



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA DE ENERGIAS E MEIO AMBIENTE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL

JOÃO PEDRO SOUSA CALAÇA

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTOS DE FUNDAÇÃO DE BARRAGENS
PROJETADAS SOBRE FUNDAÇÕES PERMEÁVEIS UTILIZANDO MODELAGEM
NUMÉRICA DO FLUXO

FORTALEZA - CE

2025

JOÃO PEDRO SOUSA CALAÇA

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTOS DE FUNDAÇÃO DE BARRAGENS
PROJETADAS SOBRE FUNDAÇÕES PERMEÁVEIS UTILIZANDO MODELAGEM
NUMÉRICA DO FLUXO.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti
Soares.

FORTALEZA - CE

2025

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)

C142e Calaça, João Pedro Sousa.

Estudo da eficiência de tratamentos de fundação de barragens projetadas sobre fundações permeáveis utilizando modelagem numérica do fluxo / João Pedro Sousa Calaça. – 2025.
63 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares .

1. Modelagem numérica. 2. Fundação de barragens. 3. Trincheira de vedação. 4. Tapete impermeável. 5. Fluxo subterrâneo. I. Título.

CDD 628

JOÃO PEDRO SOUSA CALAÇA

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTOS DE FUNDAÇÃO DE BARRAGENS
PROJETADAS SOBRE FUNDAÇÕES PERMEÁVEIS UTILIZANDO MODELAGEM
NUMÉRICA DO FLUXO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: **31/07/2025**.

BANCA EXAMINADORA

D.Sc. Anderson Borghetti Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

D.Sc. Alfran Sampaio Moura
Universidade Federal do Crato (UFC)

M.Sc. Vitória Lima Tavares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Silvia e Paulo, que me deram as
oportunidades pra chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que, diante de todas as dificuldades, foram capazes de me criar sem que me faltasse nada e me deram um amor incomparável. Eles são os responsáveis por eu ter chegado tão longe. Sei que, independentemente de tudo, sempre vão me apoiar. São as pessoas que mais amo neste mundo, e isso é algo indiscutível.

À minha avó, que foi a maior guerreira desta família e conseguiu criar todos, mesmo com tudo indo contra, sempre com a mentalidade de ajudar os outros em toda situação. Ela é uma das mulheres que mais admiro na vida, e não poderia ser diferente.

À minha irmã, que, mesmo com nossas implicações, sei que sempre estará do meu lado para qualquer situação, e eu também estarei ao lado dela.

Ao restante da minha família que sobra amor pra dar e estão sempre unidos fazendo o dia de todos mais felizes inclusive o meu.

Ao Mateus e ao Caio, que conheci no Ensino Médio, e quando saímos dele, já sabia que levaria vocês para a vida toda. Sinto que existem muitas coisas minhas que somente vocês entendem, qualquer momento com vocês gera uma felicidade incomparável dentro de mim..

À Camille e à Maira, com quem criei uma conexão que eu não esperava. Faz pouco tempo, mas, é como se elas estivessem desde sempre na minha vida, e eu não poderia pedir uma amizade melhor que a delas. Elas são realmente joias na minha vida.

Aos meus queridos amigos que conheci durante a graduação, sinto que cada um de vocês foi responsável por uma evolução muito grande minha. Vocês não entendem a dimensão do que representam para mim.

A todos os “Espiroquetas”, que são o melhor grupo que eu poderia ter. Jamais pensei que encontraria pessoas tão únicas e incríveis dentro da minha própria graduação, e que fossem responsáveis por me ajudar a passar por ela, sem vocês eu não conseguiria. Amo muito todos vocês.

Ao Rodrigo e à Beatriz, que foram uma das primeiras pessoas que falei no UFC. Sei que para vocês eu não preciso dizer muito, pois pretendo passar a vida ao lado de vocês, então ainda vão me ouvir falar muito que amo vocês. São as melhores pessoas que já conheci, e sei que nunca vou conseguir expressar o quanto são importantes para mim.

Ao meu orientador, Anderson, que foi um dos responsáveis por me fazer se apaixonar pela área da geotecnia. Durante o TCC, pude acompanhar mais de perto o quão incrível e compreensível ele é. Muito obrigado por me orientar e me guiar tanto no PET quanto no TCC.

À Universidade Federal do Ceará, que proporcionou diversas oportunidades e me fez evoluir e crescer de maneiras que eu não esperava.

A todos os professores que tive durante esses anos na UFC, sinto que levarei os ensinamentos de cada um deles para a minha vida.

*“Não estou interessado em viver mil anos.
Viver o hoje já é o suficiente”* (Portgas D. Ace,
One Piece, de Eiichiro Oda.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência de tratamentos de fundação aplicados em barragens construídas sobre fundações permeáveis, utilizando a modelagem numérica como principal ferramenta de análise. O foco está na compreensão do comportamento do fluxo subterrâneo em diferentes cenários, considerando soluções técnicas geralmente adotadas em projetos geotécnicos para o controle da percolação em estruturas de barramento. Foram estudadas três condições distintas de fundação: sem a aplicação de qualquer tipo de tratamento, representando a condição natural da fundação permeável; com a adoção de um tapete impermeável de montante; e com a instalação de uma trincheira de vedação. Para cada tipo de tratamento, foram consideradas diferentes geometrias, a fim de verificar a alteração dos resultados frente às variações de profundidade e comprimento dos elementos. As trincheiras foram modeladas com profundidades de 5, 7.5 e 10 metros, enquanto os tapetes impermeáveis foram simulados com comprimentos de 50, 100 e 150 metros. As simulações foram realizadas por meio do software GeoStudio (versão estudante), utilizando o módulo SEEP/W, que permite a análise do fluxo de água. Os resultados obtidos por meio da modelagem numérica foram comparados com valores teóricos estimados com base em equações presentes na literatura especializada. O objetivo dessa comparação é avaliar a aderência entre os métodos teóricos tradicionais e os dados obtidos via simulação, além de identificar possíveis limitações ou discrepâncias que possam surgir no processo de estimativa de vazões percoladas em fundações permeáveis. A abordagem adotada busca contribuir para o aprimoramento do entendimento técnico das soluções analisadas e para o embasamento de futuras decisões de projeto.

Palavras-chave: modelagem numérica; fundação de barragens; fluxo subterrâneo.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the efficiency of foundation treatments applied to dams built over permeable foundations, using numerical modeling as the main analysis tool. The focus is on understanding the behavior of subsurface flow under different scenarios, considering technical solutions commonly adopted in geotechnical designs to control seepage in dam structures. Three distinct foundation conditions were analyzed: without any type of treatment, representing the natural condition of the permeable foundation; with the implementation of an upstream impervious blanket; and with the installation of a cutoff trench. For each treatment type, different geometries were considered in order to assess the variation in results due to changes in depth and length of the elements. The trenches were modeled with depths of 5, 7.5, and 10 meters, while the impervious blankets were simulated with lengths of 50, 100, and 150 meters. The simulations were performed using GeoStudio software (student version), with the SEEP/W module, which enables the analysis of water flow. The results obtained from numerical modeling were compared to theoretical values estimated based on equations found in specialized literature. The objective of this comparison is to evaluate the adherence between traditional theoretical methods and the data obtained through simulation, as well as to identify possible limitations or discrepancies that may arise in the process of estimating seepage in permeable foundations. The adopted approach seeks to contribute to the improvement of technical understanding of the analyzed solutions and to support future design decisions.

Keywords: numerical modeling; dam foundation; subsurface flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Permeâmetro	14
Figura 2 – Rede de fluxo	15
Figura 3 - Variação das perdas de carga em função da penetração do cutoff (Cedergreen, 1967)	17
Figura 4 – Trincheira de vedação parcial	18
Figura 5 – Trincheira de vedação total	18
Figura 6 – Parede diafragma	19
Figura 7 – Tapete impermeável de montante	21
Figura 8 – Exemplo de piping no corpo da barragem	23
Figura 9 – Exemplo de piping em fundação de barragem	23
Figura 10 – Barragem do Atalho – trecho central.	25
Figura 11 – Barragem de Praia Grande – trecho central.	26
Figura 12 – Interface do Geostudio.	28
Figura 13 – Seção transversal da barragem de Entremontes.	30
Figura 14 – Seção transversal da barragem de Frios.	31
Figura 15 – Fluxograma das modelagens realizadas.	33
Figura 16 – Barragem de Frios	35
Figura 17 – Barragem de Frios com tapete impermeável de montante de 50metros.	36
Figura 18 – Barragem de Entremontes com trincheira de vedação (5 metros)	36
Figura 19 – Materiais e propriedades hidráulicas	37
Figura 20 – Condições de contorno (Entremontes)	38
Figura 21 – Relação de Q_t/Q_{fo} para $d = 5$ e $D = 10$	41
Figura 22 – Relação de Q_t/Q_{fo} para $d = 10$ e $D = 10$	43
Figura 23 – Modelagem da barragem de Frios	45
Figura 24 – Modelagem da barragem de Frios com tapete impermeável de montante (50m).	46
Figura 25 – Modelagem da barragem de Frios com Trincheira vedante (5m).	47
Figura 26 – Modelagem da barragem de entremontes.	48
Figura 27 – Modelagem da barragem de Entremontes com tapete impermeável de montante (150 m).	49
Figura 28 –Modelagem da barragem de Entremontes com trincheira vedante(10m)	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Dados de ruptura de barragens até 1986	24
Gráfico 2 – Comparação entre Valores Teóricos e Modelagem Numérica (Entremontes com Trincheira).	53
Gráfico 3 – Comparação entre Valores Teóricos e Modelagem Numérica (Frios com Trincheira)	53
Gráfico 4 – Comparação entre Valores Teóricos e Modelagem Numérica (Entremontes com Tapete impermeável de montante)	54
Gráfico 5 – Comparação entre Valores Teóricos e Modelagem Numérica (Frios com Tapete impermeável de montante)	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações de Frios	42
Tabela 2 – Informações de Entremontes	43
Tabela 3 – Resultados das vazões na modelagem numérica.	48
Tabela 4 – Resultados das vazões na modelagem numérica.	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Informações de Entremontes	30
Quadro 02 – Informações de Entremontes	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Conceitos básicos	13
2.1.1	<i>Percolação</i>	13
2.1.2	<i>Permeabilidade do solo</i>	13
2.1.3	<i>Fluxo bidimensional</i>	15
2.2	Tipos de tratamento de barragem com fundação permeável	16
2.2.1	<i>Trincheira de vedação</i>	16
2.2.2	<i>Parede Diafragma</i>	18
2.2.3	<i>Tapete impermeável de montante</i>	20
2.3	Fluxo de água na fundação de barragens.	22
2.4	Casos de barragem com aplicação de tratamentos para o controle de piping e permeabilidade	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	GeoStudio (SEEP/W)	27
3.2	Caracterização das Estruturas Analisadas	29
3.2.1	<i>Barragem de Entremontes</i>	29
3.2.2	<i>Barragem de Frios</i>	30
3.3	Metodologia	32
3.3.1	<i>Modelagem numérica das barragens</i>	32
3.3.2	<i>Definição do projeto no módulo define</i>	34
3.3.2	<i>Construção da geometria</i>	35
3.3.3	<i>Definição dos materiais e propriedades hidráulicas</i>	36
3.3.4	<i>Condições de contorno</i>	37
3.3.5	<i>Execução da análise</i>	38
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	39

4.1	Introdução	39
4.2	Cálculo da vazão por métodos teóricos	39
4.2.1	<i>Barragem de frios</i>	40
4.2.1.1	Sem tratamento	40
4.2.1.2	Com tapete impermeável de montante (50m)	40
4.2.1.3	Com trincheira vedante (5 metros)	40
4.2.2	<i>Barragem de Entremontes</i>	42
4.2.2.1	Sem tratamento	42
4.2.2.2	Com tapete impermeável de montante (150m)	42
4.2.2.3	Com a trincheira vedante (10 metros)	43
4.3	Modelagem numérica	44
4.3.1	<i>Barragem de Frios</i>	44
4.3.1.1	Sem tratamento	44
4.3.1.2	Com tapete impermeável de montante (50m).	45
4.3.1.3	Com trincheira vedante (5m)	46
4.3.2	<i>Barragem de Entremontes</i>	48
4.3.2.1	Sem tratamento	48
4.3.2.2	Com tapete impermeável de montante (150m)	49
4.3.2.3	Com trincheira vedante (10m)	50
4.4.1	<i>Teórico x modelagem (Com trincheira vedante)</i>	52
4.4.2	<i>Teórico x modelagem (Com tapete impermeável de montante)</i>	53
5	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade estrutural de uma barragem está diretamente condicionada à eficiência de sua fundação, sendo esta responsável por suportar as cargas da estrutura e controlar os fluxos de água subterrânea. Dentre os fatores críticos para a segurança das barragens, destaca-se o controle da percolação, o movimento indesejado da água através do corpo ou da fundação da estrutura. Esse fenômeno, quando não adequadamente tratado, pode ocasionar processos erosivos internos, instabilidade do maciço e, em situações extremas, o rompimento da barragem.

Casos emblemáticos, como o rompimento da barragem de South Fork nos Estados Unidos (1889), evidenciam as consequências catastróficas de falhas relacionadas ao controle inadequado da percolação. Embora o contexto geotécnico e tecnológico atual seja mais avançado, o risco permanece presente. No Brasil, o desastre de Brumadinho, ocorrido em 2019, reforça essa preocupação: embora envolvesse uma barragem de rejeitos, o rompimento demonstrou como falhas estruturais associadas a processos internos, como o acúmulo de água e pressão nos poros, podem levar ao colapso repentino de grandes estruturas, com impactos humanos, ambientais e econômicos devastadores.

Nesse cenário, o emprego de técnicas de tratamento de fundações torna-se indispensável. Métodos como a trincheira de vedação (escavações verticais em forma de trapézios preenchidos com materiais de baixa permeabilidade, como argila compactada) são utilizados para reduzir a passagem de água nas fundações. Já o tapete impermeável de montante tem a função de minimizar a infiltração de água, criando uma barreira que reduz a percolação através do solo. Essa técnica é amplamente aplicada e reconhecida por sua eficácia na mitigação de riscos associados à percolação, contribuindo para a estabilidade das barragens.

Apesar de sua importância, a avaliação da eficiência desses métodos ainda representa um desafio técnico significativo, especialmente devido à variabilidade dos materiais geológicos e das condições de operação de cada barragem. Neste contexto, a modelagem numérica surge como uma ferramenta indispensável, permitindo simular cenários diversos e prever o comportamento hidráulico e estrutural das fundações antes da execução das obras.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de modelagem numérica, a eficiência da aplicação das técnicas de trincheira de vedação e tapete impermeável de montante no controle da percolação em barragens, bem como comparar os resultados obtidos com os cálculos teóricos disponíveis na literatura. Especificamente, busca-

se simular o comportamento do fluxo subterrâneo e analisar a eficiência hidráulica de diferentes métodos de tratamento de fundação, considerando variações geométricas nos elementos utilizados. Também se pretende investigar a influência dessas geometrias na redução da vazão de percolação. Por fim, o estudo visa demonstrar as diferenças de comportamento entre as barragens analisadas, destacando como a carga hidráulica influencia diretamente os resultados, desde os valores de poropressão até as vazões finais simuladas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão, serão abordados os principais temas que servem de base para o desenvolvimento deste trabalho. Serão discutidos tópicos relacionados à barragem, ao processo de percolação e às formas de controle desse fenômeno, reunindo diferentes conceitos que ajudarão a construir uma compreensão clara e fundamentada sobre o assunto.

2.1 Conceitos básicos

2.1.1 *Percolação*

A percolação é o processo em que a água se infiltra e atravessa os vazios de um solo ou material poroso. Esse fenômeno é natural e depende diretamente das características do material, como a porosidade e a permeabilidade. Em solos menos densos e com maior volume de vazios, como os arenosos, a percolação vai ocorrer de forma mais rápida. Já em materiais com a presença de partículas muito finas, como a argila, esse fluxo é bem mais lento. Além disso, fatores como a diferença de pressão e a presença de diferentes tipos de materiais influenciam na direção e na intensidade do fluxo. A água se movimenta dentro do solo quando há diferenças de potencial, e isso gera tensões internas que podem afetar a estrutura ou estabilidade do meio atravessado. (PINTO, 2006).

2.1.2 *Permeabilidade do solo*

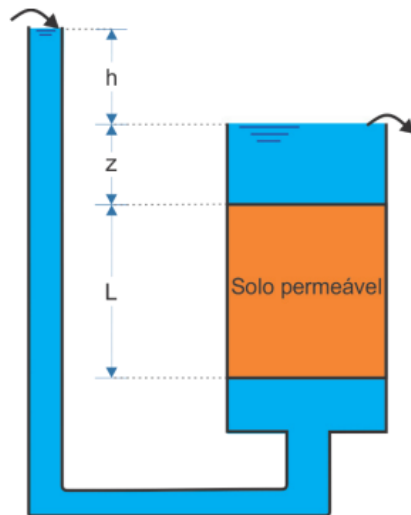
A percolação em solos é um processo natural que se refere à capacidade dos solos de permitir o escoamento de água em seu meio. A permeabilidade, que é a habilidade do solo em permitir a passagem de fluidos, é um dos atributos físicos mais importantes para indicar a facilidade com que a água atravessa os poros do solo (Martins *et al.*, 2002). Pinto (2006) complementa essa definição ao afirmar que “submetida a diferenças de potenciais, a água desloca-se no seu interior”, o que implica que a movimentação da água no solo pode gerar tensões que influenciam sua estabilidade.

A permeabilidade é dependente de diversos fatores, como a densidade, porosidade, saturação, característica dos fluidos e outros fatores que influenciam esse fenômeno. A granulometria e a estrutura do solo também desempenham um papel importante, pois afetam o

espaço poroso e a distribuição de poros, dificultando ou facilitando o movimento da água (Mesquita, 2001).

De acordo com Pinto (2006), em 1856, Henry Darcy realizou experimentos que deram origem à Lei de Darcy. Por meio de seus estudos, ele identificou a relação entre a vazão da água e o gradiente hidráulico, utilizando uma coluna de areia como meio poroso. Ao variar principalmente a altura da coluna, foi possível observar como a diferença de carga influenciava o fluxo de água através do solo. Darcy percebeu que existia uma proporcionalidade entre o gradiente hidráulico e a velocidade de percolação, sendo essa relação expressa por uma constante chamada coeficiente de permeabilidade (k), característica do meio poroso. O experimento conduzido por ele está mostrado na Figura 01:

Figura 01 – Permeâmetro



Fonte: Pinto (2006).

Dessa forma, com base nesse experimento surgiu a equação da Lei de Darcy, que é dada pela seguinte fórmula:

Eq. 1:

$$Q = K.I.A$$

em que, K é o coeficiente de permeabilidade, I é o gradiente hidráulico, Q é a Vazão final e A é a área da seção transversal do permeâmetro.

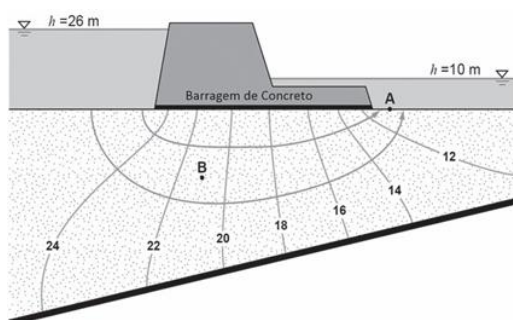
2.1.3 Fluxo bidimensional

Segundo Pinto (2006), a direção que o fluxo de água adota permite classificá-lo em três tipos: unidimensional, bidimensional e tridimensional. O fluxo bidimensional se destaca por ocorrer em planos paralelos, com as partículas de água seguindo trajetórias curvas, o que se aplica diretamente ao caso das barragens. Em estruturas desse tipo, a geometria do terreno e da fundação limita o movimento da água a dois eixos principais, o que torna esse modelo uma representação realista e útil para análises de percolação.

No contexto das barragens, o fluxo de água através do maciço e da fundação é geralmente tratado como um fluxo bidimensional, pois ocorre em um único plano, sob condições de solo saturado e na maioria dos casos em regime permanente. De acordo com Ortigão (2007), casos de fluxo bidimensional geram a maioria dos problemas geotécnicos e que nesses casos existe uma curvatura tanto nas linhas de fluxo quanto nas equipotenciais.

Após considerar o fluxo bidimensional, uma forma eficiente de representá-lo graficamente é por meio da rede de fluxo. Essa representação consiste na construção de um desenho formado por linhas de fluxo e linhas equipotenciais, que se cruzam formando pequenos “elementos quadrados” chamados de elementos de fluxo, esses com intersecções de 90° . As linhas de fluxo indicam o caminho que a água percorre no interior do solo, enquanto as linhas equipotenciais representam pontos com a mesma carga hidráulica. A rede de fluxo é uma ferramenta muito utilizada para estimar vazões, verificar gradientes hidráulicos e analisar a poropressão em barragens. Sua construção geralmente é feita por métodos gráficos ou computacionais, respeitando a ortogonalidade entre as linhas e mantendo a proporção dos elementos para garantir a precisão da análise (FERREIRA, 2015). A Figura 02 mostra o exemplo de uma rede de fluxo, em um solo onde foi instalado uma pranchada.

Figura 02 – Rede de fluxo



Fonte: HORNBERGER et al. (1998)

A rede de fluxo permite estimar vazões de saída de barragens, pelas fundações e pelo maciço da barragem. Entretanto, além da construção da rede de fluxo, também é possível estimar a vazão de saída por meio de proposições teóricas. A partir da Lei de Darcy, aprimorada pela fórmula de Dachler (Marsal *et al.*, 1974), é possível determinar a vazão de água na fundação por meio da seguinte expressão:

Eq. 2:

$$Q_{fo} = \frac{K_f H D}{B + 0,88D}$$

Em que Q_{fo} é a vazão de água na fundação, K_f é o coeficiente de permeabilidade, D é a espessura do solo de fundação, H é a carga total do talude de montante e B é o comprimento da base da barragem na seção transversal.

2.2 Tipos de tratamento de barragem com fundação permeável

Um dos principais passos para a construção de uma barragem é o estudo da permeabilidade do solo onde ela será erguida. Como já mencionado anteriormente, a infiltração e o fluxo de água no solo podem gerar graves problemas estruturais na barragem. Para isso, existem alguns tipos de tratamentos que podem ser realizados para reduzir esse fluxo de água. Alguns dos tratamentos utilizados serão apresentados nos itens a seguir.

2.2.1 Trincheira de vedação

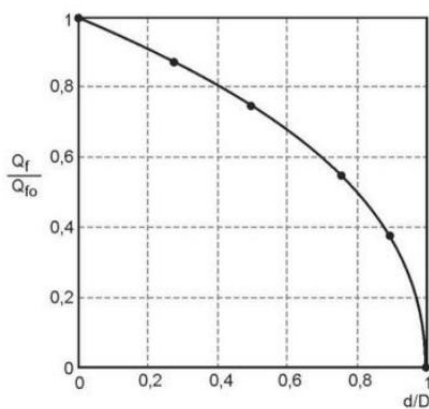
A trincheira de vedação é uma técnica amplamente utilizada em barragens de terra e enrocamento para o controle de percolação da água através da fundação, especialmente em terrenos formados por solos altamente permeáveis. Trata-se de uma escavação profunda, geralmente posicionada sob o eixo da barragem, que é preenchida com materiais de baixa permeabilidade, como argila compactada, concreto ou misturas de solo com bentonita (OLIVEIRA, 2008). A sua principal função é formar uma barreira hidráulica no subsolo, com o objetivo de reduzir ou até impedir o fluxo de água na fundação (ASSIS *et al.*, 2003).

Para situações de fluxo bidimensional plano com presença de trincheira de vedação, a vazão e a eficiência (em reduzir as vazões) pode ser estimada com base na seguinte equação e na Figura 03:

Eq. 3:

$$E = 1 - Q_f/Q_{fo}$$

Figura 03 - Variação das perdas de carga em função da penetração do cutoff (Cedergreen, 1967)



Fonte: Cedergreen (1967).

Em que Q_f é a vazão de água com a trincheira, Q_{fo} é a vazão de água sem a trincheira, d é a profundidade da trincheira e D é a profundidade da fundação.

Sabendo três desses valores, é possível obter o valor da vazão através de uma relação básica, uma vez que a Figura 03 nos fornece uma relação de proporção entre os valores descritos.

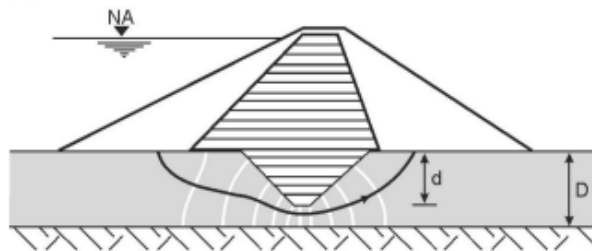
Essa técnica apresenta bons resultados em situações onde o solo da fundação é bastante permeável, pois consegue interromper diretamente o caminho preferencial da água. Em fundações rasas, a escavação é mais simples e o custo tende a ser menor. No entanto, dificuldades surgem em terrenos com lençol freático elevado ou com grandes espessuras de solo permeável. Nesses casos, a execução da trincheira exige sistemas auxiliares de drenagem, como poços de bombeamento ou ponteiros filtrantes, além de demandar maior tempo e logística para a retirada de material escavado (ASSIS *et al.*, 2003; OLIVEIRA, 2008).

Existem dois tipos principais de trincheira: a total e a parcial. A trincheira de vedação total é aquela que intercepta toda a espessura da camada permeável da fundação, sendo,

portanto, mais eficaz. Já a trincheira de vedação parcial, como o próprio nome sugere, penetra apenas uma parte dessa camada. Segundo Assis *et al.* (2003), essa solução visa aumentar o caminho de percolação da água, gerando menores gradientes hidráulicos e vazões. No entanto, sua eficácia depende bastante das características do solo.

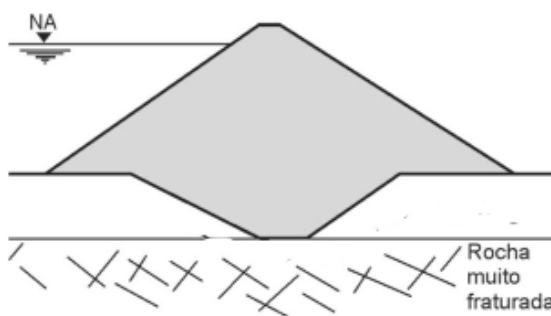
Cedergren (1989) quantificou essa limitação ao mostrar que uma trincheira com 50% de penetração na camada permeável reduz a vazão em apenas 15%, enquanto uma trincheira com 80% de penetração consegue reduzir em torno de 50%. Esses dados reforçam a necessidade de escavações mais profundas para se obter um desempenho hidráulico satisfatório, o que, por outro lado, eleva os custos e a complexidade da obra. As Figuras 04 e 05 evidenciam exemplos de trincheiras com vedação parcial e total, respectivamente.

Figura 04 – Trincheira de vedação parcial



Fonte: Faiçal Massad (2010).

Figura 05 – Trincheira de vedação total



Fonte: Adaptado de Faiçal Massad (2010).

2.2.2 Parede Diafragma

A parede diafragma é uma técnica utilizada como solução de vedação em fundações de barragens, especialmente em situações onde o solo é uma camada altamente permeável

assentada sobre uma fundação rochosa. Trata-se de uma estrutura construída no interior do solo, em concreto armado, com o objetivo de criar uma barreira vertical que reduza ou bloqueie o fluxo de água subterrâneo (MASSAD, 2010).

Se tratando da parede diafragma, esse fluxo de água subterrâneo é calculado por meio da fórmula de Ambrasseys. Através desse cálculo é possível verificar se houve o bloqueio ou redução da vazão:

Eq. 4:

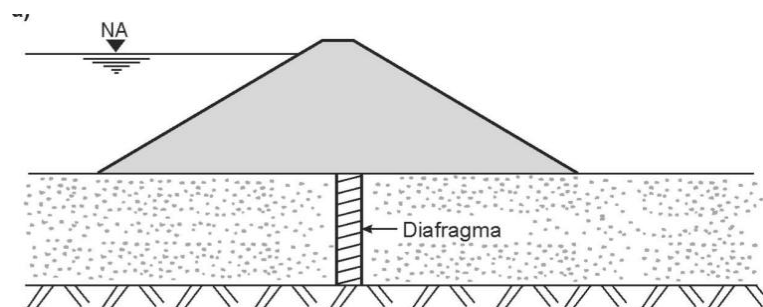
$$Q_f = \frac{k_f HD}{0,88D + B + b\left(\frac{k_f}{k_d} - 1\right)}$$

Em que K_d é a permeabilidade do diafragma, b é a largura do diafragma e as demais variáveis são as mesmas citadas anteriormente.

A execução da parede diafragma envolve a escavação de uma vala estreita e profunda, normalmente realizada com equipamentos específicos como o *Clam-Shell*. Durante a escavação, utiliza-se lama bentonítica para garantir a estabilidade das paredes da vala até que o concreto seja lançado.

De acordo com os materiais utilizados e a profundidade atingida, a parede diafragma apresenta alta resistência mecânica e durabilidade, características que a tornam indicada para barragens submetidas a grandes cargas hidráulicas. Por ser parecida com a trincheira vedante e ser executada até atingir a rocha ou uma camada impermeável, ela torna-se muito eficiente no controle da permeabilidade, no entanto, é mais utilizada quando o solo permeável é mais profundo que no caso das trincheiras vedantes, assim são métodos utilizados em situações diferentes.

Figura 06 – Parede diafragma



Fonte: Faiçal Massad (2010).

2.2.3 Tapete impermeável de montante

O tapete impermeável de montante é uma técnica amplamente utilizada no tratamento de fundações de barragens, especialmente quando o solo da fundação apresenta camadas permeáveis em profundidade e permeabilidade moderada. Essa solução consiste na aplicação de uma camada de material de baixa permeabilidade, geralmente solo compactado, disposta na área de montante da barragem, com o objetivo de dificultar o avanço da água pelo subsolo (OLIVEIRA, 2008).

A principal função desse tapete é aumentar o caminho de percolação da água, promovendo uma maior perda de carga e, conseqüentemente, reduzindo a subpressão na fundação da barragem. Após a aplicação do tapete, uma maneira de estimar o novo fluxo de água que percola pela fundação é por meio das seguintes fórmulas:

Eq. 5:

$$Q_f = \frac{k_f HD}{0,88D + B + x_r} \left(p / \frac{k_f}{k_t} > 100 \right)$$

No qual, as variáveis são dadas por:

$$a = \sqrt{\frac{k_t}{k_f z_t D}} \quad \bar{x} = \frac{\sqrt{2}}{a} \quad x_r = 0,63(\bar{x})$$

Em que X_r é o comprimento do tapete totalmente impermeável, K_t é a permeabilidade do tapete, Z_t é a espessura do tapete, K_f é a permeabilidade da fundação e D é a profundidade da fundação.

Sua aplicação costuma ser combinada com outros sistemas de controle, como drenagens a jusante ou trincheiras de vedação, reforçando a eficácia do conjunto (Assis *et al.*, 2003). Em situações específicas, o tapete também pode ser executado com materiais como concreto ou geomembranas, oferecendo uma solução superficial de controle de fluxo em locais onde o acesso é facilitado e o fluxo de água se dá em níveis mais rasos.

Na Figura 07, observa-se a aplicação de uma geomembrana utilizada para impedir o contato do líquido com o solo. Esse tipo de material geossintético apresenta excelente durabilidade e é amplamente empregado em obras de impermeabilização e proteção ambiental.

Figura 07 – Geomembrana Lisa de PEAD.

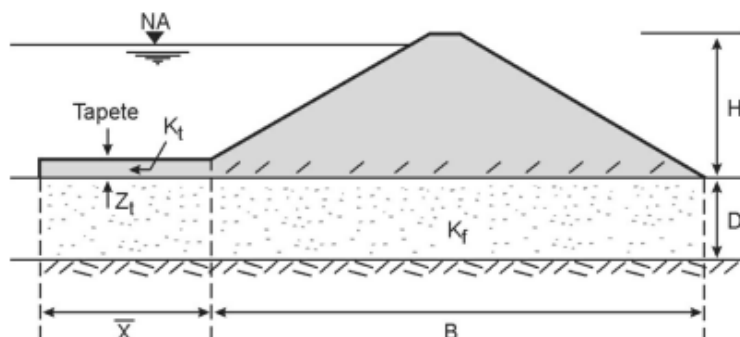


Fonte: Geomembrana Geossintéticos (2025).

Apesar de ser considerada uma alternativa de custo relativamente baixo para controle de percolação, o tapete impermeável requer atenção especial durante sua execução. Trincas podem se formar por ressecamento ou por deformações causadas pelo enchimento do reservatório, comprometendo sua continuidade e desempenho hidráulico (ASSIS *ET AL.*, 2003).

Quando bem projetado e executado, o tapete impermeável de montante pode representar uma solução prática e eficiente para o controle de percolação, especialmente quando integrado a outras técnicas de vedação. Na Figura 08 é possível observar uma barragem com o tapete impermeável de montante como seu principal método de tratamento, além disso, as variáveis especificadas na figura são as mesmas mencionadas no cálculo teórico.

Figura 08 – Tapete impermeável de montante



Fonte: Faiçal Massad (2010).

2.3 Fluxo de água na fundação de barragens.

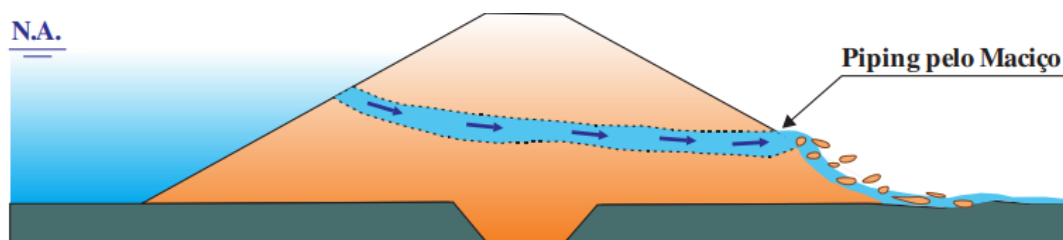
A passagem de água pela fundação de barragens é um fenômeno esperado, uma vez que os materiais usados na construção, especialmente os solos, não são totalmente impermeáveis. Ainda assim, quando esse fluxo ocorre de forma intensa e fora de controle, pode comprometer a estabilidade e segurança da barragem, como alerta Massad (2003). Nessas situações, a estrutura também perde uma de suas funções mais básicas, que é o controle do fluxo de água. Essa vulnerabilidade costuma ficar evidente já no primeiro enchimento do reservatório, uma fase crítica, onde falhas de projeto podem ser reveladas (CIGB, 1995).

Quando as vazões em uma barragem são elevadas, podem dar origem a patologias importantes. Merecem destaque a surgência e o *piping*. A surgência ocorre quando a água aparece de forma inesperada a jusante da barragem, geralmente por meio da fundação, enfraquecendo a coesão do solo e favorecendo instabilidades (FOSTER *et al* 1998). A erosão interna, ocorre quando o fluxo de água dentro do solo começa a remover finas partículas da estrutura, formando espaços vazios, esse processo pode evoluir para uma condição mais crítica, conhecida como *piping*, que é caracterizado pela formação de canais permanentes de fluxo dentro do solo, o que compromete a integridade da barragem (ICOLD, 2017).

Entre essas anomalias, o *piping* é considerado uma das mais graves. Trata-se de uma forma de erosão interna que tem sido responsável por diversas rupturas em barragens ao longo das décadas (FOSTER *et al.*, 1998). O processo se inicia quando a força da água supera a resistência do solo, removendo partículas e formando canais vazios dentro do maciço (OLIVEIRA, 2014). Esses canais aumentam com o tempo, conforme o fluxo se intensifica, o que agrava ainda mais a situação. Segundo Saré (2003) é importante analisar o pé de jusante da barragem, pois é onde o risco é maior por causa da combinação de alta pressão hidráulica e baixa tensão confinante, um ambiente propício para o início do colapso.

Na Figura 09 é possível observar a ocorrência de *piping* no interior do maciço da barragem, onde o fluxo de água percola de montante para jusante, transportando partículas do solo ao longo do caminho formado. A representação gráfica destaca a progressão do *piping* através do maciço, reforçando a necessidade de meios de controle desse fenômeno, como filtros e zonas de transição bem projetadas (OLIVEIRA, 2008).

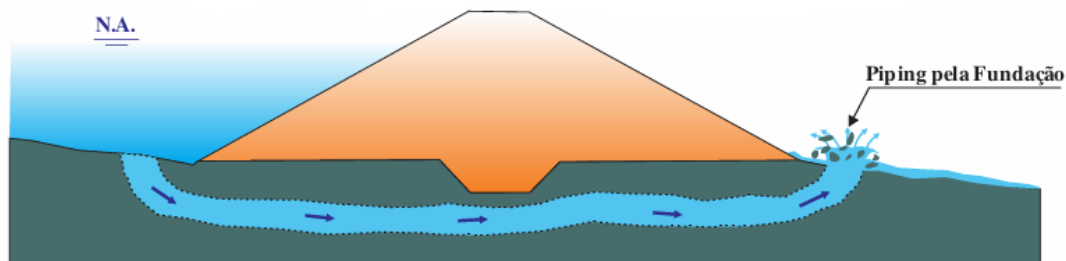
Figura 09 – Exemplo de piping no corpo da barragem



Fonte: Leme (2015).

Já na Figura 10 é verificado que o *piping* está ocorrendo na fundação da barragem, nesse caso quando as partículas são transportadas acabam gerando surgência de água à jusante da barragem, evidenciando um problema de percolação na fundação. Dessa forma, a trincheira de vedação não estaria sendo eficiente para o controle do fluxo de água, sendo necessário complementar com outro método ou aumentar a profundidade da trincheira.

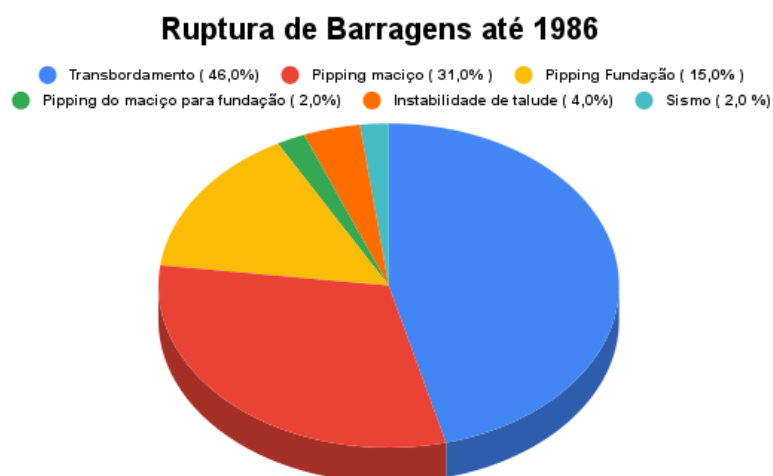
Figura 10 – Exemplo de piping em fundação de barragem



Fonte: Leme (2015).

Apoiado nas estatísticas levantadas por Foster *et al.* (1998), as causas mais comuns de ruptura de barragem são galgamento, fenômenos de erosão interna e instabilidades de taludes. Esse levantamento foi feito com base na análise de 11.192 barragens. No Gráfico 01 é possível observar de forma mais detalhada as causas de rompimento e suas porcentagens, assim, destacando que 15% desses rompimentos foram devido ao *piping* na fundação da barragem, que é o foco desse trabalho.

Gráfico 1 – Dados de ruptura de barragens até 1986



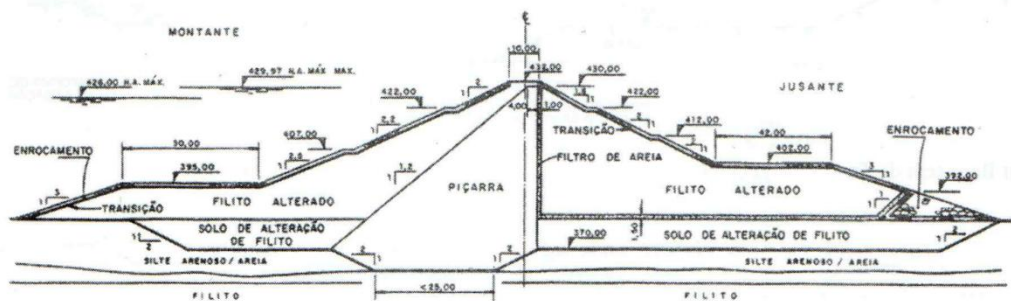
Fonte: Foster et al. (1998).

2.4 Casos de barragem com aplicação de tratamentos para o controle de piping e permeabilidade

Na construção de barragens, é necessário realizar uma análise prévia para verificar as condições do solo onde a estrutura será implantada, com atenção especial ao fluxo de água. Isso porque, em solos muito permeáveis, pode haver sérios riscos estruturais devido à percolação.

Por isso, é fundamental identificar previamente se há necessidade de aplicar algum tipo de tratamento e, caso positivo, definir qual seria o mais adequado. Um exemplo é a barragem de Atalhos, localizada no município de Brejo Santo (CE). Ao observar sua seção transversal, nota-se que o solo de fundação é predominantemente arenoso, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Barragem do Atalho – trecho central.

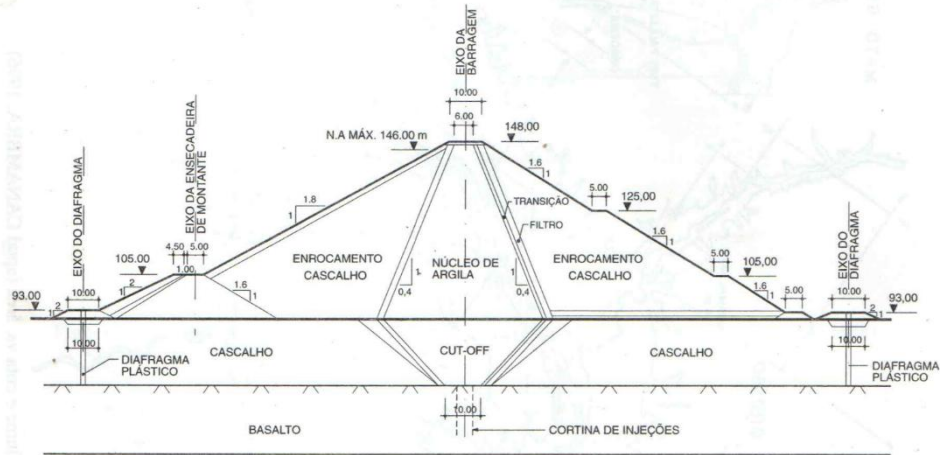


Fonte: Cruz (1996).

Na Figura 11, é possível observar que o projeto adotou uma trincheira vedante, justamente devido à alta permeabilidade do solo e à previsão de fluxo intenso de água. Esse tratamento foi essencial para evitar problemas como o *piping*. Analisando a imagem e como é descrito por Cruz (1996) a altura entre o material de fixação (rocha) e a barragem é em torno de 5 a 7 metros, o que a torna ideal para a execução de uma trincheira vedante.

O caso da barragem de Praia Grande (Figura 12) é um exemplo bastante semelhante. Nessa situação, ficou evidente que, devido ao solo local ser composto por cascalho de alta permeabilidade, seria necessário adotar medidas para reduzir o fluxo de água. Por isso, foram aplicados dois métodos de tratamento: a parede diafragma e a trincheira vedante. Como pode ser visto na figura 12, a profundidade até a rocha não ultrapassa os 10 metros, o que tornou financeiramente viável a execução dessas duas soluções.

Figura 12 – Barragem de Praia Grande – trecho central.



Fonte: Cruz (1996).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho envolve um estudo sobre a percolação de barragens com a fundação mais permeável que o maciço, englobando casos específicos e utilizando a versão estudante do GeoStudio 2007, especificamente o modelo numérico SEEP/W para simular o comportamento hidráulico de duas barragens localizadas no Nordeste.

Para isso, foram empregados os parâmetros geotécnicos comuns observados em materiais de fundação permeável, como um coeficiente de permeabilidade de 1.10^{-4} m/s, uma profundidade arbitrada de 10m, valor compatível com seções transversais de barragens descritas por Cruz (1996). Também foram consideradas as condições de contorno de montante e jusante de duas barragens reais localizadas na região Nordeste do Brasil.

Os resultados de vazões de saída obtidos a partir da modelagem foram, então, comparados com as proposições teóricas apresentadas na literatura. A seguir apresenta-se uma contextualização sobre o programa numérico, bem como as barragens selecionadas e as modelagens realizadas.

3.1 GeoStudio (SEEP/W)

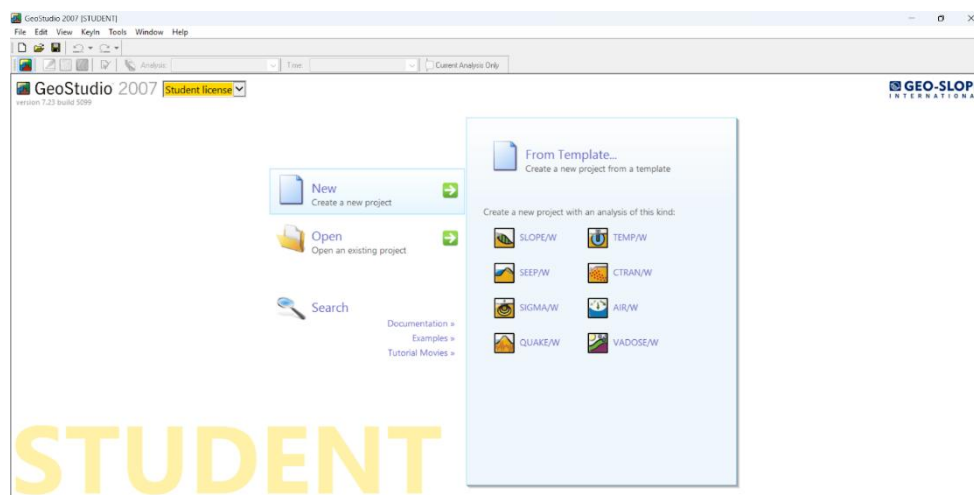
O GeoStudio é um Software que foi utilizado como uma ferramenta para analisar o fluxo de água na fundação da barragem. Desenvolvido pela GEOSLOPE International Ltd., o GeoStudio integra diversos módulos voltados para simulações de fenômenos físicos em solos, sendo o SEEP/W o módulo específico utilizado neste estudo. O SEEP/W é projetado para análises de fluxo de água em meios porosos, tanto saturados quanto não saturados, e é baseado no método dos elementos finitos, o que possibilita resolver problemas complexos de forma mais simples.

O *software* permite a realização de modelagem bidimensional, o que significa que os cálculos são realizados com base em uma seção plana da estrutura, em muitos casos uma seção transversal do barramento. Essa abordagem é ainda mais útil quando se trata de uma barragem localizada em vales com geometria relativamente uniforme ao longo de seu eixo. Ortigão (2007) observa que a maioria dos problemas em geotecnia podem ser representados de forma bidimensional, resultando em dados bastante representativos quando há simetria no sistema.

Um dos principais diferenciais do GeoStudio é sua interface intuitiva, que permite ao usuário criar a geometria do sistema, especificar materiais com propriedades específicas, inserir condições de contorno e simular diferentes cenários. Além disso, o software gera visualizações gráficas da rede de fluxo, facilitando a interpretação dos resultados.

Entretanto, por se tratar de uma versão estudante, o software apresenta limitações técnicas específicas. A principal delas se refere ao número máximo de nós e elementos que podem ser usados na malha de elementos finitos. Em função dessa limitação, a modelagem desenvolvida neste trabalho concentrou-se nas áreas mais críticas para a análise de percolação: a fundação da barragem, a trincheira de proteção e o tapete impermeável de montante. O corpo da barragem foi omitido da modelagem, pois sua inclusão exigiria um número elevado de elementos e as vazões geradas no maciço da barragem foram insignificantes comparadas aos do maciço de fundação. A Figura 13 mostra a interface de entrada do software, onde é possível observar as opções de criação de novos projetos, abertura de projetos existentes e escolha de modelos específicos, como SEEP/W (análise de fluxo), SLOPE/W (estabilidade de taludes), entre outros.

Figura 13 – Interface do Geostudio.



Fonte: GEOSLOPE International Ltd. (2007).

O SEEP/W apresenta três módulos principais:

1. *Define*: É um módulo onde são inseridas todas as informações do modelo, no qual se define a geometria da barragem e de seus elementos, como fundação, trincheira e tapete impermeável. Também são atribuídas as propriedades dos materiais e as condições de contorno. Essa fase é essencial, pois garante a representação dos dados no modelo numérico. É neste

módulo também que se atribui a malha de elementos finitos, que será utilizada nas etapas de cálculo e análise.

2. *Solver*: O Solver é responsável por executar os cálculos da simulação, aplicando o método dos elementos finitos para resolver a equação do fluxo de água, considerando as propriedades dos solos e condições de contorno. Ao final do processo, é gerado um arquivo de resultados que pode ser visualizado e analisado na próxima etapa.

3. *Contour*: Nessa etapa os resultados são apresentados de forma gráfica e numérica. O *contour* permite visualizar os campos de potencial hidráulico, linhas de fluxo, gradientes, vazões, entre outras variáveis. Essa visualização detalhada facilita a interpretação do resultado, destacando assim áreas críticas com alta vazão ou que fujam do esperado.

3.2 Caracterização das Estruturas Analisadas

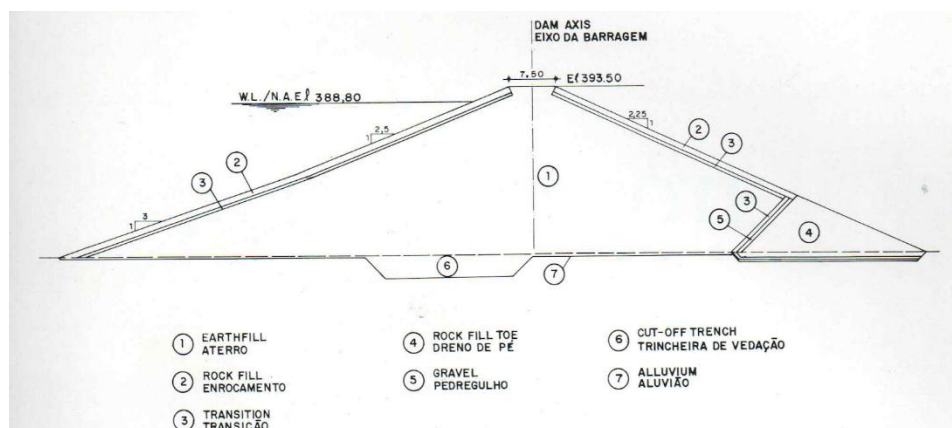
Para a realização deste estudo, foram selecionadas duas barragens: Entremontes e Frios. A escolha dessas estruturas fundamenta-se em características geológicas e geométricas que apresentam uma certa uniformidade, o que reduz a complexidade de modelagem e viabiliza uma representação mais precisa na versão estudante do SEEP/W. Essas barragens não apresentam variações significativas ao longo de sua fundação ou corpo, favorecendo a definição dos parâmetros necessários à simulação numérica. Tal abordagem permite um estudo mais eficaz dos efeitos de diferentes soluções de tratamento de fundação, como a trincheira vedante e o tapete impermeável, proporcionando uma melhor compreensão da influência dessas técnicas no controle da percolação e na segurança da estrutura.

3.2.1 Barragem de Entremontes

A Barragem de Entremontes está localizada no município de Parnamirim, no sertão de Pernambuco, e integra um conjunto de obras fundamentais para a segurança hídrica do semiárido nordestino. Sua construção foi motivada pela necessidade de garantir o abastecimento de água em uma região marcada por longos períodos de estiagem e escassez hídrica. A barragem faz parte do Sistema Adutor do Oeste, que busca levar água de forma regular a dezenas de localidades interioranas. Além de abastecer a população, a estrutura também tem papel importante no suporte à agricultura e à pecuária da região. Com capacidade

de acumulação expressiva, a barragem apresenta uma estrutura em enrocamento com núcleo argiloso e fundações predominantemente em materiais de baixa permeabilidade. A Figura 14 mostra a seção transversal da barragem de Entremontes e toda sua estrutura interna e o Quadro 01 apresenta informações técnicas sobre essa barragem.

Figura 14 – Seção transversal da barragem de Entremontes.



Fonte: Araújo (1990).

Quadro 01 – Informações de Entremontes

Barragem de Entremontes	
Localização	Parnamirim – PE
Ano de construção	1982
Capacidade total	339,33 hm ³
Área do reservatório	4 688 ha
Extensão do barramento	990 m
Altura máxima do barramento	29,5 m
Cota do coroamento	393,50
Cota da soleira do vertedouro	388,80
Tipo de vertedouro	Soleira livre com perfil Creager
Tipo de barragem	Terra homogênea com enrocamento
Rio barrado	Rio São Pedro (ou rio Jacaré)

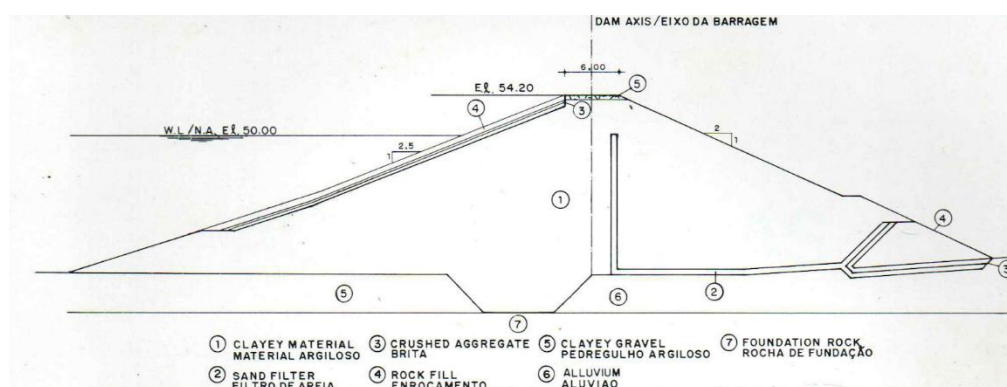
Fonte: Araújo (1990).

3.2.2 Barragem de Frios

A Barragem de Frios, localizada no município de Umirim, no Ceará, foi construída com o objetivo de fortalecer o sistema hídrico do estado, atendendo tanto a população local quanto a projetos de desenvolvimento regional. Situada na bacia hidrográfica do Rio Curu, uma

estrutura foi projetada para resistir às condições climáticas adversas da região, desempenhando um papel crucial no abastecimento humano e na sustentabilidade das atividades econômicas locais. Com uma cota máxima de 450 metros e situada numa área com relevo relativamente plano, a Barragem de Frios apresenta fundações rasas e homogêneas, o que facilita a sua construção e operação. Sua estrutura se destaca pela eficiência no armazenamento de água, funcionando como um reservatório de regularização e garantindo vazões constantes mesmo durante períodos de estiagem prolongados. Na Figura 15 é possível observar a barragem citada através de uma seção transversal dela, já no Quadro 02 é possível verificar algumas informações básicas sobre a barragem de Frios.

Figura 15 – Seção transversal da barragem de Frios.



Fonte: Araújo (1990).

Quadro 02 – Informações de Entremontes

Barragem de Frios	
Localização	Umirim - Ce
Ano de construção	1989
Capacidade total	33,03 hm ³
Área do reservatório	608 ha
Extensão do barramento	630 m
Altura máxima do barramento	20,7 m
Cota do coroamento	54,20
Cota da soleira do vertedouro	50,00
Tipo de vertedouro	Soleira com perfil Creager
Tipo de barragem	Terra homogênea com filtro e dreno interno
Rio barrado	Rio Frios

Fonte: Araújo (1990).

3.3 Metodologia

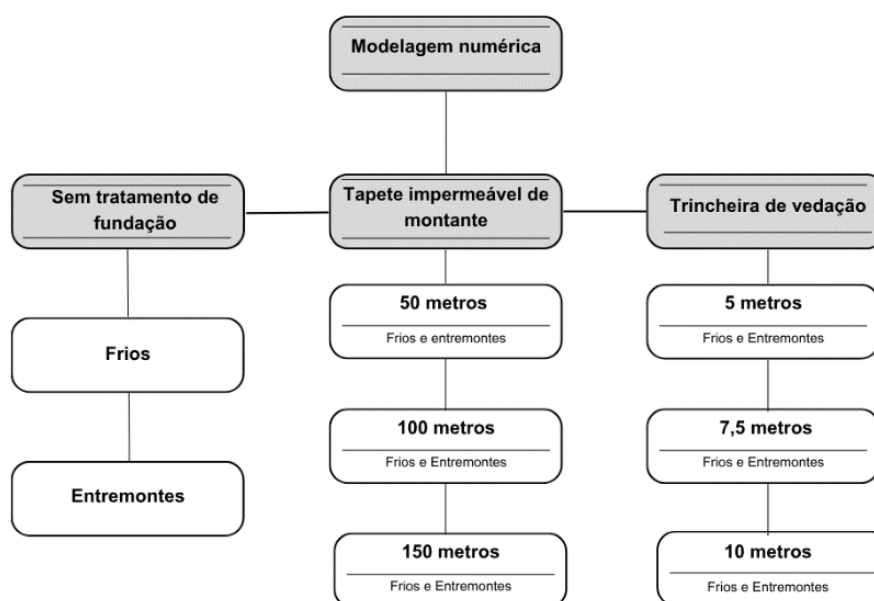
3.3.1 Modelagem numérica das barragens

Para o desenvolvimento deste estudo, foram utilizadas como base a geometria das barragens de Entremontes e Frios. Os principais dados considerados para a modelagem foram a cota da soleira e o comprimento da seção transversal da base dessas barragens, parâmetros essenciais para a construção do modelo numérico e a simulação do comportamento hidráulico das estruturas. Esses dados permitiram representar de forma adequada as condições reais das barragens, conferindo maior confiabilidade aos resultados obtidos.

A análise paramétrica da barragem foi conduzida a partir das informações referentes à sua geometria e à fundação. Foram consideradas variações de cenário, incluindo a barragem sem qualquer tratamento de fundação e com a implantação de trincheiras vedantes com profundidades de 5, 7,5 e 10 metros. A escolha desses valores se deu por representarem bons pontos de transição até a condição de vedação total, podendo assim serem comparados. Além disso, por não serem profundidades muito próximas entre si, torna-se mais evidente a diferença de vazão entre os diferentes casos. Trincheiras com profundidades inferiores a 5 metros não foram consideradas, pois são pouco usuais devido à sua baixa eficiência no controle da percolação.

Também foram considerados cenários com a aplicação de tapetes impermeáveis de montante, com comprimentos de 50, 100 e 150 metros. A escolha desses valores se deu por abrangerem uma faixa representativa e próxima das dimensões usualmente adotadas em projetos reais, permitindo uma análise mais abrangente do desempenho hidráulico. Tapetes com comprimentos muito inferiores não apresentariam eficiência significativa, enquanto extensões maiores poderiam se tornar inviáveis do ponto de vista econômico. A Figura 16 demonstra um fluxograma com todas as modelagens plotadas no software, totalizando 14 modelos numéricos

Figura 16 – Fluxograma das modelagens realizadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, nas modelagens optou-se por não incluir o corpo completo da barragem. Isso ocorreu devido a versão utilizada do software (estudante) apresentar uma limitação no número de elementos para um máximo de 500 elementos. Modelar todo o corpo da barragem consumiria uma quantidade significativa de elementos e ao excluir o corpo da barragem, permitiu um refinamento maior da malha no material de fundação.

Inicialmente, foram feitas simulações considerando o maciço da barragem com uma permeabilidade mil vezes menor do que a da fundação, com o objetivo de verificar possíveis influências nas vazões. Contudo, os resultados da modelagem numérica indicaram que o fluxo de água e a vazão de saída não foram influenciados pela presença do maciço da barragem (foram praticamente iguais). Em função disso, optou-se por realizar a modelagem com o domínio do fluxo somente pelas fundações e considerando as técnicas de tratamento (tapete impermeável de montante e trincheira vedante). Em paralelo com a modelagem numérica foram realizados cálculos de vazão baseados em composições teóricas, utilizando as equações apresentadas na revisão bibliográfica. Esses valores teóricos foram comparados com os resultados obtidos nas simulações do modelo numérico, servindo como forma de verificação e comparação entre ambos os métodos.

Durante a simulação no *software*, a geometria da estrutura foi dividida em pequenas unidades, compondo uma malha computacional. Essa divisão permite que o problema seja resolvido por partes, o que é característico da metodologia dos elementos finitos: transformar um sistema contínuo em vários elementos finitos e bem definidos. Essa abordagem favorece uma análise mais clara do comportamento hidráulico da estrutura em diferentes situações.

Para cada uma das regiões modeladas, como a trincheira, o tapete impermeável e o material de fundação, foram atribuídas propriedades hidráulicas específicas, com base nos valores apresentados em Azeredo *et al.* (2011). No caso do maciço de fundação, considerou-se uma profundidade de 10 metros, assumindo-se um único tipo de solo totalmente saturado. Essa escolha foi feita, em parte, para reduzir a complexidade do modelo, para contornar as limitações impostas pela versão estudante do software e também por ser uma faixa de profundidade muito comum, assim como apresentado em diferentes exemplos de barragens em por Cruz (1996).

A permeabilidade adotada para o solo de fundação foi de 0,0001 m/s, valor típico de materiais arenosos com porosidade elevada, conforme descrito por Azeredo et al. (2011). A definição desse parâmetro visa simular uma condição mais crítica de percolação, permitindo avaliar com mais clareza o desempenho de soluções adotadas para o controle do fluxo de água, como o uso de trincheiras vedantes e tapetes impermeáveis.

3.3.2 Definição do projeto no módulo define

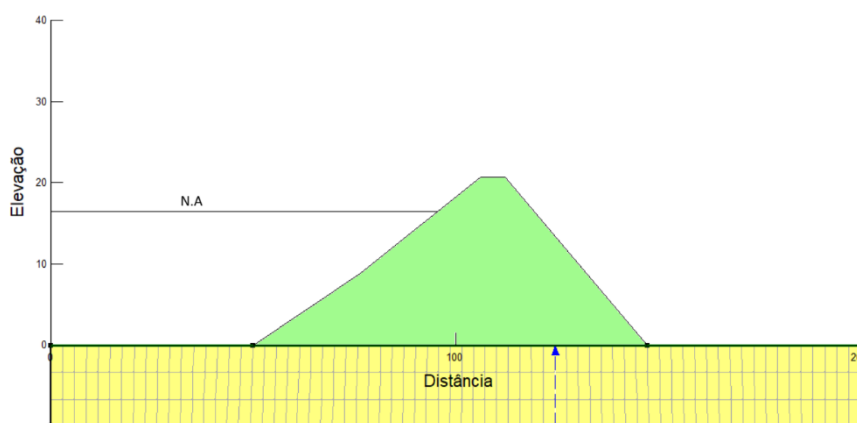
O primeiro passo para iniciar o projeto foi definir o tipo de análise mais adequada. Como se trata de um estudo sobre a percolação de água na fundação de barragens, o módulo mais apropriado do GeoStudio é o SEEP/W, dentro dele, foi realizada uma análise de fluxo permanente, ou seja, uma condição em que o nível do lençol freático de montante e jusante permanece constante ao longo do tempo, sem variações durante a simulação. Após selecionar e criar o projeto, foram ajustadas as unidades de medida para facilitar o trabalho com os valores que seriam inseridos. Também foi importante configurar corretamente a escala do desenho, garantindo que a barragem fosse projetada nas proporções certas e dentro da área esperada para a modelagem.

3.3.2 Construção da geometria

Essa etapa foi fundamental, para a modelagem pois nela foi representada a geometria das barragens de Frios e Entremontes. O principal dado considerado foi o comprimento da base de cada uma, sendo 147,6 metros para Entremontes e 97,4 metros para Frios. Além disso, no caso de modelos que utilizam tratamento de fundação, também foram desenhadas as estruturas para o tratamento.

Como pode ser observado, na Figura 17 está representada a barragem e sua fundação, porém a malha foi aplicada apenas na fundação (como já mencionado anteriormente). A discretização foi feita utilizando elementos quadrilaterais. No total, a malha contém 310 nós e 244 elementos, garantindo uma boa resolução para a simulação do fluxo de percolação.

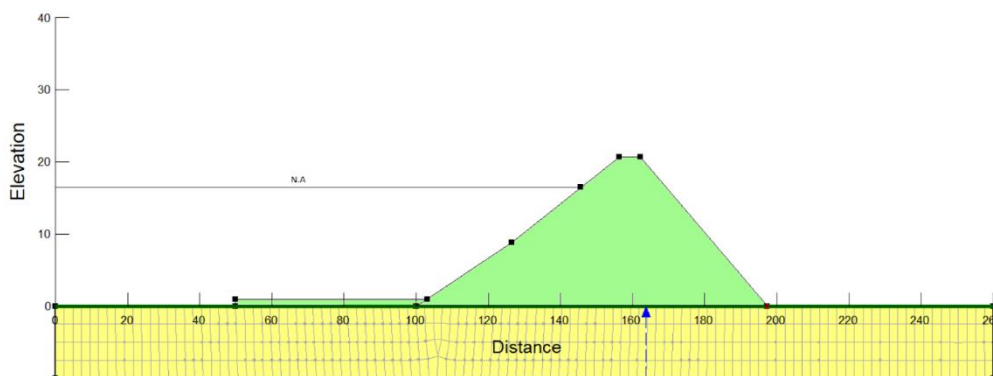
Figura 17 – Barragem de Frios



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 18 é possível observar não apenas a dimensão da barragem, mas também a geometria do tapete impermeável de montante. Para cada barragem foram realizados três estudos variando o comprimento do tapete: 50, 100 e 150 metros. No exemplo mostrado, o tapete possui extensão de 50 metros. Sua malha foi feita utilizando elementos quadrilaterais. No total, a malha contém 548 nós e 435 elementos.

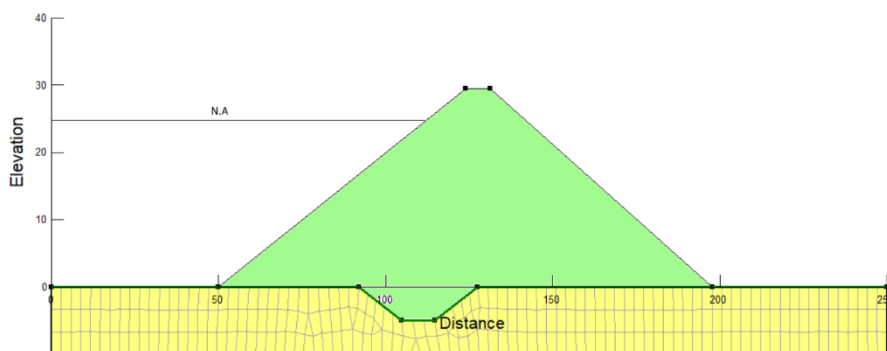
Figura 18 – Barragem de Frios com tapete impermeável de montante de 50 metros.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste caso, é possível observar a trincheira de vedação com 5 metros de profundidade, ocupando parte da fundação da barragem. Também foi realizada uma modelagem com trincheiras de 7.5 e 10 metros de profundidade. Todas as situações foram consideradas com o objetivo de permitir uma comparação entre os três cenários. Sua malha possui predominantemente elementos quadrilaterais, mas com alguns triangulares. Totalizando 340 nós e 253 elementos.

Figura 19 – Barragem de Entremontes com trincheira de vedação (5 metros)



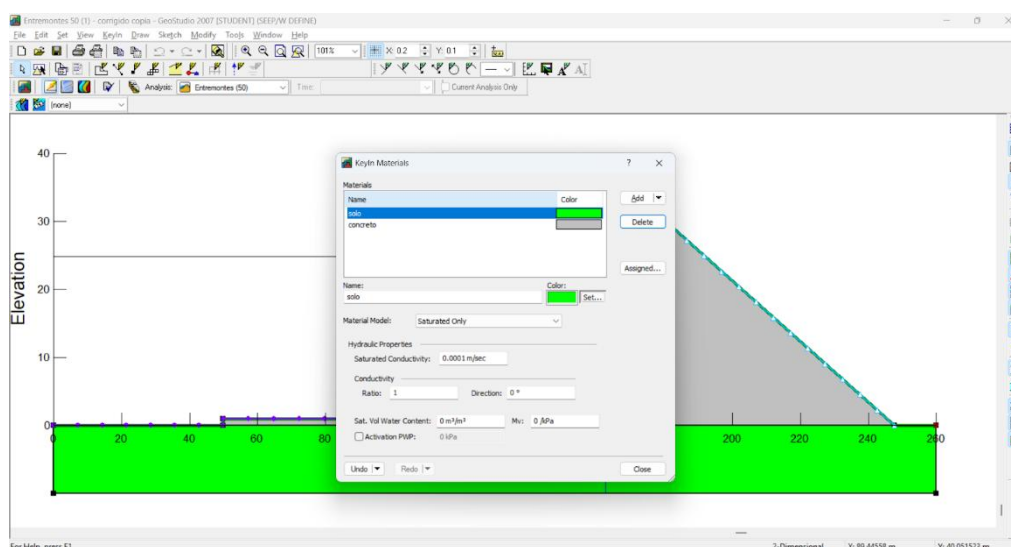
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Definição dos materiais e propriedades hidráulicas

Após a construção da geometria da barragem e das estruturas de controle da percolação, o passo seguinte foi definir os materiais que compõem cada parte do modelo. Nessa fase, foram atribuídas propriedades hidráulicas específicas às regiões desenhadas, como

fundação, trincheira vedante e tapete impermeável de montante. A fundação foi considerada como um solo saturado, com permeabilidade de 1×10^{-4} m/s (0,0001 m/s), valor que representa solos mais porosos, como arenito. Já para os elementos de tratamento, como a trincheira e o tapete, foi adotada uma permeabilidade significativamente menor de 1×10^{-7} m/s (0,0000001 m/s), condizente com materiais de baixa permeabilidade, como o concreto. Esses parâmetros foram inseridos diretamente no módulo Kelyn do GeoStudio (Figura 20), e foram fundamentais para que o modelo representasse adequadamente o comportamento do fluxo de água no subsolo da barragem.

Figura 20 – Materiais e propriedades hidráulicas



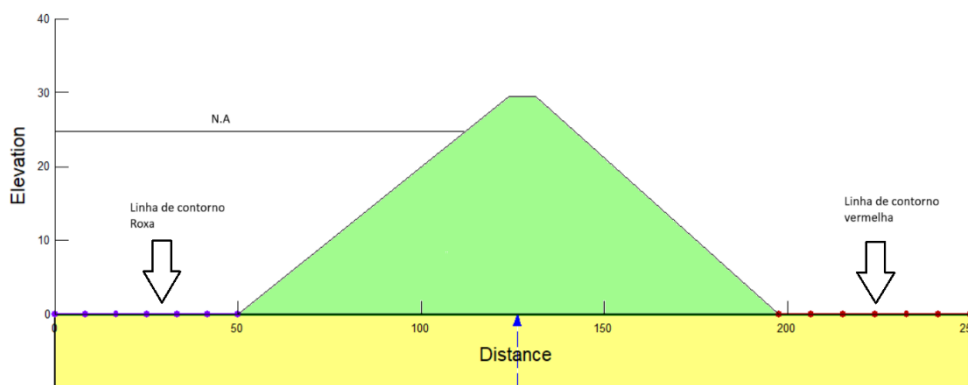
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.4 Condições de contorno

Consiste na definição das condições de contorno, uma etapa essencial para garantir que o modelo represente corretamente o comportamento hidráulico da estrutura. Nessa fase, foram atribuídos os valores da elevação da água à jusante de cada barragem, com base na cota do reservatório. Essa informação é um dos principais fatores que afetam o estudo, já que a diferença de nível da água é um dos responsáveis pela intensificação do fluxo. O nível de água a montante foi fixado em 24,8 metros para Entremontes e 16,5 metros para Frios, que representa a cota da soleira dessas barragens, enquanto à jusante foi atribuído o valor de 0. Essas condições são fundamentais para que o *software* consiga simular corretamente o caminho percorrido pela

água dentro da fundação e dos elementos de tratamento, como o tapete impermeável e a trincheira vedante.

Figura 21 – Condições de contorno (Entremontes)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 21 é possível observar uma condição de contorno roxa à esquerda representando a altura d'água a montante (24,8m) da barragem e uma condição de contorno vermelha a direita, representando a altura a jusante (0 m), essa diferença entre os níveis é responsável por fazer o fluxo da água correr de montante para jusante.

3.3.5 Execução da análise

Essa é a etapa final, pois após concluir os passos anteriores, a próxima etapa é rodar a análise dentro do software. Para isso utilizou-se o módulo *solver*, para processar todos os dados inseridos. Ao iniciar e resolver a simulação, o módulo *contour* gera os resultados como linhas equipotenciais, linhas de fluxo e o valor da vazão total de percolação. Esses dados foram essenciais para entender a eficiência dos tratamentos e para comparar com os resultados teóricos.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Após a construção dos modelos e definição das configurações a serem testadas, esta etapa do trabalho apresenta os principais resultados obtidos ao longo das simulações dos cálculos. Além disso, os resultados são apresentados de forma visual, com o objetivo de facilitar a interpretação e a comparação entre os diferentes cenários analisados.

Para cada barragem, foram simulados sete cenários: um sem nenhum tipo de tratamento (caso base), três com diferentes configurações de trincheira vedante (5, 7.5 e 10 metros de profundidade) e três com variações no uso do tapete impermeável (50, 100 e 150 metros). Após o processamento, foi possível comparar graficamente cada situação, observando diferenças nas linhas de fluxo, nas zonas de pressão e nas vazões obtidas.

A comparação entre os cenários ajuda a entender melhor o desempenho das soluções aplicadas, além de indicar quais configurações oferecem maior eficiência no controle da percolação. Essa análise também contribui para validar o modelo numérico adotado, já que os padrões de fluxo e os valores de vazão puderam ser comparados com estimativas teóricas previamente calculadas. Uma semelhança entre os dois métodos reforça a confiabilidade dos resultados e demonstra que a estimativa teórica consegue representar bem o comportamento previsto pelo modelo numérico.

4.2 Cálculo da vazão por métodos teóricos

Além da modelagem numérica, este trabalho também utilizou métodos teóricos para estimar a vazão de percolação nas fundações das barragens analisadas. Essas estimativas foram feitas com base em fórmulas consagradas na literatura técnica. A seguir, são apresentados os cálculos realizados para os diferentes cenários de cada barragem, considerando situações com e sem tratamento de percolação.

4.2.1 Barragem de frios

4.2.1.1 Sem tratamento

Para o cenário sem tratamento de fundação, ou seja, sem a presença de trincheiras ou tapetes impermeáveis, foi utilizada a eq. 02, com base nos estudos de Dachler (1994), voltada para o cálculo da vazão em fundações permeáveis:

Eq. 2:

$$Q_{fo} = \frac{K_f * H * D}{B + 0,88D}$$

Utilizando os valores de K_f igual a 0,0001m/s, H igual a 16,5m, D igual a 10m e B igual a 97,4m, o valor final obtido para a vazão foi de $1,55367 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s/m}$.

4.2.1.2 Com tapete impermeável de montante (50m)

Para os cenários que consideram o uso de tapete impermeável de montante, foi utilizada a eq. 5 para descrever a percolação em todos os diferentes tipos de comprimento:

Eq. 5:

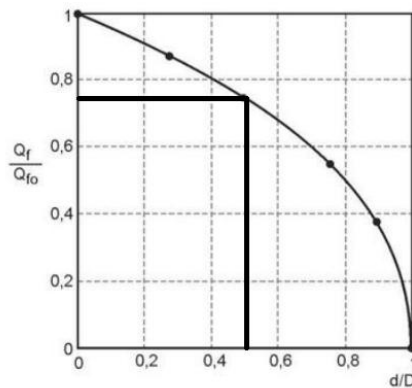
$$Q_f = \frac{K_f * H * D}{0,88 * D + B + X_r} \quad ; \quad x_r = 0,63x$$

Como o valor do comprimento do tapete (x) já foi previamente definido no modelo, não é necessário calcular seu valor teórico. Assim, a única variável auxiliar que precisa ser estimada é x_r , utilizando os valores de K_f igual a 0,0001m/s, H igual a 16,5m, D igual a 10m e B igual a 97,4m, o valor final obtido para a vazão foi de $1,19826 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s/m}$.

4.2.1.3 Com trincheira vedante (5 metros)

Com base na razão entre a profundidade da trincheira (d) e a espessura da fundação permeável (D), foi utilizado a Figura 21 que apresenta o valor de Q_f/Q_{fo} em função de d/D, assim, para d = 5 metros e D = 10 metros:

Figura 22 – Relação de Q_f/Q_{fo} para $d = 5$ e $D = 10$.



Fonte: Adaptado de Cedergreen (1967).

Logo:

$$\frac{Q_f}{Q_{fo}} = 0,75$$

Sabendo que o valor de Q_{fo} é $1,55367 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, o valor de Q_f obtido é de $1,16525 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

A Tabela 01 apresenta os resultados obtidos para os diferentes tipos de tratamento aplicados em Frios, incluindo o cenário sem nenhum tipo de intervenção, considerando as vazões de saída obtidas nas simulações. É possível observar uma redução significativa da vazão tanto com o aumento do comprimento do tapete impermeável quanto com o aprofundamento da trincheira vedante, assim, os efeitos são mais evidentes à medida que as dimensões dos dispositivos de contenção aumentam. No entanto, nem sempre a melhor escolha será aquela que apresenta a menor vazão, pois fatores econômicos também devem ser considerados. Tapetes muito longos, por exemplo, podem não oferecer uma relação custo-benefício favorável.

Tabela 1 – Informações de Frios

Tratamento aplicado	Vazão final (Q_f m²/s/m)
Sem tratamento	$1,5536.10^{-4}$
Tapete impermeável de montante (50m)	$1,1982.10^{-4}$
Tapete impermeável de montante (100m)	$9,7517.10^{-5}$
Tapete impermeável de montante (150m)	$8,2212.10^{-5}$
Trincheira vedante (5 m)	$1,1652.10^{-4}$
Trincheira vedante (7,5 m)	$8,5452.10^{-5}$
Trincheira vedante (10 m)	0

Fonte: Elaborada pelo autor

4.2.2 Barragem de Entremontes

4.2.2.1 Sem tratamento

Para a Barragem de Entremontes, o cálculo da vazão de percolação na fundação, no cenário sem qualquer tipo de tratamento:

Eq. 2:

$$Q_{fo} = \frac{K_f * H * D}{B + 0,88D}$$

Utilizando os valores de K_f igual a 0,0001m/s, H igual a 24,8m, D igual a 10m e B igual a 147,6 m, o valor final obtido para a vazão foi de $1,58568 \times 10^{-4}$ m³/s/m

4.2.2.2 Com tapete impermeável de montante (150m)

Nesse cenário de Entremontes, o tamanho do tapete foi definido como 150m, como não foi necessário calcular o comprimento teórico do tapete, basta apenas achar o valor de X_r e aplicar:

Eq. 5:

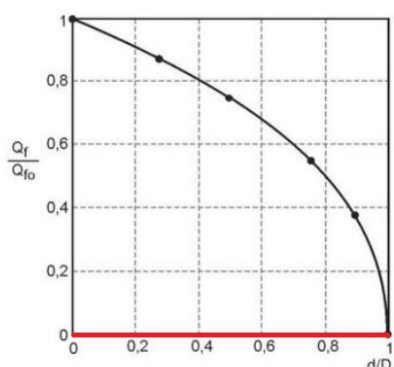
$$Q_f = \frac{K_f * H * D}{0,88 * D + B + X_r} \quad ; \quad x_r = 0,63 * x$$

Assim, calculando x_r e utilizando os valores de K_f igual a 0,0001m/s, H igual a 24,8 m, D igual a 10 m e B igual a 147,6 m, o valor final obtido para a vazão foi de $9,8844 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

4.2.2.3 Com a trincheira vedante (10 metros)

No caso da análise da Barragem de Entremontes, como nesse caso a trincheira vedante abrange toda a fundação, indo até a camada mais impermeável, a vazão é reduzida bruscamente, não deixando espaços para haver um grande fluxo de água. Dessa forma, ao analisar a figura 22 a relação da profundidade da trincheira (d) e a espessura da camada permeável de fundação (D), observou-se que como a razão entre $d = 10 \text{ m}$ e $D = 10 \text{ m}$ é igual a 1 o valor de Q_f seria 0.

Figura 23 – Relação de Q_f/Q_{f0} para $d = 10$ e $D = 10$.



Fonte: Adaptado de Cedergreen (1967).

A Tabela 02 apresenta os resultados teóricos obtidos para a barragem de Entremontes, considerando diferentes formas de tratamento da fundação. É possível notar uma tendência clara de redução da vazão final à medida que se aplicam intervenções mais eficazes, como o alongamento dos tapetes impermeáveis ou o aprofundamento das trincheiras vedantes. Esses dados reforçam o papel importante dos tratamentos na diminuição do fluxo percolado.

Tabela 2 – Informações de Entremontes

Tratamento aplicado	Vazão final (Q_f m²/s/m)
Sem tratamento	$1,5856 \cdot 10^{-4}$
Tapete impermeável de montante (50m)	$1,3200 \cdot 10^{-4}$
Tapete impermeável de montante (100m)	$1,1303 \cdot 10^{-4}$
Tapete impermeável de montante (150m)	$9,8844 \cdot 10^{-5}$
Trincheira vedante (5 m)	$1,1892 \cdot 10^{-4}$
Trincheira vedante (7,5 m)	$8,7212 \cdot 10^{-5}$
Trincheira vedante (10 m)	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Modelagem numérica

Tratando agora da modelagem numérica, foi possível simular o comportamento do fluxo de água nas fundações das barragens de Entremontes e Frios com o apoio do software SEEP/W GeoStudio. A modelagem permitiu uma visualização mais clara dos efeitos de cada tratamento aplicado, como trincheiras e tapetes impermeáveis, e facilitou a análise das linhas de fluxo, vazões e equipotenciais. Abaixo estão apresentados os modelos e os resultados obtidos para os diferentes cenários simulados em cada barragem.

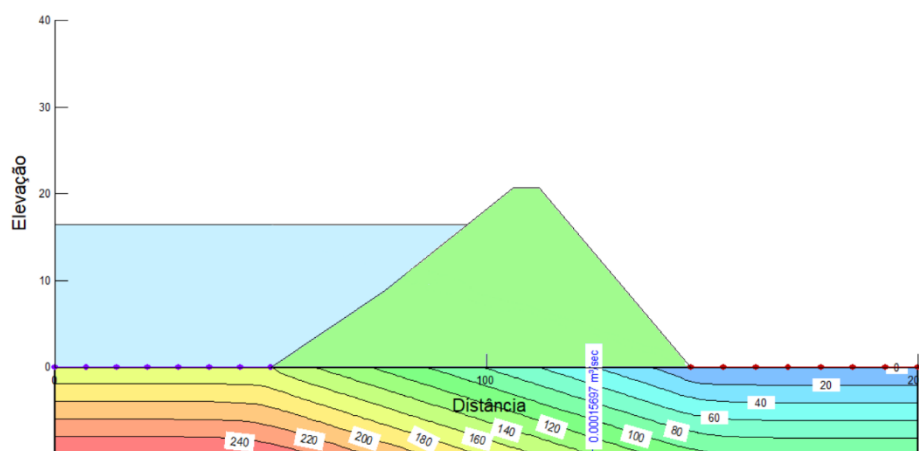
4.3.1 Barragem de Frios

4.3.1.1 Sem tratamento

Os resultados gerados no modelo numérico permitiram observar as linhas de fluxo na fundação. A Figura 24 mostra o comportamento do fluxo subterrâneo, indicando que a água atravessa diretamente a fundação da barragem, sem a presença de obstáculos que reduzam sua percolação. Além disso, observa-se a poropressão e a carga hidráulica, que diminuem progressivamente na direção de jusante, com a poropressão caindo de 240 para 0 kpa. Essa configuração serve como referência para comparação com os demais cenários em que foram aplicados tratamentos como trincheiras vedantes ou tapetes impermeáveis. A vazão total calculada pelo programa é mostrada abaixo na Figura 24 e foi de $1,5697 \times 10^{-4}$ m³/s.

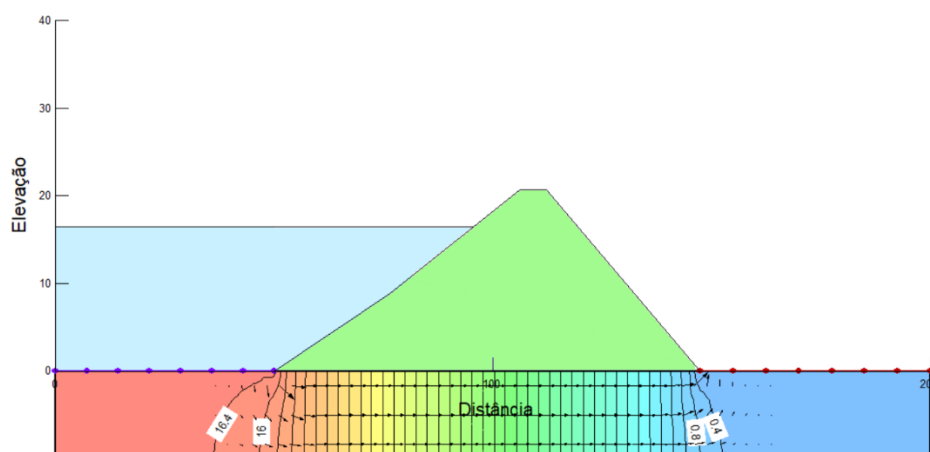
Figura 24 – Modelagem da barragem de Frios

(a) Poro-pressões (kPa)



Fonte: Elaborado pelo autor.

(b) Cargas hidráulicas totais (m) e vetores de fluxo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

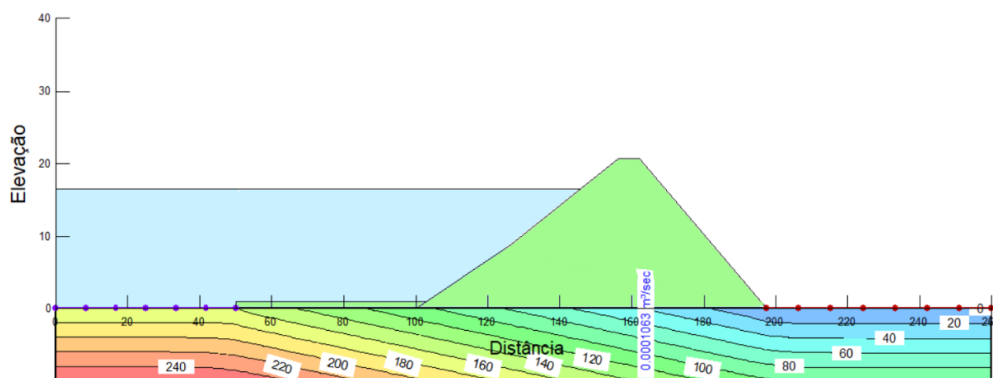
4.3.1.2 Com tapete impermeável de montante (50m).

Aplicando o tapete impermeável na região de montante, o fluxo de água passa a percorrer um trajeto mais longo através da fundação, o que reduz a percolação e a vazão. Na Figura 25, observa-se a modelagem da Barragem de Frios com a implementação de um tapete impermeável de 50 metros, evidenciando essa alteração no comportamento do fluxo subterrâneo, nesse caso é possível observar que o valor da vazão passa a ser $1,063 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Assim, observou-se uma redução significativa em comparação à modelagem sem nenhum tipo de tratamento de fundação. No entanto, valores como os de poropressão, que dependem apenas da altura da água, permanecem os mesmos em todos os cenários de Frios. Essa diminuição na

vazão final já representa um ganho em termos de segurança, uma vez que contribui para a estabilidade da barragem.

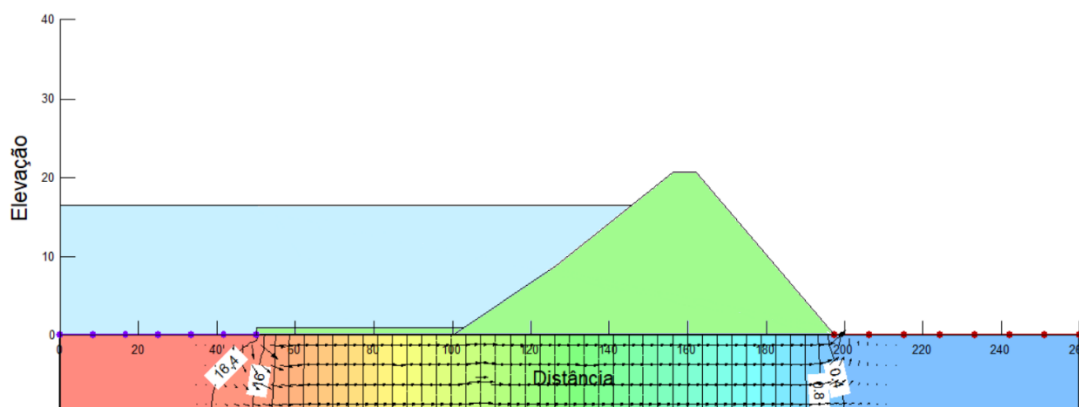
Figura 25 – Modelagem da barragem de Frios com tapete impermeável de montante (50m).

(a) Poro-pressões (kPa)



Fonte: Elaborado pelo autor.

(b) Cargas hidráulicas totais (m) e vetores de fluxo.



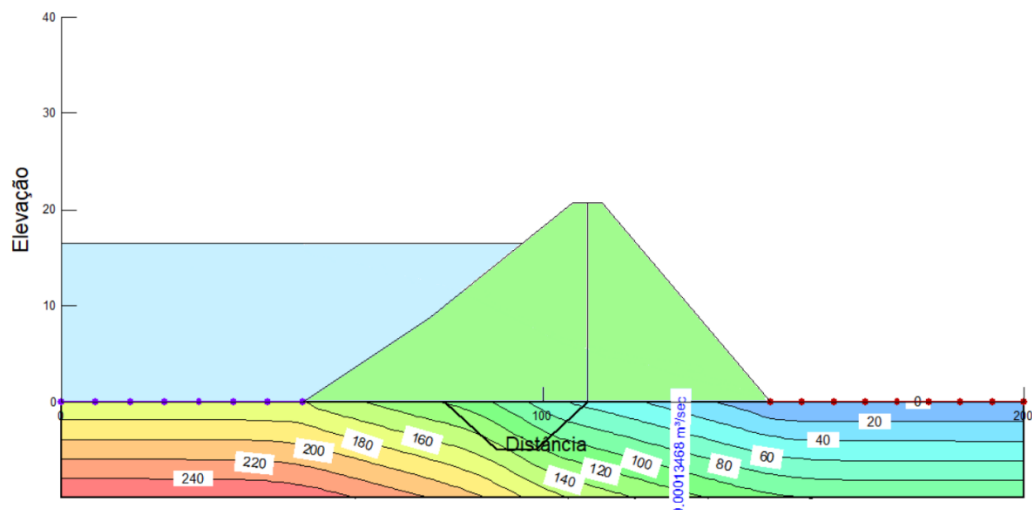
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.1.3 Com trincheira vedante (5m)

Nesse cenário, a trincheira vedante ocupa apenas metade da espessura da fundação permeável, o que não é o ideal do ponto de vista técnico. Ainda assim, sua presença já provoca alterações no comportamento do fluxo subterrâneo. A Figura 26 mostra como as linhas de fluxo e as equipotenciais se distribuem nesse caso, além de apresentar a vazão total estimada pelo software de $1,3468 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

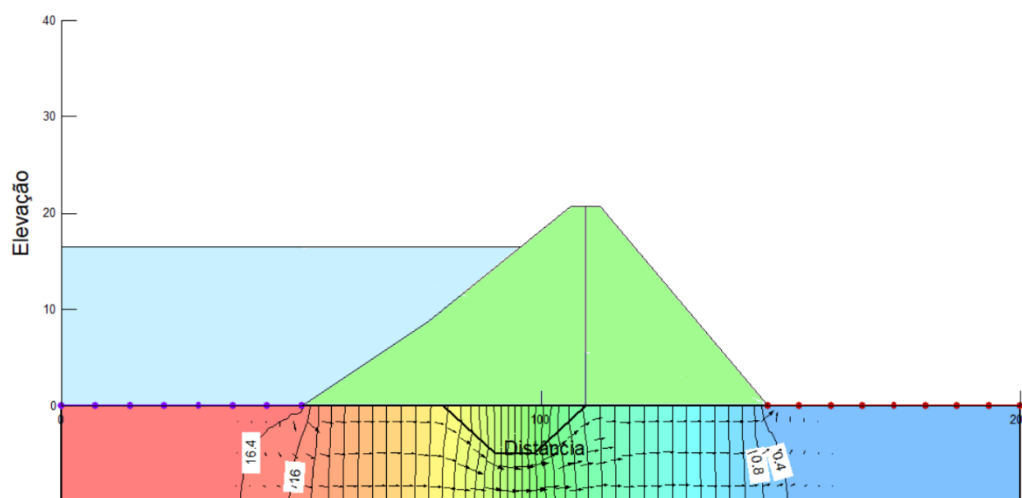
Figura 26 – Modelagem da barragem de Frios com Trincheira vedante (5m).

(a) Poro-pressões (kPa)



Fonte: Elaborado pelo autor.

(b) Cargas hidráulicas totais (m) e vetores de fluxo.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 03 apresenta todos os resultados de vazões de saída obtidos por meio da modelagem numérica para a barragem de Frios, incluindo os cenários que não foram representados graficamente neste trabalho, visando evitar a repetição de dados e resultados parecidos.

Tabela 3 – Resultados das vazões na modelagem numérica

Tratamento aplicado	Vazão final (Q_f m ² /s/m)
Sem tratamento	$1,5697 \cdot 10^{-4}$
Tapete impermeável de montante (50m)	$1,063 \cdot 10^{-4}$
Tapete impermeável de montante (100m)	$8,0509 \cdot 10^{-5}$
Tapete impermeável de montante (150m)	$6,4719 \cdot 10^{-5}$
Trincheira vedante (5 m)	$1,3468 \cdot 10^{-4}$
Trincheira vedante (7,5 m)	$1,0111 \cdot 10^{-4}$
Trincheira vedante (10 m)	$1,2470 \cdot 10^{-12}$

Fonte: Elaborada pelo autor.

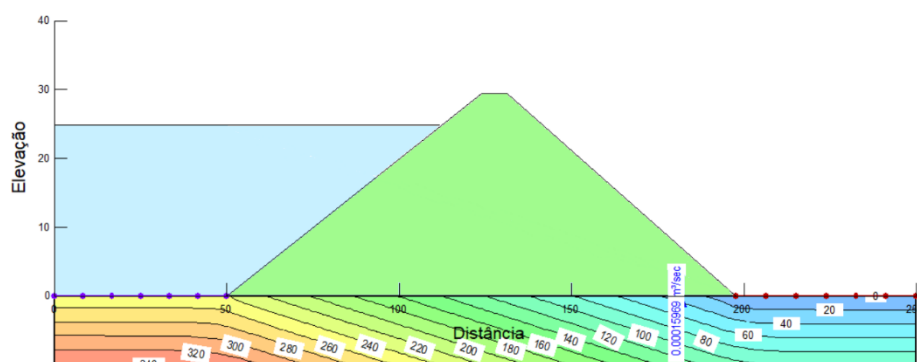
4.3.2 Barragem de Entremontes

4.3.2.1 Sem tratamento

Assim como em Frios, esse cenário base será utilizado como referência para saber a eficácia dos métodos de tratamento, sua modelagem pode ser observada na Figura 27, na qual é evidenciada principalmente as suas linhas de fluxo, carga hidráulica, poropressão (variando de 340 até 0 kPa) e o valor de sua vazão que é de $1,5969 \times 10^{-4}$ m³/s.

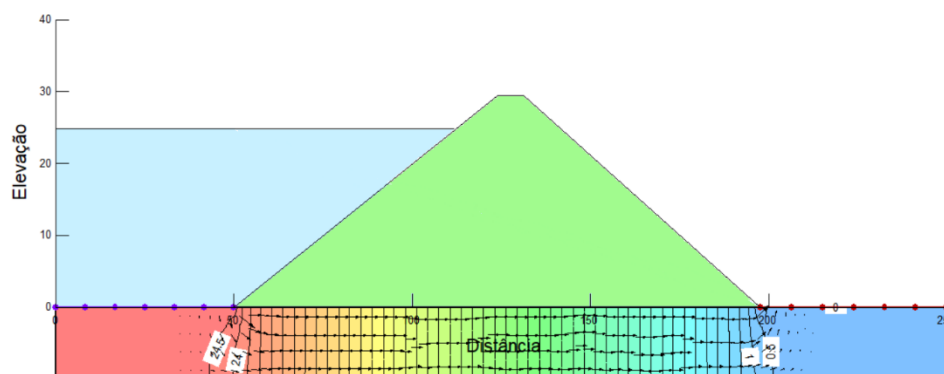
Figura 27 – Modelagem da barragem de Entremontes.

(a) Poro-pressões (kPa)



Fonte: Elaborado pelo autor.

(b) Cargas hidráulicas totais (m) e vetores de fluxo.



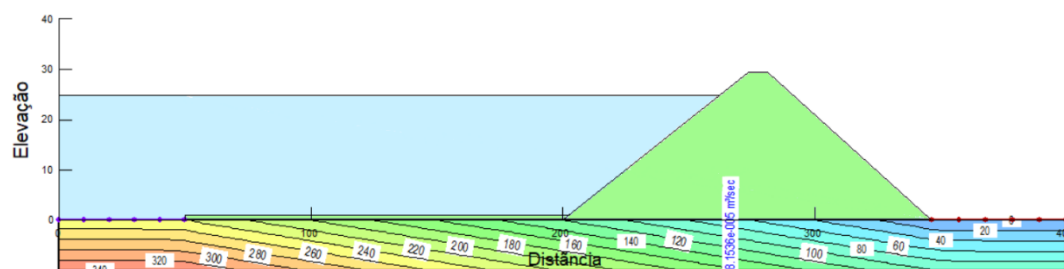
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2.2 Com tapete impermeável de montante (150m)

Nesta modelagem é aplicado o maior comprimento de tapete impermeável utilizado no estudo, o que resulta em uma redução mais significativa da vazão em comparação aos demais comprimentos. No entanto, vale ressaltar que nem sempre é necessário utilizar o maior comprimento possível, pois, dependendo do caso, o custo-benefício e financeiro pode não compensar. Após determinado ponto, o aumento do comprimento do tapete gera apenas pequenas variações na vazão. A Figura 28, apresenta a modelagem com todas as características já citadas e apresenta uma vazão de $8,1536 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

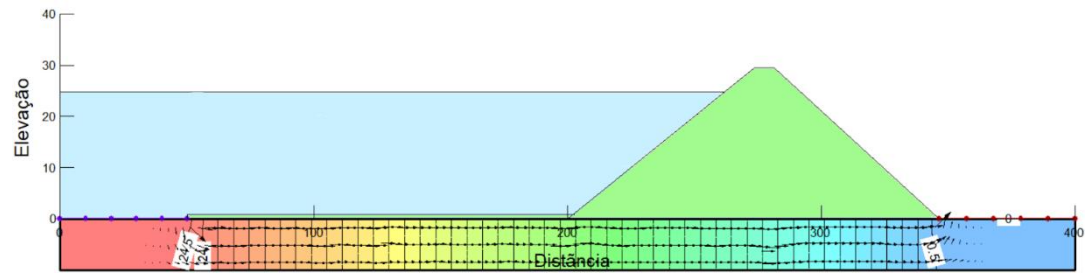
Figura 28 – Modelagem da barragem de Entremontes com tapete impermeável de montante (150 m).

(a) Poro-pressões (kPa)



Fonte: Elaborado pelo autor.

(b) Cargas hidráulicas totais (m) e vetores de fluxo.



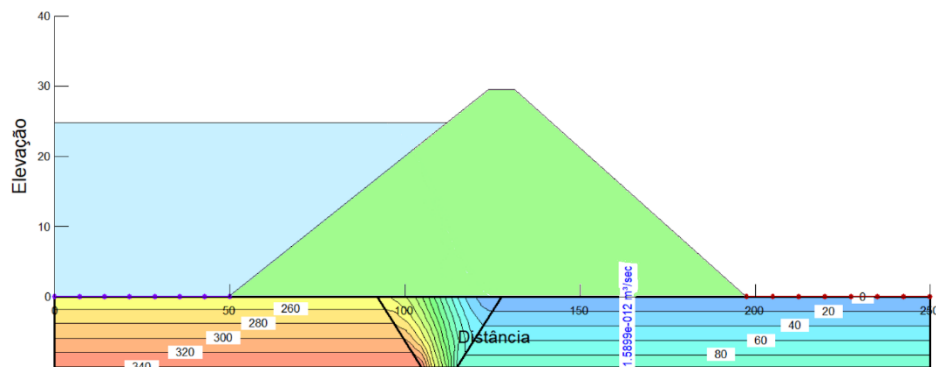
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2.3 Com trincheira vedante (10m)

Como a trincheira possui a mesma profundidade da camada permeável da fundação, o fluxo é totalmente interceptado, não havendo regiões com percolação significativa. Essa modelagem tem justamente o objetivo de demonstrar esse comportamento. Ao analisar a Figura 29, observa-se que praticamente não há fluxo de montante para a jusante, e que as linhas de poropressão e de carga hidráulica estão concentradas dentro da trincheira, evidenciando que essa é uma solução extremamente eficaz. A vazão simulada é dada por $1,5899 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$.

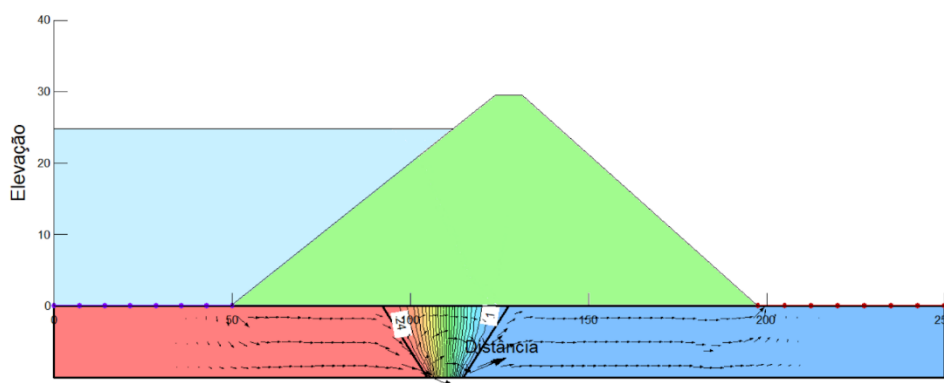
Figura 29 –Modelagem da barragem de Entremontes com trincheira vedante(10m)

(a) Poro-pressões (kPa)



Fonte: Elaborado pelo autor.

(b) Cargas hidráulicas totais (m) e vetores de fluxo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 04 reúne os dados referentes às vazões de saída simuladas numericamente para a barragem de Entremontes. Estão incluídas todas as combinações de cenários avaliadas no estudo.

Tabela 4 – Resultados das vazões na modelagem numérica.

Tratamento aplicado	Vazão final (Q_f m ² /s/m)
Sem tratamento	$1,5969 \cdot 10^{-4}$
Tapete impermeável de montante (50m)	$1,2083 \cdot 10^{-4}$
Tapete impermeável de montante (100m)	$9,7205 \cdot 10^{-5}$
Tapete impermeável de montante (150m)	$8,1536 \cdot 10^{-5}$
Trincheira vedante (5 metros)	$1,4064 \cdot 10^{-4}$
Trincheira vedante (7,5 metros)	$1,1807 \cdot 10^{-4}$
Trincheira vedante (10 metros)	$1,5899 \cdot 10^{-12}$

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4 Comparações entre as vazões obtidas por modelagem numérica x proposições teóricas.

Após obter os resultados das simulações numéricas e dos cálculos teóricos, foi possível comparar os valores de vazão obtidos por ambos os métodos. Essa comparação é fundamental para verificar a consistência dos resultados e avaliar a confiabilidade dos modelos utilizados. Enquanto os métodos teóricos fornecem estimativas simplificadas baseadas em fórmulas clássicas da engenharia, a modelagem numérica permite uma análise mais detalhada

do comportamento do fluxo subterrâneo. A seguir, são apresentadas as comparações entre os resultados de forma visual, a fim de facilitar a compreensão. Essa comparação contempla as vazões obtidas nos três principais cenários analisados: sem tratamento, com aplicação de tapete impermeável e com trincheira vedante.

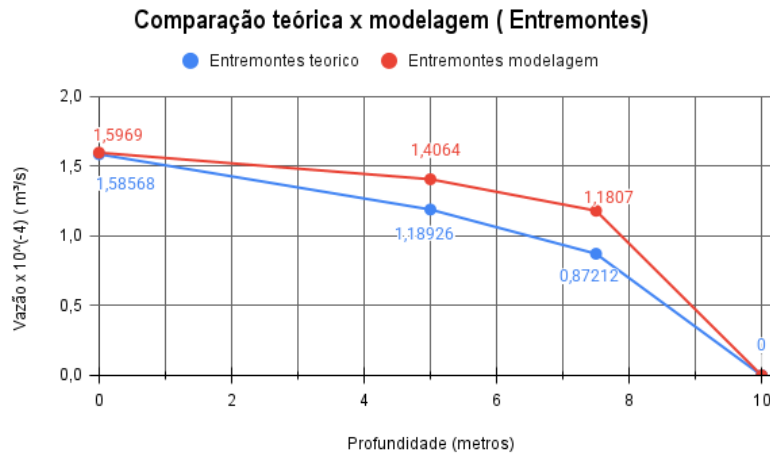
4.4.1 Teórico x modelagem (Com trincheira vedante)

Na trincheira vedante, observou-se que, tanto para a condição de Entremontes (Gráfico 02) quanto para a de frios (Gráfico 3), a modelagem apresentou uma vazão de saída superior ao valor obtido por cálculos teóricos. Essa diferença se torna ainda mais evidente nas trincheiras com profundidades de 5 e 7,5 metros. O gráfico da variação das perdas de carga em função da penetração do *cutoff* (CEDERGREN, 1967), utilizado para estimar a vazão de saída, sugere uma relação não linear entre profundidade da trincheira e vazão de saída. Cedergren (1989), afirma que uma trincheira escavada com 50% de penetração reduziria a vazão em apenas 15%, enquanto uma com 80% de penetração poderia reduzir em até 50%.

Esse comportamento ressalta a importância de se utilizar trincheiras mais profundas, visto que, como observado nos Gráficos 2 e 3, ao aumentar a profundidade de 5 para 7,5 metros, já se nota uma redução mais acentuada na vazão modelada. A partir desse ponto, os resultados tendem a se aproximar dos valores teóricos de forma mais rápida, até alcançar a condição ideal em que não há mais fluxo significativo.

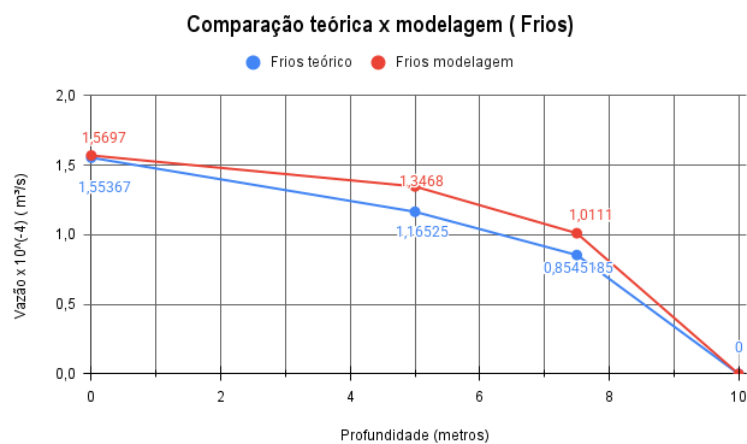
Além disso, é importante destacar que trincheiras parciais normalmente são associadas a métodos complementares de vedação, como o tapete impermeável a montante. Nesses casos, espera-se uma redução moderada da vazão, o que é coerente com os resultados obtidos nas simulações. Em contrapartida, a trincheira de vedação total, por garantir um controle mais efetivo da percolação, pode ser utilizada, na maioria dos casos, sem a necessidade de soluções complementares.

Gráfico 2 – Comparação entre Valores Teóricos e Modelagem Numérica (Entremontes com Trincheira).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 – Comparação entre Valores Teóricos e Modelagem Numérica (Frios com Trincheira)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2 Teórico x modelagem (Com tapete impermeável de montante)

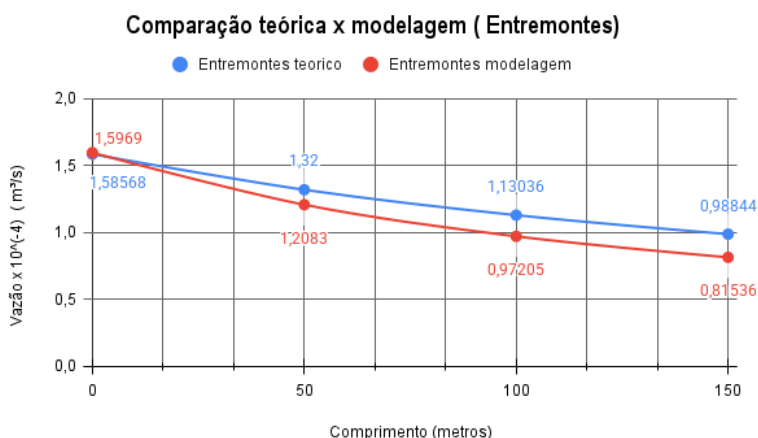
No caso do tapete impermeável de montante, os resultados obtidos, observados nos Gráficos 4 e 5, apresentaram um comportamento oposto ao das trincheiras vedantes. Nessa situação, os valores teóricos de vazão foram superiores aos fornecidos pela modelagem

numérica, com exceção do cenário sem nenhum tipo de tratamento, no qual a vazão simulada foi similar.

Em ambas as figuras, é possível observar que, com os tapetes impermeáveis de 50, 100 e 150 metros de comprimento, à medida que o tapete se estende, a diferença entre os valores teóricos e os obtidos por modelagem aumentou. Isso demonstra que, quanto maior o comprimento do tapete e menor a vazão resultante, menos compatíveis se tornam os resultados. Dessa forma, a equação teórica (Eq. 5) mostra-se mais próximo do valor da modelagem em casos em que o tapete é curto, mas diminui precisão à medida que seu comprimento aumenta.

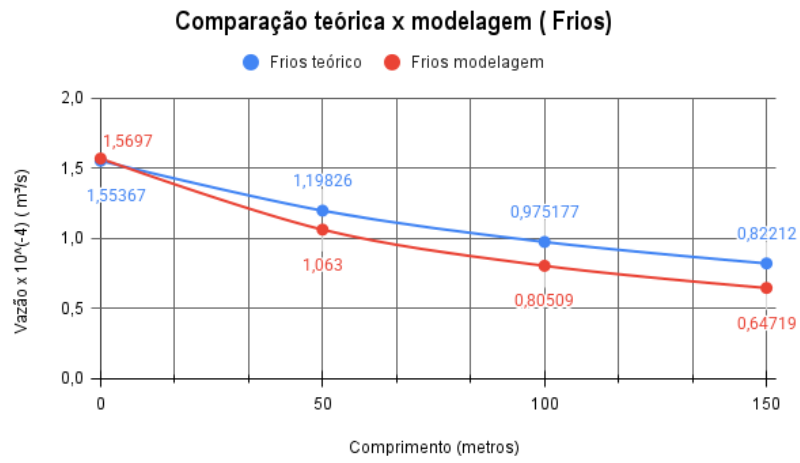
Nessa situação, torna-se mais apropriado confiar nos resultados da modelagem numérica, uma vez que ela considera, de forma mais precisa, os parâmetros do modelo e as condições de contorno reais envolvidas. O uso de elementos finitos permite capturar com maior fidelidade as variações do gradiente hidráulico ao longo da fundação, especialmente em estruturas mais extensas. Portanto, em projetos com tapetes de maior comprimento, a simulação numérica se destaca como uma ferramenta mais robusta e confiável para estimar as vazões de percolação.

Gráfico 4 – Comparação entre Valores Teóricos e Modelagem Numérica
(Entremontes com Tapete impermeável de montante)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 5 – Comparação entre Valores Teóricos e Modelagem Numérica (Frios com Tapete impermeável de montante)



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos por meio da modelagem numérica e da comparação com os métodos teóricos aplicados à análise da percolação em barragens de terra, foi possível identificar que para a situação sem nenhum tipo de tratamento, as vazões foram muito próximas entre si. No entanto, diferenças significativas entre os valores teóricos estimados e os resultados obtidos por modelagem ficaram evidentes quando algum tratamento foi aplicado. Como exemplo, tem-se o caso do tapete impermeável de 150 metros (Frios), em que a diferença entre o valor teórico e o simulado foi de aproximadamente $1,7493 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Apesar de parecer um valor pequeno, é importante lembrar que se trata de vazões muito baixas, de modo que pequenas variações podem representar diferenças relevantes.

A análise evidenciou que os métodos teóricos tendem a superestimar as vazões de saída no caso do tapete impermeável de montante, enquanto, no caso da trincheira de vedação, subestimam os volumes percolados em relação aos valores obtidos por simulação. Observou-se ainda que, quanto maior a profundidade da trincheira ou o comprimento do tapete, maior tende a ser esse desvio.

Essa discrepância pode ser atribuída às simplificações adotadas nos métodos teóricos, que muitas vezes não consideram com precisão fatores como a distribuição real das cargas hidráulicas e o comportamento bidimensional do fluxo subterrâneo. Já a modelagem numérica, por sua vez, possibilita uma representação mais realista do sistema, levando em conta diferentes parâmetros hidráulicos e geométricos, e oferecendo resultados mais coerentes com o comportamento físico esperado da estrutura.

Dessa forma, a modelagem numérica se apresenta como uma ferramenta mais confiável e precisa para a estimativa de vazões de percolação em barragens, especialmente em situações onde se busca um dimensionamento mais seguro e condizente com as situações reais. Além disso, os tratamentos de fundação se mostraram extremamente eficientes na diminuição das vazões de saída.

Como sugestão para trabalhos futuros, destaca-se a limitação da versão estudantil do software utilizado, sendo recomendável o uso de versões mais completas, que permitam uma análise mais abrangente, possibilitando o estudo de processos erosivos na própria barragem. Além disso, sugere-se estudar barragens cujos dados reais de vazão de saída sejam de fácil acesso, permitindo a comparação entre os valores teóricos, da modelagem e os observados em campo. Por fim, recomenda-se a realização de modelagens considerando fluxo transitório, a fim

de demonstrar a influência da variação do lençol freático nos resultados da modelagem numérica.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, José Amaury de Aragão, coord. **Barragens no Nordeste do Brasil**; experiência do DNOCS em barragens na região semi-árida. 2. ed. Fortaleza, DNOCS, 1990. 328p .
- ASSIS, A. P. et al. **Apostila do curso de Barragens**. UnB, Brasília, DF, 170p, 2003.
- AZEREDO, A.L.C.; MEIRELLES, M.C.; LUCENTI, F.; SILVA, S.A. **Desempenho da Parede Diafragma Plástica na UHE Estreito**, XXVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, CBDB, Rio de Janeiro, Brasil. 2011.
- CEDERGREN, H. R. **Seepage, drainage and flow nets**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1967. 534 p.
- CEDERGREN, H. R. **Seepage, drainage and flow nets**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1989. 465 p.
- CRUZ, Paulo Teixeira. **100 barragens brasileiras**: casos históricos, materiais de construção, projeto. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.
- COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (CIGB). **Falhas de barragens** – análise estatística. Boletim 99. Paris: CIGB, 1995.
- FERREIRA, J. L. D. **Geotecnia aplicada a barragens de terra**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. **Analysis of embankment dam incidents**. UNICIV Report N° R-374 - UNSW, Sydney, Austrália, 1998.
- GEOMEMBRANA GEOSSINTÉTICOS. **Geomembranas PEAD: características, aplicações e soluções em impermeabilização**. Disponível em: <https://www.geomembrana.com.br/geomembranas.php>. Acesso em: 05 ago. 2025.
- GEOSLOPE INTERNATIONAL LTD. **GeoStudio 2007 – SEEP/W: software for seepage analysis**. Calgary, Canadá: Geo-Slope International Ltd., 2007.
- HORNBERGER, G. M.; RAFFENSPERGER, J. P.; WIBERG, P. L.; et al. **Elements of physical hydrology**. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1998.
- ICOLD. **Internal erosion of existing dams, levees, and dikes, and their foundations**. International Commission on Large Dams, Paris. Bulletin 164. 2017. Disponível em: <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/faculty-of-engineering/civil/public/geotechnics/Bridle-IC-Wkshp-FINAL-%27fines-deposited%27.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- LEME, R. F. **Avaliação de uma Metodologia para Projeto de Pequenas Barragens de Terra no Semiárido**: Construção, Ensaios e Modelagem Numérica. 2015. 223 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Civil, Área de

Concentração: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2015.

MARSAL, R. J.; ROSÉNDIZ, D. **Effectiveness of cut offs in earth foundations and abutments of dams**. In: PAN-AMERICAN CONFERENCE OF SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4., 1974, Porto Rico. Proceedings. Porto Rico, 1974. v. 1, p. 237–312.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M. **Avaliação de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes povoamentos florestais**. Cerne, Lavras, v. 8, n. 1, p. 32–41, 2002.

MASSAD, Faíçal. **Obras de Terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

MATA-LIMA, H. **Fluxo bidimensional (Redes de fluxo)**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, 2014. Apostila da disciplina de Mecânica dos Solos II. Disponível em:

https://www.feis.unesp.br/Home/Instituicao/administracao/congregacao/anexo_04.pdf.

Acesso em: 05 jul. 2025.

MESQUITA, M. G. B. F. **Caracterização estatística da condutividade hidráulica saturada do solo**. 2001. 110 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

OLIVEIRA, A. G. S. **Análise da Eficácia dos Dispositivos de Vedação e Drenagem Utilizados em Fundações Permeáveis e Barragens de Terra**. 174 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2008.

OLIVEIRA, D. A. **Análise do fluxo d’água na barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves – Açu/RN**. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2014.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3ª ed. Editora Terratek, 2007.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SARÉ, A. R. **Análise das Condições de Fluxo na Barragem de Curuá-Una, Pará**. 167 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil – PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2003.