umedecimento pode gerar zonas críticas de instabilidade, favorecendo tanto mecanismos de ruptura rasos quanto profundos, dependendo da estratigrafia e das condições iniciais de umidade.

2.7.3 Evolução temporal do fator de segurança

O fator de segurança em taludes de solos não saturados não pode ser considerado uma grandeza constante, uma vez que sua magnitude depende da evolução temporal do estado hidráulico do maciço. Ng e Shi (1998) demonstraram que o instante de menor fator de segurança pode ocorrer após o término do evento de infiltração, em função da continuidade do fluxo interno e da dissipação progressiva da sucção.

Estudos recentes baseados em modelagem numérica transiente demonstram que o fator de segurança de taludes em solos não saturados é uma grandeza dependente do tempo, controlada pela evolução do estado hidráulico do maciço. Akram e Azam (2023) mostraram que taludes granulares submetidos a diferentes cenários climáticos apresentam flutuações

sazonais do fator de segurança, associadas à redistribuição interna de umidade e à redução da sucção matricial, mesmo na ausência de eventos extremos de precipitação. De forma complementar, Belew *et al.* (2022) evidenciaram que o fator de segurança de barragens de terra varia significativamente entre diferentes condições operacionais, como fim da construção, regime permanente e rebaixamento rápido do reservatório, reforçando o caráter temporal da estabilidade dessas estruturas.

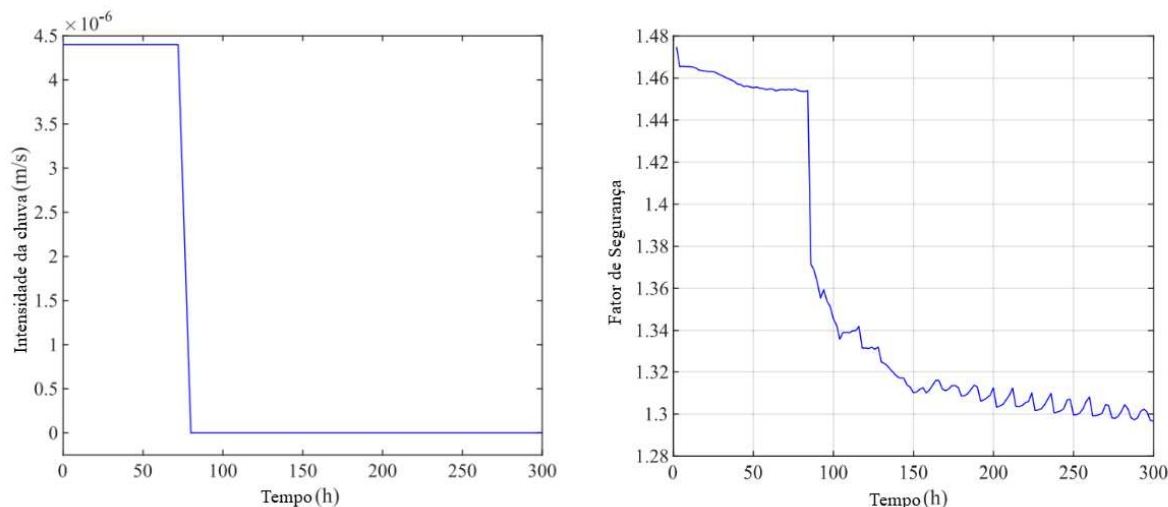
A prova prática da importância desta física no contexto local é fornecida por Leme *et al.* (2016). Num estudo da Barragem de Pesqueiro (CE), os autores realizaram simulações numéricas transientes (utilizando o GeoStudio) para modelar a operação real da barragem ao longo de 6 anos. A conclusão fundamental do estudo foi que a consideração da sucção matricial resultou em Fatores de Segurança com diferenças de até 29,6% em relação aos métodos clássicos, os quais desprezam o efeito não saturado. Este dado quantifica a falha grave que é ignorar a sucção na análise de barragens no Ceará.

2.8 Influência climática na estabilidade de taludes em solos não saturados

2.8.1 Regime de precipitação como agente desencadeador

A precipitação é amplamente reconhecida na literatura como a principal forçante climática associada à instabilidade de taludes em solos não saturados, porém os estudos recentes convergem ao demonstrar que sua influência não se manifesta de forma instantânea. Wu *et al.* (2025) mostraram, por meio de modelagem numérica acoplada, que o fator de segurança (FS) não atinge seu valor mínimo durante o pico da precipitação, mas em instantes posteriores ao término do evento pluviométrico como pode ser observado na Figura 9. Esse comportamento evidencia que a chuva atua como um agente desencadeador, enquanto a condição crítica de instabilidade está associada à evolução temporal da resposta do maciço, resultado que também foi observado em análises transientes conduzidas por Ahmadi-Adli *et al.* (2012).

Figura 9 – Variação da intensidade chuva e do Fator de Segurança ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2025).

A persistência dos efeitos da precipitação após a sua cessação foi confirmada por diferentes abordagens metodológicas. Ahmadi-Adli *et al.* (2012) verificaram que o FS continua diminuindo no período pós-evento, mesmo na ausência de novas chuvas, indicando que o risco de instabilidade se mantém elevado após o fim da precipitação. Essa resposta retardada foi posteriormente quantificada sob a ótica probabilística por Costa *et al.* (2023), que demonstraram que a probabilidade máxima de falha ocorre após o término do evento pluviométrico. Em conjunto, esses estudos indicam que o encerramento da chuva não corresponde à eliminação imediata do risco, reforçando o caráter temporal da atuação climática.

Além do momento de ocorrência do estado crítico, a literatura destaca que as características temporais da precipitação, em especial intensidade e duração, exercem papel determinante na resposta dos taludes. Espinosa e El Naggar (2024), a partir de um estudo paramétrico sistemático, identificaram a intensidade da chuva como a variável mais sensível na redução do FS, enquanto eventos de menor intensidade exigiram maior duração para induzir instabilidade significativa. Essa diferenciação entre tipos de chuva ajuda a explicar por que eventos com volumes acumulados semelhantes podem resultar em respostas de estabilidade distintas, observação que também foi reportada por Ahmadi-Adli *et al.* (2012) ao comparar cenários pluviométricos com diferentes distribuições temporais.

A importância da intensidade da precipitação é reforçada por Erdağ e Işık (2022), que demonstraram uma relação não linear entre a intensidade da chuva e o fator de segurança. Os autores observaram que incrementos relativamente pequenos na intensidade do evento pluviométrico podem provocar reduções abruptas do FS, evidenciando que eventos extremos

exercem um efeito desproporcional sobre a estabilidade. Esses resultados complementam as conclusões de Espinosa e El Nagggar (2024), ao indicar que não apenas a intensidade é relevante, mas que sua influência pode se manifestar de forma altamente não linear.

A resposta ao regime de precipitação mostra-se ainda mais sensível quando considerados solos granulares não saturados, materiais frequentemente empregados em obras de terra. Bustamante *et al.* (2025) observaram que, nesses solos, o fator de segurança reduz progressivamente com o tempo de exposição à chuva, mesmo sob eventos de intensidade constante. Essa elevada sensibilidade temporal corrobora as observações de Wu *et al.* (2025) e Ahmadi-Adli *et al.* (2012) quanto à importância do período pós-evento, indicando que, em materiais granulares, a instabilidade pode se desenvolver de forma acelerada após a imposição da condição climática.

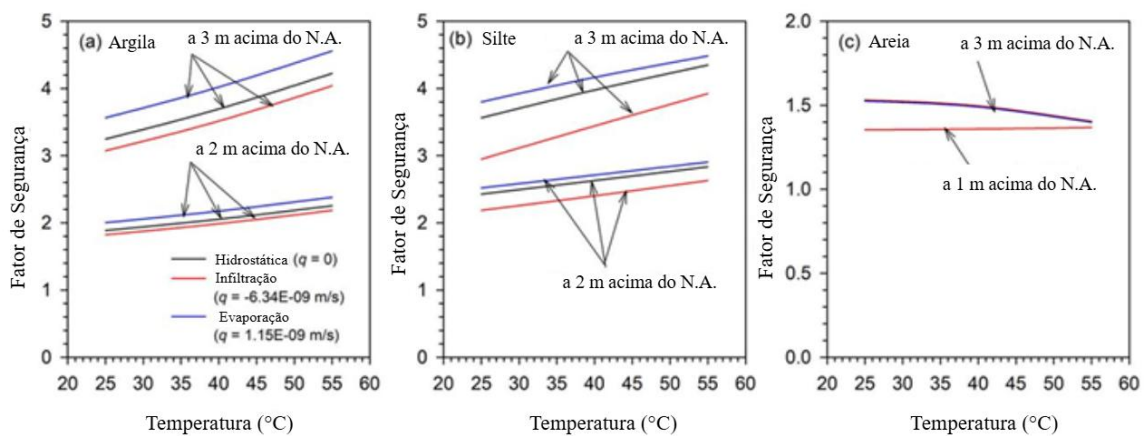
2.8.2 Influência da temperatura e da evaporação no regime hídrico do solo

A literatura indica que a estabilidade de taludes em solos não saturados não é definida apenas pela ocorrência de eventos de precipitação, mas é fortemente condicionada pelas condições climáticas antecedentes, em especial pelos processos de evaporação e evapotranspiração que atuam durante períodos de estiagem. Cotecchia *et al.* (2019), por meio de modelagens numéricas acopladas solo-atmosfera utilizando séries climáticas reais, observaram variações sazonais significativas da sucção matricial e do fator de segurança (FS), fortemente associadas aos períodos de maior demanda evaporativa. De forma complementar, Lu (2020) destaca que a evaporação, governada pelo regime térmico e energético do ambiente, é um dos principais mecanismos responsáveis pelo aumento progressivo da sucção, definindo o estado hidráulico inicial do solo antes da ocorrência da precipitação. Esses resultados indicam que períodos prolongados de secagem não constituem fases neutras do ponto de vista geotécnico, mas condicionam diretamente a resposta do solo ao molhamento subsequente.

Além de controlar indiretamente a evaporação, a temperatura tem sido identificada como uma variável climática ativa na estabilidade de taludes não saturados. Thota e Vahedifard (2021), ao analisarem numericamente encostas submetidas a incrementos térmicos na faixa de 25 °C a 55 °C, observaram alterações significativas no fator de segurança mesmo na ausência de variações no teor de umidade imposto, indicando que análises que desconsideram explicitamente o efeito térmico tendem a superestimar a estabilidade do talude. A influência da temperatura mostrou-se fortemente dependente da granulometria do solo, conforme evidenciado na Figura 10. Nos solos finos, como argilas e siltes, o aumento da temperatura de 25 °C para 55 °C promoveu ganhos no fator de segurança de até 33% nas camadas superficiais,

associados à intensificação da sucção induzida pela evaporação. Em contraste, no solo arenoso, a 3 m acima do nível d'água, observou-se uma redução progressiva do FS, da ordem de 2% e 8% para temperaturas de 40 °C e 55 °C, respectivamente. Esses resultados sugerem que, em solos granulares, a redução da coesão aparente associada à diminuição da tensão superficial da água intersticial pode superar os efeitos benéficos da secagem evaporativa, configurando as altas temperaturas como um fator de fragilização estrutural antecedente à ocorrência de eventos de precipitação.

Figura 10 –FS em função da temperatura para (a) argila; (b) silte; e (c) areia.



Fonte: Adaptado de Thota & Vahedifard (2021).

A relevância do efeito térmico também foi confirmada por Tian *et al.* (2023), que realizaram análises numéricas tridimensionais comparando cenários com e sem a consideração explícita da variável temperatura em taludes sob condições de fluxo não saturado. Os autores observaram diferenças significativas nos valores do fator de segurança entre os cenários analisados, mesmo mantendo-se constantes as condições hidráulicas, indicando que a omissão da temperatura pode conduzir a avaliações não conservadoras da estabilidade. Em uma perspectiva complementar, Loche e Scaringi (2022) argumentam que a temperatura exerce um controle contínuo sobre a estabilidade de taludes, de modo que a adoção de valores médios pode mascarar oscilações relevantes do fator de segurança em contextos climáticos com elevada variabilidade térmica.

2.8.3 Implicações para barragens de terra em regiões semiáridas

No semiárido brasileiro, esse comportamento assume relevância adicional em função do uso recorrente de solos locais compactados no ramo seco da curva Proctor. Lôbo Neto *et al.* (2018) mostraram que essa condição de compactação resulta em estruturas metastáveis e potencialmente colapsíveis, cuja resposta mecânica é fortemente dependente da variação do teor de umidade. Os autores destacam que a passagem de estados secos para estados mais úmidos pode induzir deformações significativas, reforçando a sensibilidade dessas barragens às condições climáticas antecedentes.

Do ponto de vista hidráulico, estudos de modelagem aplicados a barragens de terra indicam que o comportamento do fluxo é governado por processos não permanentes. Li *et al.* (2022) demonstraram que análises baseadas em regime permanente não representam adequadamente a redistribuição temporal da umidade no interior do maciço após eventos de precipitação, uma vez que o escoamento transiente controla a evolução das condições hidráulicas durante e após o molhamento.

De forma integrada, os estudos analisados indicam que a avaliação da estabilidade de barragens de terra em regiões semiáridas requer a consideração explícita da ação climática ao longo do tempo, bem como de seus efeitos sobre o comportamento hidráulico e mecânico dos solos constituintes. Apesar dos avanços existentes, observa-se que ainda são limitados os estudos que integram, de maneira conjunta, dados climáticos reais, comportamento não saturado e análises transientes de estabilidade aplicadas especificamente a uma barragem de terra na região semiárida, o que evidencia uma lacuna relevante na literatura.

2.9 Modelagem numérica aplicada à estabilidade de barragens de terra

A avaliação da estabilidade de taludes de barragens de terra sob ações climáticas exige abordagens capazes de representar a interação entre infiltração, redistribuição hídrica e resistência mecânica ao longo do tempo. Mburu *et al.* (2022), em um artigo de revisão, analisaram diferentes estratégias de modelagem aplicadas à estabilidade de taludes e demonstraram que métodos simplificados, baseados na consideração de níveis d'água estáticos ou condições hidráulicas permanentes, não conseguem representar adequadamente a natureza transiente dos processos que governam a estabilidade dessas estruturas. Segundo os autores, análises de clima–fluxo–estabilidade fornecem uma representação mais realista do comportamento de taludes submetidos a variações climáticas, sendo particularmente relevantes para obras de terra com longa vida útil.

A implementação prática dessas abordagens tem sido viabilizada por meio de ferramentas numéricas capazes de simular explicitamente a interação solo-atmosfera. Bračko *et al.* (2022) discutiram a aplicação de modelos climáticos à análise geotécnica, destacando a importância de representar o balanço hídrico superficial sob condições climáticas variáveis. Os autores demonstraram que a incorporação de dados de precipitação, evaporação e cenários climáticos permite avaliar a resposta hidráulica do solo de forma integrada, aspecto fundamental para estruturas como barragens de terra, cujos taludes permanecem expostos continuamente às ações ambientais.

Em contexto brasileiro, Silva *et al.* (2021) aplicaram uma cadeia de análise de fluxo e estabilidade à avaliação de um talude associado a obra de terra no Ceará, demonstrando a influência decisiva da sucção matricial na segurança da estrutura. Os resultados mostraram que, em condição não saturada, o fator de segurança atingiu valores elevados ($FS \approx 2,45$), enquanto a simulação da infiltração de chuva resultou na dissipação da sucção e na redução do fator de segurança para valores próximos à ruptura ($FS \approx 1,03$). Esse comportamento evidencia que, em barragens de terra, análises que desconsideram a condição não saturada ou a evolução temporal do fluxo podem subestimar significativamente o risco de instabilidade dos taludes.

Apesar dos avanços observados na literatura, ainda são limitados os estudos que aplicam de forma integrada essas abordagens numéricas a taludes de barragens de terra localizadas em regiões semiáridas, utilizando dados climáticos reais e parâmetros hidráulicos representativos dos materiais empregados nessas estruturas. Essa limitação reforça a necessidade de investigações que combinem modelagem numérica e condições climáticas reais para avaliar de forma mais consistente a estabilidade de taludes de barragens de terra.

3 MÉTODO

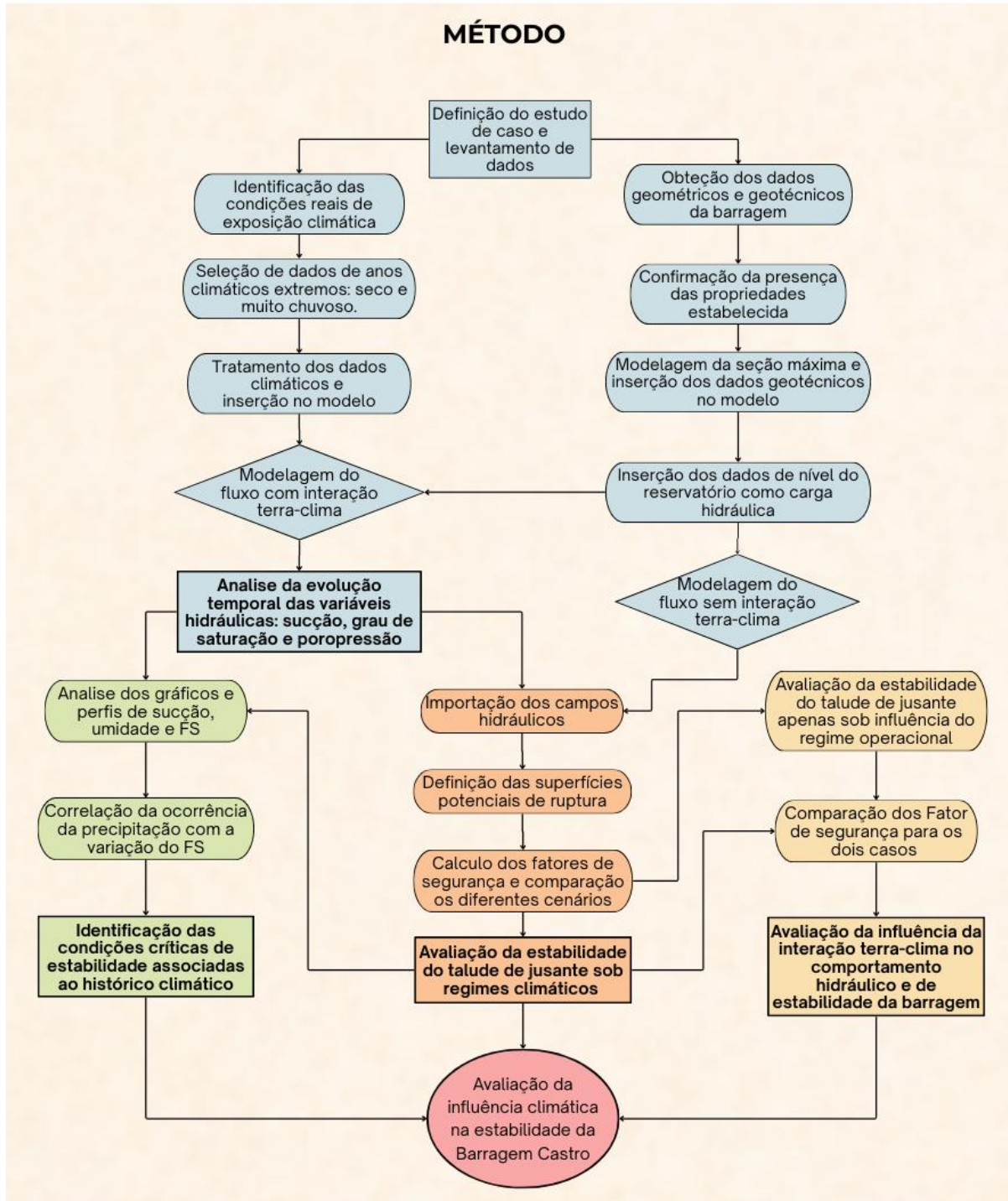
3.1 Estrutura metodológica da pesquisa

A metodologia adotada neste trabalho foi concebida de forma integrada e sequencial, com o objetivo de avaliar a influência das condições climáticas na estabilidade de uma barragem de terra inserida em ambiente semiárido. O procedimento metodológico articula a caracterização do empreendimento, a definição de cenários climáticos contrastantes, a modelagem do fluxo não saturado sob regime transiente e a análise da estabilidade dos taludes, buscando representar de maneira mais realista a interação entre os processos climáticos, hidráulicos e geotécnicos atuantes no maciço.

A organização do método foi estruturada de modo a estabelecer uma relação direta entre as etapas analíticas desenvolvidas e os objetivos específicos da pesquisa. As fases iniciais concentram-se no levantamento e tratamento dos dados geométricos, geotécnicos e climáticos, seguidas pela modelagem numérica do fluxo com acoplamento terra-clima e pela avaliação da resposta hidráulica do talude ao longo do tempo. A partir desses resultados, são realizadas as análises de estabilidade e as comparações entre diferentes cenários, culminando no atendimento ao objetivo geral do estudo.

A Figura 11 apresenta o fluxograma metodológico adotado, no qual os blocos iniciais e intermediários representam as etapas operacionais do método, enquanto os blocos finais correspondem aos objetivos específicos alcançados a partir dessas análises. O elemento final em destaque sintetiza o objetivo geral da pesquisa, evidenciando a lógica sequencial e integrada utilizada para conduzir o estudo.

Figura 11 – Fluxograma metodológico adotado para o estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nessa estrutura metodológica, as subseções seguintes apresentam, de forma detalhada, os procedimentos adotados em cada etapa, iniciando-se pela caracterização do empreendimento selecionado como estudo de caso.

3.2 Barragem Castro

3.2.1 Localização e acesso

Para a realização deste trabalho, a Barragem Castro foi escolhida como estudo de caso. A Barragem Castro é um empreendimento hídrico localizado no município de Itapiúna, no estado do Ceará, integrante da bacia hidrográfica metropolitana. O barramento intercepta o Rio Castro e constitui uma das principais infraestruturas de regularização hídrica da região, sendo responsável pelo abastecimento de diversos municípios do Maciço de Baturité e áreas adjacentes. Situa-se na zona urbana do município de Itapiúna–CE, com acesso principal a partir da rodovia estadual CE-060. A estrutura encontra-se implantada a aproximadamente 3 km do centro urbano, na ombreira esquerda do barramento. As coordenadas geográficas do local são 4°33'55.6"S e 38°55'51.3"W, correspondentes ao sistema de coordenadas geográficas, e, em sistema UTM (Zona 24M), E = 507.202 m e N = 9.495.552 m de acordo com dados fornecidos do projeto executivo.

As Figuras 12, 13, apresentadas a seguir, ilustraram o acesso e a localização da referida obra, dentro do contexto estadual e municipal.

Figura 12 – Localização no contexto estadual.



Fonte: IBGE, 2025.

Figura 13 – Localização no contexto municipal.



Fonte: Adaptado da SOP-CE, (2025)

3.2.2 Histórico e finalidade do empreendimento

As obras da Barragem Castro tiveram início em junho de 1995 e foram concluídas em agosto de 1996. Atualmente, a operação e manutenção do açude são realizadas pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH).

O projeto executivo foi elaborado pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), tendo como finalidade principal o abastecimento público de água dos municípios de Itapiúna, Capistrano, Aracoiaba e distritos vizinhos. De forma complementar, o reservatório atende aos usos de irrigação, piscicultura, lazer e controle de cheias, promovendo o desenvolvimento socioeconômico regional.

3.2.3 Características físicas da barragem

A Barragem Castro é classificada como uma barragem de terra homogênea, dotada de filtro vertical de areia e tapete drenante horizontal. A estrutura principal apresenta as seguintes características geométricas:

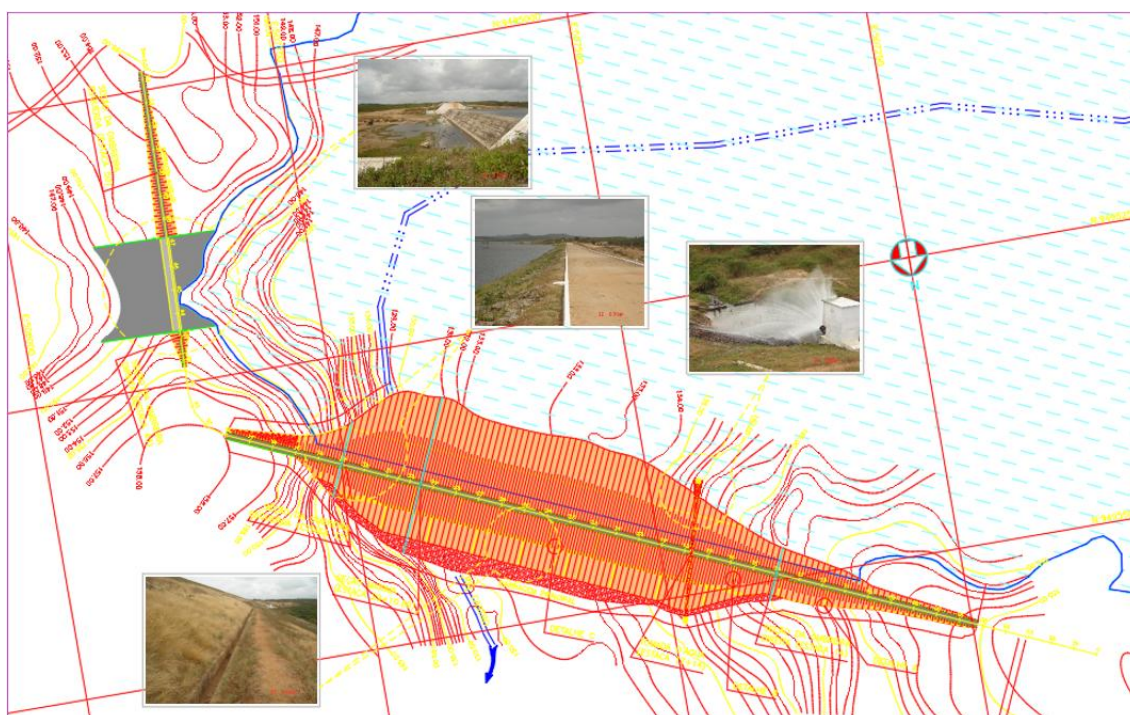
- **Altura máxima:** 24,39 m
- **Extensão do coroamento:** 656,00 m
- **Largura do coroamento:** 6,00 m
- **Cota do coroamento:** 154,70 m
- **Largura máxima da base:** 128,28 m

Os taludes da barragem apresentam inclinação variável, sendo no talude de montante

1:3 (V:H) até a cota 142,00 m e 1:2,5 (V:H) até a crista. No talude de jusante, a inclinação é de 1:2,5 (V:H) até a berma intermediária na cota 144,50 m e 1:2 (V:H) até a crista. O talude de montante é protegido por enrocamento do tipo “*rip-rap*” com espessura de 0,40 m e transição de 0,20 cm até a cota 142,00 e apenas enrocamento de pedra até a crista, enquanto o talude de jusante apresenta proteção vegetal.

O maciço principal possui volume aproximado de 480.701 m³. Complementarmente, existe uma barragem auxiliar localizada no prolongamento da ombreira direita, com altura máxima de 5,75 m, extensão de 252,00 m e largura de crista de 3,00 m, incorporando o sangradouro do sistema. A figura 14 apresenta um arranjo geral da barragem.

Figura 14 – Arranjo do Açude Castro.

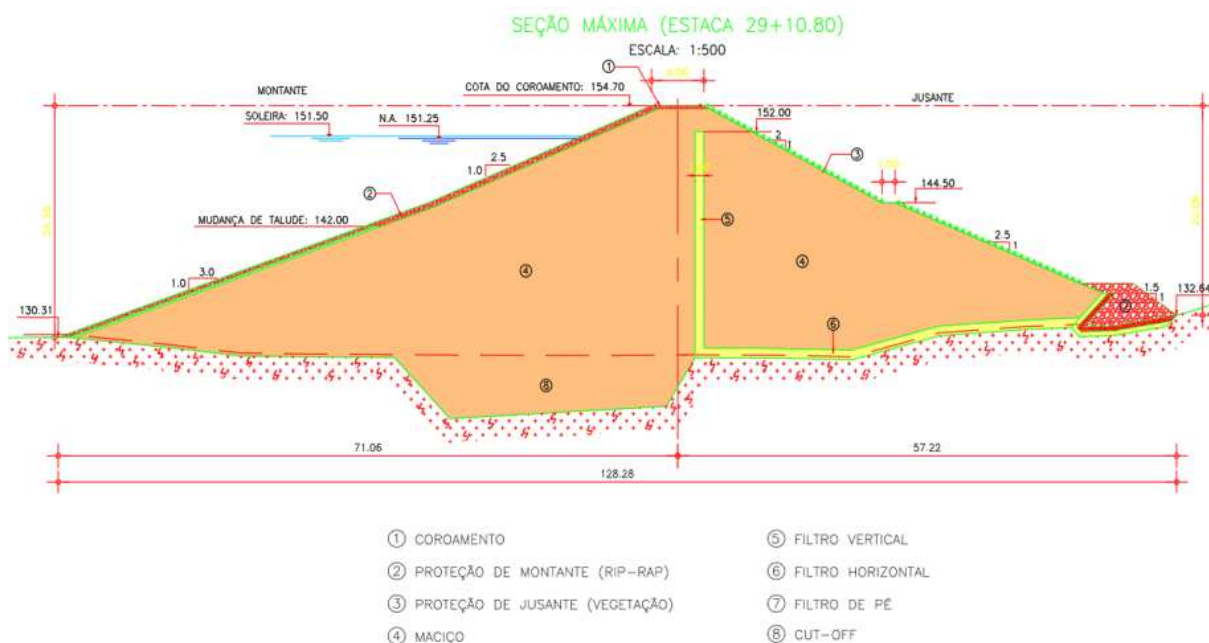


Fonte: Projeto *as built*, (2025).

3.2.4 Seção transversal típica

A seção transversal típica da Barragem Castro é composta por maciço de terra homogênea, filtro vertical de areia, tapete drenante horizontal e sistemas de drenagem superficial. A Figura 15 apresenta a seção máxima da barragem, conforme desenhos executivos do projeto *as built*, evidenciando os taludes, o sistema de drenagem interna e as proteções superficiais.

Figura 15 – Seção transversal máxima (Projeto as built).



Fonte: Projeto *as built*, (2025).

3.2.5 Características hidrológicas do reservatório

O reservatório da Barragem Castro apresenta as seguintes características hidrológicas:

- **Capacidade total de armazenamento:** 63,90 hm³
- **Volume morto:** 4,30 hm³
- **Área da bacia hidráulica:** 753 ha
- **Área da bacia hidrográfica de contribuição:** 359,83 km²
- **Precipitação média anual:** 801,4 mm
- **Evaporação média anual:** 2.235,3 mm
- **Volume médio afluente anual:** 28,92 hm³
- **Coefficiente de escoamento superficial:** 10,03%
- **Vazão regularizada:** 0,55 m³/s

Esses parâmetros refletem o comportamento hidrológico típico de regiões semiáridas, com elevada evaporação potencial e forte variabilidade sazonal das afluências

3.2.6 Vertedouro e tomada d'água

O vertedouro da Barragem Castro é do tipo canal natural escavado, com soleira em perfil Creager, incorporado à barragem auxiliar. O sangradouro possui largura de 80,00 m, cota da soleira na elevação 151,50 m e lâmina máxima de projeto de 1,33 m, resultando em uma

revanche de 3,20 m.

A tomada d'água localiza-se na seção esquerda da barragem, na estaca 17+14,00, sendo constituída por uma galeria em concreto armado com tubulação circular em aço carbono de diâmetro nominal de 800 mm. A estrutura possui comprimento total de 123,37 m, torre de controle a montante com altura de 20,50 m e sistema de controle composto por comporta a montante e válvula dispersora de pressão a jusante, permitindo uma vazão regularizada de 0,55 m³/s

3.3 Caracterização Climática da Região

A caracterização climática da área de influência da Barragem Castro foi realizada com o objetivo de descrever o regime atmosférico regional e definir as variáveis climáticas de entrada utilizadas na modelagem numérica de fluxo não saturado por meio da ferramenta Terra-Clima. O enfoque foi direcionado à variabilidade temporal das precipitações e da evaporação, parâmetros diretamente responsáveis pela alternância entre processos de umedecimento e secagem dos taludes em regiões semiáridas.

A área de estudo insere-se no domínio climático do semiárido nordestino, caracterizado por elevada irregularidade espacial e temporal das chuvas, longos períodos de estiagem e altas taxas de evaporação potencial, condições que exercem influência direta sobre o comportamento hidráulico de barragens de terra.

3.3.1 Fontes dos dados climáticos

Os dados climáticos utilizados neste estudo foram obtidos a partir de bases oficiais, selecionadas de modo a garantir representatividade regional e consistência temporal para os anos analisados.

Os dados de precipitação pluviométrica foram obtidos junto à FUNCEME, utilizando-se o posto pluviométrico ITAPIÚNA (ID 69), localizado no município de Itapiúna-CE, pertencente à região hidroclimática metropolitana, com coordenadas geográficas aproximadas de latitude 4,5830° S e longitude 38,9500° W. A escolha dessa estação justifica-se por se tratar do posto pluviométrico mais próximo da Barragem Castro, sendo, portanto, o mais representativo das condições locais de precipitação. Foram utilizadas séries temporais diárias, posteriormente agregadas em intervalos semanais, de modo a compatibilizar os dados com a discretização temporal adotada no módulo Terra-Clima.

Os dados de evaporação e variáveis meteorológicas complementares foram obtidos a partir da estação do INMET localizada no município de Quixeramobim–CE. A escolha dessa estação baseou-se na proximidade geográfica com Itapiúna, na similaridade climática regional e, principalmente, na disponibilidade contínua e confiável de dados para os anos extremos selecionados.

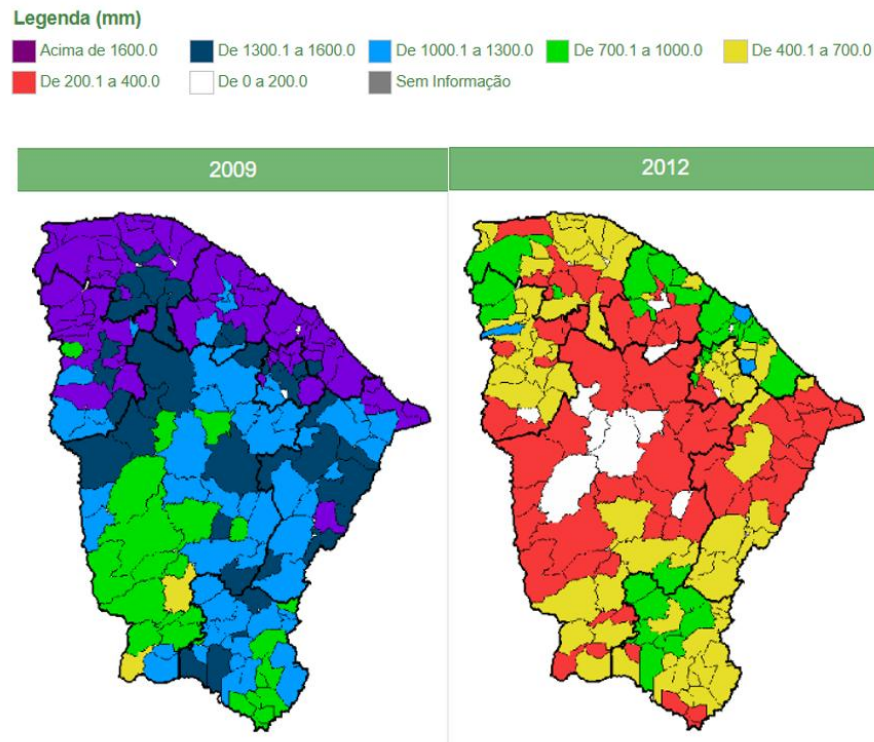
3.3.2 Seleção dos anos climáticos extremos

Com o intuito de avaliar a resposta hidráulica do talude sob condições contrastantes, foram selecionados dois anos hidrológicamente extremos:

- Ano de 2009, caracterizado por precipitações significativamente acima da média histórica regional, representando um cenário úmido com maior potencial de infiltração e elevação da linha de saturação;
- Ano de 2012, reconhecido como um período de seca extrema no semiárido nordestino, marcado por baixos totais pluviométricos e intensificação dos processos de secagem do solo.

A Figura 16 apresenta a chuva máxima anual por município no estado do Ceará para os anos de 2009 e 2012, com base nos dados do calendário de chuvas da FUNCEME. Essa representação espacial foi utilizada para contextualizar a variabilidade pluviométrica regional associada aos anos selecionados, evidenciando os contrastes entre um período hidrológicamente úmido e um período de seca severa. As informações apresentadas subsidiam a definição dos cenários climáticos adotados na modelagem numérica, especialmente no que se refere à imposição das condições de contorno climáticas no módulo Terra-Clima.

Figura 16 – Chuva máxima por município – 2009 e 2012.

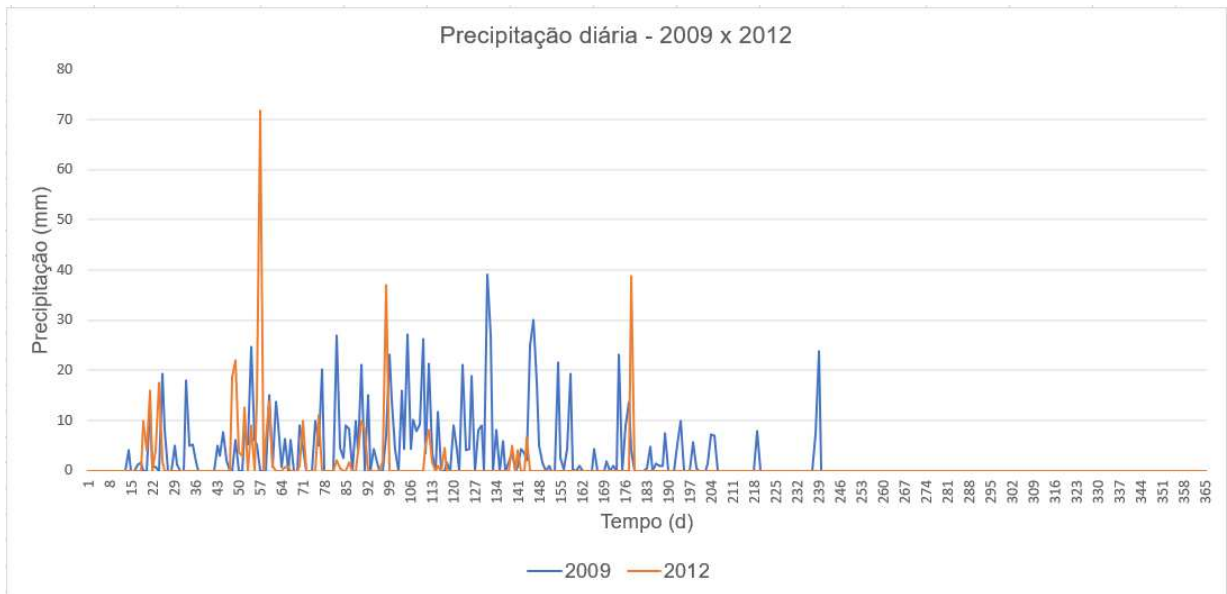


Fonte: Adaptado do calendário de chuvas FUNCEME, (2025).

A escolha desses anos permite analisar a influência da variabilidade climática sobre o regime de fluxo não saturado, abrangendo situações críticas tanto de excesso quanto de deficiência hídrica.

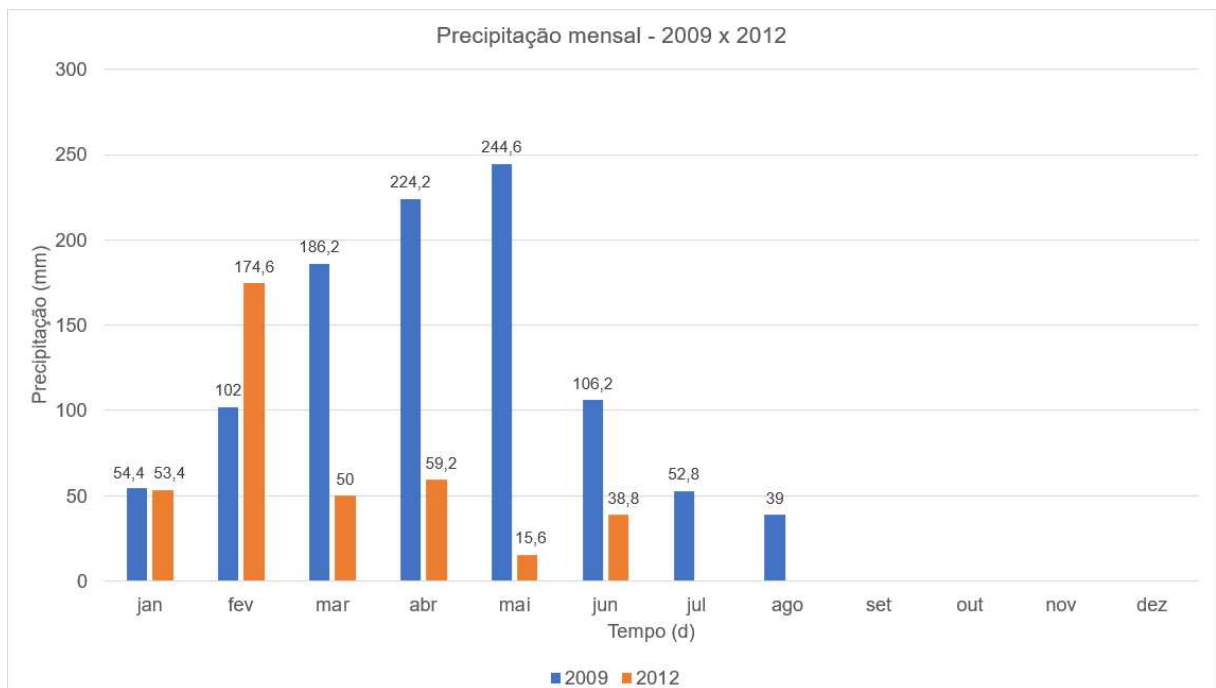
A Figura 17 apresenta a série temporal de precipitação diária, obtida a partir dos dados observados da estação meteorológica da FUNCEME, para os anos de 2009 e 2012. Os registros evidenciam diferenças significativas no comportamento pluviométrico entre os dois períodos, com maior frequência e intensidade de eventos diários em 2009 quando comparado a 2012. Complementarmente, a Figura 18 mostra a precipitação mensal acumulada, também com base nos dados observados, destacando volumes mensais mais elevados em 2009 e totais reduzidos e irregularmente distribuídos ao longo do ano de 2012.

Figura 17 – Gráfico de precipitações diárias para os anos de 2009 e 2012.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – Gráfico de precipitações mensais para os anos de 2009 e 2012.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O total anual de precipitação registrado em 2009 foi de 1009,4 mm, enquanto em 2012 o acumulado foi significativamente inferior, atingindo 391,6 mm, caracterizando este último como um ano notadamente mais seco. Entretanto, apesar do menor volume anual, o ano de 2012 apresentou um mês de fevereiro mais chuvoso em comparação a 2009, com precipitação mensal

de 174,6 mm, frente a 102,0 mm observados em fevereiro de 2009. Esse comportamento esteve associado principalmente à ocorrência de um evento pluviométrico pontual, registrado em 26 de fevereiro de 2012, quando foi observado o maior valor de precipitação diária do período analisado, com acumulado de 71,8 mm, evidenciando a elevada irregularidade temporal das chuvas em ambientes semiáridos.

3.3.3 Organização dos dados climáticos

Os dados de precipitação provenientes da FUNCEME foram organizados em séries temporais diárias e posteriormente convertidos para valores semanais acumulados, de modo a compatibilizar a escala temporal com a modelagem numérica transiente. Esse procedimento reduz oscilações de curta duração e favorece a estabilidade numérica das simulações.

Os dados climáticos necessários à modelagem atmosférica foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), compreendendo séries de temperatura do ar, precipitação pluviométrica, umidade relativa do ar, velocidade do vento, insolação e evapotranspiração potencial. As variáveis originalmente disponibilizadas em diferentes escalas temporais foram padronizadas para compatibilização com o módulo Terra-Clima. Em particular, os dados de evaporação e evapotranspiração potencial, fornecidos em base mensal, foram interpolados para escala diária por meio de procedimentos de distribuição temporal uniforme, conforme prática corrente em estudos de balanço hídrico e modelagem climática aplicada à geotecnia. Quando necessário, variáveis climáticas auxiliares, como temperatura do ar, umidade relativa, foram utilizadas de forma indireta no cálculo da evaporação potencial, conforme as metodologias adotadas pelo próprio INMET.

3.3.4 Representatividade climática dos dados adotados

Embora os dados de evaporação tenham sido obtidos a partir da estação de Quixeramobim–CE, essa escolha é considerada adequada, uma vez que o município apresenta condições climáticas típicas do semiárido cearense, com regime pluviométrico, temperaturas médias e evaporação potencial semelhantes às observadas na região de Itapiúna. Além disso, a distância relativamente reduzida entre os municípios e a inexistência de estações evaporimétricas completas em Itapiúna reforçam a validade da adoção desses dados como representativos da área de estudo.

Dessa forma, a combinação de dados pluviométricos locais (FUNCEME – Itapiúna) com dados evaporimétricos e meteorológicos regionais (INMET – Quixeramobim) assegura

uma caracterização climática consistente e adequada aos objetivos da modelagem numérica proposta.

3.4 Análises numéricas

3.4.1 Caracterização geral da abordagem metodológica

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se na integração entre modelagem climática, análise de fluxo não saturado e análise de estabilidade de taludes, com o objetivo de representar de forma mais realista o comportamento hidrológico e mecânico de taludes de solos granulares em regiões semiáridas. Essa abordagem fundamenta-se no entendimento de que as condições climáticas exercem influência direta sobre o regime de sucção matricial, a redistribuição de umidade no solo e, conseqüentemente, sobre a estabilidade do maciço ao longo do tempo.

Diferentemente de análises convencionais em regime permanente, optou-se pela utilização de simulações transientes, capazes de representar a variabilidade temporal das ações climáticas, como períodos prolongados de estiagem e eventos concentrados de precipitação. Dessa forma, o procedimento metodológico foi estruturado de modo sequencial, iniciando-se pela definição geométrica e caracterização dos materiais, passando pela modelagem do fluxo não saturado sob condições climáticas variáveis e culminando na avaliação da estabilidade do talude em diferentes instantes dos períodos analisados.

As análises numéricas foram realizadas com o auxílio do pacote GeoStudio 2025, utilizando-se os módulos SEEP/W, interação Terra-Clima e SLOPE/W, de forma integrada, garantindo consistência entre o campo hidráulico simulado e as análises de estabilidade subsequentes.

O módulo SEEP/W foi empregado para a simulação do fluxo de água no maciço em regime saturado e não saturado, permitindo a avaliação da evolução temporal das poro-pressões e da sucção matricial no interior do solo. As condições climáticas foram representadas por meio da interação terra-clima implementada no módulo SEEP/W, utilizando-se séries temporais reais de precipitação e evaporação. Esses dados foram aplicados diretamente como condições de contorno na superfície do talude, permitindo a simulação transiente da infiltração e da resposta hidráulica do solo ao longo do período analisado. A partir dos campos hidráulicos obtidos, as análises de estabilidade foram conduzidas no módulo SLOPE/W, que utiliza métodos de equilíbrio limite para o cálculo do fator de segurança, incorporando diretamente as distribuições de poro-pressão resultantes das análises de fluxo. Esse procedimento integrado

permitiu a avaliação da estabilidade dos taludes em regime transiente, considerando explicitamente a influência da evolução hidráulica no comportamento mecânico do maciço.

Adicionalmente, com o objetivo de avaliar a influência da consideração explícita das condições climáticas na estabilidade dos taludes, foram realizadas análises comparativas de estabilidade sem a aplicação da interação terra-clima no módulo SEEP/W. Nesses casos, as análises foram conduzidas assumindo condições hidráulicas simplificadas, permitindo a comparação direta entre os resultados obtidos com e sem a consideração dos efeitos transientes de infiltração. Essa abordagem possibilitou isolar o impacto da evolução climática e hidráulica no fator de segurança, evidenciando a relevância da modelagem transiente na representação do comportamento real do maciço.

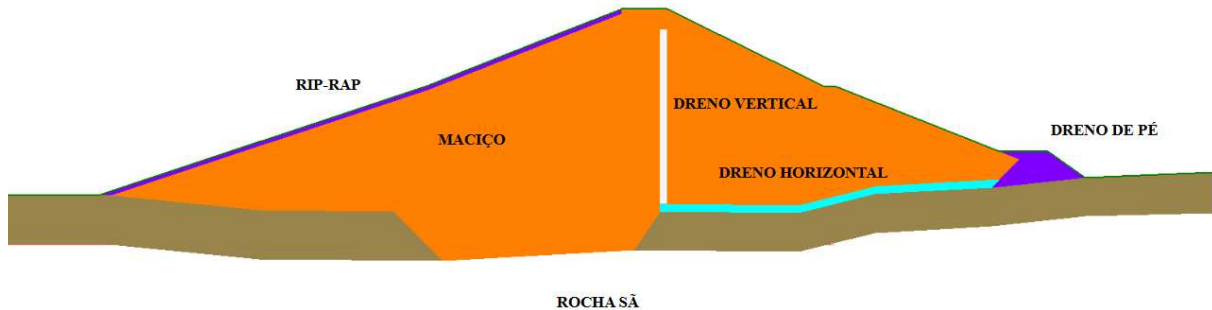
3.4.2 Definição da geometria e da seção típica analisada

A geometria do modelo numérico foi definida com base nas análises correspondentes à seção máxima da Barragem Castro, mostrada na Figura 19, escolhida de modo a reproduzir adequadamente as condições geométricas e construtivas predominantes no maciço. A adoção de uma seção típica bidimensional baseia-se na hipótese de deformação plana, amplamente empregada em estudos de fluxo e estabilidade de barragens de terra e taludes extensos.

A seção considerada contempla o talude propriamente dito, bem como as diferentes camadas de solo constituintes e, quando aplicável, os elementos de drenagem interna. Para fins de modelagem numérica, cada material foi considerado homogêneo dentro de sua respectiva região, hipótese que permite reduzir a complexidade do modelo sem comprometer a representatividade global do comportamento hidráulico do maciço.

Essa simplificação é justificada pelo foco do estudo estar direcionado à influência das variações climáticas na resposta global do talude, e não à investigação de heterogeneidades locais de pequena escala. A geometria definida constitui, portanto, a base física sobre a qual todas as etapas subsequentes da modelagem numérica foram desenvolvidas.

Figura 19 – Seção adotada nas análises de fluxo.

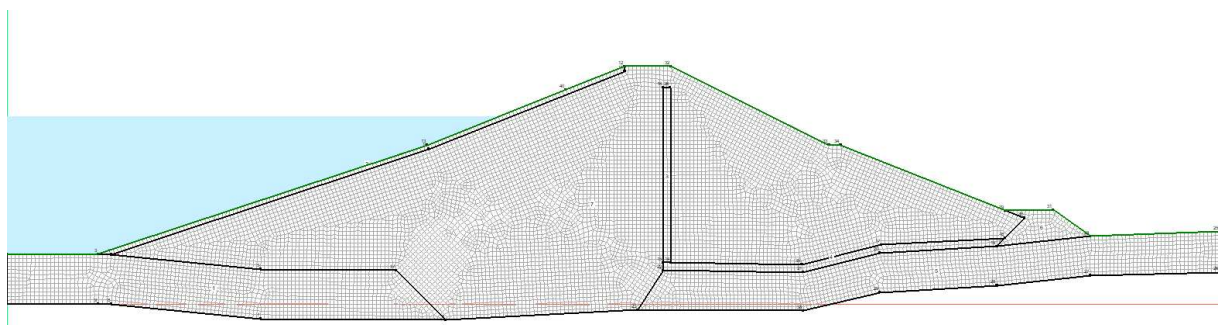


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.3 Discretização do domínio e malha de elementos finitos

Após a definição da geometria da Barragem Castro, procedeu-se à discretização do domínio por meio de uma malha bidimensional composta por 10.610 elementos finitos, com tamanho global característico de 0,5 m, gerada automaticamente pelo módulo SEEP/W. A malha foi distribuída de forma predominantemente uniforme ao longo do domínio analisado. Foram adotados elementos predominantemente quadrangulares, com a utilização pontual de elementos triangulares, de modo a assegurar melhor adaptação à geometria irregular do talude, sobretudo nas regiões caracterizadas por múltiplos nós e acentuadas variações geométricas. A Figura 20 ilustra a malha de elementos finitos adotada no modelo.

Figura 20 – Malha de Elementos Finitos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.4 Caracterização hidráulica dos materiais

A caracterização hidráulica dos materiais constituintes do talude fundamentou-se na

definição da condutividade hidráulica saturada e na representação do comportamento hidráulico em condições não saturadas, por meio das curvas características de retenção de água no solo. Reconhece-se que, em solos não saturados, a permeabilidade não pode ser considerada constante, uma vez que varia significativamente em função do teor de umidade volumétrico e da sucção matricial atuante no meio poroso, sendo indispensável sua adequada representação em análises de fluxo transiente.

Do ponto de vista físico, o solo é constituído por partículas sólidas interligadas por vazios intersticiais, os quais podem estar preenchidos por água, ar ou por uma combinação de ambas as fases. À medida que a sucção matricial aumenta, ocorre a substituição progressiva da água por ar nos vazios, reduzindo a continuidade da fase líquida e, conseqüentemente, a capacidade de escoamento do solo. Em contrapartida, na condição de sucção nula, o solo encontra-se totalmente saturado, sendo a condutividade hidráulica definida pela permeabilidade saturada, usualmente adotada como parâmetro de referência nos modelos hidráulicos.

A determinação do teor de umidade volumétrico inicial do solo baseou-se em parâmetros físicos obtidos a partir de ensaios laboratoriais disponibilizados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH), assegurando a representatividade das condições reais do material empregado no talude. Para esse procedimento, foram considerados a massa específica seca do solo, $\gamma_d = 18,32 \text{ kN/m}^3$, e o teor de umidade gravimétrico, $w = 15,43\%$. O índice de vazios foi estimado a partir da relação entre a massa específica dos sólidos, adotada como $\gamma_s = 27,0 \text{ kN/m}^3$, valor característico de solos arenosos, e a massa específica seca, conforme a Equação (6).

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (6)$$

Substituindo-se os valores adotados, obteve-se:

$$e = \frac{27,0}{18,32} - 1 = 0,474 \quad (6.1)$$

A partir do valor do índice de vazios, determinou-se a porosidade do solo, assumida como equivalente ao teor de umidade volumétrico na condição saturada, de acordo com a Equação (7).

$$\theta = n = \frac{e}{1 + e} \quad (7)$$

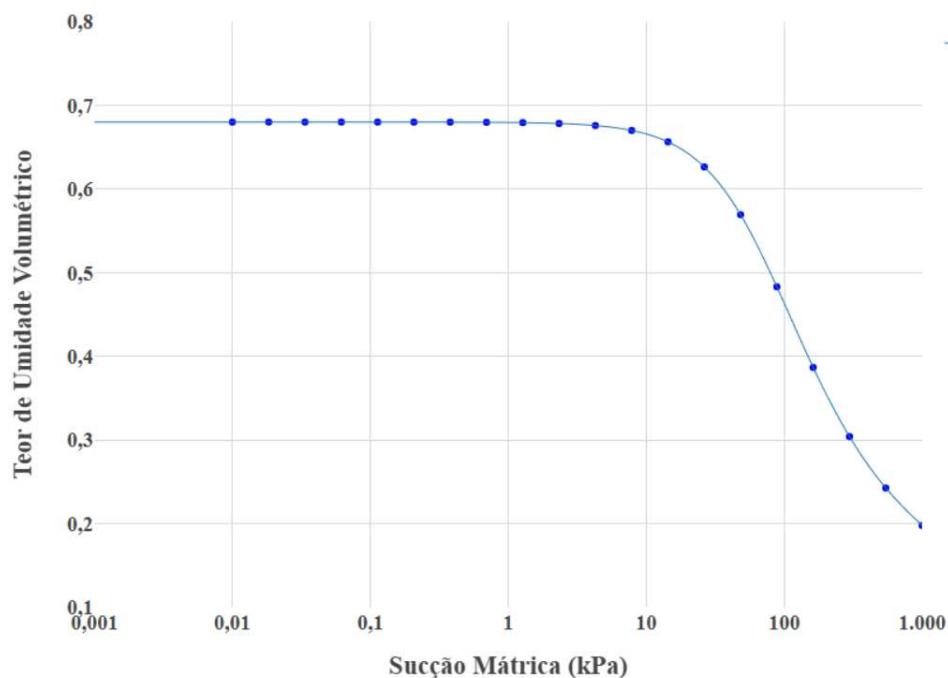
Resultando em:

$$\theta = n = \frac{0,474}{1 + 0,474} = 0,678 \quad (7.1)$$

O valor obtido para o teor de umidade volumétrico saturado (θ_s) foi utilizado como

parâmetro de entrada no módulo SEEP/W, servindo como condição inicial para a definição do estado de umidade do solo e para a construção da curva característica de retenção de água. A curva característica, gerada no próprio ambiente do programa a partir dos parâmetros hidráulicos adotados, possibilita a representação contínua da transição entre os estados saturado e não saturado, sendo fundamental para a correta simulação do fluxo em meio poroso e da variação da condutividade hidráulica em função da sucção matricial. A Figura 21 apresenta o gráfico da curva característica utilizada nas simulações.

Figura 21 – Gráfico da curva característica de retenção de água.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do conhecimento da permeabilidade saturada e da curva característica de retenção de água, foram definidas as funções $k(\psi)$, que descrevem a variação da condutividade hidráulica em função da sucção matricial. No módulo SEEP/W, essas funções são estimadas por meio de uma formulação integral que combina a curva característica do solo com o coeficiente de permeabilidade saturada, resultando em uma relação não linear entre permeabilidade e sucção. Essa abordagem permite ao modelo numérico simular de forma consistente o fluxo de água em condições parcialmente saturadas, capturando a redução progressiva da permeabilidade à medida que o solo se dessatura.

A expressão geral utilizada pelo programa para o cálculo da permeabilidade não saturada é apresentada na Equação (3) proposta por Fredlund *et al.* (1994), a qual relaciona o coeficiente de permeabilidade saturada, a sucção matricial e o teor de umidade volumétrico

obtido a partir da curva característica do solo:

$$k(\Psi) = k_s \frac{\int_{\ln(\Psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\Psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{aev}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (3)$$

Em que:

k = Permeabilidade não saturada (cm/s);

k_s = Permeabilidade saturada (cm/s);

Ψ_{aev} = Sucção de entrada de ar (kPa);

Ψ = Sucção (kPa);

$b = \ln(10^6)$;

θ = Teor de umidade volumétrico;

θ_s = Teor de umidade volumétrico saturado;

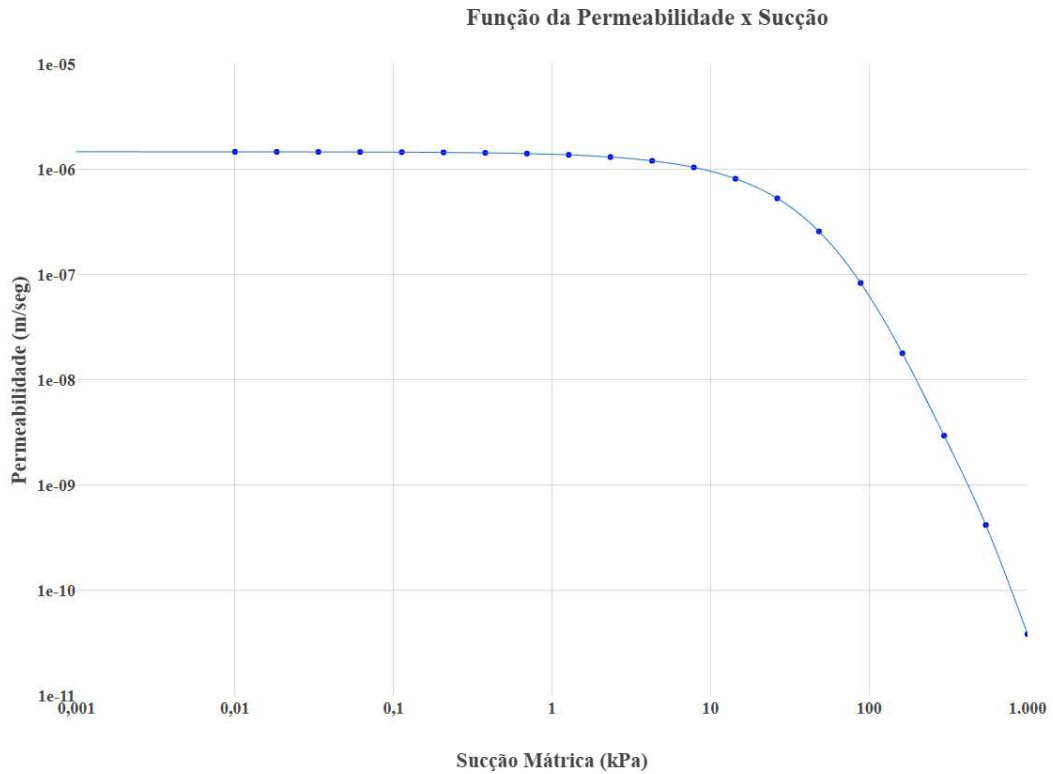
$e = 2,171828$;

y = Variável de integração que representa o logaritmo da sucção;

θ' = A primeira derivada da equação de Fredlund e Xing (1994) para a curva característica.

Com base nessa formulação, foi estimada a função de permeabilidade do solo compactado a partir da sua curva característica e do coeficiente de permeabilidade saturada $k=1,48 \times 10^{-6}$ m/s. A função foi definida para um intervalo de sucção variando de 0 a 1000 kPa, permitindo representar adequadamente a redução da permeabilidade à medida que o solo se torna progressivamente menos saturado. A Figura 22 ilustra a relação obtida entre a permeabilidade e a sucção matricial para o solo analisado.

Figura 22 – Gráfico da função da permeabilidade pela sucção para o solo compactado.



A análise da função apresentada evidencia que, para níveis elevados de sucção, ocorre uma diminuição significativa do coeficiente de permeabilidade, associada à maior presença de ar nos vazios e à redução da continuidade da fase líquida no meio poroso.

Em relação aos demais materiais constituintes do maciço da barragem, como o dreno vertical, o *rip-rap* e o *rockfill*, não se procedeu à definição de funções de permeabilidade dependentes da sucção. Esses materiais atuam predominantemente como elementos de drenagem interna e permanecem submetidos a baixos valores de sucção, o que justifica a adoção de coeficientes de permeabilidade constantes ao longo das análises.

No modelo hidráulico, o solo compactado foi considerado anisotrópico, adotando-se um coeficiente de permeabilidade horizontal nove vezes superior ao coeficiente de permeabilidade vertical, de modo a representar os efeitos do processo construtivo e da orientação preferencial dos vazios. Os demais materiais foram considerados isotrópicos, em função de sua natureza granulométrica e do seu comportamento hidráulico predominantemente uniforme.

A Tabela 3 a seguir apresenta um resumo das propriedades hidráulicas dos materiais estudados.

Tabela 3 – Propriedades hidráulicas dos materiais

Solo	K_v (m/s)	K_v/ K_x		Função de Permeabilidade
Solo Compactado	1.48×10^{-6}	0,11	Anisotrópico	Não Linear
Dreno vertical	1.0×10^{-4}	1.00	Isotrópico	Linear
Dreno horizontal	1.0×10^{-4}	1.00	Isotrópico	Linear
Aluvião	1.0×10^{-5}	1.00	Isotrópico	Linear
Enrocamento	1.0×10^{-3}	1.00	Isotrópico	Linear

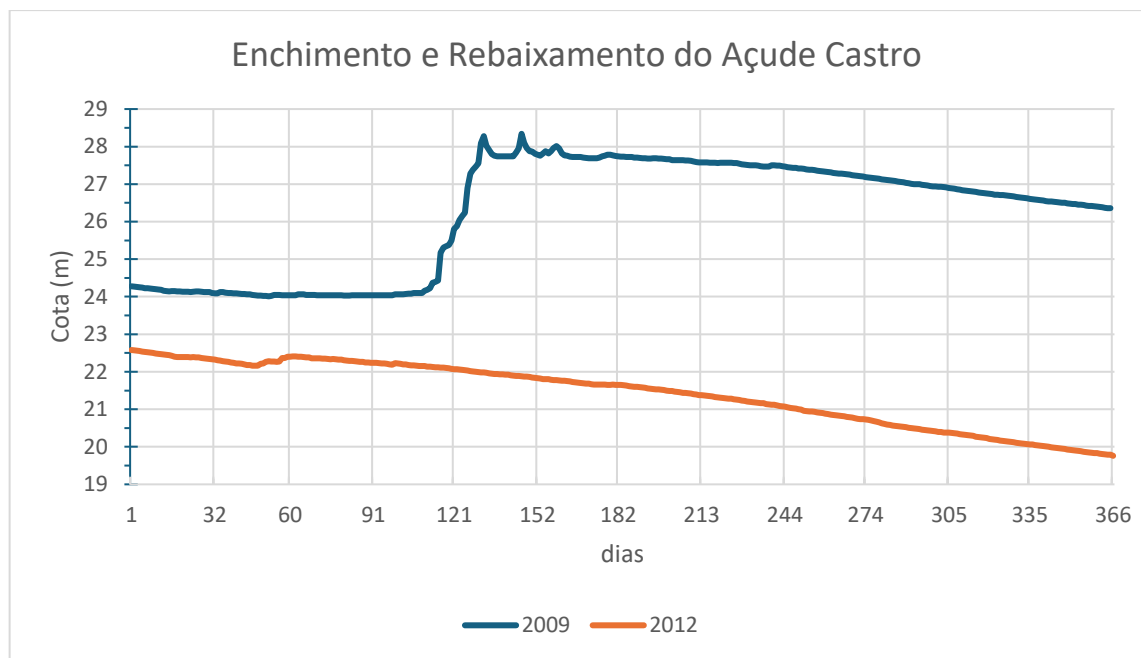
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.5 Condições de contorno

As condições de contorno adotadas nas análises de fluxo em regime transiente foram definidas de modo a representar a variação temporal das cargas hidráulicas atuantes no maciço, bem como os efeitos das ações climáticas incidentes sobre a superfície do talude. Essas condições contemplam tanto as flutuações do nível d'água do reservatório ao longo dos processos de enchimento e esvaziamento, quanto a atuação conjunta da precipitação, temperatura, evaporação e umidade durante os períodos característicos de estação chuvosa e de estiagem.

O processo de enchimento do reservatório foi definido a partir da análise de informações operacionais históricas disponibilizadas pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), referentes aos anos de 2009 e 2012. A Figura 23 apresenta a variação do nível de água do reservatório ao longo do tempo para os períodos analisados, evidenciando as fases de enchimento e rebaixamento observadas em cada ano. Essas variações exercem influência direta nas condições de contorno hidráulicas impostas ao modelo numérico, uma vez que o nível do reservatório controla a distribuição das pressões da água nos poros no interior do maciço durante as análises de fluxo e estabilidade.

Figura 23 - Gráfico de enchimento e rebaixamento do Açude Castro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.6 Tratamento e integração dos dados climáticos

Os dados climáticos utilizados na modelagem foram obtidos a partir de bases oficiais, abrangendo precipitação pluviométrica, temperatura do ar, umidade relativa e evapotranspiração potencial. Essas variáveis foram selecionadas por influenciarem diretamente os processos de infiltração, evaporação e redistribuição de umidade no solo.

a) Precipitação

Os dados de precipitação pluviométrica utilizados na modelagem numérica foram obtidos junto à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), a partir da estação pluviométrica nº 69, localizada no município de Itapiúna-CE (latitude 4,5830° S e longitude 38,9500° W), pertencente à região Metropolitana e com status operacional ativo. Essa estação foi selecionada por ser a mais próxima da área de estudo, representando adequadamente as condições locais de chuva incidentes sobre o talude analisado.

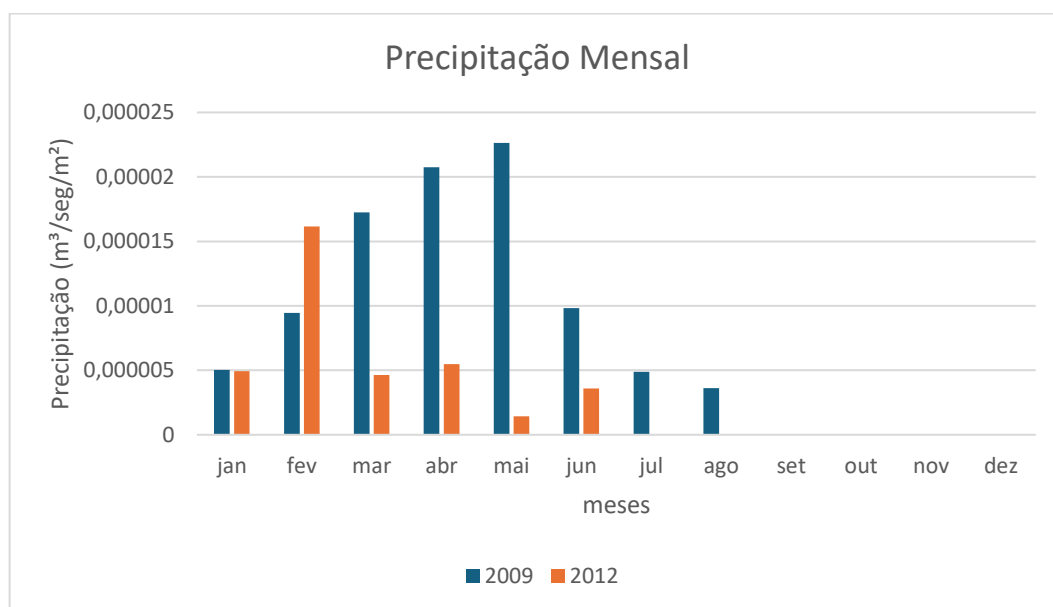
Foram utilizados dados diários de precipitação referentes aos anos de 2009 e 2012, escolhidos por apresentarem regimes pluviométricos contrastantes, característicos da variabilidade climática do semiárido cearense. Os dados originais foram disponibilizados em milímetros (mm), correspondendo à lâmina diária de precipitação acumulada.

Para a incorporação desses dados no módulo Terra-Clima, foi necessária a conversão das lâminas de precipitação para unidades compatíveis com o modelo de fluxo, expressas em

termos de vazão por área ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$). Considerando a natureza convectiva e concentrada das chuvas típicas do semiárido, adotou-se, para fins de modelagem, uma duração efetiva de precipitação de 3 horas por evento, valor amplamente empregado em estudos hidrológicos e geotécnicos para a representação de chuvas intensas na região. A conversão foi realizada distribuindo-se a lâmina diária de precipitação ao longo do período de 3 horas para uma área característica.

Com a finalidade de proporcionar melhor visualização e compreensão do comportamento pluviométrico após o tratamento e a conversão dos dados, as séries diárias de precipitação foram também organizadas na forma de acumulados mensais. Essa abordagem possibilitou evidenciar a distribuição temporal das chuvas ao longo dos anos analisados, bem como identificar os períodos de maior e menor concentração pluviométrica. Para esse propósito, foi elaborado um gráfico de precipitação acumulada mensal, como observado na Figura 24, referente aos anos de 2009 e 2012, os quais sintetizam o regime pluviométrico considerado nas análises numéricas.

Figura 24 – Gráfico de precipitações mensais referentes aos anos de 2009 e 2012.



Fonte: Elaborado pelo autor.

b) Temperatura

Os dados de temperatura do ar utilizados na modelagem foram obtidos a partir do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), compreendendo os valores diários de temperatura máxima (T_{\max}) e mínima (T_{\min}) referentes aos anos analisados. A consideração

dessa variável justifica-se por sua influência direta nos processos de evaporação e evapotranspiração, que condicionam a variação do teor de umidade e da sucção matricial em solos não saturados.

Com o objetivo de representar de forma mais conservadora e fisicamente coerente as condições críticas associadas aos eventos de precipitação, adotou-se um procedimento de ajuste da temperatura diária em função da intensidade relativa da chuva ocorrida. Esse procedimento baseia-se no fato de que, em regiões semiáridas, eventos de chuva mais intensos tendem a ocorrer sob condições atmosféricas menos quentes, enquanto dias secos estão geralmente associados a temperaturas próximas aos valores máximos diários.

Assim, a temperatura efetivamente incorporada ao modelo foi calculada a partir das relações apresentadas nas Equações (8) e (9). Inicialmente, determinou-se o fator adimensional f_i , que expressa a razão entre a precipitação diária observada (P_i) e a precipitação máxima registrada no mês correspondente (P_{max}):

$$f_i = \frac{P_i}{P_{max}} \quad (8)$$

Esse fator representa a relevância relativa do evento pluviométrico no contexto do regime mensal de chuvas, assumindo valores próximos de zero para dias secos ou com precipitação reduzida e valores próximos da unidade para eventos de maior intensidade.

A partir da determinação de f_i , a temperatura diária aplicada ao modelo (T_i) foi calculada conforme a Equação (5.4):

$$T_i = T_{max} - f_i \cdot \Delta T \quad (9)$$

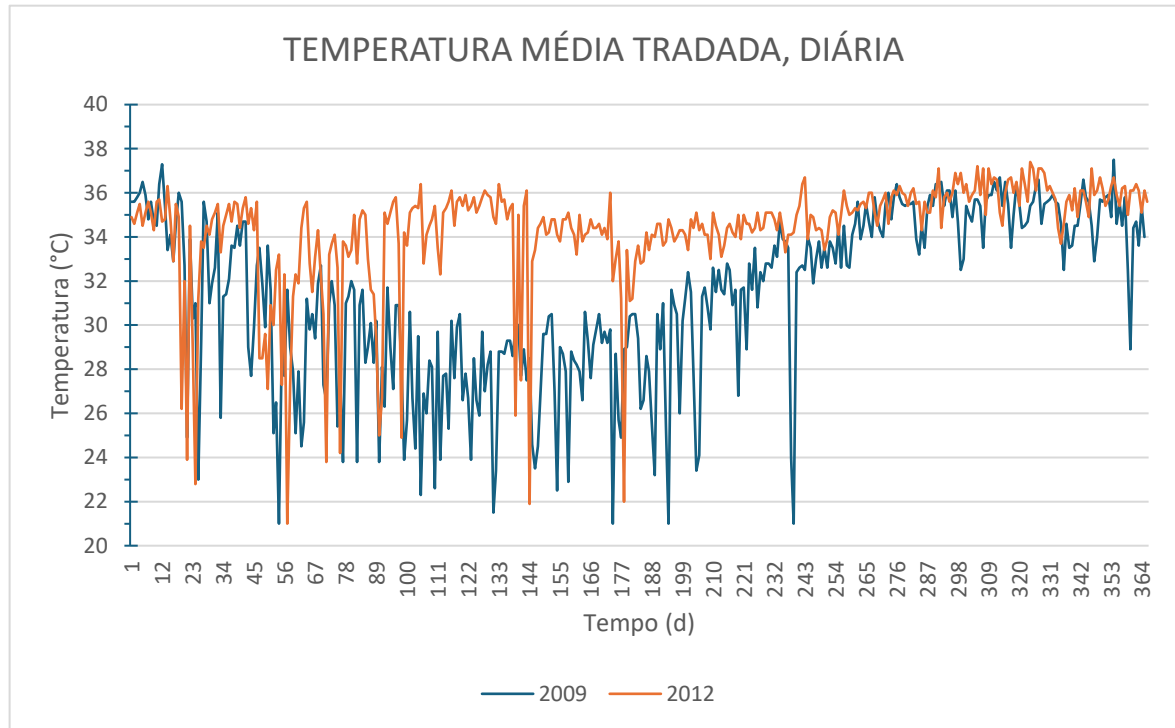
em que T_{max} corresponde à temperatura máxima diária registrada e ΔT representa a variação térmica diária, definida como a diferença entre as temperaturas máxima e mínima ($\Delta T = T_{max} - T_{min}$).

Esse procedimento permite ajustar a temperatura do ar de forma consistente com a ocorrência e a intensidade das chuvas, reduzindo os valores térmicos nos dias de precipitação mais significativa e mantendo temperaturas elevadas nos períodos secos. Dessa forma, o método possibilita uma representação mais realista da interação entre precipitação, temperatura e processos evaporativos, contribuindo para uma simulação mais adequada da evolução temporal do balanço hídrico superficial e da sucção matricial no interior do talude.

Com intuito de visualizar melhor o comportamento térmico após o tratamento dos dados, as séries de temperatura diária calculadas para os anos de 2009 e 2012 foram representadas graficamente. A Figura 25 apresenta a variação da temperatura média diária tratada ao longo dos respectivos anos, evidenciando as diferenças temporais associadas aos

regimes climáticos analisados. Essa representação gráfica possibilita a identificação de períodos de maior redução térmica associados à ocorrência de eventos pluviométricos mais intensos, bem como a predominância de temperaturas elevadas durante os intervalos secos, coerentemente com o procedimento adotado para a integração dos dados no modelo numérico.

Figura 25 – Gráfico com dados de temperatura tradados dos anos de 2009 e 2012.



Fonte: Elaborado pelo autor.

c) Evapotranspiração Potencial

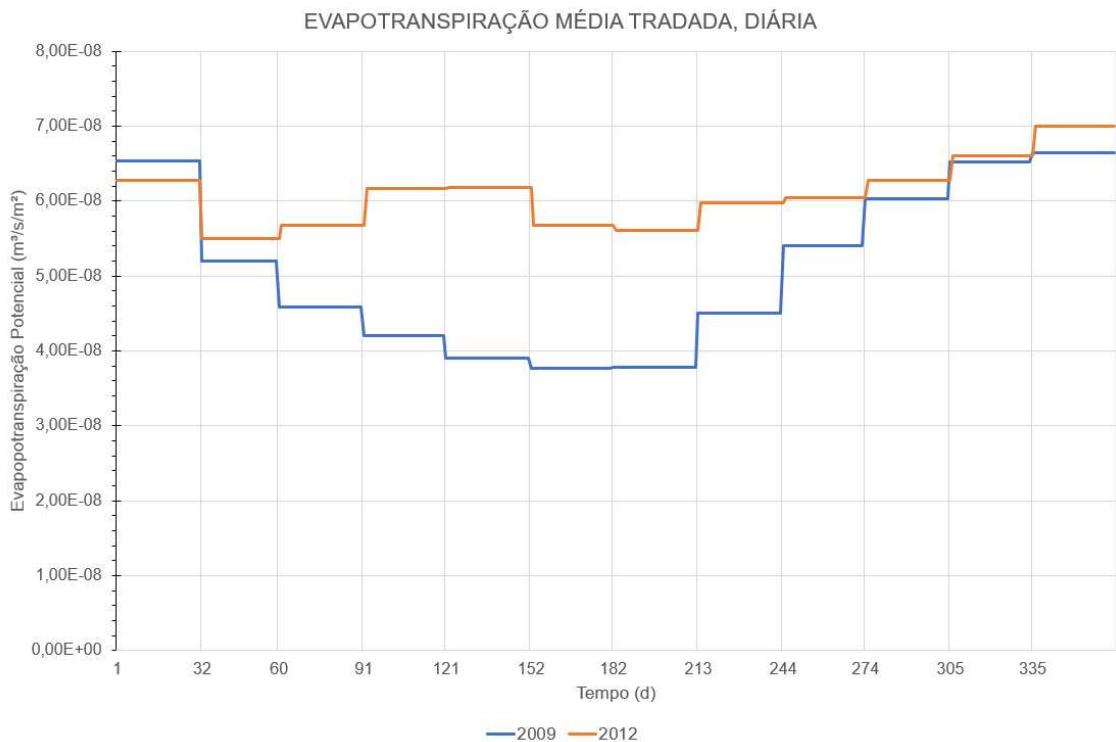
Os dados de evapotranspiração potencial utilizados na modelagem numérica foram obtidos a partir do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Diferentemente da precipitação pluviométrica, essa variável encontrava-se disponível apenas em escala mensal, expressa em milímetros (mm), exigindo procedimentos adicionais de tratamento para sua incorporação ao modelo de fluxo não saturado.

Inicialmente, os valores mensais de evapotranspiração potencial foram distribuídos temporalmente ao longo de cada mês, assumindo-se uma taxa média diária constante. Para isso, o valor mensal de evapotranspiração foi dividido pelo número de dias correspondente a cada mês, resultando em uma estimativa de evapotranspiração diária representativa do período analisado. Esse procedimento é amplamente empregado em estudos de balanço hídrico quando não se dispõe de dados diários, permitindo preservar os valores acumulados mensais

característicos do regime climático local.

Em seguida, os valores diários obtidos, originalmente expressos em milímetros, foram convertidos para unidades compatíveis com o módulo Terra-Clima, em termos de vazão por área ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$). Diferentemente do tratamento adotado para a precipitação, a evapotranspiração foi considerada como um processo contínuo ao longo do dia, sendo, portanto, distribuída uniformemente em um período de 24 horas. Os valores dos dados de evapotranspiração potencial adotados para o modelo podem ser observados na Figura 26.

Figura 26 – Gráfico com dados de evapotranspiração potencial dos anos de 2009 e 2012

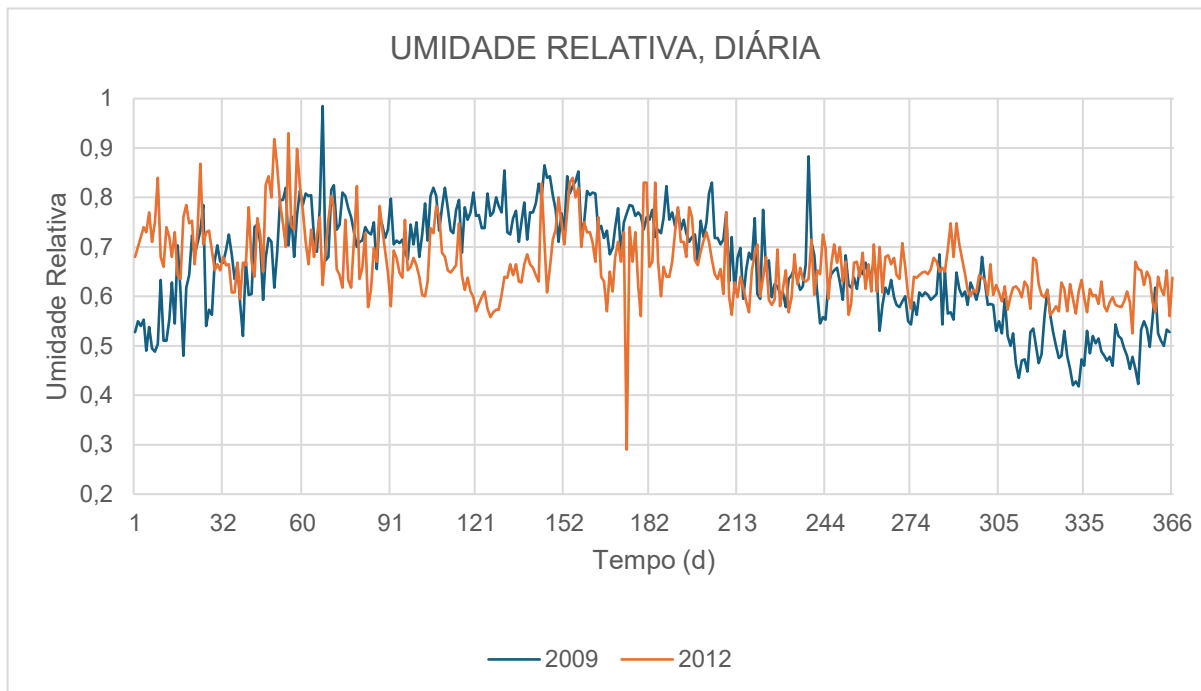


Fonte: Elaborado pelo autor.

d) Umidade

Os dados de umidade não necessitaram de um tratamento específico já que já são obtidos da forma que são integrados ao módulo. Os valores dos dados de umidade adotados para o modelo podem ser observados na Figura 27. Esse tratamento permitiu a integração adequada das variáveis climáticas ao módulo Terra-Clima, garantindo coerência entre os dados observados e as condições de contorno atmosféricas impostas ao modelo.

Figura 27 – Gráfico com dados de umidade relativa dos anos de 2009 e 2012.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.7 Modelagem do fluxo não saturado sob condições climáticas

A modelagem do fluxo de água no interior do talude foi realizada em regime transiente por meio do módulo SEEP/W, considerando explicitamente o comportamento hidráulico do solo em condições saturadas e não saturadas. As ações climáticas foram impostas como condições de contorno atmosféricas na superfície do talude por meio do módulo Terra-Clima, permitindo a simulação integrada dos processos de precipitação, evaporação e evapotranspiração ao longo do tempo.

A adoção de uma abordagem transiente possibilitou representar a evolução temporal do conteúdo de umidade, da sucção matricial e do campo de poro-pressões no maciço, capturando de forma mais realista os efeitos cumulativos dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem característicos de regiões semiáridas. Diferentemente de análises em regime permanente, essa abordagem permite avaliar não apenas estados extremos, mas também a resposta progressiva do sistema hidráulico frente à variabilidade climática.

As séries climáticas tratadas foram aplicadas como fluxos superficiais variáveis no tempo, enquanto as variações do nível do reservatório foram impostas como condições de carga hidráulica no talude de montante. Dessa forma, o modelo passou a representar simultaneamente os efeitos do aporte hídrico atmosférico e das flutuações do reservatório sobre o regime de

percolação no interior do maciço.

Como resultado dessa etapa, foram obtidos campos temporais de poro-pressão e sucção matricial para todos os instantes analisados, os quais serviram como base para a avaliação da estabilidade dos taludes. Esses campos hidráulicos foram exportados diretamente para o módulo SLOPE/W, garantindo consistência entre o comportamento hidráulico simulado e as análises mecânicas subsequentes.

3.4.8 Definição dos parâmetros geotécnicos para a análise de estabilidade

Os parâmetros geotécnicos empregados nas análises de estabilidade dos taludes foram definidos a partir da integração de resultados de ensaios geotécnicos previamente realizados, informações construtivas da barragem e valores de referência amplamente consolidados na literatura técnica. Tal procedimento mostrou-se necessário em razão da inexistência de um conjunto completo de ensaios laboratoriais representativos para todos os materiais constituintes do sistema analisado, prática recorrente em estudos de modelagem numérica e retroanálise geotécnica.

Os ensaios disponíveis indicaram que o solo utilizado na construção do maciço da barragem apresenta classificação predominantemente SC (areia argilosa), conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). Dessa forma, os parâmetros de resistência ao cisalhamento e de peso específico do maciço foram definidos com base nos resultados compilados por Carvalho (1983), oriundos de aproximadamente 1500 ensaios realizados pelo *U.S. Bureau of Reclamation* (USBR), os quais fornecem faixas representativas de comportamento mecânico para solos compactados empregados em barragens de terra. Esses resultados são apresentados na Tabela 3.2, a qual serviu de referência para a seleção dos parâmetros geotécnicos do solo do maciço.

Considerando a classificação SC e as condições típicas de compactação tipo Proctor, foram adotados para o solo do maciço os valores de peso específico de $21,2 \text{ kN/m}^3$, coesão efetiva de 11 kPa e ângulo de atrito efetivo de 31° , compatíveis com os intervalos indicados para solos SC compactados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados de 1500 ensaios realizados pelo *U. S. BUREAU OF RECLAMATION*.

Classificação do solo	Compactação - Proctor		Resistência ao cisalhamento		
	γ_g	h (%)	C' (KPa)	C' sat(KPa)	ϕ (°)
GW	>19,0	<13,3	(x)	(x)	>38,3
GP	>17,6	<12,4	(x)	(x)	>36,5
GM	>18,2	<14,5	(x)	(x)	>33,8
GC	>18,4	<14,7	(x)	(x)	>31,0
SW	19,0 ± 0,8	13,3 ± 2,5	40 ± 4,0	(x)	38,6 ± 1,2
SP	17,6 ± 0,3	12,4 ± 1,0	23 ± 6,0	(x)	36,5 ± 1,2
SM	18,2 ± 0,2	14,5 ± 0,4	52 ± 6,0	20 ± 7,0	33,8 ± 1,2
SM-SC	19,0 ± 0,2	12,8 ± 0,5	51 ± 2,0	14 ± 6,0	33,4 ± 4,0
SC	18,4 ± 0,2	14,7 ± 0,4	76 ± 2,0	11 ± 6,0	31,0 ± 4,0
ML	16,5 ± 0,2	19,2 ± 0,7	68 ± 1,0	09 ± (x)	31,8 ± 2,3
ML-CL	17,4 ± 0,3	16,8 ± 0,7	64 ± 2,0	22 ± (x)	31,8 ± 3,4
CL	17,3 ± 0,2	17,3 ± 0,3	88 ± 1,0	13 ± 2,0	28,4 ± 2,3
OL	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)
MH	13,1 ± 0,6	36,3 ± 3,2	36,3 ± 3,2	20 ± 9,0	25,2 ± 2,9
CH	15,0 ± 0,3	25,5 ± 1,2	25,5 ± 1,2	11 ± 6,0	19,3 ± 5,1
OH	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)

OBS.: ± - indica um limite de confiança de 90%
(x) – indica um número insuficiente de valores

Fonte: Carvalho, (1983).

Para os demais materiais constituintes do sistema, incluindo aluvião de fundação, drenos horizontais e verticais e enrocamento. Os parâmetros geotécnicos foram definidos com base em valores típicos recomendados na literatura clássica de mecânica dos solos e engenharia de barragens, tais como os apresentados por Terzaghi, Peck e Mesri, bem como por manuais técnicos do *U.S. Bureau of Reclamation*. Para esses materiais, adotou-se coesão efetiva nula quando pertinente, em consonância com o comportamento predominantemente friccional, e valores de ângulo de atrito e peso específico compatíveis com sua natureza granulométrica e função estrutural.

O conjunto final de parâmetros geotécnicos adotados nas análises de estabilidade, incluindo peso específico, coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo para todos os materiais considerados, é apresentado de forma consolidada na Tabela 5, a qual foi utilizada diretamente nas simulações de estabilidade realizadas no módulo SLOPE/W.

Tabela 5 – Dados geotécnicos utilizados na análise de estabilidade

	Peso Específico (kN/m ³)	Coesão Efetiva (kPa)	Ângulo de Atrito Efetivo (°)	ϕ^b (°)
Aluvião	19,0	2	30	-
Dreno Horizontal	19,5	0	30	-
Dreno Vertical	19,5	0	30	-
Enrocamento	21	0	40	-
Solo do maciço	21,2	11	31	15,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na ausência de ensaios laboratoriais específicos para a determinação do parâmetro ϕ^b , adotou-se neste estudo o valor correspondente a 50% do ângulo de atrito efetivo do solo ϕ' . Essa aproximação é amplamente utilizada em análises de estabilidade de solos não saturados. Conforme destacado por Krahn (2004), embora ϕ^b varie fisicamente com o grau de saturação do solo, o módulo SLOPE/W o considera constante ao longo da análise, sendo recomendada, para fins práticos, sua estimativa como uma fração de ϕ' . Dessa forma, a adoção de ϕ^b mostra-se compatível com a metodologia empregada.

O parâmetro ϕ^b não foi considerado na caracterização dos drenos vertical e horizontais, do enrocamento e do aluvião, uma vez que não existem dados experimentais suficientes que permitam sua definição com confiabilidade para esses materiais. Além disso, a inclusão desse parâmetro teria impacto desprezível nos resultados das análises de estabilidade, considerando que tais materiais estão associados a níveis de sucção reduzidos quando comparados ao solo compactado do maciço, onde os efeitos da não saturação são mais pronunciados.

3.4.9 Análises de estabilidade dos taludes

As análises de estabilidade dos taludes foram realizadas a partir dos campos de poro-pressão e de sucção matricial obtidos nas simulações de fluxo, utilizando-se o módulo SLOPE/W do pacote GeoStudio 2025. As análises foram conduzidas com base no método de equilíbrio limite de Morgenstern–Price, adotando-se uma função lateral do tipo meia-senoide para a distribuição das forças entre as fatias. As condições de poro-pressão foram incorporadas diretamente a partir da análise parente, considerando-se todos os instantes simulados, sem a inclusão de efeitos pseudoestáticos ou fatores parciais, conforme prática consolidada em

análises determinísticas de estabilidade de barragens de terra.

A estabilidade do talude foi avaliada a partir de duas abordagens distintas. Na primeira, foram utilizados os campos hidráulicos provenientes das simulações realizadas com acoplamento climático, nas quais as ações de precipitação, evaporação e evapotranspiração foram explicitamente consideradas por meio do módulo Terra-Clima. Na segunda abordagem, a análise de estabilidade foi conduzida com base nos resultados das simulações de fluxo realizadas sem o uso do módulo Terra-Clima, representando uma condição hidráulica simplificada, típica de análises convencionais.

Em ambas as abordagens, os resultados hidráulicos do SEEP/W foram incorporados diretamente ao SLOPE/W, permitindo avaliar a evolução temporal do fator de segurança sob diferentes condições de carregamento hidráulico.

Essa metodologia comparativa possibilitou avaliar a contribuição isolada e combinada da sucção matricial e do acoplamento climático na estabilidade do talude, bem como identificar eventuais diferenças entre os resultados obtidos por representação hidráulica simplificada e aqueles resultantes de uma modelagem mais representativa das condições reais de operação da barragem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

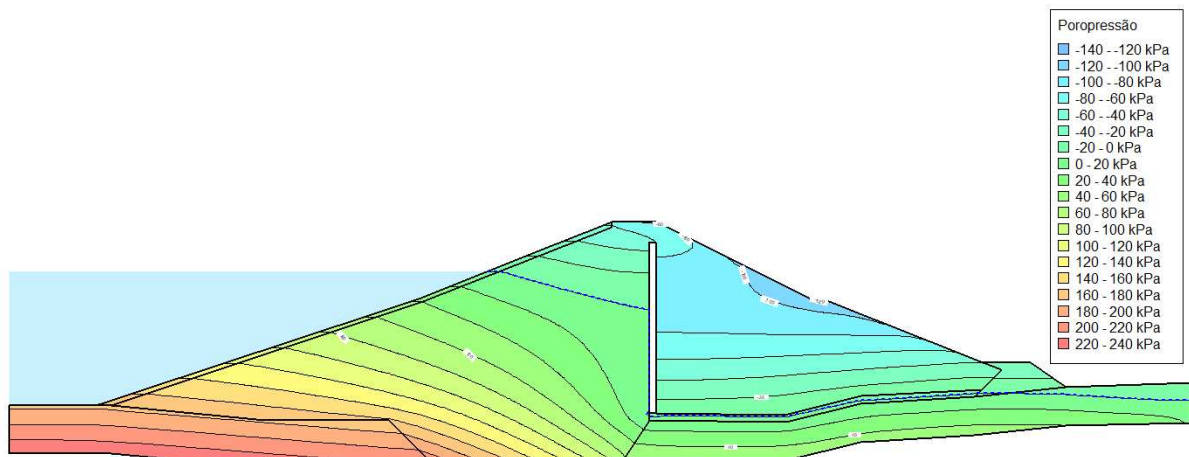
4.1 Comportamento hidráulico do maciço ao longo do tempo

4.1.1 Ano de 2009 – Regime climático úmido

As Figuras 28 a 34 apresentam a seção transversal da barragem, ilustrando a evolução temporal das distribuições das pressões da água nos poros (poropressões) no interior do maciço, representadas por isolinhas, ao longo do período analisado. A Figura 28 corresponde à condição inicial da análise de fluxo, definida a partir da cota do reservatório em 31/12/2008, enquanto as Figuras 29, 30, 31, 32, 33 e 34 mostram, respectivamente, os estados hidráulicos aos 60, 120, 180, 240, 300 e 360 dias do ano de 2009. Essa sequência permite identificar os períodos de maior redução e posterior recuperação da sucção matricial, constituindo a base para a interpretação da resposta hidráulica e da estabilidade dos taludes apresentada nas seções subsequentes.

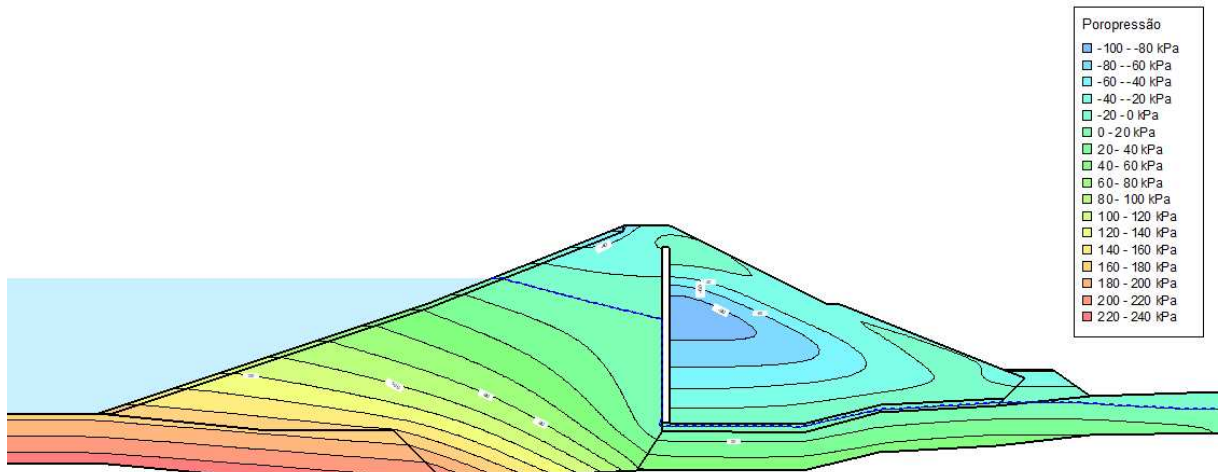
Nos resultados apresentados, a poro-pressão corresponde à pressão da água nos poros do solo, podendo assumir valores positivos ou negativos. Em condições não saturadas, os valores negativos de poro-pressão representam a sucção matricial. Dessa forma, quanto mais negativo o valor da poro-pressão, maior é a sucção matricial, enquanto valores menos negativos indicam redução da sucção e aproximação da condição saturada. Assim, a análise das distribuições de poro-pressões permite interpretar diretamente a variação espacial e temporal da sucção matricial no maciço, sendo os valores negativos associados ao comportamento não saturado do solo.

Figura 28 – Distribuição das poropressões na seção da barragem condição inicial (2009)



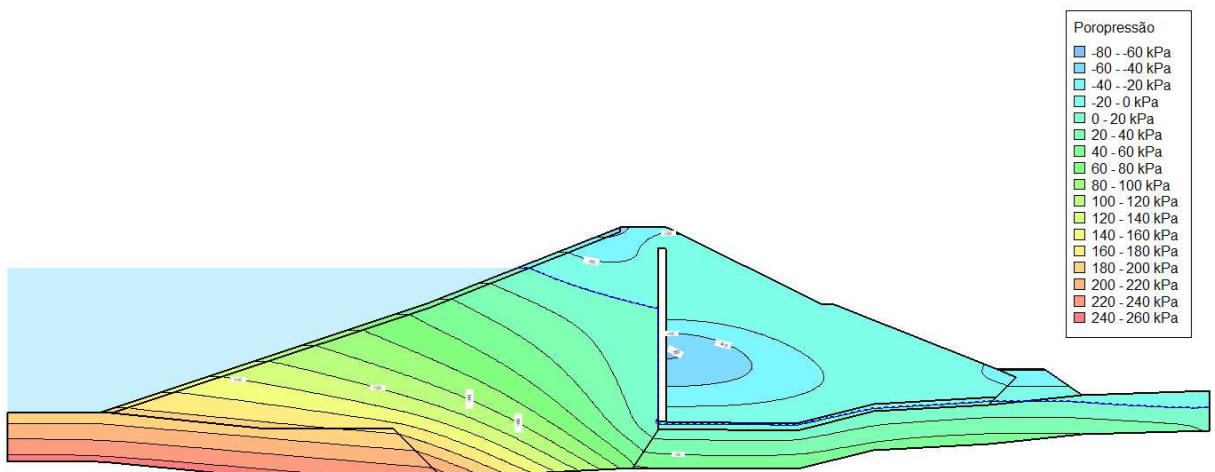
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 29 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 60 dias (2009)



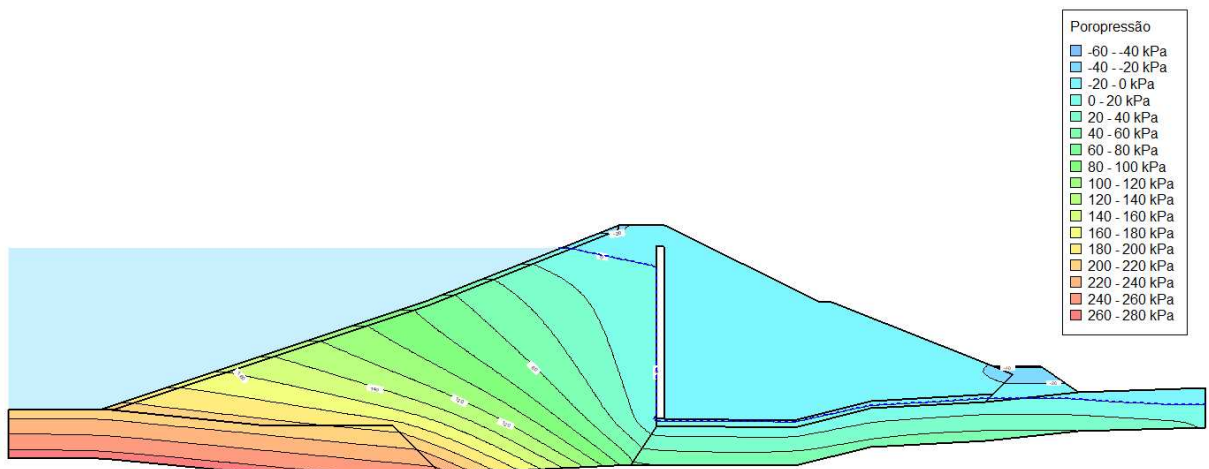
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 120 dias (2009)



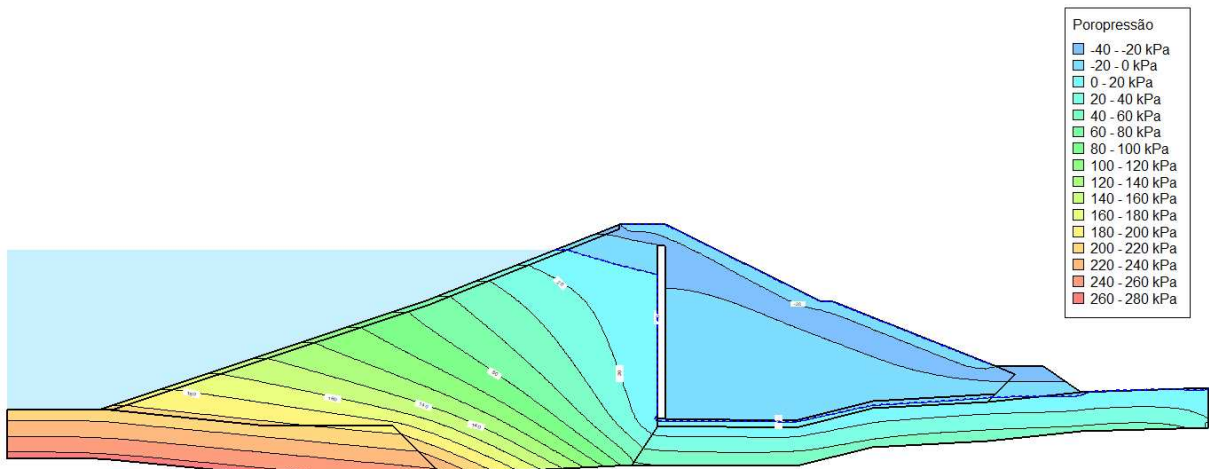
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 31 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 180 dias (2009)



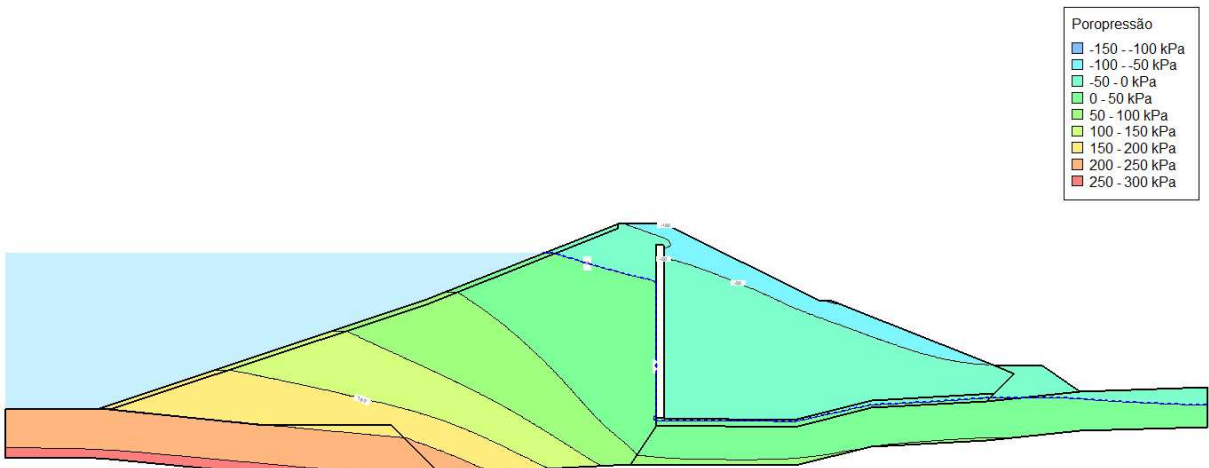
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 32 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 240 dias (2009)



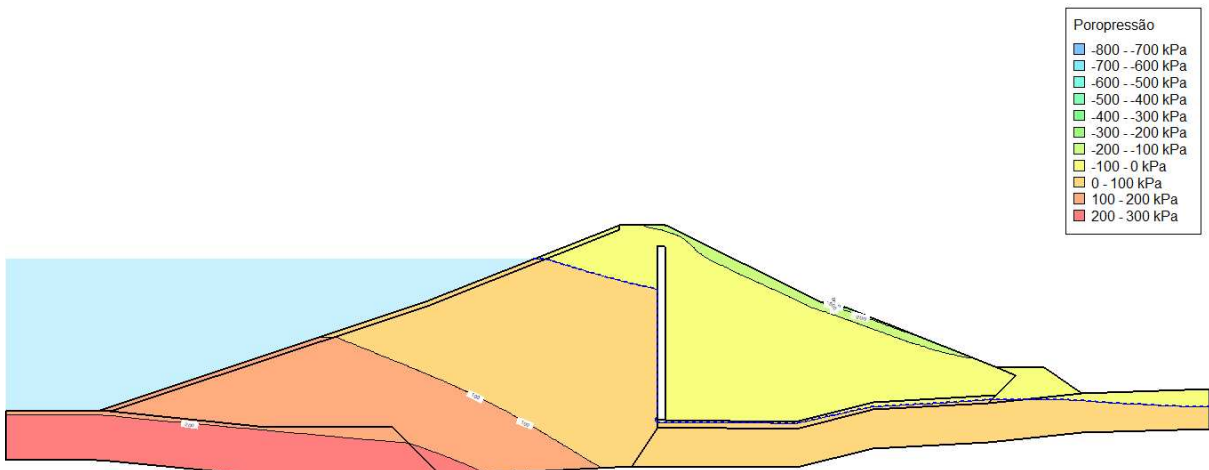
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33– Distribuição das poropressões na seção da barragem com 300 dias (2009)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 34 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 360 dias (2009)



Fonte: Elaborada pelo autor.

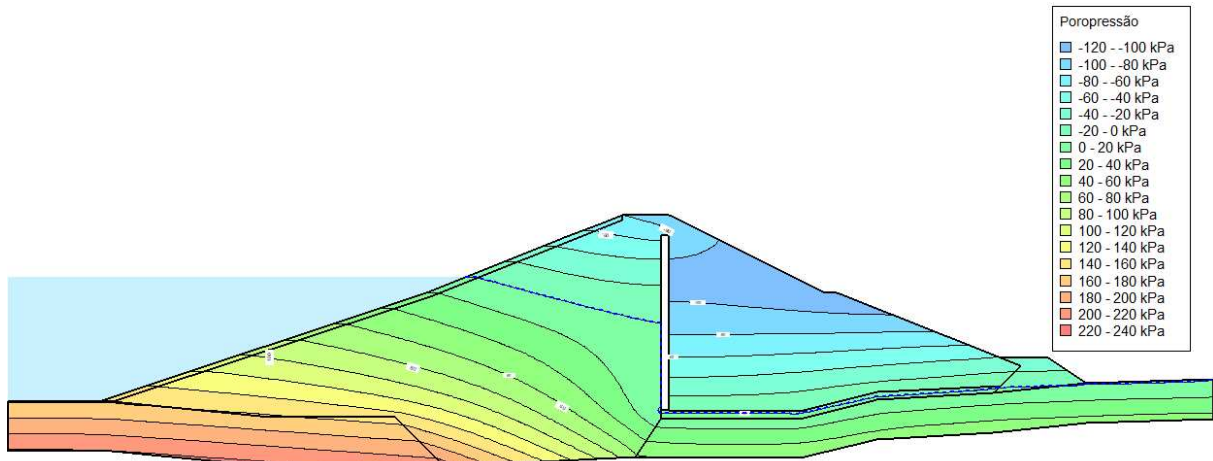
A análise dos mapas de poro-pressões obtidos para o ano de 2009 evidencia um comportamento transiente diretamente associado à alternância entre períodos de precipitação e estiagem. Observa-se que, à medida que o tempo evolui de 60 para 180 dias, ocorre uma redução progressiva da sucção matricial no interior do maciço, indicando o avanço da frente de molhamento e o aumento do teor de umidade do solo durante o período de maior concentração de chuvas. O instante correspondente a 180 dias apresenta os menores valores de sucção entre os períodos analisados, configurando a condição hidráulica mais desfavorável em termos de resistência aparente do solo.

A partir de 240 dias, verifica-se um restabelecimento gradual da sucção matricial, associado à redução da precipitação e ao predomínio de condições de estiagem. Esse processo torna-se ainda mais evidente aos 360 dias, quando os mapas indicam valores de sucção mais elevados e amplamente distribuídos no maciço, refletindo a recuperação das condições não saturadas do solo. Esse comportamento demonstra que a sucção matricial responde de forma dinâmica ao regime climático, diminuindo durante períodos chuvosos e aumentando durante fases de menor disponibilidade hídrica, em consonância com o balanço entre infiltração e evaporação.

4.1.2 Ano de 2012 – Regime climático seco

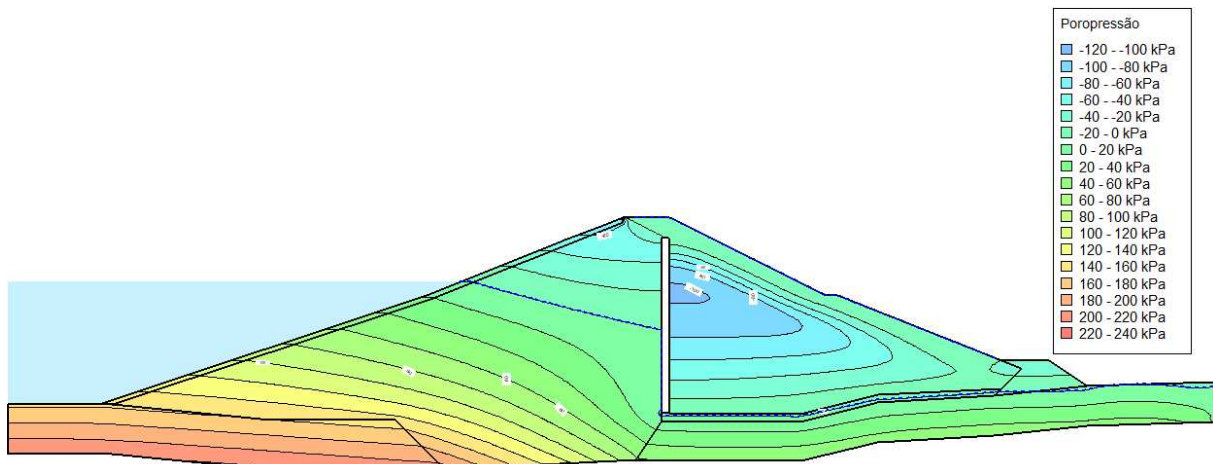
As Figuras 35 a 41 apresentam a seção transversal da barragem, ilustrando a evolução temporal das distribuições das pressões da água nos poros (poro-pressões) no interior do maciço, representadas por isolinhas, ao longo do período analisado. A Figura 35 corresponde à condição inicial da análise de fluxo, definida a partir da cota do reservatório em 31/12/2011, enquanto as Figuras 36, 37, 38, 39, 40 e 41 mostram, respectivamente, os estados hidráulicos aos 60, 120, 180, 240, 300 e 360 dias do ano de 2012. Essa sequência permite avaliar a evolução temporal da sucção matricial sob um regime climático mais seco, servindo de base para a interpretação da resposta hidráulica do maciço e de suas implicações na estabilidade dos taludes.

Figura 35 – Distribuição das poropressões na seção da barragem condição inicial (2012)



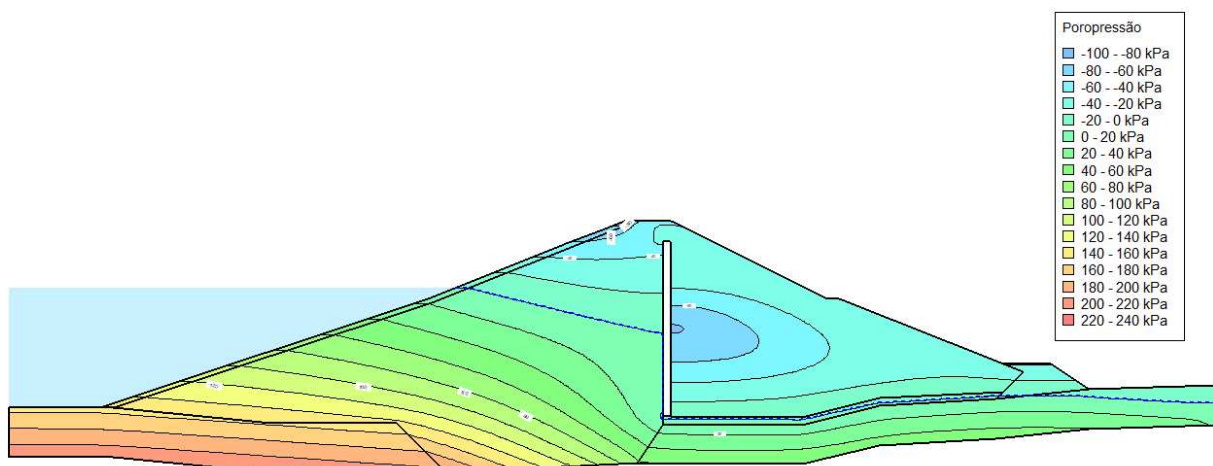
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 60 dias (2012)



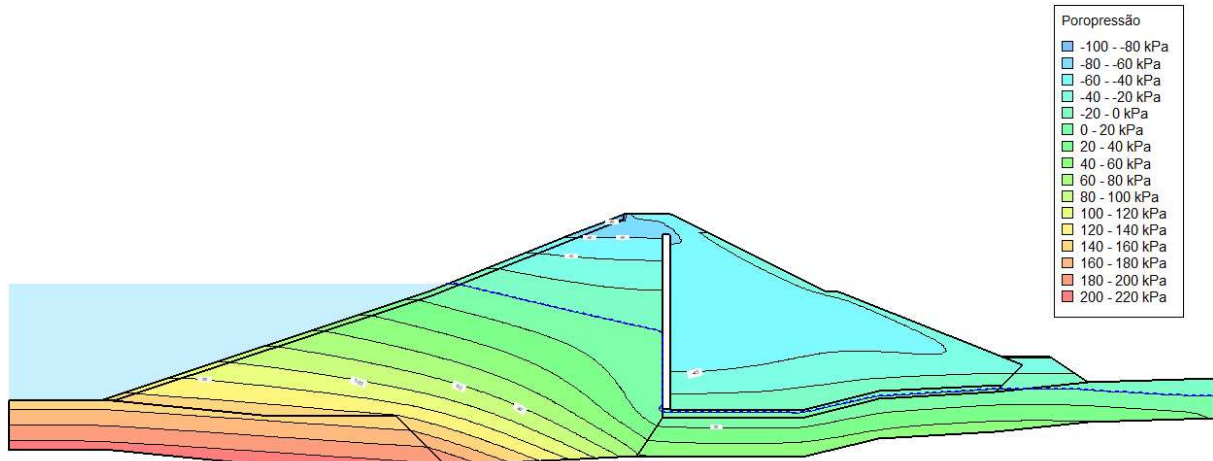
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 120 dias (2012)



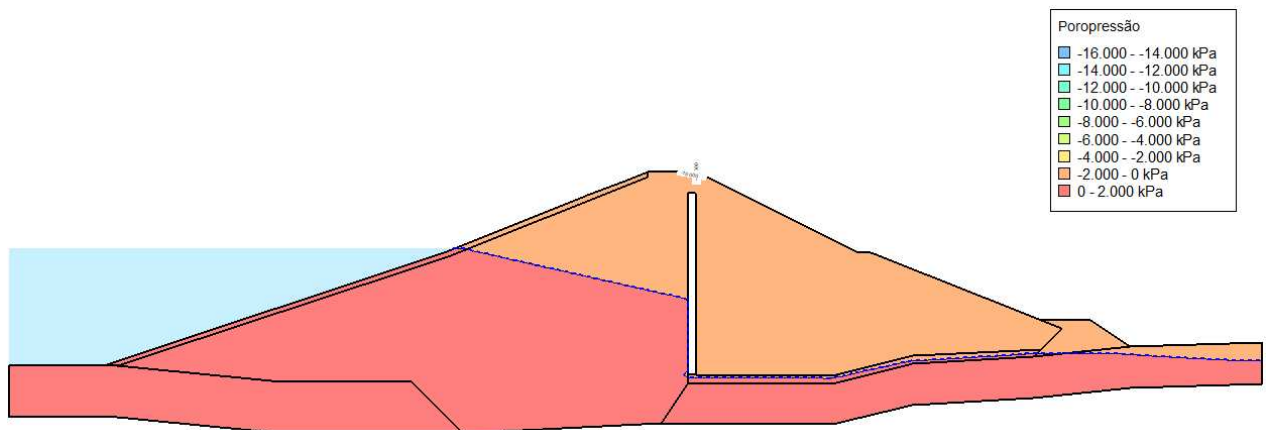
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 38 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 180 dias (2012)



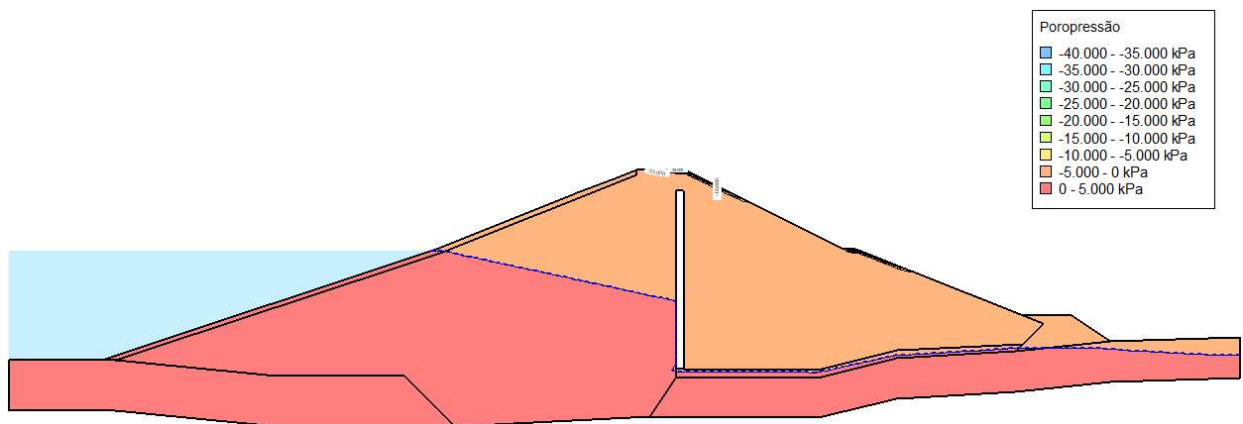
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 240 dias (2012)



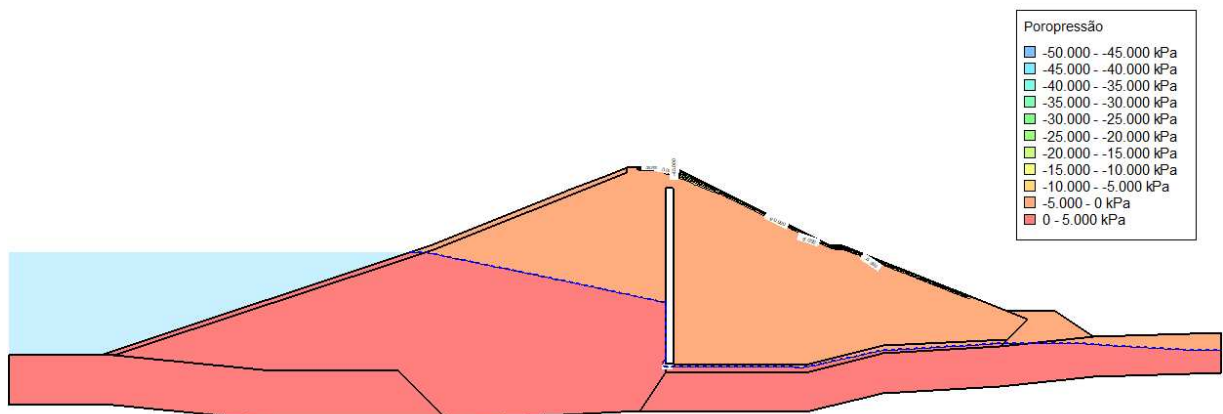
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 40 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 300 dias (2012)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41 – Distribuição das poropressões na seção da barragem com 360 dias (2012)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise dos mapas de poro-pressões obtidos para o ano de 2012 evidencia uma resposta hidráulica distinta daquela observada em 2009, refletindo a predominância de um regime climático mais seco ao longo do período analisado. Observa-se que, à medida que o tempo evolui de 60 para 120 dias, ocorre uma redução da sucção matricial no interior do maciço, associada à ocorrência de eventos pluviométricos pontuais no início do período. O instante correspondente a 120 dias apresenta os menores valores de sucção entre os períodos analisados, configurando a condição hidráulica mais desfavorável do ano, ainda que menos crítica quando comparada ao cenário de 2009.

A partir desse instante, verifica-se um aumento progressivo da sucção matricial ao longo do tempo, associado ao predomínio de um período de estiagem significativamente mais prolongado. Aos 180, 240, 300 e 360 dias, os mapas indicam valores de sucção cada vez mais elevados e amplamente distribuídos no maciço, evidenciando a intensificação das condições não saturadas do solo. Observa-se, ainda, que os valores de poro-pressões negativas atingem escalas superiores às registradas em 2009, reforçando o caráter mais seco do ano de 2012 e a maior contribuição da sucção matricial para a resistência aparente do solo ao longo da maior parte do período analisado.

4.2 Influência das condições climáticas na estabilidade dos taludes

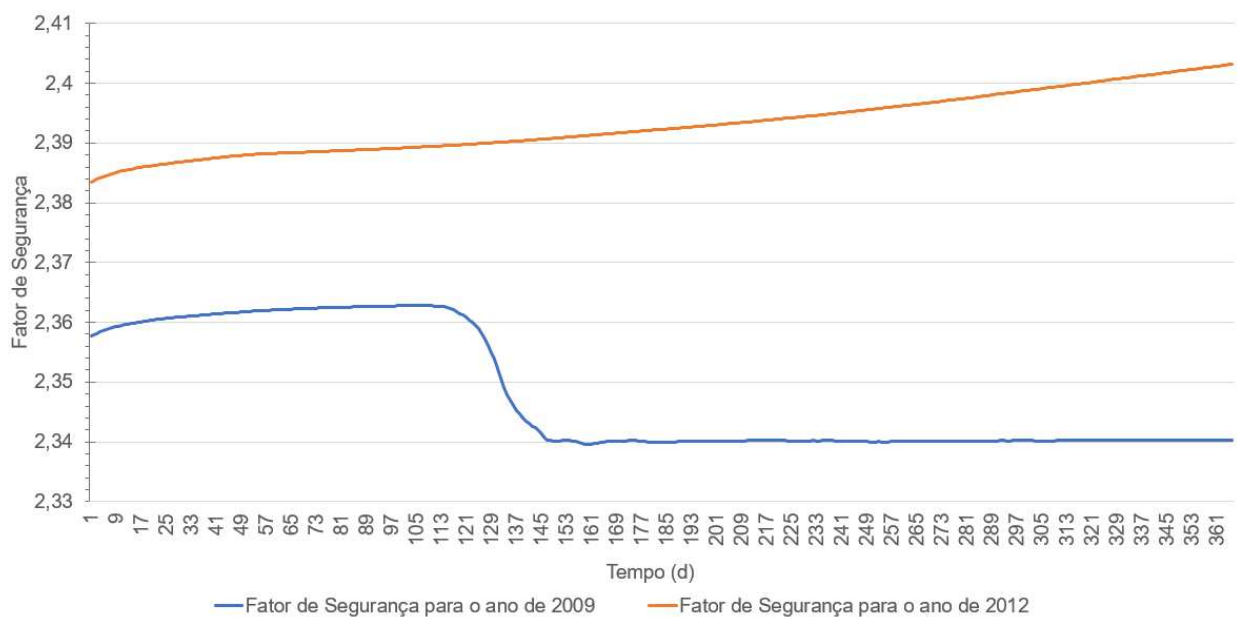
4.2.1 Estabilidade dos taludes sem considerar a interação terra-clima

As análises de estabilidade realizadas neste tópico foram conduzidas com base nos resultados das análises transientes de fluxo, considerando apenas a influência do enchimento e da secagem do reservatório como condição de contorno hidráulico, sem a aplicação da interação

terra-clima no modelo. As análises de estabilidade foram realizadas no talude de jusante, por ser a face mais exposta às variações das condições hidráulicas e climáticas, utilizando como dados de entrada as pressões da água nos poros resultantes do processo de enchimento e rebaixamento do nível d'água. Os resultados apresentados referem-se ao fator de segurança nas superfícies críticas de ruptura ao longo do tempo, isolando a influência do enchimento e da secagem daquela decorrente de variações climáticas.

A Figura 42 apresenta a evolução temporal do fator de segurança (FS) ao longo do ciclo de operação do reservatório para os anos de 2009 e 2012.

Figura 42 – Evolução do FS durante o ciclo de operação do reservatório em 2009 e 2012.



Fonte: Elaborada pelo autor

As análises de estabilidade realizadas para os anos de 2009 e 2012 indicam que o fator de segurança varia ao longo do tempo, acompanhando as alterações impostas pelas condições operacionais do reservatório e pela resposta hidráulica do maciço. Os resultados evidenciam que as variações do nível d'água ao longo do ano promovem modificações no estado de tensões e no regime de pressões de poros, incluindo alterações no campo de sucção matricial, refletindo-se diretamente na evolução do fator de segurança. No entanto, quando a interação terra-clima não é considerada, essas variações mostram-se limitadas em magnitude, resultando em um comportamento globalmente mais estável.

No ano de 2009, o fator de segurança apresenta inicialmente um aumento muito discreto, praticamente desprezível, até aproximadamente 120 dias de simulação. Em seguida, observa-se uma queda brusca entre os dias 120 e 145, associada ao rápido aumento da cota do reservatório, que provocou elevação abrupta das poro-pressões e redução significativa da

sucção matricial no maciço. Após esse intervalo crítico, o fator de segurança passa a variar muito pouco, mantendo-se praticamente constante até o final do período analisado. O menor valor de fator de segurança ocorre em instantes posteriores ao período de maior elevação do nível d'água, indicando que a resposta do talude não é imediata, mas controlada pela redistribuição interna das pressões ao longo do tempo. Após esse ajuste inicial, o fator de segurança passa a se manter praticamente constante ao longo do restante do ano, o que pode ser atribuído ao estabelecimento de um regime hidráulico quase estacionário no maciço, no qual as variações do nível do reservatório e das condições climáticas deixam de provocar alterações significativas no campo de poro-pressões. Ainda assim, os valores de fator de segurança permanecem elevados, variando entre aproximadamente 2,34 a 2,36, com uma amplitude total de apenas 0,02, caracterizando uma condição globalmente estável e com baixa sensibilidade temporal para o cenário analisado.

Para o ano de 2012, o comportamento observado é distinto, caracterizando-se por valores de fator de segurança sistematicamente mais elevados ao longo de todo o período. Esse comportamento está associado à menor elevação do nível do reservatório e ao predomínio de condições climáticas mais secas, que favorecem a manutenção de níveis mais elevados de sucção matricial no maciço. Como consequência, observa-se maior contribuição da sucção para o incremento da resistência ao cisalhamento, resultando em menores variações no estado de tensões quando comparado a 2009. Os valores do fator de segurança variam aproximadamente entre 2,38 a 2,40, com uma variação total de 0,02, indicando um comportamento igualmente estável e pouco variável ao longo do tempo. A evolução temporal do fator de segurança em 2012 apresenta, assim, uma tendência coerente com a redução do nível d'água e com a intensificação das condições não saturadas no talude.

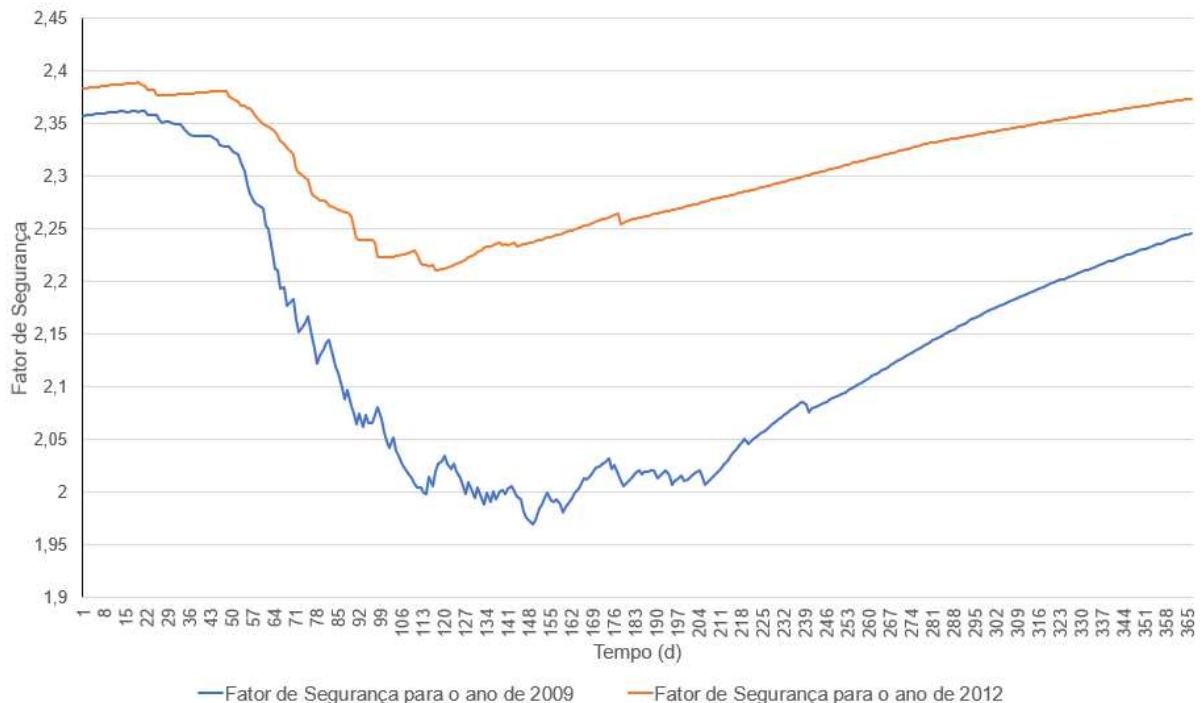
4.2.2 Análises de estabilidade considerando a influência da interação terra-clima

As análises de estabilidade realizadas neste tópico foram conduzidas com base nos resultados das análises transientes de fluxo obtidas no módulo SEEP/W, incorporando explicitamente a interação terra-clima como condição de contorno hidráulico. Além da variação do nível do reservatório, o modelo considerou a influência conjunta das condições climáticas reais, incluindo precipitação, temperatura, umidade relativa e evapotranspiração, aplicadas na superfície do talude por meio da interação solo-atmosfera. As análises de estabilidade foram realizadas no talude de jusante, por ser a face mais diretamente exposta às ações climáticas, utilizando como dados de entrada no módulo SLOPE/W as distribuições de pressões da água

nos poros e de sucção matricial resultantes das simulações hidráulicas no SEEP/W. Os resultados apresentados referem-se à evolução do fator de segurança e das superfícies críticas de ruptura ao longo do tempo, permitindo avaliar de forma integrada a influência combinada do enchimento, da secagem do reservatório e das variações climáticas na estabilidade do talude.

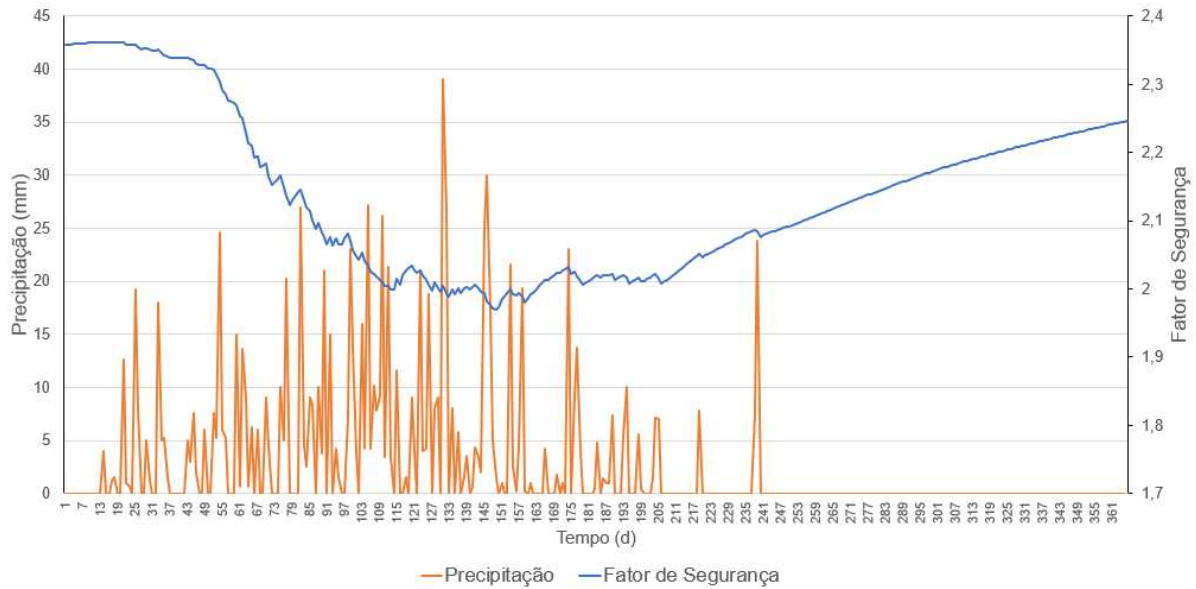
As Figuras 43, 44 e 45 apresentam, de forma integrada, a evolução temporal do fator de segurança (FS) e sua relação com o regime de precipitação para os anos analisados. A Figura 43 mostra a variação do fator de segurança ao longo do tempo para os anos de 2009 e 2012, representados em um mesmo gráfico, permitindo a comparação direta do comportamento da estabilidade do talude sob regimes climáticos distintos. A Figura 44 apresenta a evolução do fator de segurança ao longo do tempo para o ano de 2009, associada à precipitação diária registrada no período, possibilitando a visualização conjunta da resposta da estabilidade frente aos eventos pluviométricos e aos períodos de estiagem. De forma análoga, a Figura 45 ilustra essa mesma relação para o ano de 2012, permitindo avaliar o comportamento do fator de segurança em um cenário caracterizado por menor volume anual de chuvas e maior predominância de condições secas.

Figura 43 – Variação do fator de segurança ao longo do tempo sob efeitos climáticos.



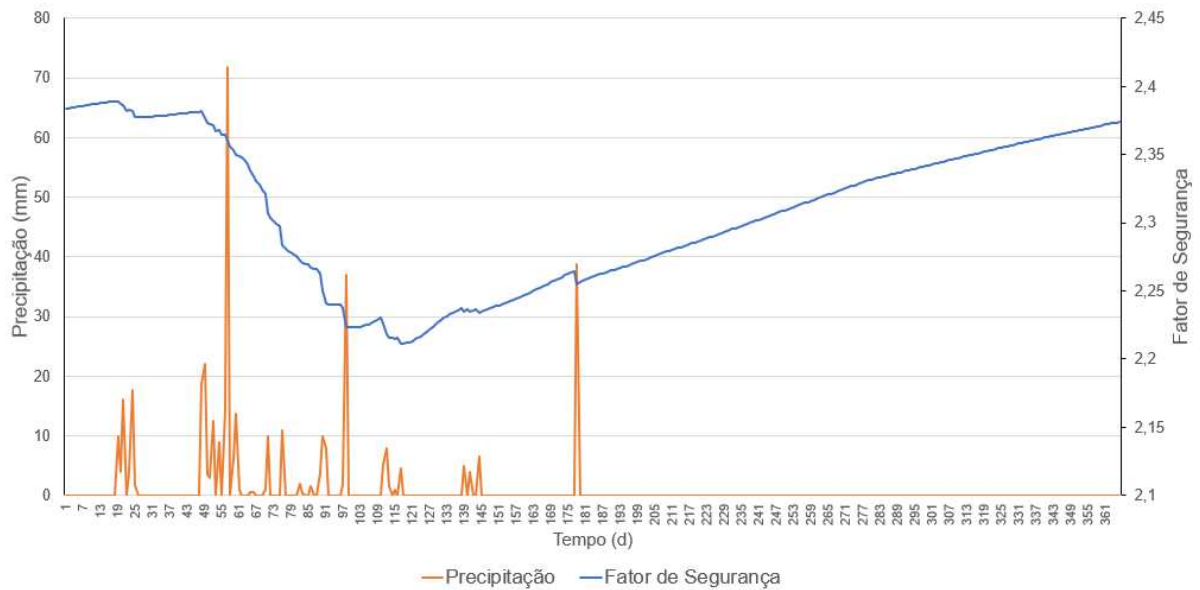
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 44 – Evolução do fator de segurança e da precipitação diária no ano de 2009.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 45 – Evolução do fator de segurança e da precipitação diária no ano de 2012.



Fonte: Elaborada pelo autor

As análises de estabilidade realizadas com a incorporação da interação terra-clima evidenciam um comportamento substancialmente distinto daquele observado no cenário sem ação climática. Os resultados demonstram que o fator de segurança passa a responder de forma mais sensível à evolução temporal das condições ambientais. Para os anos de 2009 e 2012, observa-se que a estabilidade do talude não é controlada apenas pela operação do reservatório, sendo também influenciada pela dinâmica de infiltração, secagem e redistribuição hídrica no interior do maciço, induzida pelas variações climáticas ao longo do ano.

No ano de 2009, caracterizado por maior concentração de eventos pluviométricos, observa-se uma redução mais pronunciada do fator de segurança. O valor mínimo atingiu aproximadamente 1,97, registrado no dia 149, enquanto o valor máximo foi da ordem de 2,36, resultando em uma amplitude de variação de cerca de 0,39 ao longo do período analisado. Destaca-se que o menor fator de segurança não ocorre em sincronia com os máximos níveis do reservatório nem com os picos de precipitação, mas em instantes posteriores aos períodos de maior chuva.

Esse comportamento evidencia a ocorrência de uma defasagem hidromecânica entre os eventos pluviométricos e a resposta da estabilidade do talude. Tal defasagem está associada ao tempo necessário para o avanço da frente de molhamento no interior do maciço, à redistribuição transiente das poro-pressões e à dissipação progressiva da sucção matricial ao longo da superfície potencial de ruptura. Assim, a condição mais desfavorável de estabilidade é governada não pelo instante de maior precipitação, mas pelo período subsequente, no qual os efeitos hidráulicos da infiltração se manifestam de forma mais intensa no interior do maciço.

Tal interpretação encontra respaldo nos resultados obtidos por Wu et al. (2025), que realizaram modelagens numéricas solo-atmosfera e demonstraram que o fator de segurança tende a atingir seus valores mínimos após o término dos eventos de chuva, em função do avanço da frente de molhamento e da redistribuição interna das poro-pressões. De forma complementar, Ahmadi-Adli et al. (2012), a partir de análises transientes de taludes não saturados, mostraram que a resposta da estabilidade ocorre de forma retardada em relação à precipitação, confirmando o mecanismo observado neste estudo.

Para o ano de 2012, embora os valores do fator de segurança permaneçam globalmente mais elevados, a inclusão da interação terra-clima permite identificar oscilações associadas a eventos pluviométricos pontuais, que não são capturadas na análise sem clima. O fator de segurança mínimo observado foi de aproximadamente 2,21, ocorrendo no dia 117, enquanto o valor máximo atingiu cerca de 2,39, resultando em uma variação total de aproximadamente 0,18, significativamente inferior à registrada em 2009. A manutenção de níveis mais elevados de sucção matricial durante a maior parte do ano, em função do predomínio da estiagem, contribui para a maior estabilidade do talude. Ainda assim, os resultados indicam que eventos isolados de chuva são suficientes para provocar reduções temporárias do fator de segurança.

Esse comportamento é compatível com o observado por Espinosa e El Nagggar (2024), que, por meio de um estudo paramétrico sistemático, demonstraram que chuvas de elevada intensidade, mesmo quando concentradas em curtos intervalos de tempo, podem induzir reduções significativas do fator de segurança em taludes não saturados.

A comparação entre os resultados obtidos para os anos de 2009 e 2012, a partir da análise dos gráficos de evolução temporal do fator de segurança, evidencia que a interação terra-clima amplia de forma significativa a variabilidade da estabilidade dos taludes. Observa-se que, quando a ação climática é considerada, o fator de segurança deixa de apresentar um comportamento quase constante e passa a responder de maneira mais sensível às variações climáticas ao longo do tempo, com reduções mais pronunciadas nos períodos subsequentes aos eventos de chuva. Além disso, a análise gráfica mostra que os instantes críticos de estabilidade não coincidem entre os anos analisados, reforçando que a estabilidade dos taludes é governada pela evolução temporal da infiltração e da sucção matricial, e não apenas pelas condições hidráulicas associadas à operação do reservatório.

Com o objetivo de sintetizar quantitativamente os efeitos da interação terra-clima na estabilidade dos taludes, a Tabela 6 apresenta um resumo dos valores máximo e mínimo do fator de segurança, bem como da variação total observada (ΔFS), para os anos de 2009 e 2012, considerando os cenários com e sem a interação terra-clima. Essa síntese permite uma comparação direta entre os diferentes cenários analisados, evidenciando o impacto da ação climática na amplificação da variabilidade do fator de segurança.

Tabela 6 – Valores do fator de segurança nos cenários com e sem interação terra-clima.

	Sem Terra-Clima		Com Terra-Clima	
	2009	2012	2009	2012
FS máx	2,36	2,4	2,36	2,39
FS mín	2,34	2,38	1,97	2,21
ΔFS	0,02	0,02	0,39	0,18

Fonte: Elaborada pelo autor

4.2.3 Análise da resposta hidráulica na superfície crítica sob interação terra-clima

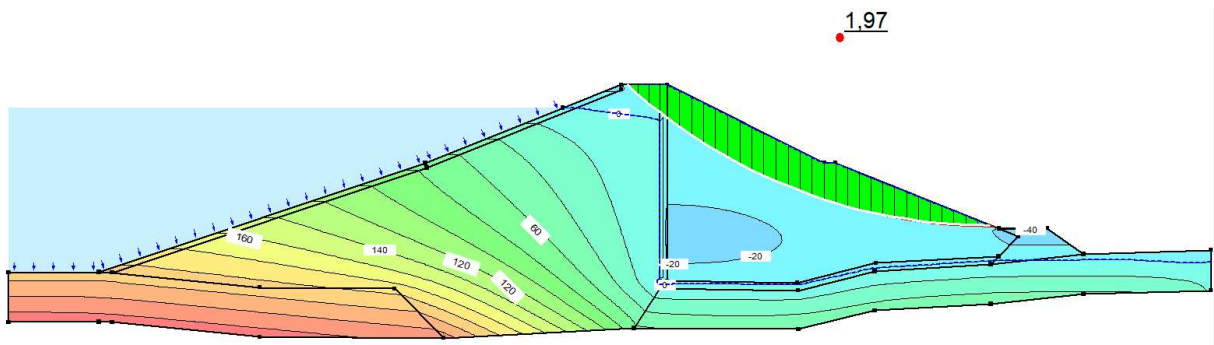
Com o objetivo de aprofundar a interpretação dos resultados de estabilidade obtidos nas análises que consideram a interação terra-clima, apresenta-se, neste item, uma análise detalhada da resposta hidráulica ao longo da superfície crítica de ruptura correspondente aos instantes de menor fator de segurança identificados para os anos de 2009 e 2012. Ressalta-se que essa análise é restrita ao cenário com interação terra-clima, uma vez que apenas nesse caso a variabilidade hidráulica induzida pelas ações climáticas resulta em condições críticas bem definidas ao longo do tempo.

As Figuras 46 e 47 apresentam a seção transversal da barragem nos instantes críticos de estabilidade, correspondentes ao dia 149 em 2009 e ao dia 117 em 2012, ilustrando as

distribuições das pressões da água nos poros. Nessas figuras, a superfície crítica de ruptura está delimitada em vermelho, sendo destacado o ponto de maior profundidade, adotado como ponto representativo para a análise da resposta hidráulica local do maciço. Essas superfícies correspondem a trajetórias hipotéticas de deslizamento determinadas por análises de equilíbrio limite, associadas ao menor fator de segurança do sistema. Apesar de representarem o mecanismo potencial mais desfavorável, os fatores de segurança obtidos são elevados, indicando uma condição globalmente estável. Ainda assim, a superfície crítica delimita a região do maciço onde a relação entre tensões atuantes e resistência ao cisalhamento é relativamente menos favorável.

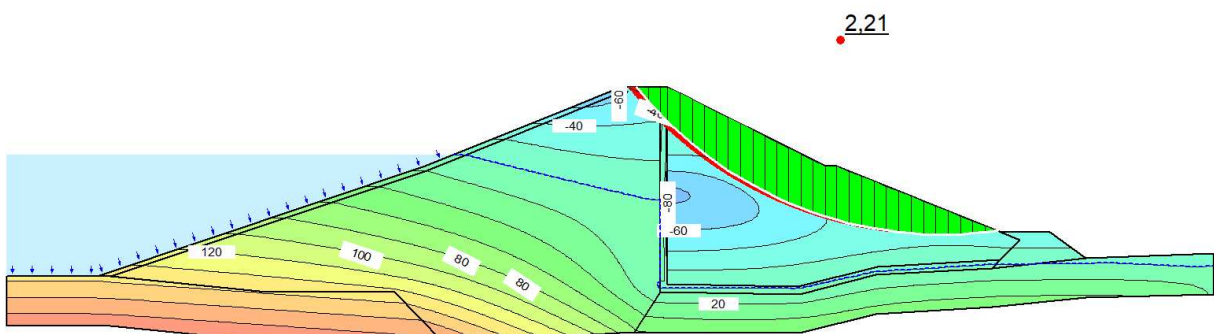
Com base nesse ponto, as Figuras 48 e 49 apresentam, respectivamente, a evolução temporal das poro-pressões e do grau de saturação para o ano de 2009. De forma análoga, para o ano de 2012, as Figuras 50 e 51 mostram os gráficos de poro-pressão e de grau de saturação ao longo do tempo. Esse conjunto de resultados permite analisar de forma integrada a evolução do estado hidráulico local nos instantes críticos de estabilidade.

Figura 46 – Poropressões na superfície crítica de 2009 no dia de menor estabilidade (149)



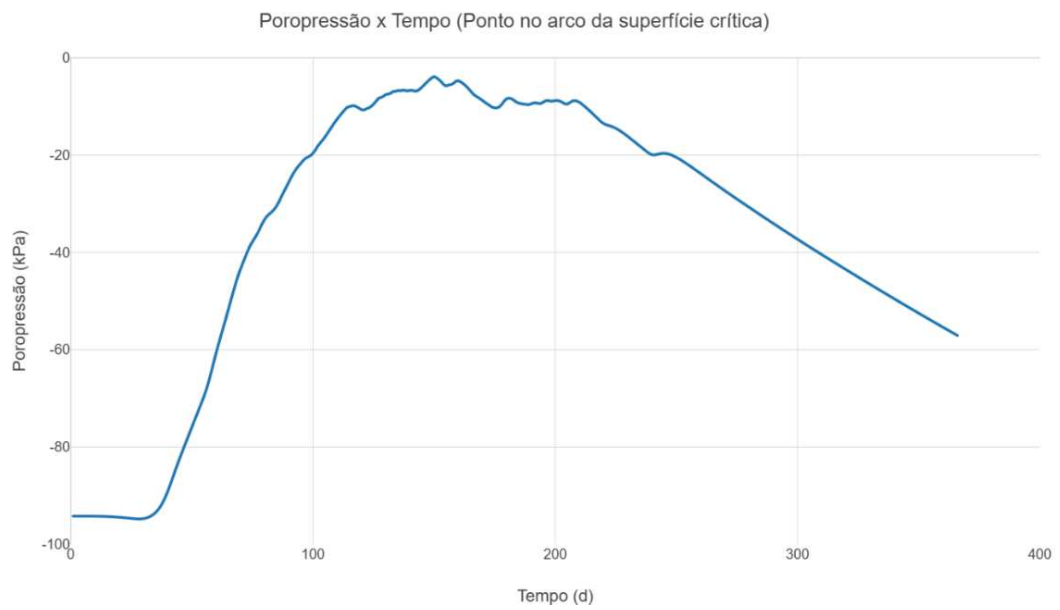
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 47 – Poropressões na superfície crítica de 2012 no dia de menor estabilidade (117)



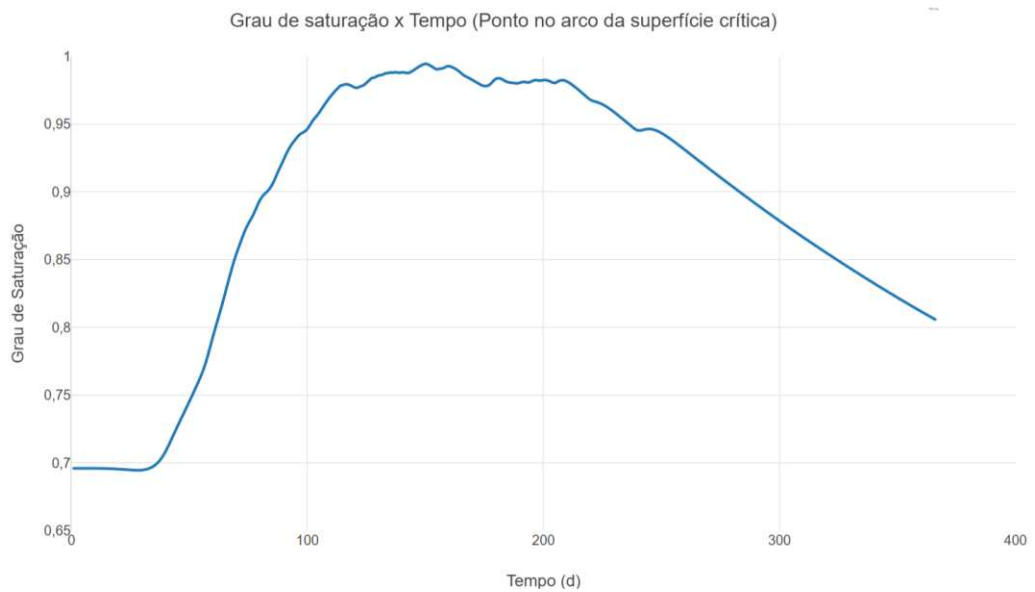
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 48 – Gráfico da relação da poropressão pelo tempo de 2009.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 49 – Gráfico da relação do grau de saturação pelo tempo de 2009.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 50 – Gráfico da relação da poropressão pelo tempo de 2012.

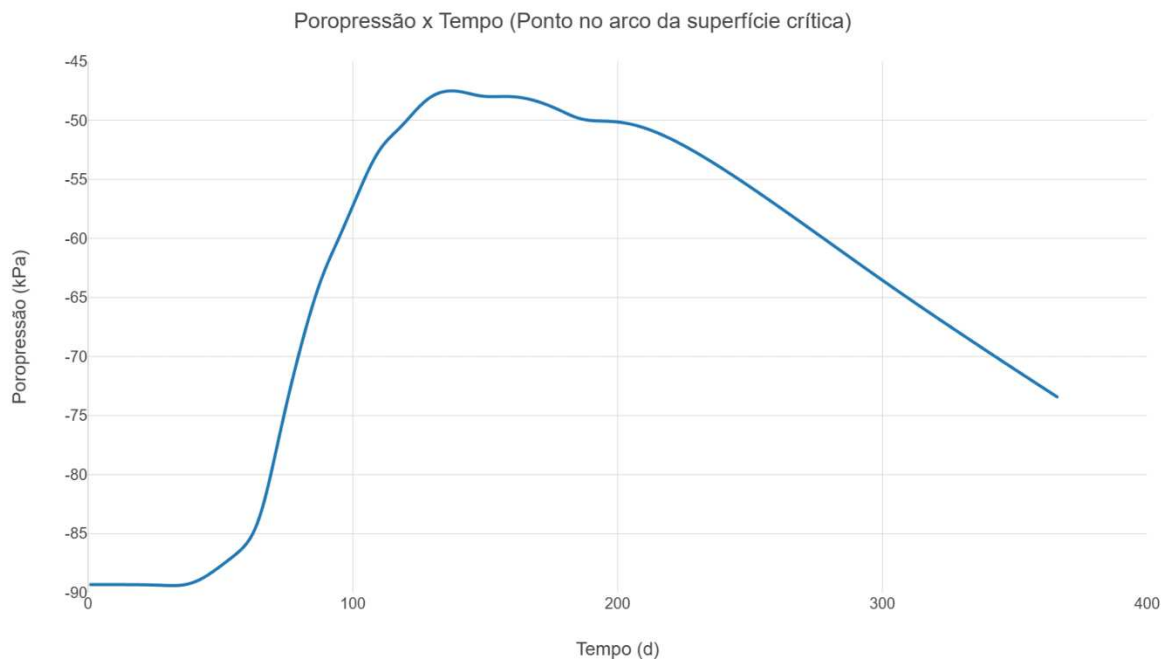
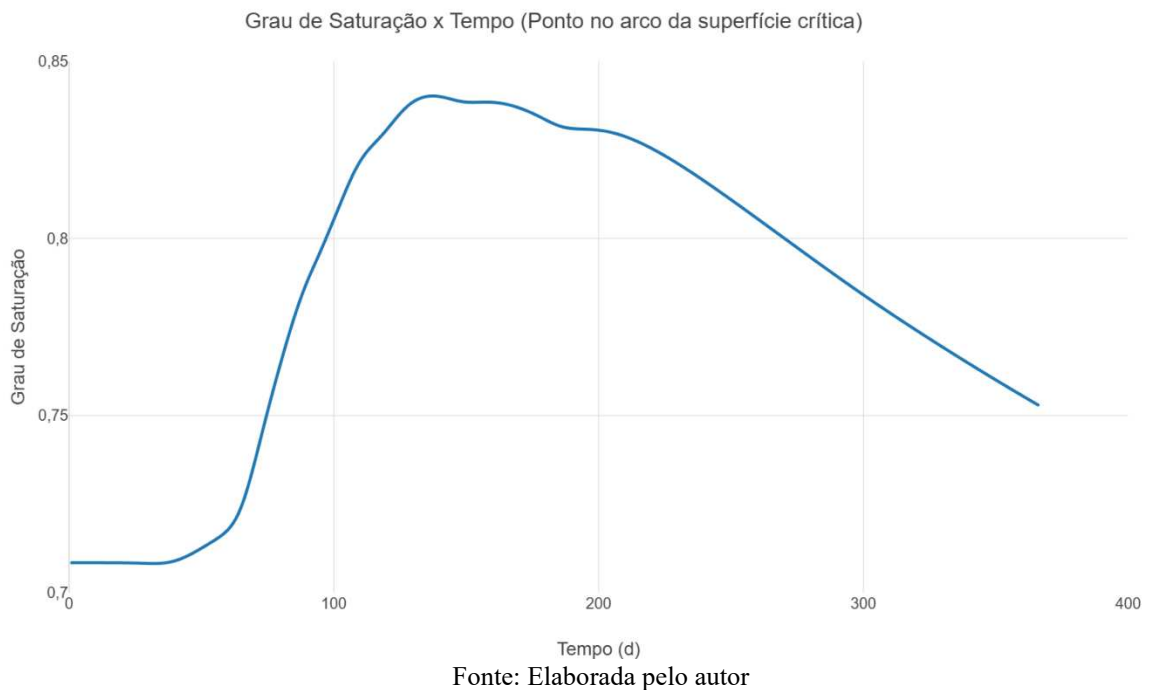


Figura 51 – Gráfico da relação do grau de saturação pelo tempo de 2012.



A análise da evolução temporal da poro-pressão e do grau de saturação desses pontos localizado na máxima profundidade da superfície crítica de ruptura evidenciou um comportamento fortemente acoplado entre essas variáveis. A análise conjunta desses resultados permite identificar o grau de saturação no ponto de máxima profundidade da superfície crítica

como um indicador hidráulico crítico da estabilidade do talude. Observa-se que os instantes de menor fator de segurança coincidem com períodos em que o grau de saturação se aproxima de valores característicos da transição entre o regime não saturado e condições próximas à saturação, promovendo a redução significativa da sucção matricial. Esse comportamento indica que a perda progressiva da sucção, associada ao aumento do grau de saturação ao longo da superfície crítica, constitui o principal mecanismo responsável pela diminuição da resistência aparente do solo e, conseqüentemente, pela redução do fator de segurança nos cenários analisados.

Ademais, observa-se que as variações da poro-pressão ao longo do tempo acompanham, de forma praticamente coincidente, as variações do grau de saturação do solo, indicando que a resposta hidráulica local é governada pela curva característica de retenção de água no solo. Esse comportamento é consistente com os resultados apresentados por Chiorean (2017), que demonstrou, por meio de análises numéricas e analíticas, que a sucção matricial em pontos específicos do domínio varia diretamente em função do grau de saturação, sendo possível representar adequadamente essa relação por meio de gráficos temporais de sucção e saturação. O autor destaca que, durante processos de infiltração, o aumento progressivo do grau de saturação resulta em redução da sucção, enquanto durante a secagem ocorre o restabelecimento gradual da sucção, padrão também observado no presente estudo.

De forma complementar, Mahmood *et al.* (2016) analisaram a resposta hidráulica de taludes não saturados sob condições de chuva uniforme e mostraram que a evolução temporal da sucção em pontos localizados ao longo da superfície potencial de ruptura acompanha o avanço da frente de umedecimento e o aumento do teor de água no solo. Os autores evidenciaram que, mesmo na ausência de saturação total, a redução da sucção em pontos críticos é suficiente para provocar variações significativas na estabilidade do talude.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA PESQUISAS FUTURAS

Nesta pesquisa foi apresentado um estudo voltado à avaliação da estabilidade dos taludes da Barragem Castro, com base na utilização de parâmetros hidráulicos e de resistência obtidos da literatura e de bases de dados existentes, os quais serviram como suporte para a realização de simulações numéricas transientes de fluxo e estabilidade. As análises foram conduzidas por meio dos módulos SEEP/W e SLOPE/W, considerando tanto cenários sem a ação climática quanto cenários com a incorporação explícita da interação terra-clima, utilizando dados reais de precipitação, evapotranspiração e operação do reservatório.

5.1 Conclusões

As simulações de fluxo permitiram representar adequadamente a evolução temporal das poro-pressões e da sucção matricial no interior do maciço, evidenciando o avanço e o recuo das zonas de maior umidade em resposta às variações do nível do reservatório e às condições climáticas impostas. Observou-se que a inclusão da ação climática promove alterações significativas no campo hidráulico, sobretudo nas camadas mais superficiais do talude de jusante, com redução da sucção durante períodos chuvosos e recuperação progressiva ao longo da estiagem.

As análises de estabilidade realizadas sem a consideração da interação terra-clima indicaram pequenas variações do fator de segurança ao longo do tempo, resultando em um comportamento globalmente estável e pouco sensível às variações ambientais. Esse resultado evidencia a limitação de abordagens que consideram apenas o enchimento e o rebaixamento do reservatório, uma vez que tais metodologias tendem a não capturar adequadamente os efeitos transientes associados ao comportamento não saturado do solo.

Por outro lado, as análises de estabilidade realizadas com a incorporação da interação terra-clima evidenciaram uma maior variabilidade temporal do fator de segurança, associada à dissipação da sucção matricial e à redistribuição das poro-pressões no interior do maciço. Verificou-se que os menores valores de fator de segurança ocorrem de forma retardada em relação aos eventos de precipitação, confirmando que a resposta da estabilidade é controlada pela evolução transiente do campo hidráulico e não apenas pela ocorrência imediata das chuvas.

A comparação entre os anos de 2009 e 2012 mostrou que períodos caracterizados por maior concentração de eventos pluviométricos resultam em reduções mais expressivas do fator de segurança, enquanto anos marcados por predominância de estiagem apresentam comportamento globalmente mais estável, embora ainda sensível a eventos de chuva pontuais.

Esse resultado reforça a influência das condições climáticas antecedentes na estabilidade dos taludes da Barragem Castro.

De forma geral, os resultados obtidos confirmam a importância da consideração dos conceitos da mecânica dos solos não saturados e da interação solo-atmosfera em análises de estabilidade de barragens de terra localizadas em regiões semiáridas. A abordagem adotada permitiu uma representação mais realista do comportamento hidráulico e mecânico do maciço ao longo do tempo, contribuindo para avaliações de estabilidade menos conservadoras e mais alinhadas às condições reais de operação da Barragem Castro.

Ainda assim, destaca-se que, tanto nas análises realizadas sem a consideração da interação terra-clima quanto naquelas que incorporam explicitamente os efeitos climáticos, a Barragem Castro apresentou comportamento globalmente estável ao longo dos períodos avaliados. Os valores do fator de segurança mantiveram-se elevados e as superfícies potenciais de ruptura identificadas foram predominantemente rasas, restritas às camadas mais superficiais do talude de jusante, não sendo observadas condições que indicassem instabilidade estrutural da barragem nos cenários analisados.

5.2 Limitações do estudo

Os resultados deste trabalho devem ser interpretados no contexto das hipóteses e simplificações adotadas. As análises foram conduzidas por meio de simulações numéricas determinísticas, não sendo consideradas explicitamente as incertezas associadas à variabilidade espacial dos parâmetros geotécnicos e hidráulicos. Dessa forma, os fatores de segurança obtidos representam respostas específicas aos cenários analisados.

A caracterização dos materiais do maciço baseou-se em parâmetros representativos, assumindo-se homogeneidade dos solos e constância das propriedades hidráulicas e mecânicas ao longo do domínio. As análises de estabilidade foram realizadas pelo método de equilíbrio limite, com superfícies de ruptura circulares, abordagem amplamente empregada na prática, porém sem a avaliação explícita de deformações ou mecanismos de ruptura mais complexos.

A interação terra-clima foi representada por séries climáticas específicas dos anos de 2009 e 2012, restringindo a interpretação dos resultados a esses períodos. Não foram realizadas análises probabilísticas ou de sensibilidade, que poderiam ampliar a avaliação da influência das incertezas dos parâmetros sobre a estabilidade. Ainda assim, a metodologia adotada mostrou-se adequada para a análise comparativa da influência das condições climáticas na estabilidade dos taludes, em consonância com os objetivos do estudo.

5.3 Sugestões para pesquisas futuras

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se que estudos futuros aprofundem a investigação do comportamento de barragens de terra em condições não saturadas, por meio de:

- Ensaios laboratoriais voltados à caracterização hidráulica e à determinação da curva de retenção de água de solos utilizados em barragens no semiárido nordestino.
- Ensaios de resistência ao cisalhamento com controle de sucção, visando à calibração mais precisa dos parâmetros mecânicos empregados em modelagens numéricas.
- Avaliação dos efeitos de ciclos repetidos de umedecimento e secagem na estabilidade de taludes, considerando possíveis alterações progressivas da estrutura do solo.
- Aplicação de séries climáticas mais longas e de abordagens probabilísticas, de modo a ampliar a avaliação do risco associado à variabilidade climática e operacional.

REFERÊNCIAS

- ABMS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). **Relatório de segurança de barragens 2024–2025**. Brasília, DF: ANA, 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios – módulo Nordeste e Semiárido**. Brasília, DF: ANA, 2025.
- AHMADI-ADLI, M.; TALEBPOUR, M. H.; MIRZAEI, M. **Numerical study on the effect of rainfall on the stability of slopes with different soil properties**. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, v. 45, n. 4, p. 485–498, 2012.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. **Köppen’s climate classification map for Brazil**. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- BRAČKO, M.; PETKOVŠEK, A.; MAJES, B. **Implementation of climate change effects on slope stability analysis**. *Applied Sciences*, v. 12, n. 16, art. 8171, 2022.
- BUSTAMANTE, J.; GÓMEZ, L.; SILVA, R.; ARAÚJO, J. C. **Stability analysis of an urban slope under human activities and critical rainfall: case study of Recife, Brazil**. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 43, art. 68, 2025.
- CHIOREAN, V. F. **Determination of matric suction and saturation degree for unsaturated soils: comparative study – numerical method versus analytical method**. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 245, art. 032074, 2017.
- CONCEIÇÃO, J. A.; GITIRANA JÚNIOR, G. F. N.; OLIVEIRA, R. L. **Influence of soil–atmosphere interactions and unsaturated soil properties on slope stability**. *MATEC Web of Conferences*, v. 337, art. 01008, 2021.
- CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURI, N. **Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das Várzeas de Sousa (PB)**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 2, p. 311–324, 2003.
- COSTA, A. F.; SANTOS, L. J. C.; SOUZA, R. M.; LIMA, J. P. S. **Slope stability analysis using probabilistic approach**. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 9, n. 10, p. 1175–1190, 2023.
- COTECCHIA, F.; SANTALOIA, F.; PICARELLI, L.; COVIELLO, V.; PAPA, R. **Modelling the effects of climate change on the stability of slopes for the assessment of hydro-geological risk**. *Engineering Geology*, v. 263, art. 105266, 2019.

- DE OLIVEIRA, P. T.; SILVA, C. M. S. E.; LIMA, K. C. **Linear trend of occurrence and intensity of heavy rainfall events on Northeast Brazil**. *Atmospheric Science Letters*, v. 15, n. 3, p. 172–177, 2014.
- DENG, X.; LIU, H.; ZHANG, L.; LI, J. **Effect of matrix suction on the shear strength characteristics of unsaturated soils**. *Frontiers in Materials*, v. 10, art. 1284722, 2023.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS (DNOCS). **Barragens no Nordeste do Brasil: experiência do DNOCS em barragens na região semiárida**. Fortaleza: DNOCS, 2003.
- DING, J.; ZHANG, J.; LI, Z.; WANG, Y. **Prediction model of residual soil shear strength under dry–wet cycles and its uncertainty**. *Water*, v. 15, n. 22, art. 3931, 2023.
- ERDAĞ, Y.; IŞIK, N. S. **Effects of rainfall intensity and duration on the stability of infinite unsaturated soil slopes**. *Natural Hazards*, v. 114, p. 1–22, 2022.
- ESPINOSA, T.; EL NAGGAR, M. H. **Impact of climate change on slope stability using a coupled hydro-mechanical model**. *Computers and Geotechnics*, v. 160, art. 105678, 2024.
- FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G.; FOSTER, M. **Geotechnical engineering of dams**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. **WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas**. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 12, p. 4302–4315, 2017.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. **The shear strength of unsaturated soils**. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 15, n. 3, p. 313–321, 1978.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- GHOSH, D.; BANERJEE, A.; PUPPALA, A. J.; RAO, B. H. **Exploring the influence of climate change on earthen embankments with expansive soil**. *Geosciences*, v. 14, n. 2, art. 37, 2024.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Semiárido brasileiro 2021**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.
- INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS (IPEF). **Mapa de classificação climática do Brasil segundo Köppen-Geiger**. Piracicaba: IPEF, 2025.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Base de dados climáticos WorldClim versão 2**. São José dos Campos: INPE, 2025.
- INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO (INSA). **Delimitação do Semiárido Brasileiro – 2024**. Campina Grande: INSA, 2024.
- IPCC. **Climate change 2021: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

IPCC. **Climate change 2023: synthesis report**. Geneva: IPCC, 2023.

KOLLING NETO, A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; RIBEIRO, C. B. M. **Estimating water balance in a Brazilian semiarid watershed using different spatial data**. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 140, art. 104856, 2024.

KRAHN, J. **Stability modeling with SLOPE/W: an engineering methodology**. Calgary: GEO-SLOPE/W International Ltd., 2004.

KUTZNER, J. **Earth and rockfill dams: principles for design and construction**. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997.

LEME, R. F.; DANTAS NETO, S. A.; SILVA FILHO, F. C. **Influência da sucção mátrica nas condições de fluxo e estabilidade de taludes de uma barragem de terra**. *Conexões: Ciência e Tecnologia*, v. 10, n. 2, p. 29–41, 2016.

LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. **Permeability functions for unsaturated soils**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 123, n. 12, p. 1118–1126, 1997.

LI, J. H.; LI, L.; ZHANG, L. M.; FREDLUND, D. G. **Effects of desiccation cracking on the stability of a soil slope**. *Géotechnique*, v. 68, n. 4, p. 320–329, 2018.

LI, Y.; ZHANG, L.; LIU, H.; ZHANG, J. **Transient seepage and slope stability analysis of an earth dam during rapid drawdown**. *Water*, v. 14, n. 12, art. 1850, 2022.

LIU, F.; XU, C.; BA, M.; MAO, X. **Temperature influence on matric suction in unsaturated soils: experimental insights**. *Scientific Reports*, v. 15, art. 84910, 2025.

LOCHE, M.; SCARINGI, G. **Temperature effects on the shear strength of an unsaturated clayey soil**. *Engineering Geology*, v. 308, art. 106806, 2022.

LU, N. **Unsaturated soil mechanics: fundamental challenges, breakthroughs, and opportunities**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 146, n. 7, art. 02520001, 2020.

LU, N.; LIKOS, W. J. **Suction stress characteristic curve for unsaturated soil**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 132, n. 2, p. 131–142, 2006.

MAHMOOD, K.; KIM, J. M.; ASHRAF, M.; ZIA-UR-REHMAN. **The effect of soil type on matric suction and stability of unsaturated slope under uniform rainfall**. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 20, n. 4, p. 1294–1299, 2016.

MARINHO, F. A. M.; GUZMÁN, G. G. C.; ORLANDO, P. D. G. **Constant water content compression tests on unsaturated compacted soil with suction measurement using a HCT**. *International Journal of Geomechanics*, v. 16, n. 6, art. D4016006, 2016.

MBURU, J. W.; LI, A.-J.; LIN, H.-D.; LU, C.-W. **Investigations of unsaturated slopes subjected to rainfall infiltration using numerical approaches: a parametric study and comparative review**. *Sustainability*, v. 14, n. 21, art. 14465, 2022.

PEREIRA, B.; MEDEIROS, P.; MEIRA NETO, A. A.; ARAÚJO, J. C.; SIVAPALAN, M. **Advancing water security in semi-arid Brazil: expansion of water storage infrastructure and human–water system co-evolution**. *Frontiers in Water*, v. 7, 2024.

PREZIOSI, M.-C.; MICIC, T. **Embankment dam probabilistic assessment for climate scenarios**. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, v. 165, n. 3, p. 155–166, 2012.

RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A.; LEONG, E. C. **Variability of unsaturated soil properties and their effect on slope stability**. *Engineering Geology*, v. 125, p. 44–53, 2012.

SANDRONI, S. S.; GUIDICINI, G. **Barragens de terra e enrocamento**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

STOŠIĆ, B.; STOŠIĆ, T.; SILVA, R. M.; SOUSA, F. A. S. **Quantifying the rainy season in the Brazilian Northeast: seasonal precipitation variation including coastal stations**. *Water*, v. 17, n. 7, art. 1086, 2025.

SUDENE – SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE (BRASIL). **Resolução nº 107, de 27 de julho de 2017**. Recife: SUDENE, 2017.

TANG, Y.; ZHANG, L.; FREDLUND, D. G.; LU, N. **Effect of wetting–drying cycles on the shear strength of an unsaturated soil**. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 79, p. 4371–4383, 2020.

THOTA, S. K.; VAHEDIFARD, F. **Temperature effects on the stability of unsaturated soil slopes**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 147, n. 5, art. 04021021, 2021.

TIAN, Y.; ZHOU, X.; ZHANG, L.; LI, J. **Thermo-hydro-mechanical modeling of slope stability under climate change**. *Computers and Geotechnics*, v. 155, art. 105202, 2023.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E.; CLIFTON, A. W. **Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction**. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 33, n. 3, p. 379–392, 1996.

VILAYVONG, K.; KAMEI, T.; SUGIYAMA, T.; NAKAJIMA, S. **Unsaturated behavior of an earthfill dam during coupled initial impoundment and a prolonged rainfall**. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, v. 7, n. 2, p. 585–590, 2019.

WU, W.; YANG, Y.; JIAO, Y.; WANG, S. **Stability analysis of unsaturated slopes under rainfall and drainage using the vector-sum-based numerical manifold model**. *Computers and Geotechnics*, v. 179, art. 106992, 2025.

YANG, M.; ZHANG, J.; LI, Y. Study of the shear strength model of unsaturated soil in the Benggang area of southern China. *Water*, v. 16, n. 4, art. 612, 2024.

ZHAI, Q.; RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A.; LEONG, E. C. Estimation of unsaturated shear strength from soil–water characteristic curve. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 145, n. 9, art. 04019045, 2019.