



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

LAUANNA NÁTANY BARROS OLIVEIRA

**PROPOSTA DE UMA BARRAGEM DE TERRA PARA A REGIÃO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO FORMOSO**

PALMAS

2023

LAUANNA NÁTANY BARROS OLIVEIRA

**PROPOSTA DE UMA BARRAGEM DE TERRA PARA A REGIÃO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO FORMOSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Cleber Decarli de Assis
Coorientadora: Prof. Me. Izabel Castro de Abreu Neta

PALMAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

- O48p Oliveira, Lauanna Nátany Barros
 Proposta de uma barragem de terra para a região da bacia hidrográfica do
 rio Formoso / Lauanna Nátany Barros Oliveira. – Palmas, TO, 2023.
 142 p. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
 Palmas, Palmas, TO, 2023.
- Orientador: Me. Cleber Decarli de Assis
 Coorientadora: Dra. Izabel Castro de Abreu Neta
1. Barragens. 2. Análise de fluxo e estabilidade. 3. Segurança. I. Assis,
 Cleber Decarli de. II. Neta, Izabel Castro de Abreu. III. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

LAUANNA NÁTANY BARROS OLIVEIRA

**PROPOSTA DE UMA BARRAGEM DE TERRA PARA A REGIÃO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO FORMOSO**

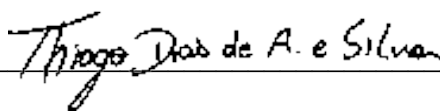
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 08 / 12 / 2023

BANCA AVALIADORA



Prof. Me. Cleber Decarli de Assis
Orientador(a)



Prof. Dr. Thiago Dias de Araújo e Silva
Avaliador(a) 1



Prof. Me. Edvaldo Alves dos Santos
Avaliador(a) 2

Dedico este trabalho à minha mãe, Keila, ao meu pai, Erinaldo e às minhas irmãs, Maria e Débora.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pelo dom da vida e por renovar minhas forças sempre que precisei durante essa caminhada.

Agradeço à minha mãe, Keila e meu pai, Erinaldo, por todo amparo financeiro e por serem meus exemplos de persistência diante das dificuldades que surgiram. Agradeço minhas irmãs, Maria e Débora, por serem minhas melhores amigas e companheiras, por terem me ajudado em diversos momentos da graduação, por terem compreendido minha ausência e por todo acompanhamento nas horas ruins.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, por ser referência em educação pública de qualidade e por ter sido o ambiente onde pude me desenvolver de forma pessoal e profissional, através da troca de experiências e conhecimento. Agradeço a todos os professores que tive na graduação, por ministrarem o ensino de forma eficaz e por terem sido grandes modelos de profissionais para mim.

Agradeço ao meu orientador Prof. Me. Cleber Decarli de Assis, por ter aceitado prontamente o convite para orientação e pela assistência indispensável nesta etapa. Agradeço em especial, a Prof. Me. Izabel Castro de Abreu Neta, coorientadora deste trabalho, por todas as palavras de incentivo e pela amizade construída que fizeram muita diferença, obrigada.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos que cruzei durante o curso, por terem me concedido momentos de alegria no decorrer deste desafio. Agradeço a minha querida amiga Alessandra Dutra, por me mostrar que amizade verdadeira independe do tempo e espaço e, por acreditar em mim até mesmo quando eu duvidei.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para que a conclusão dessa importante fase da minha vida acontecesse. Meu muito obrigada.

RESUMO

As barragens desempenham um papel vital na história, atendendo a diversas necessidades, como fornecimento de água e irrigação. No entanto, devido ao seu tamanho, a construção e manutenção precisam ser precisas para evitar riscos significativos. A segurança operacional é fundamental, pois rupturas podem causar danos irreversíveis, incluindo materiais, ambientais e perda de vidas. Neste estudo, desenvolveu-se um modelo de barragem de terra para a bacia hidrográfica do rio Formoso. Avaliou-se diferentes configurações, incluindo uma seção sem dispositivos de drenagem e vedação, outra com um sistema de drenagem horizontal e uma terceira com um sistema de drenagem composto por filtros horizontal e vertical. Esses modelos foram submetidos a análises de percolação e estabilidade, com foco na escolha da opção mais segura. Após as análises, concluiu-se que o uso do filtro horizontal em conjunto com o filtro vertical obteve a melhor eficiência, reduzindo a vazão em 40,4% e o gradiente hidráulico em 27,0% a 15 metros do talude de jusante em condições normais. Com o intuito de reforçar a segurança em razão da fundação permeável, foram avaliados dois elementos de vedação: a parede diafragma e o tapete impermeável à montante. O tapete impermeável a montante foi o dispositivo escolhido, demonstrando eficácia em relação ao gradiente hidráulico de 100% no pé do talude e 76,2% a 15 metros, para o N.A. normal, alcançando simultaneamente fatores de segurança satisfatórios.

Palavras-chave: Barragens. Análise de fluxo e estabilidade. Segurança. Sistema de drenagem. Sistema de vedação.

ABSTRACT

Dams play a vital role in history, serving various needs such as water supply and irrigation. However, due to their size, construction and maintenance must be precise to avoid significant risks. Operational safety is crucial, as breaches can cause irreversible damage, including material, environmental, and loss of life. In this study, a earth dam model was developed for the Formoso River watershed. Different configurations were evaluated, including a section without drainage and sealing devices, another with a horizontal drainage system, and a third with a drainage system consisting of both horizontal and vertical filters. These models underwent analyses of percolation and stability, with a focus on selecting the safest option. Following the analyses, it was concluded that the use of the horizontal filter in conjunction with the vertical filter achieved the best efficiency, reducing flow by 40.4% and the hydraulic gradient by 27.0% at 15 meters from the downstream slope under normal conditions. To enhance safety due to the permeable foundation, two sealing elements were evaluated: the diaphragm wall and the upstream impermeable mat. The upstream impermeable mat was chosen as the device, demonstrating effectiveness in reducing the hydraulic gradient by 100% at the base of the slope and by 76.2% at 15 meters, for the normal water level, while simultaneously achieving satisfactory safety factors.

Keywords: Dams. Flow and stability analysis. Safety. Drainage system. Sealing system.

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 – Curva granulométrica da amostra coletada na ombreira direita da barragem A. ..79
- Gráfico 2 - Curva granulométrica da amostra coletada na ombreira direita da barragem B....79
- Gráfico 3 - Curva granulométrica da amostra coletada na ombreira direita da barragem C....80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre barragens de terra rompidas e suas capacidades.	34
Tabela 2 – Relação entre barragens de terra rompidas e suas alturas.	34
Tabela 3 - Fatores de segurança mínimos para as condições de carregamento.	64
Tabela 4 – Sondagens mistas realizadas no eixo de cada barragem.	74
Tabela 5 – Sondagens rotativas realizadas nas ombreiras de cada barragem.	74
Tabela 6 – Valores de massa específica dos sólidos.	78
Tabela 7 – Valores de limites de Atterberg.	78
Tabela 8 – Valores de coesão e ângulo de atrito interno.	81
Tabela 9 – Valores do coeficiente de permeabilidade.	81
Tabela 10 – Valores de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo.	81
Tabela 11 – Valores de massa específica aparente “ <i>in situ</i> ”.	82
Tabela 12 – Valores do teor de umidade.	82
Tabela 13 – Valores da massa específica seca.	82
Tabela 14 – Valores do grau de compactação.	83
Tabela 15 – Resumo dos parâmetros geotécnicos.	87
Tabela 16 – Fatores de segurança mínimos para as condições de carregamento.	94
Tabela 17 – Resumo dos resultados obtidos nas análises de percolação – Caso I.	107
Tabela 18 – Resumos dos resultados obtidos nas análises de percolação – Caso II.	107
Tabela 19 – Resumo dos resultados obtidos nas análises de percolação – Caso III.	108
Tabela 20 - Resultados obtidos nas análises de percolação para o N.A. normal.	108
Tabela 21 – Resultados obtidos nas análises de percolação para o N.A. máximo.	108
Tabela 22 – Resultados obtidos nas análises de estabilidade – Caso I.	113
Tabela 23 – Resultados obtidos nas análises de estabilidade – Caso II.	113
Tabela 24 – Resultados obtidos nas análises de estabilidade – Caso III.	114
Tabela 25 – Resultados obtidos nas análises de estabilidade para o N.A. normal.	114
Tabela 26 – Resultados obtidos nas análises de estabilidade para o N.A. máximo.	114
Tabela 27 – Eficiência da vazão e gradiente hidráulico para o N.A. normal.	115
Tabela 28 – Eficiência da vazão e gradiente hidráulico para o N.A. máximo.	116
Tabela 29 – Resultados para percolação - N.A. normal.	120
Tabela 30 – Resultados para percolação - N.A. máximo.	120
Tabela 31 – Resultados para estabilidade - N.A. normal e N.A. máximo.	122
Tabela 32 – Resultados para percolação - N.A. normal.	126

Tabela 33 – Resultados para percolação - N.A. máximo.	126
Tabela 34 – Resultados para estabilidade - N.A. normal e N.A. máximo.....	127
Tabela 35 – Eficiência para o N.A. normal – Parede diafragma.	129
Tabela 36 – Eficiência para o N.A. máximo – Parede diafragma.	129
Tabela 37 – Eficiência para o N.A. normal – Tapete impermeável.	129
Tabela 38 – Eficiência para o N.A. máximo – Tapete impermeável.....	129
Tabela 39 – Comparação da eficiência para o N.A. normal – Parede diafragma.....	129
Tabela 40 – Comparação da eficiência para o N.A. máximo – Parede diafragma.....	130
Tabela 41 – Comparação da eficiência para o N.A. normal – Tapete impermeável.	130
Tabela 42 – Comparação da eficiência para o N.A. máximo – Tapete impermeável.	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal das barragens de concreto gravidade.....	23
Figura 2 – Seção transversal das barragens de concreto gravidade aliviada.	23
Figura 3 – Elementos e seção transversal das barragens de concreto em contraforte.	24
Figura 4 – Seção transversal das barragens de concreto rolado.	24
Figura 5 – Seção transversal das barragens em arco e suas variações.	25
Figura 6 – Seção transversal das barragens de terra homogêneas.	26
Figura 7 – Seção transversal das barragens de terra zoneadas.	26
Figura 8 – Barragens de enrocamento.	27
Figura 9 – Características de enquadramento na PNSB.	28
Figura 10 – Acidentes e incidentes em barragens brasileiras de 2011 a 2018.	30
Figura 11 – Percentual de falhas por tipo de barragem.	33
Figura 12 – Modos de ruptura em barragens de terra.....	35
Figura 13 – Sub causas dos problemas de qualidade.....	35
Figura 14 – Causas de ruptura de barragens de aterro entre 1799 e 2005.....	36
Figura 15 – Proporção de eventos adversos por tipo de barragem.....	37
Figura 16 – Causas de acidentes em barragens brasileiras de 2011 a 2018.	37
Figura 17 – Causas de incidentes em barragens brasileiras de 2011 a 2018.	38
Figura 18 – Barragem de Vajont após galgamento.	39
Figura 19 – Topo da barragem de Teton durante o rompimento.....	40
Figura 20 – Barragem do Pirocaua após galgamento.	41
Figura 21 – Progresso de ruptura por <i>piping</i>	42
Figura 22 – Iniciação de <i>piping</i> por erosão regressiva.	43
Figura 23 – Iniciação de <i>piping</i> por fluxo concentrado.....	43
Figura 24 – Iniciação de <i>piping</i> por sufusão.....	44
Figura 25 – Barragem de aterro galgada.	44
Figura 26 – Etapas da ruptura por galgamento.....	45
Figura 27 – Rompimento de talude decorrente de saturação.....	46
Figura 28 – Anomalias nas barragens de aterro.	47
Figura 29 – Exemplo de permeâmetro.	50
Figura 30 – Exemplo de permeâmetro de carga constante.....	52
Figura 31 – Exemplo de permeâmetro de carga variável.	53
Figura 32 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função do tipo de solo.....	53

Figura 33 – Comportamento da rede de fluxo em meio isotrópico e anisotrópico.	55
Figura 34 – Fluxo confinado.	56
Figura 35 – Fluxo não-confinado.	56
Figura 36 – Exemplo de rede de fluxo.	57
Figura 37 – Terminologia de taludes.	59
Figura 38 – Método das fatias com forças atuando em uma fatia genérica.	62
Figura 39 – Trincheira de vedação total.	65
Figura 40 – Trincheira de vedação parcial.	65
Figura 41 – Exemplo de parede diafragma.	66
Figura 42 – Exemplo de barragem com cortina de injeção.	66
Figura 43 – Exemplo de tapete impermeável à montante.	67
Figura 44 – Exemplo de filtro vertical em barragem.	67
Figura 45 – Exemplo de filtro horizontal em barragem.	68
Figura 46 – Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.	70
Figura 47 – Localização da bacia do rio Formoso no estado do Tocantins.	72
Figura 48 – Geologia da região de estudo.	73
Figura 49 – Localização das barragens ao longo do rio Formoso.	74
Figura 50 – Locação dos furos das sondagens mistas.	75
Figura 51 – Locação do furo SR – 03 na barragem A.	75
Figura 52 – Locação do furo SR – 02 na barragem B.	76
Figura 53 – Locação do furo SR – 01 na barragem C.	76
Figura 54 – Perfil geotécnico do maciço da fundação.	77
Figura 55 – Modelo da seção a ser analisado.	83
Figura 56 – Interface do <i>software</i>	84
Figura 57 – Malha de elementos finitos.	85
Figura 58 – Modelo do Caso I.	88
Figura 59 - Modelo do Caso II.	89
Figura 60 - Modelo do Caso III.	90
Figura 61 – Localização do ponto de análise da vazão.	91
Figura 62 - Localização dos pontos de análise do gradiente hidráulico.	94
Figura 63 – Características da parede diafragma.	95
Figura 64 – Características do tapete impermeável à montante.	96
Figura 65 – Cargas hidráulicas para o N.A. normal do Caso I.	98
Figura 66 – Cargas hidráulicas para o N.A. máximo do Caso I.	98

Figura 67 – Vazão para o N.A. normal do Caso I.	99
Figura 68 – Vazão para o N.A. máximo do Caso I.	99
Figura 69 – Gradientes hidráulicos para o N.A. normal do Caso I.	100
Figura 70 – Gradientes hidráulicos para o N.A. máximo do Caso I.....	100
Figura 71 – Cargas hidráulicas para o N.A. normal do Caso II.	101
Figura 72 – Cargas hidráulicas para o N.A. máximo do Caso II.....	101
Figura 73 – Vazão para o N.A. normal do Caso II.	102
Figura 74 – Vazão para o N.A. máximo do Caso II.	102
Figura 75 – Gradientes hidráulicos para o N.A. normal do Caso II.	103
Figura 76 – Gradientes hidráulicos para o N.A. máximo do Caso II.	103
Figura 77 – Cargas hidráulicas para o N.A. normal do Caso III.	104
Figura 78 – Cargas hidráulicas para o N.A. máximo do Caso III.	104
Figura 79 – Vazão para o N.A. normal do Caso III.	105
Figura 80 – Vazão para o N.A. máximo do Caso III.....	105
Figura 81 – Gradientes hidráulicos para o N.A. normal do Caso III.....	106
Figura 82 – Gradientes hidráulicos para o N.A. máximo do Caso III.....	106
Figura 83 – Fator de segurança para o N.A. normal do Caso I.	110
Figura 84 – Fator de segurança para o N.A. máximo do Caso I.	110
Figura 85 – Fator de segurança para o N.A. normal do Caso II.....	111
Figura 86 – Fator de segurança para o N.A. máximo do Caso II.	111
Figura 87 – Fator de segurança para o N.A. normal do Caso III.....	112
Figura 88 – Fator de segurança para o N.A. máximo do Caso III.....	112
Figura 89 – Parede diafragma em conjunto com sistema de drenagem.	117
Figura 90 – Cargas hidráulicas para o N.A. normal – Parede diafragma + Drenagem.	117
Figura 91 – Cargas hidráulicas para o N.A. máximo – Parede diafragma + Drenagem.	118
Figura 92 – Vazão para o N.A. normal – Parede diafragma + Drenagem.	118
Figura 93 – Vazão para o N.A. máximo – Parede diafragma + Drenagem.....	119
Figura 94 – Gradientes hidráulicos para N.A. normal – Parede diafragma + Drenagem.....	119
Figura 95 – Gradientes hidráulicos para N.A. máximo – Parede diafragma + Drenagem....	120
Figura 96 – Fator de segurança para o N.A. normal – Parede diafragma + Drenagem.....	121
Figura 97 – Fator de segurança para o N.A. máximo – Parede diafragma + Drenagem.....	121
Figura 98 – Tapete impermeável em conjunto com sistema de drenagem.....	122
Figura 99 – Cargas hidráulicas para N.A. normal – Tapete impermeável + Drenagem.	123
Figura 100 – Cargas hidráulicas para N.A. máximo – Tapete impermeável + Drenagem....	123

Figura 101 - Vazão para o N.A. normal – Tapete impermeável + Drenagem.	124
Figura 102 - Vazão para o N.A. máximo – Tapete impermeável + Drenagem.....	124
Figura 103 – Gradientes hidráulicos para N.A. normal – Tapete + Drenagem.....	125
Figura 104 – Gradientes hidráulicos para N.A. máximo – Tapete + Drenagem.	125
Figura 105 – Fator de segurança para N.A. normal – Tapete impermeável + Drenagem.....	127
Figura 106 – Fator de segurança para N.A. máximo – Tapete impermeável + Drenagem. ...	127

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação da barragem.	32
Quadro 2 – Frequência das Revisões Periódicas.	32
Quadro 3 – Classificação das fissuras nas barragens de aterro.	48
Quadro 4 – Condição de estabilidade do talude de acordo com o FS.	61
Quadro 5 – Métodos usuais de análise da estabilidade de taludes.	63
Quadro 6 – Parâmetros geotécnicos utilizados.	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	17
1.2	JUSTIFICATIVA	18
1.3	OBJETIVOS	18
1.3.1	Objetivo geral	18
1.3.2	Objetivos específicos	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	BARRAGENS	20
2.2	TIPOS DE BARRAGENS	21
2.2.1	Barragens de concreto	22
2.2.2	Barragens de aterro	25
2.3	SEGURANÇA DE BARRAGENS	27
2.3.1	Verificação da segurança	30
2.4	ROMPIMENTO DE BARRAGENS DE TERRA	32
2.4.1	Rupturas no cenário internacional	38
2.4.1.1	<i>Barragem de Vajont</i>	38
2.4.1.2	<i>Barragem de Teton</i>	39
2.4.2	Rupturas no cenário nacional	40
2.4.2.1	<i>Barragem do Pirocaua</i>	40
2.4.2.2	<i>Córrego Berlim</i>	41
2.4.3	Mecanismos de ruptura	41
2.4.3.1	<i>Erosão interna (piping)</i>	41
2.4.3.2	<i>Galgamento</i>	44
2.4.3.3	<i>Instabilização</i>	46
2.5	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM BARRAGENS DE ATERRO	47
2.6	PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE ATERRO	48
2.6.1	Análise de fluxo	48
2.6.1.1	<i>A permeabilidade do solo</i>	49
2.6.1.2	<i>Lei de Darcy</i>	50
2.6.1.3	<i>Determinação da permeabilidade</i>	52
2.6.1.4	<i>Equação de Bernoulli</i>	54

2.6.2	Fluxo bidimensional	54
2.6.2.1	<i>Anisotropia</i>	55
2.6.2.2	<i>Condições de contorno</i>	56
2.6.3	Redes de fluxo	56
2.6.3.1	<i>Gradiente hidráulico crítico</i>	57
2.6.3.2	<i>Método dos Elementos Finitos</i>	58
2.7	ESTABILIDADE EM BARRAGENS DE ATERRO	59
2.7.1	Análise de estabilidade	59
2.7.1.1	<i>Fator de segurança</i>	60
2.7.1.2	<i>Métodos de equilíbrio limite</i>	61
2.7.2	Condições de carregamento	63
2.8	CONTROLE DA PERCOLAÇÃO	64
2.8.1	Trincheira de vedação	65
2.8.2	Parede diafragma	65
2.8.3	Cortina de injeção	66
2.8.4	Tapete impermeável à montante	66
2.8.5	Filtro vertical	67
2.8.6	Filtro horizontal	67
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	68
3.1	METODOLOGIA DA PESQUISA	68
3.2	ETAPAS DA PESQUISA	69
3.2.1	Fluxograma	70
3.3	PROPRIEDADES DA REGIÃO DE ESTUDO	71
3.4	INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS	73
3.4.1	Pesquisa de campo	73
3.4.2	Ensaaios geotécnicos	77
3.5	PROPOSTA DE SEÇÃO	83
3.6	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	84
3.7	PERCOLAÇÃO E ESTABILIDADE	85
3.7.1	Definição de parâmetros	86
3.8	CONDIÇÕES DE CONTORNO	87
3.9	VARIAÇÕES NO MODELO PRINCIPAL	87
3.9.1	Caso I	88

3.9.2	Caso II	88
3.9.3	Caso III	89
3.10	PARÂMETROS DE ESCOLHA.....	90
3.11	SISTEMA DE VEDAÇÃO	94
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	96
4.1	ANÁLISES DE PERCOLAÇÃO	96
4.1.1	Caso I.....	97
4.1.2	Caso II	100
4.1.3	Caso III	103
4.1.4	Resumo das análises de percolação	106
4.1.4.1	<i>Resumo dos resultados do Caso I.....</i>	<i>107</i>
4.1.4.2	<i>Resumo dos resultados do Caso II</i>	<i>107</i>
4.1.4.3	<i>Resumo dos resultados do Caso III</i>	<i>108</i>
4.1.4.4	<i>Resumo dos resultados por N.A.....</i>	<i>108</i>
4.2	ANÁLISES DE ESTABILIDADE	109
4.2.1	Caso I.....	109
4.2.2	Caso II	110
4.2.3	Caso III	111
4.2.4	Resumo das análises de estabilidade	113
4.2.4.1	<i>Resumo dos resultados do Caso I.....</i>	<i>113</i>
4.2.4.2	<i>Resumo dos resultados do Caso II</i>	<i>113</i>
4.2.4.3	<i>Resumo dos resultados do Caso III</i>	<i>113</i>
4.2.4.4	<i>Resumo dos resultados por N.A.....</i>	<i>114</i>
4.3	CÁLCULO E COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA.....	115
4.4	MELHORIA COM SISTEMA DE VEDAÇÃO	116
4.4.1	Parede diafragma	116
4.4.1.1	<i>Percolação.....</i>	<i>117</i>
4.4.1.2	<i>Estabilidade</i>	<i>120</i>
4.4.2	Tapete impermeável à montante.....	122
4.4.2.1	<i>Percolação.....</i>	<i>122</i>
4.4.2.2	<i>Estabilidade</i>	<i>126</i>
4.4.3	Eficiência	128
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	131

5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
	REFERÊNCIAS	134

1 INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas que estão presentes na vida do homem desde os tempos remotos, onde a prática de impossibilitar o escoamento dos cursos d'água já era realizada para suprir diversas necessidades, como abastecimento doméstico, irrigação e outras (COSTA, 2012). Com o avanço da tecnologia, novas funções foram incorporadas a essas construções, como por exemplo, o armazenamento de água para produção de energia elétrica.

Os tipos de barragens são diversos e, os mais usados se baseiam no material empregado na construção. Dentre eles, estão as barragens de concreto e as barragens de aterro (de terra e de enrocamento), sendo as barragens de terra as mais utilizadas no Brasil. De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens de 2021 (RSB), elaborado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2022), 56% das barragens que estão sujeitas à Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) são de terra. Massad (2010) explica que isso acontece pelo fato de o país possuir grande disponibilidade de material terroso e apresentar condições topográficas que favorecem a construção desse tipo de barragem.

Embora sejam estruturas vantajosas para uma sociedade, trata-se de obras de grandes dimensões que como qualquer outra podem sofrer problemas quando não construídas e operadas adequadamente. Assim, garantir que as barragens operem de forma segura deve ser prioridade, uma vez que o seu rompimento resulta em prejuízos permanentes de diversas naturezas, como materiais, ambientais e de vida. Silva e Silva (2020) comentam que as consequências resultantes do colapso de uma barragem na saúde pública vão além da fronteira de localização e os impactos são difíceis de serem analisados e solucionados.

Nesse contexto, o avanço da tecnologia permitiu que a construção de barragens acontecesse de forma mais consciente e que levasse em consideração o quesito da segurança, em contraste as construções que antigamente eram baseadas na experiência. Os *softwares* são fundamentais nessa mudança de comportamento, pois permitem representar e simular precisamente as barragens, por meio da alimentação de dados obtidos em campo e realizar análises de fenômenos que afetam essas estruturas.

Dentre as análises possíveis de serem feitas em programas, estão as de percolação e de estabilidade de taludes. Através das análises de percolação é possível compreender o comportamento da água e simular sistemas de vedação e drenagem que controlem o fluxo tanto pelo corpo quanto pela fundação da barragem, uma vez que o fenômeno da percolação quando não controlado pode afetar diretamente a estabilidade da estrutura. Dessa forma, riscos podem ser identificados e amenizados através da análise desses fenômenos em *software*.

Considerando que infiltrações e escorregamentos estão entre as principais causas de rupturas de barragens, torna-se crucial identificar, durante a fase de projeto, locais suscetíveis aos efeitos desses acontecimentos, como os pontos propensos a *piping* (erosão regressiva). Conforme Ferreira (2022), é essencial analisar a formação de *piping*, uma das principais perturbações em barragens de aterro, em função da capacidade de desestabilização do solo através do deslocamento de partículas.

Além das análises de percolação, a avaliação da estabilidade do talude jusante está entre as principais preocupações na segurança de barragens de aterro, podendo resultar em grandes deslizamentos (FERREIRA, 2022). Ferramentas de *software* especializadas permitem análises detalhadas, considerando fatores como tipo de solo, inclinação e condições hidrológicas. A identificação e correção de problemas de estabilidade são essenciais para evitar riscos à integridade da barragem, destacando a importância da análise integrada de percolação e estabilidade para garantir segurança ao longo da vida útil da estrutura.

Assim sendo, este trabalho propõe um modelo de barragem de terra para a região da bacia hidrográfica do rio Formoso a partir das características e levantamento dos dados geológico-geotécnicos do local. Serão realizadas análises de percolação e estabilidade em um modelo inicial e novos modelos com dispositivos de drenagem e vedação serão propostos, com o intuito de reduzir os efeitos provocados pelo movimento da água e garantir segurança a estrutura. Deste modo, a solução que se apresentar mais eficiente será indicada para o caso estudado.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

As barragens são obras que proporcionam diversos benefícios para uma sociedade, entretanto, são construções que assim como qualquer outra estão sujeitas a sofrerem problemas. Os graves acidentes em barragens comprovam a necessidade dessas estruturas serem construídas não só sobre o olhar da economia, como também o da segurança. Assim, para que tenham a sua seguridade garantida é necessário não só conhecer as características do local onde serão instaladas, como também da estrutura em si do barramento.

Nesse contexto, a fim de garantir o princípio da segurança de uma barragem e levando em consideração que entre as principais causas de ruptura estão a instabilidade de seus taludes e o processo de erosão interna (*piping*), o presente trabalho busca responder: Como a análise integrada de percolação e estabilidade pode contribuir para o desenvolvimento de um modelo

seguro de barragem de terra, considerando as características geotécnicas encontradas na formação geológica da bacia hidrográfica do rio Formoso?

1.2 JUSTIFICATIVA

Nota-se que, mesmo diante do avanço tecnológico e da ampla difusão do conhecimento, é comum se deparar com notícias sobre acidentes envolvendo barragens, nos quais potenciais rupturas são desconsideradas. No Brasil, existem diversos exemplos de desastres que impactaram diretamente a vida da população e o meio ambiente, com destaque para as barragens do Fundão (Mariana, MG), em 2015, e do Córrego do Feijão (Brumadinho, MG), em 2019. Essas tragédias são apontadas por Guidicini, Sandroni e Mello (2021) como o ponto crucial no surgimento da preocupação com a segurança das barragens no Brasil.

Nesse contexto, observa-se uma crescente adoção de políticas que demandam uma gestão mais eficiente da segurança das barragens no Brasil. A Lei 12.334, sancionada em 20 de setembro de 2010, representa um marco regulatório no país, impondo requisitos mais rigorosos para o planejamento, construção, operação e monitoramento de barragens. Ela visa prevenir a ocorrência de desastres similares, enfocando a importância da avaliação contínua da estabilidade e da implementação de medidas preventivas.

A importância deste trabalho se fundamenta na necessidade de analisar o fluxo e a estabilidade de taludes em barragens desde a fase de projeto, reconhecendo que compreender os diversos fenômenos envolvidos nessas estruturas é fundamental para o domínio efetivo da segurança do barramento.

Pretende-se com o estudo contribuir com informações importantes não só para futuros trabalhos acadêmicos, como também para todas as entidades que possuem relação com a segurança de barragens, como os empreendedores, projetistas e outros. Espera-se que a pesquisa possa ajudar a transformar a realidade dos acidentes nessas obras, pois ações tomadas no planejamento dessas construções podem evitar desastres catastróficos que perduram muitas vezes por anos na vida de quem é afetado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Propor um modelo seguro de barragem de terra, para as características geotécnicas encontradas na formação geológica da bacia hidrográfica do Rio Formoso.

1.3.2 Objetivos específicos

- Levantar as características e dados geológico-geotécnicos da região da bacia hidrográfica do rio Formoso;
- Propor um modelo de barragem inicial e sugerir possibilidades de seção por meio da incrementação de sistemas de drenagem e vedação;
- Analisar o fluxo e a estabilidade dos modelos propostos;
- Comparar os resultados das análises de fluxo e estabilidade das alternativas de seções com o modelo inicial e, indicar a melhor solução para o caso analisado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BARRAGENS

Conforme citado no Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2016a), barragem é uma estrutura construída em um curso d'água, com o objetivo de conter ou acumular água ou quaisquer outras substâncias, sejam elas líquidas ou uma mistura de líquidos e sólidos. As funções dessas estruturas são diversas, incluindo o abastecimento público, produção de energia elétrica, regularização de cheias, recreação e outros.

A Lei nº 12.334/2010 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) apresenta uma definição semelhante, mas complementa explicando que além da estrutura em si do barramento, todos os demais elementos que estão ligados a esse, também fazem parte de uma barragem (BRASIL, 2010). Simultâneo a isso, Gaioto (2003) destaca que em geral as obras de barragens são grandiosas e por isso demandam projetos que devem ter a colaboração de profissionais de diversas áreas da engenharia.

A construção de barragens está presente na vida do homem desde os primórdios de sua civilização, pois o ser humano sempre desenvolveu técnicas que usassem os recursos disponíveis na natureza para suprir suas necessidades. Cruz (2004) relata que a prática de edificar barragens para o fornecimento de água, seja para o consumo próprio ou para atividades como irrigação, é algo que está atrelado à história da humanidade e que não é uma técnica nova, sendo essa tão arcaica como a História do homem. Soares *et al.* (2019) afirmam que as barragens são elementos básicos em uma sociedade e promovem o crescimento do local onde são instaladas.

Nesse contexto, os primeiros registros que se tem sobre a construção de barragens estão relacionados ao surgimento das civilizações, como as da Babilônia, Egito, Índia, Pérsia e do Extremo Oriente. Por pelo menos 5.000 anos essas estruturas estiveram disponíveis a esses povos, possuindo uma relação direta com as atividades de irrigação que os mesmos desenvolviam. Não se sabe ao certo em que ano começaram essas construções, mas há milhares de anos no Egito se desenvolvia essas obras no rio Nilo para irrigação e na China elas eram usadas para fazer tanto com que a água chegasse às terras agrícolas como também para controlar as enchentes (JANSEN, 1983).

No Brasil, as barragens começaram a ser construídas para satisfazer as necessidades da população brasileira. A barragem mais antiga que se tem conhecimento no território brasileiro

foi erguida na cidade do Recife no final do século XVI. Na última década do século XIX, dois motivos principais impulsionaram o aumento da construção dessas obras: as secas características da região Nordeste e o crescimento do país. Esse fato foi de extrema importância para mitigar o problema da migração para a região Sudeste, permitindo que assim o povo nordestino não saísse do seu lugar de origem, pois essa região é marcada por rios em sua maioria intermitentes, com vazões específicas médias inferior a 3 l/s.km², com valores superiores a 3000 horas por ano de incidência de raios solares e chuvas médias anuais de 400 mm ou menos, segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2011).

As barragens destinadas à produção de energia elétrica começaram a ser construídas também no final do século XIX, especificamente nas regiões Sul e Sudeste. Inicialmente eram obras de dimensões pequenas, forneciam baixas cargas e atendiam pouca demanda (CBDB, 2011). Com o avanço da tecnologia foi possível ampliar as finalidades que o armazenamento de água proporciona, fazendo com que as barragens aumentassem em número e dimensão e, como consequência estimulasse o desenvolvimento socioeconômico do país (PERSECHINI *et al.*, 2015).

Atualmente existe pelo menos uma barragem de grande porte em aproximadamente metade dos rios do mundo. Dessas grandes barragens do mundo, mais de três quartos delas estão localizadas em cinco países e por volta de dois terços se encontram em países em desenvolvimento. Em 24 países, dos quais estão incluídos o Brasil e a Noruega, a produção de energia hidrelétrica representa 90% de todo o total de energia elétrica produzida. É estimado que as barragens que foram erguidas unicamente para irrigação são metade das grandes obras construídas do mundo e que essas auxiliam com 12% a 16% da produção de alimentos em todo o cenário mundial. No mínimo 75 países edificaram barragens com a finalidade de controlar inundações. Até os dias atuais, essas obras permanecem sendo em muitos territórios como os maiores projetos individuais no que diz respeito a investimentos, dados esses da Comissão Mundial de Barragens (CMB, 2000).

2.2 TIPOS DE BARRAGENS

Segundo Silva (2016), o agrupamento das barragens pode ser feito sob diferentes critérios, como seus objetivos, materiais empregados na construção, forma estrutural, capacidade de armazenamento e dimensões. O livro *Design of Small Dams* do U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (USBR) cita que as barragens são agrupadas quanto à sua utilização, seu projeto hidráulico e os materiais empregados na construção (USBR, 1987).

Quanto à utilização, as barragens podem ser de armazenamento, desvio ou retenção. As barragens de armazenamento têm função de normalizar o regime hidrológico dos rios, permitindo acumular água para suprir demanda nas épocas em que os rios se encontram com baixa afluência; as barragens de desvio são usadas para dispersar água que será armazenada fora do curso d'água; já as barragens de retenção são projetadas para reduzir os efeitos das cheias (USB, 1987). Costa (2012) menciona que as barragens de retenção também podem ser empregadas para acumular sedimentos, resíduos industriais ou rejeitos de mineração.

Em relação à classificação baseada no projeto hidráulico, as barragens podem ser transbordantes ou não transbordantes. As transbordantes são projetadas para que a descarga passe por cima das cristas ou vertedouros, já as não transbordantes são projetadas de modo que não ocorra o transbordamento. No que se refere aos materiais empregados na construção, as barragens podem ser de terra, de enrocamento, de concreto gravidade, de concreto em arco, de contraforte de concreto e de outros tipos de materiais. Essas últimas são edificadas em sua maioria para atender demandas locais ou para fins experimentais, como por exemplo, barragens de aço estrutural e madeira (USB, 1987).

Ainda segundo USB (1987), a classificação baseada no material empregado na construção das estruturas é o tipo mais adotado, sendo considerado nas decisões iniciais do projeto. Paralelo a isso, Oliveira e Brito (1998) afirmam tal colocação ao classificarem as barragens de forma simplificada em duas categorias: barragens de concreto e barragens de aterro. Para os autores, cada um desses tipos possui exigências próprias no que diz respeito a características construtivas, solicitações e exigências da fundação.

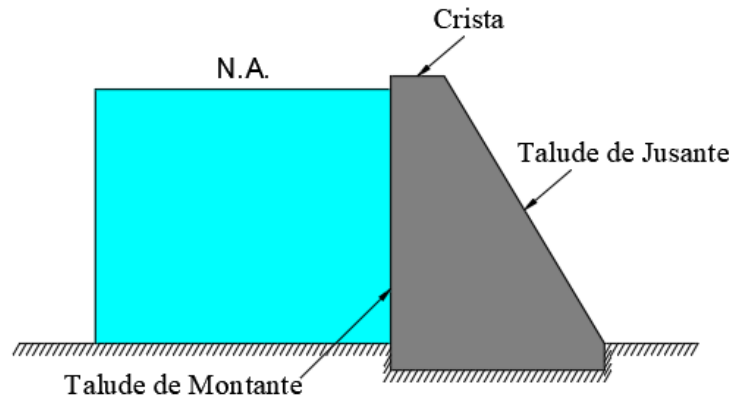
2.2.1 Barragens de concreto

As barragens de concreto são construídas em material aglomerado e exigem fundações resistentes, isso inclui ser de rocha firme e que apresenta pouca fissuração. Caso haja a presença de rochas alteradas, elas devem ser removidas e se necessário o terreno deve ser tratado, a fim de aumentar a resistência e diminuir a permeabilidade antes do mesmo receber o barramento (CAPUTO, 1987). Essas barragens se dividem em: gravidade, gravidade aliviada, em contraforte, de concreto rolado ou compactado e em abóbada (COSTA, 2012).

As barragens de concreto gravidade são estruturas maciças de concreto sem a presença de muita armação e que trabalham unicamente à compressão (COSTA, 2012). O peso próprio e a largura da base são responsáveis por garantir sua estabilidade, desde que esses estejam

alinhados com a capacidade de carga da fundação (OLIVEIRA e BRITO, 1998). A Figura 1 apresenta o perfil comum desse tipo de barragem.

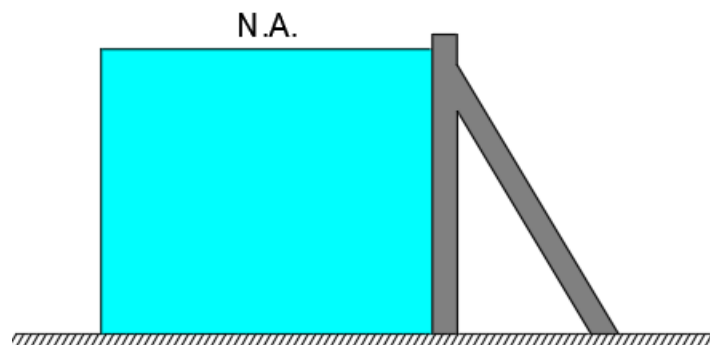
Figura 1 – Seção transversal das barragens de concreto gravidade.



Fonte: Adaptado de Caputo (1987).

Costa (2012) explica que as barragens de concreto gravidade aliviada são semelhantes as barragens de concreto gravidade, porém possuem elementos vazados ao longo da sua estrutura que as tornam mais leve e transmite esforços menores à fundação. Além disso, elas necessitam que o concreto apresente uma quantidade de armação maior em razão da solicitação aos esforços de tração. A Figura 2 apresenta a seção transversal dessas barragens.

Figura 2 – Seção transversal das barragens de concreto gravidade aliviada.

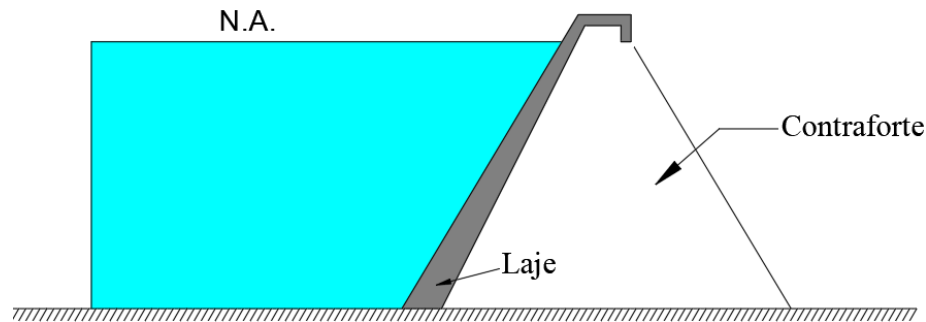


Fonte: Adaptado de Costa (2012).

As barragens em contraforte são formadas por uma laje que se encontra a montante do barramento e, por contrafortes que tem a função de sustentar a laje (KUPERMAN e CIFU, 2006). Segundo Costa (2012), os esforços que chegam à fundação se localizam em uma área pequena, consequentemente a tensão que acontece no contato da barragem com a fundação é

grande, necessitando de uma quantidade maior de armação. Já em termos de consumo de concreto, precisam de uma quantidade menor se comparadas às barragens de concreto gravidade e gravidade aliviada. A Figura 3 apresenta os elementos estruturais e a seção transversal desse tipo de barragem.

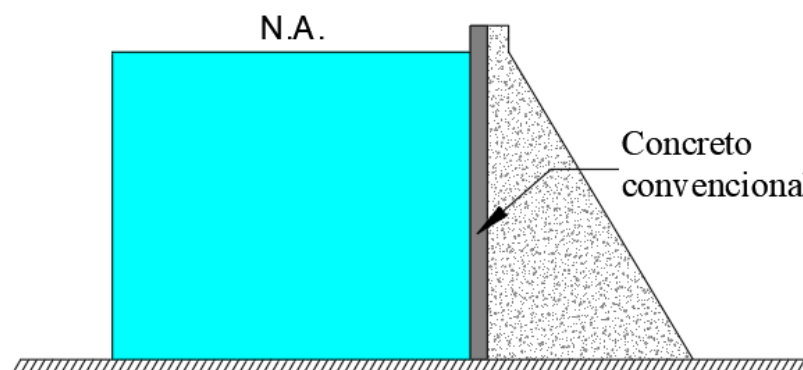
Figura 3 – Elementos e seção transversal das barragens de concreto em contraforte.



Fonte: Adaptado de Caputo (1987).

As barragens de concreto rolado ou compactado são executadas com Concreto Compactado a Rolo (CCR), um concreto que não é vibrado e que seu espalhamento é realizado com trator de esteira, sendo compactado em seguida. É necessário o uso de concreto convencional a montante da barragem para que a estanqueidade da mesma seja assegurada (COSTA, 2012). A seção transversal desse tipo de barragem é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Seção transversal das barragens de concreto rolado.

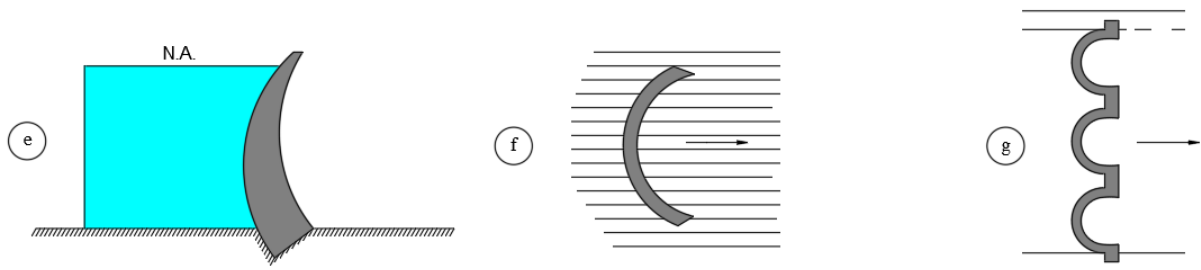


Fonte: Adaptado de Costa (2012).

As barragens abóbadas ou em arco são caracterizadas pelo formato de um arco que acontece tanto no seu sentido horizontal quanto vertical, conforme seção apresentada na Figura 5 (e). Os arcos podem se apresentar de duas formas: simples, Figura 5 (f) ou múltiplos, Figura 5 (g). A configuração em arco desse tipo de obra permite que uma parte das tensões sofridas

sejam conduzidas para as ombreiras da barragem. Além disso, necessita de pouco volume de concreto no que diz respeito ao metro quadrado de superfície represada (COSTA, 2012).

Figura 5 – Seção transversal das barragens em arco e suas variações.



Fonte: Adaptado de Costa (2012).

2.2.2 Barragens de aterro

As barragens de aterro são estruturas compostas por materiais que apresentam baixa resistência quando comparados ao concreto (OLIVEIRA e BRITO, 1998). Esses materiais podem ser naturais (solo) ou processados (rochas e britas) e devem ser escolhidos corretamente em uma área de empréstimo. Logo depois são conduzidos para a obra, lançados em posições definidas em projeto e por fim, compactados. Quanto ao comportamento geotécnico, as barragens de aterro devem ter: resistência, incompressibilidade, ausência de contração quando se encontrar no estado seco, plasticidade, aderência, mínimo de rastejo, mínimo de permeabilidade e erodibilidade (MEIRELLES, 2013).

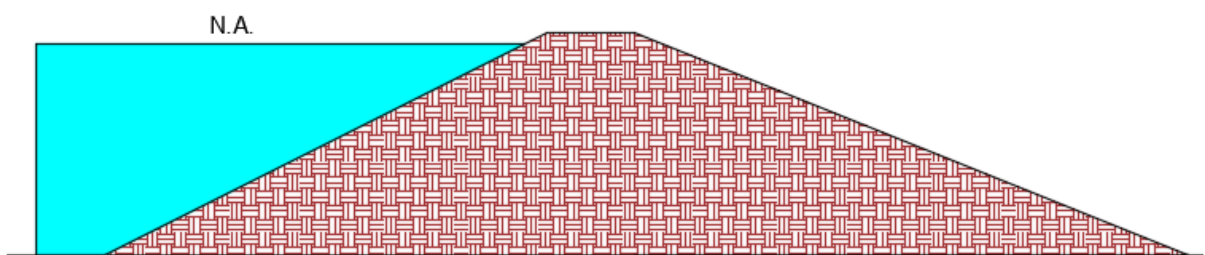
Ainda segundo Meirelles (2013), as barragens de aterro são basicamente formadas por: uma estrutura principal denominada de corpo, que é responsável por reter água; uma região a montante do barramento chamada de reservatório ou açude, onde a água é armazenada; e por um grupo de atividades e equipamentos hidráulicos que permitem a passagem d'água do sentido montante para jusante da barragem, sem que a represa sofra algum problema e a água possa ser utilizada nas finalidades a que se destina a obra. De acordo com Oliveira e Brito (1998), os tipos de barragens de aterro mais usados são as de terra e de enrocamento.

As barragens de terra são obras construídas desde os tempos remotos para o armazenamento de água para irrigação e compreendem as estruturas mais simples de barragens, podendo ser edificadas em diferentes tipos de fundação, desde um material mais resistente até um menos resistente (MARANGON, 2019). São implementadas com solos que apresentam granulometria fina a grossa, possuem baixa permeabilidade e se comportam de acordo com as

condições das poropressões. As seções mais populares desse tipo de barragem são as homogêneas e as zoneadas (OLIVEIRA e BRITO, 1998).

As barragens de terra homogêneas, segundo Costa (2012), são basicamente aquelas formadas por um único material. Massad (2010) cita que são as mais utilizadas no Brasil devido às características topográficas do país, pelos vales muito abertos e pela quantidade de material terroso. As fundações podem ser mais deformáveis e até sobre solos moles pode-se edificar esse tipo de obra. A Figura 6 apresenta a seção desse tipo de barragem.

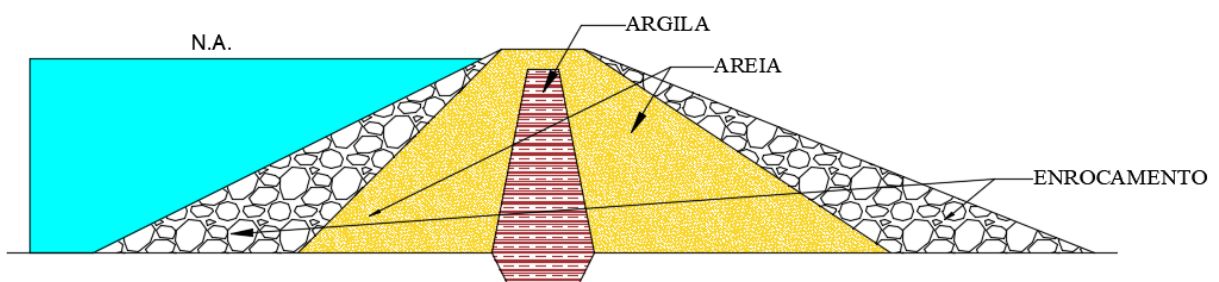
Figura 6 – Seção transversal das barragens de terra homogêneas.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

As barragens zoneadas são compostas por mais de um tipo de material que são distribuídos ao longo do corpo da barragem de acordo com suas características e/ou permeabilidade (COSTA, 2012). A Figura 7 apresenta a seção transversal dessas barragens.

Figura 7 – Seção transversal das barragens de terra zoneadas.



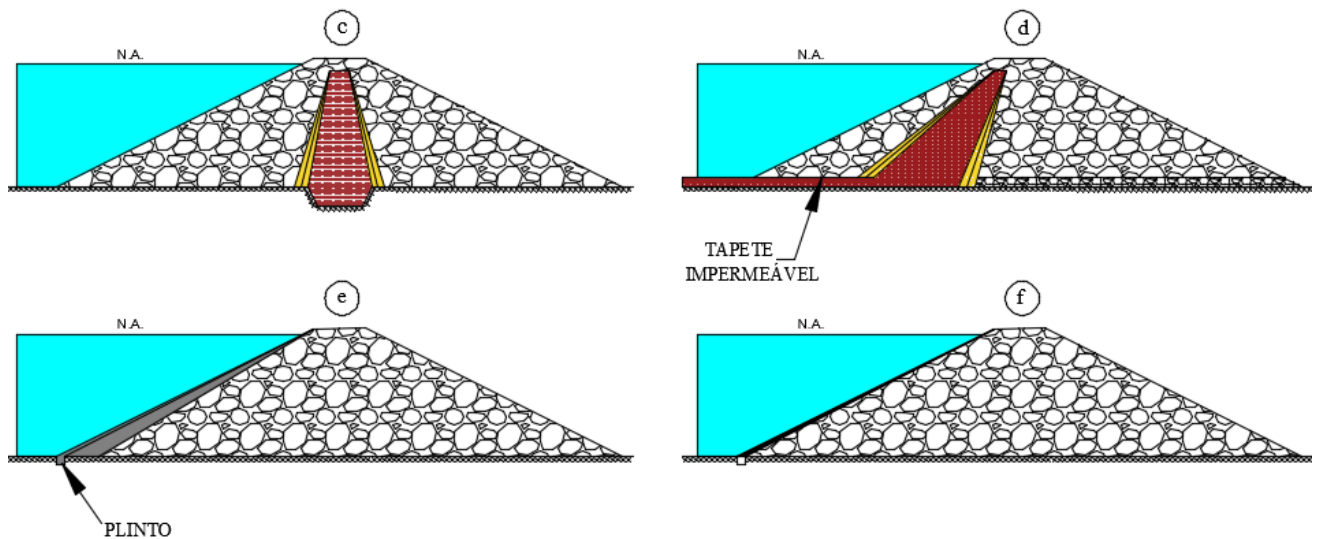
Fonte: Adaptado de Caputo (1987).

Costa (2012) explica que as barragens de enrocamento podem se apresentar de duas formas: com núcleo impermeável ou com face impermeável. As de núcleo impermeável possuem material rochoso em maior quantidade ao longo do seu corpo e, para proteção contra o escoamento da água é usado material argiloso em seu núcleo. São utilizados materiais de transição entre o rochoso e o argiloso a fim de evitar que o material fino presente no interior da

barragem seja carregado. O núcleo pode se apresentar tanto centralizado, Figura 8 (c), quanto inclinado para montante, Figura 8 (d).

Quanto às barragens com face impermeável, Costa (2012) esclarece que o fluxo d'água é impedido através da impermeabilização do talude de montante. Essa técnica pode ser feita por: camada de asfalto; placa de concreto, Figura 8 (e); chapa de aço, Figura 8 (f).

Figura 8 – Barragens de enrocamento.



Fonte: Adaptado de Costa (2012).

2.3 SEGURANÇA DE BARRAGENS

A segurança de barragens é definida pela Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), como sendo o estado de garantir a integridade tanto da estrutura quanto do seu funcionamento, de forma que seja preservada a vida, a saúde, a propriedade e o meio ambiente (BRASIL, 2010).

As barragens são obras capazes de armazenar grandes volumes de água e por isso, são essenciais na vida de uma população. Por outro lado, a construção incorreta dessas estruturas oferece riscos para as pessoas, bens e meio ambiente, reforçando a importância das leis e políticas criadas com o intuito de reduzir as falhas e perigos oferecidos por esses relevantes empreendimentos (BARBOSA *et al.*, 2020).

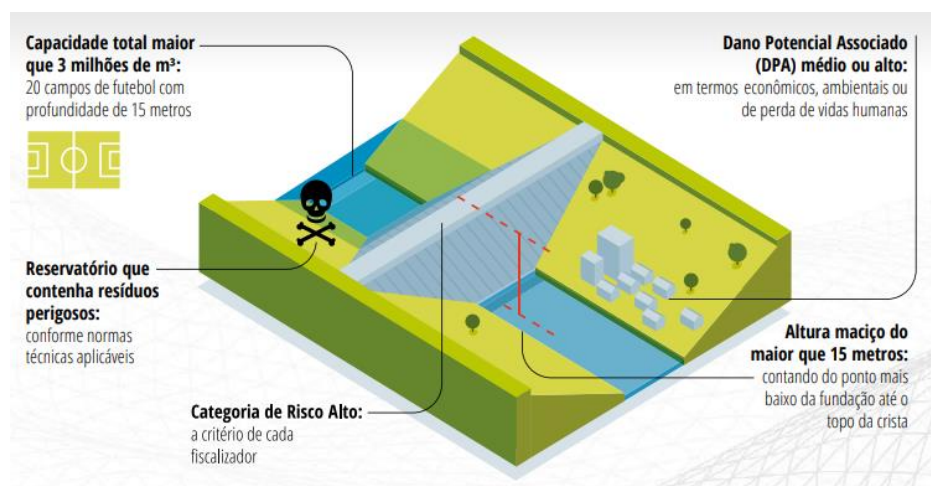
Os acidentes e incidentes em barragens aumentam na medida em que acontece o crescimento da propagação da construção dessas obras. Esse fato é agravado devido à falta de legislação e fiscalização em torno dos períodos de funcionamento das barragens, como

operação e manutenção. Além disso, a expansão urbana e industrial cada vez maior contribui para que esses acidentes e incidentes tomem proporções cada vez maiores (SILVA *et al.*, 2021). Brasil (2020) define acidente em barragem como sendo o acontecimento que afeta a estrutura do barramento, de modo que seu conteúdo seja liberado de forma descontrolada. Esse fato pode ser causado tanto por falha parcial ou total da estrutura principal quanto de suas estruturas anexas. Já o incidente é o fato que abala o desempenho da estrutura principal ou anexas e que pode gerar um acidente.

Nesse contexto, Silva *et al.* (2021) cita que devido a necessidade de garantir a segurança das barragens brasileiras, foi sancionada em 2010 a lei nº 12.334 que determina a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). O PNSB foi estabelecido para atender vários objetivos, dentre eles estão a padronização das ações de segurança, o monitoramento e acompanhamento dessas ações e a redução de acidentes. Já o SNISB trata-se de um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação das informações sobre as condições de segurança das barragens brasileiras (BRASIL, 2010).

É importante destacar que para uma barragem ser enquadrada na PNSB é necessário que se atenda a pelo menos uma das características descritas na lei: altura do maciço maior ou igual a 15 (quinze) metros, sendo esta medida contada do nível do solo até a crista; reservatório com capacidade total maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos); reservatório que tenha resíduos perigosos; categoria de dano potencial associado médio ou alto; categoria de risco alto (BRASIL, 2010). A Figura 9 apresenta o resumo das características para uma barragem ser submetida à PNSB.

Figura 9 – Características de enquadramento na PNSB.



Fonte: ANA (2021).

A responsabilidade legal pela segurança da barragem é do empreendedor, pessoa física ou jurídica que possui direito sobre a vida útil da barragem, sendo ele obrigado a elaborar e atualizar o Plano de Segurança da Barragem (BRASIL, 2010). Quanto aos órgãos federais envolvidos na legislação de segurança de barragens, tem-se o Alto do Poder Legislativo que fica responsável pelas barragens de forma geral e os órgãos fiscalizadores que são encarregados de aplicar resoluções e portarias em barragens que estão dentro de seu domínio. Esses órgãos são: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA); Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL); e Agência Nacional de Mineração (ANM), que substituiu o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Além desses, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) estabelece os procedimentos a serem adotados para se concretizar a PNSB e elabora resoluções para as barragens no geral (AIROLDI, DINIZ e UDA, 2022).

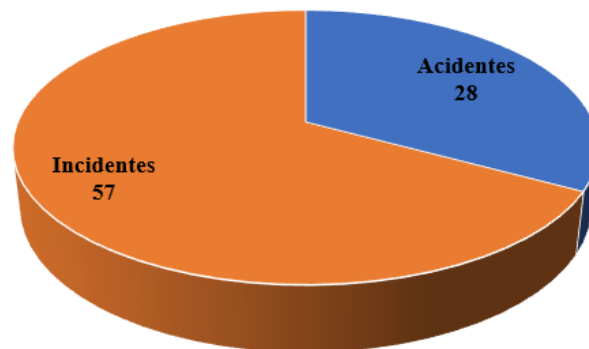
Silva *et al.* (2021) salienta que com a publicação da Lei nº 12.334/2010 a ANA passou a ter obrigação de disponibilizar anualmente o Relatório de Segurança de Barragens. De acordo com ANA (2022), os objetivos desses relatórios é fazer com que a sociedade tenha conhecimento a respeito do cenário da gestão da segurança das barragens brasileiras, de forma que essas informações se tornem acessíveis a todos. Os dados usados de base para a elaboração desses relatórios são fornecidos pelas entidades fiscalizadoras; depois é enviado ao CNRH e posteriormente é encaminhado ao Congresso Nacional e demais órgãos, a fim de tornar público o conhecimento sobre a segurança de barragens no país.

ANA (2021) evidencia no Relatório de Segurança de Barragens de 2020 que, em 2020, a Lei nº 12.334/2010 foi alterada através da Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 e com essa nova legislação, a PNSB ganhou novas propostas, algumas delas são: proibição do método de alteamento a montante na edificação de barragens de mineração; elaboração de sanções e penalidades, com altas multas; ampliação da responsabilidade dos empreendedores, como obrigações que antes eram de órgãos de proteção e defesa civil; consulta a população afetada como requisito para elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE).

A Lei nº 12.334/2010 foi um marco para a segurança de barragens, pois se ter uma legislação nessa área é uma forma de padronizar práticas de Engenharia que proporcionem o mínimo de segurança para tais obras. Conforme Airolodi, Diniz e Uda (2022), embora existissem legislação internacional que pudesse ser usada de base para a elaboração de uma legislação forte brasileira acerca da segurança de barragens, isso só aconteceu na medida em que graves acidentes envolvendo barragens ocorreram, sendo somente em 2010 que a primeira lei federal da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) foi criada.

A partir disso, o conhecimento acerca dos acidentes e incidentes envolvendo as estruturas de barragens tornou-se mais acessível. Através dos Relatórios de Segurança de Barragens que passaram a serem de elaboração obrigatória após a promulgação da Lei da PNSB, Silva *et al.* (2021) analisaram, classificaram e organizaram os dados de acidentes e incidentes em barragens brasileiras no período de 2011 a 2018, totalizando a quantidade apresentada na Figura 10. Os autores destacam que apesar da legislação permitir o conhecimento sobre os aspectos envolvidos na segurança de barragens que antes não eram conhecidos, há ausência de um processo mais profundo nos dados gerais sobre os acidentes e incidentes em barragens.

Figura 10 – Acidentes e incidentes em barragens brasileiras de 2011 a 2018.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023), com base em Silva *et al.* (2021).

2.3.1 Verificação da segurança

A análise do estado em que se encontra a segurança de uma barragem é um procedimento importante no combate a redução de acidentes. De acordo com ANA (2016b), as vistorias acerca das condições de segurança de barragens têm por objetivo analisar em que situações se encontram os elementos físicos da estrutura, a fim de identificar possíveis problemas que comprometam o funcionamento e possam desenvolver prejuízos de diversas naturezas, como à vida humana, econômicos e ambientais. Simultâneo, Sola e Ferreira (2022) complementam que a etapa de avaliação da segurança das condições estrutural e operacional, permite intervir com antecedência no funcionamento para solucionar os problemas em questão.

É fundamental verificar a segurança, pois vários fatores podem comprometer a estabilidade das estruturas de uma barragem, tornando-a perigosa. Esses fatores são exemplificados por Sola e Ferreira (2022), que citam os fenômenos naturais, como enchentes, terremotos, deslizamentos e deteriorações decorrentes do tempo; e os danos em função da idade,

mudança de comportamento e falta de manutenção que podem comprometer a segurança da barragem.

Nesse sentido, ANA (2021) cita que a segurança de uma barragem deve ser verificada periodicamente e devem acontecer ao longo das fases da obra, como planejamento e projeto, construção e primeiro enchimento, operação e desativação. Os recursos utilizados para realizar essa avaliação são as Inspeções de Segurança, Revisão Periódica e medidas adotadas que estão determinadas no Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação da barragem.

De acordo com ANA (2016b), as Inspeções de Segurança são realizadas com o objetivo de analisar em que condições se encontram a estrutura em si do barramento, identificando a existência de possíveis problemas e anomalias que possam necessitar de intervenção com medidas corretivas ou preventivas, antes que acontece uma catástrofe em escala grandiosa. Essas inspeções se dividem em regulares e especiais e ambas têm por responsável o empreendedor da barragem.

Os fatores que determinam as exigências das inspeções regulares e especiais são a categoria de risco e o dano potencial associado à barragem. Através deles, sabe-se a frequência que serão realizadas as inspeções; quão qualificada deve ser a equipe responsável pela vistoria; conteúdo e nível de detalhamento exigidos pelos órgãos fiscalizadores (BRASIL, 2010). A técnica usada nas inspeções é a averiguação visual no campo, definida por Barbosa *et al.* (2020) como o procedimento de observar *in loco* todas as estruturas da barragem, a fim de identificar possíveis pontos com anomalias (manifestações patológicas).

A Revisão Periódica faz parte dos procedimentos de segurança de barragem e é realizada com o objetivo de analisar em que situação se encontra a barragem no seu contexto geral, levando em consideração os critérios de projeto, atualização dos dados hidrológicos e alterações das situações a montante e jusante da obra (BRASIL, 2010). No caso das barragens de terra, ANA (2016c) destaca as particularidades levadas em conta na Revisão Periódica, que são: características dos materiais que compõe o aterro, condição e tratamento da fundação e análises das informações contidas no projeto.

A Resolução nº 121, de 09 de maio de 2022 que altera a Resolução nº 236 de 30 de janeiro de 2017, estabelece a frequência que deve ser realizadas as Inspeções de Segurança e as Revisões Periódicas (ANA, 2022). Para definir o intervalo, primeiro faz-se a classificação da barragem de acordo com sua categoria de risco e dano potencial associado, conforme apresenta o Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação da barragem.

Categoria de risco	Dano Potencial Associado		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	C
Médio	A	B	D
Baixo	A	B	D

Fonte: ANA (2022).

A partir da classificação da barragem, é definida a periodicidade que serão feitas as revisões periódicas de segurança de barragem (RPSB), conforme apresenta o Quadro 2. No caso da Inspeção de Segurança Regular (ISR), ANA (2022) define que essas deverão ser feitas, no mínimo, a cada ano para as classes de barragens A, B e C, e que para a classe D os empreendedores podem adotar uma periodicidade de 2 (dois) anos.

Quadro 2 – Frequência das Revisões Periódicas.

Categoria de risco	Dano Potencial Associado		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	5 anos	7 anos	10 anos
Médio	5 anos	7 anos	12 anos
Baixo	5 anos	7 anos	12 anos

Fonte: Elaborado pela autora (2023), com base em ANA (2022).

2.4 ROMPIMENTO DE BARRAGENS DE TERRA

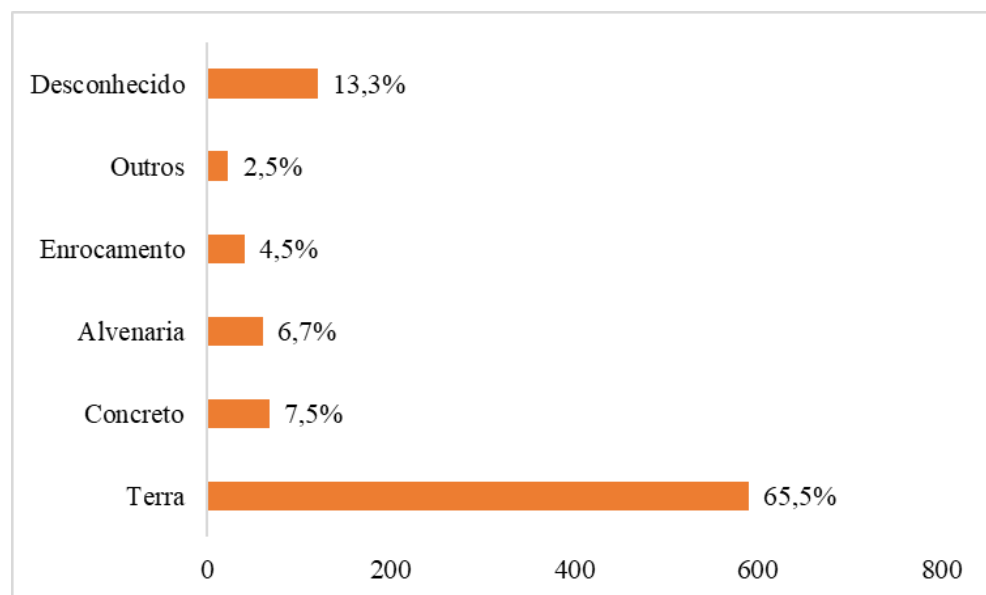
As barragens, como qualquer outra obra, podem estar sujeitas a falhas. Souza e Ladeira (2020) afirmam que apesar da evolução das técnicas construtivas usadas em barragens, nenhuma delas estão submetidas a probabilidade zero de ruptura. Nesse sentido, Virgili e Queiroz (2019) definem ruptura como uma ocorrência em que a estrutura do barramento é comprometida, afetando o desempenho de suas funções.

Sendo assim, é crucial adotar medidas que diminuam as chances de catástrofes acontecerem. Souza e Ladeira (2020) mencionam que projetar, construir, monitorar e realizar manutenções corretamente são ações que reduzem as chances de falhas. Barbosa *et al.* (2020) declaram que realizar manutenções durante a fase de operação, permite que as barragens possam cumprir suas funções de forma segura, sem colocar pessoas e propriedades localizadas a jusante em perigo.

À vista disso, as barragens de terra assim como qualquer outro tipo de barragem, devem ser projetadas levando em consideração os diversos acontecimentos que estão sujeitas. Segundo Souza e Ladeira (2020), dentre as diversas causas de ruptura de barragens, as principais são: galgamento, erosão interna (*piping*) e instabilização. Esses modos de ruptura também são enfatizados por Viseu (2008), sendo dois de natureza estrutural e um hidráulico. O hidráulico seria o galgamento, que acontece quando a água passa sobre a barragem e o estrutural são o *piping* e a instabilização.

Em um contexto mundial, Zhang, Xu e Jia (2007) realizaram um estudo onde reuniram mais de 900 casos de falhas de barragens abordados na literatura, com exceção de dados provenientes da China. Os autores notaram que aproximadamente 66% das rupturas aconteceram em barragens do tipo terra, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Percentual de falhas por tipo de barragem.



Fonte: Adaptado de Zhang, Xu e Jia (2007).

Em relação as características das barragens de terra rompidas, os autores analisaram aspectos como capacidade do reservatório e altura, obtendo os resultados apresentados na Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente. Foi possível observar, levando em consideração as capacidades e alturas conhecidas, que os maiores números de casos de rupturas de barragens de terra estão relacionados aos menores valores de capacidade do reservatório e altura da barragem, evidenciando que não são só as estruturas de barragens robustas que estão sujeitas a falhas.

Tabela 1 – Relação entre barragens de terra rompidas e suas capacidades.

Capacidade ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Casos	Porcentagem (%)
>1000	7	1.2
1000-100	19	3.2
100-10	62	10.5
10-1	63	10.6
<1	96	16.2
Desconhecido	346	58.3
Soma	593	100.0

Fonte: Adaptado de Zhang, Xu e Jia (2007).

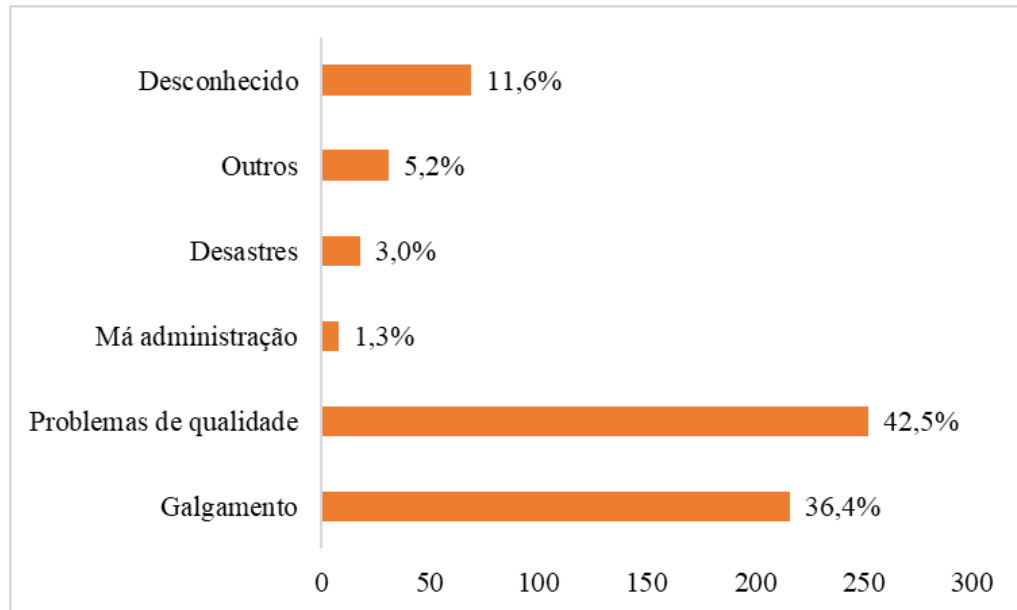
Tabela 2 – Relação entre barragens de terra rompidas e suas alturas.

Altura (m)	Casos	Porcentagem (%)
>100	4	0.7
100-60	10	1.7
60-30	44	7.4
30-15	135	22.8
<15	301	50.8
Desconhecido	99	16.6
Soma	593	100.0

Fonte: Adaptado de Zhang, Xu e Jia (2007).

Zhang, Xu e Jia (2007) também observaram os modos de rupturas das barragens, percebendo que a maior porcentagem de 42,5% é causada por problemas de qualidade, que foi como os autores nomearam um conjunto de ocorrências. A segunda maior causa de rupturas em barragens de terra, são os galgamentos, que totalizam 36,4% em relação ao total de barragens de terra rompidas. A Figura 12 apresenta as causas de ruptura em barragens de terra com suas respectivas porcentagens.

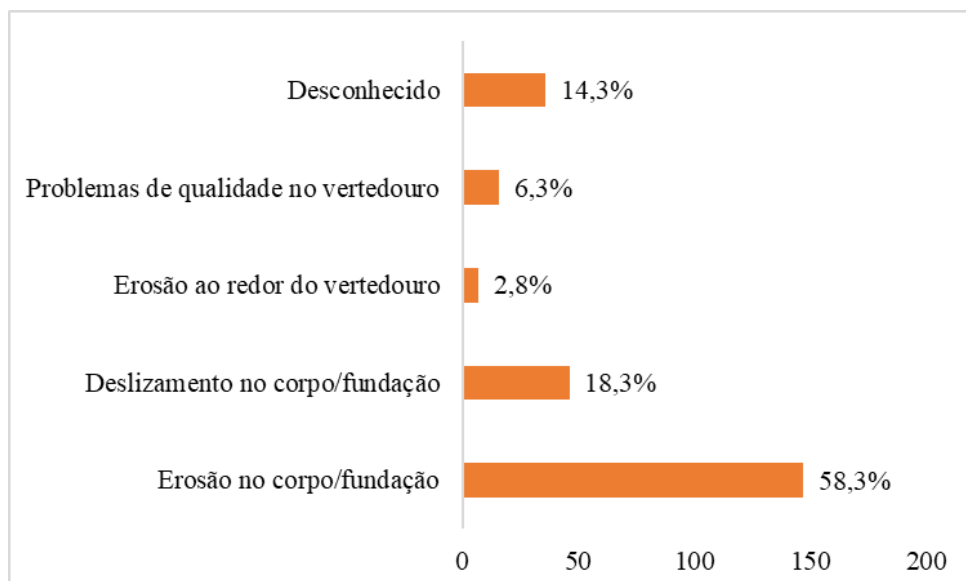
Figura 12 – Modos de ruptura em barragens de terra.



Fonte: Adaptado de Zhang, Xu e Jia (2007).

Em relação aos problemas de qualidade, os autores abordaram as porcentagens das sub causas desses problemas: erosão no corpo/fundação da barragem; deslizamento no corpo/fundação; erosão ao redor do vertedouro; problemas de qualidade no vertedouro; e sub causas desconhecidas. Dentre essas, o caso de erosão no corpo/fundação da barragem se destaca com 58,3% do total de rupturas resultantes de problemas de qualidade em barragens de terra, conforme apresenta a Figura 13.

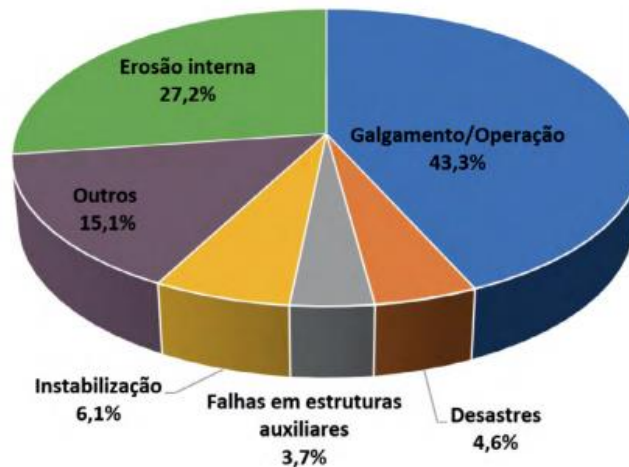
Figura 13 – Sub causas dos problemas de qualidade.



Fonte: Adaptado de Zhang, Xu e Jia (2007).

Sendo assim, ficou evidente nos estudos de Zhang, Xu e Jia (2007) que as principais causas de ruptura em barragens de terra são os mecanismos de erosão no corpo/ fundação da barragem e galgamento. Xu Yao (2010) realizou um estudo em sua tese sobre o rompimento de barragens espalhadas no mundo inteiro e alcançaram resultados similares. Souza e Ladeira (2020) extraíram dados dessa tese referentes aos motivos que causaram a ruptura de 1001 barragens de aterro no mundo, compreendendo o período de 1799 a 2005, e os resultados apontaram galgamento com 43,3% e erosão interna com 27,2% sendo as principais causas de ruptura de barragens, como apresenta a Figura 14.

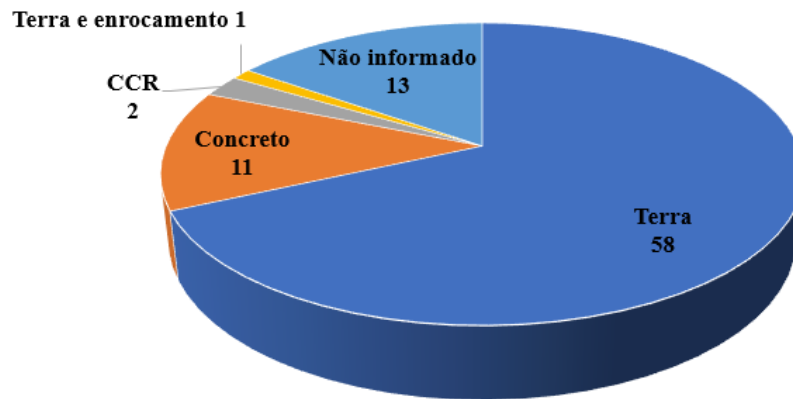
Figura 14 – Causas de ruptura de barragens de aterro entre 1799 e 2005.



Fonte: Souza e Ladeira (2020).

Em relação ao contexto nacional, Silva *et al.* (2021) chegaram aos mesmos resultados encontrados nos estudos internacionais, no que diz respeito ao tipo de barragem e a quantidade de ocorrências diversas para cada tipo. Com base nos dados dos relatórios de segurança de barragens da ANA, compreendendo o período de 2011 a 2018, os resultados obtidos pelos autores mostraram que 58 dos casos reunidos se tratavam de rupturas que aconteciam em barragens de terra. A Figura 15 apresenta a relação entre eventos adversos e tipo de barragem.

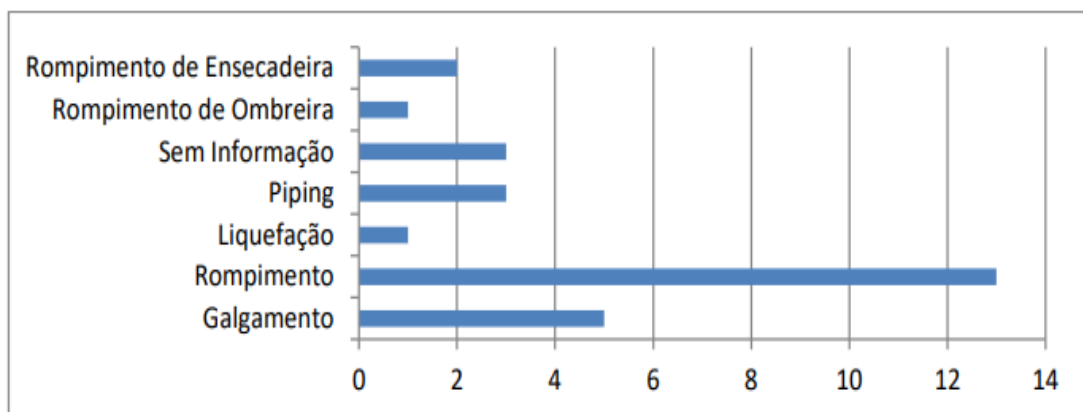
Figura 15 – Proporção de eventos adversos por tipo de barragem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023), com base em Silva *et al.* (2021).

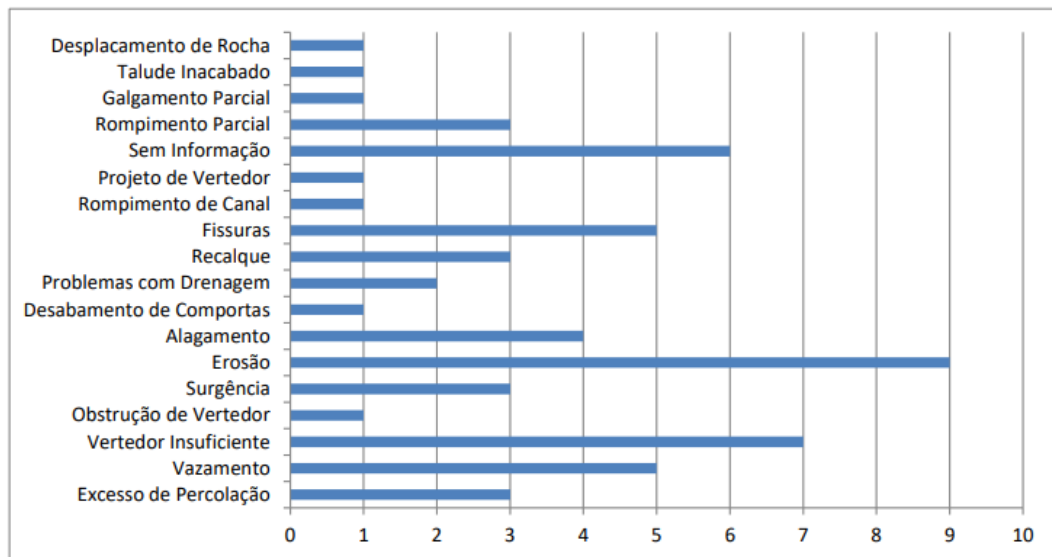
Silva *et al.* (2021) também analisaram as principais causas de acidentes e incidentes em barragens brasileiras, com base nos relatórios publicados pela ANA de 2011 a 2018. Os dados compilados pelos autores mostraram que no caso dos acidentes, a causa denominada por “rompimento” aparece como a de maior quantidade, seguida de galgamento, conforme apresenta a Figura 16. Já nos casos de incidentes, as erosões apareceram como as principais desencadeadoras desses (Figura 17). Foi possível perceber que assim como no cenário internacional, galgamento e erosão estão entre as principais causas de rupturas de barragens.

Figura 16 – Causas de acidentes em barragens brasileiras de 2011 a 2018.



Fonte: Silva *et al.* (2021).

Figura 17 – Causas de incidentes em barragens brasileiras de 2011 a 2018.



Fonte: Silva *et al.* (2021).

2.4.1 Rupturas no cenário internacional

As rupturas de barragens são ocorrências graves que podem causar impactos relevantes nas comunidades e no meio ambiente. Os acidentes acontecem ao longo dos anos tanto no cenário internacional quanto no nacional e, alguns exemplos significativos serão abordados a seguir, envolvendo os principais modos de ruptura de barragens de terra já mencionados anteriormente: galgamento, erosão interna (*piping*) e instabilização.

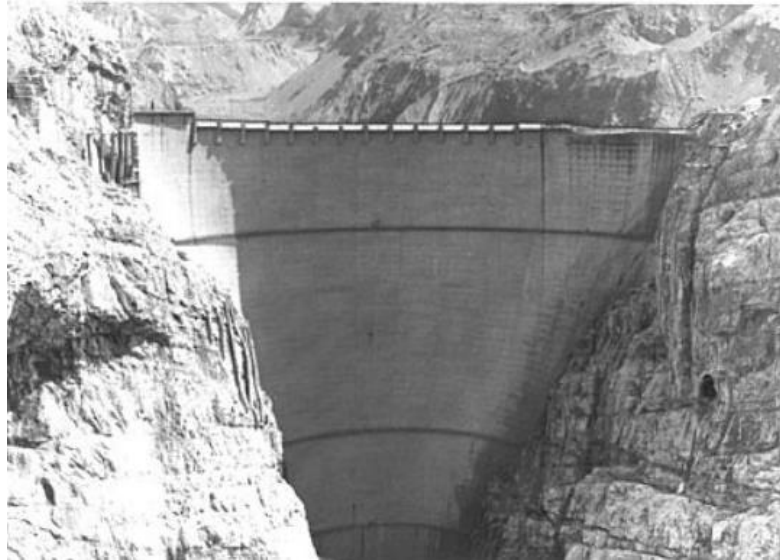
2.4.1.1 Barragem de Vajont

O acidente que ocorreu na barragem de Vajont é um exemplo de desastre causado pelo mecanismo de ruptura galgamento. A estrutura tinha 265 metros de altura e o acontecimento sofrido pela mesma é considerado um dos maiores da história, que ocorreu em 9 de outubro de 1963, mesmo não havendo ruptura completa. Aconteceu o deslizamento de extensas massas de terra em direção ao reservatório que resultou em uma onda que ultrapassou a barragem com uma altura de mais de 100 metros, resultando em uma trágica perda de aproximadamente 2.600 vidas humanas (JANSEN, 1983).

O autor ainda explica que enquanto o volume do reservatório tinha um total de 150 hm³, o material que deslizou da encosta, mais especificamente da localizada no lado esquerdo, tinha um volume de mais de 240 hm³. Esse material se movimentou de forma rápida em direção ao

reservatório e alcançou velocidades em torno de 30 m/s, o que sucedeu na formação de uma onda que ultrapassou a barragem com uma altura de mais de 100 metros acima da sua crista. A Figura 18 apresenta o estado da barragem de Vajont após sofrer galgamento.

Figura 18 – Barragem de Vajont após galgamento.



Fonte: Annovi (1975).

2.4.1.2 Barragem de Teton

O acidente que ocorreu na barragem de Teton exemplifica um desastre causado pelo fenômeno de erosão interna (*piping*), sendo esse caso um ponto de referência importante para estudos em outras barragens ao longo dos anos. Essa barragem era de terra, com 123 metros de altura e volume do reservatório de 356 hm³; localizada no rio Teton, no estado de Idaho, EUA; e de domínio do Bureau of Reclamation dos Estados Unidos. Sua ruptura aconteceu em 5 de junho de 1976, quando estava com seu reservatório quase completamente cheio, após passar pela fase de primeiro enchimento, que começou em 3 de outubro de 1975 e finalizou com a sua ruptura em 1976 (JANSEN, 1983).

O contratempo teve origem com o fluxo da água através da fundação que resultou na formação de surgências a jusante da estrutura. Conforme a percolação avançava e alcançava o maciço de terra, o fenômeno da erosão tubular regressiva (*piping*) era desencadeado. Esse processo resultou na geração de uma brecha de ruptura com 190 metros de largura e culminou na ruptura da estrutura, que entre a percepção do fenômeno e a ruptura teve uma duração de pouco mais de 2 horas. O reservatório esvaziou-se em cerca de 5 horas e a liberação de água

atingiu uma vazão máxima de aproximadamente 66.000 m³/s. Quanto as vidas perdidas, esse número foi de onze a quatorze (JANSEN, 1983). A Figura 19 mostra como estava o topo da barragem de Teton no início da tarde do ocorrido.

Figura 19 – Topo da barragem de Teton durante o rompimento.



Fonte: Jansen (1983).

2.4.2 Rupturas no cenário nacional

Uma fonte confiável sobre os casos recentes de ruptura de barragens no Brasil são os Relatórios de Segurança de Barragens elaborados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Em relação ao ano de elaboração desta pesquisa, o relatório disponibilizado pelo órgão governamental mais recente é o Relatório de Segurança de Barragens de 2021. Segundo ANA (2022), no ano de 2021 foram manifestados 13 acidentes e 37 incidentes em 16 estados brasileiros, principalmente na região central do país. A maior parte dessas ocorrências aconteceram devido as chuvas intensas que motivaram o transbordamento das barragens. Dentre os acidentes e incidentes citados no relatório, serão destacados o da Barragem do Pirocaua e do Córrego Berlim.

2.4.2.1 Barragem do Pirocaua

A Barragem do Pirocaua do tipo terra homogênea, de altura de 7 metros e volume de 0,16 hm³, rompeu por galgamento que foi desencadeado por uma chuva histórica na região de Godofredo Viana/MA. O empreendedor responsável pela barragem é a Mineração Aurizona

S.A. e com o rompimento toda a área da empresa e vias de acesso da localidade ficaram debaixo d'água. Não houve vítima fatal com o acidente e a barragem foi reconstruída em enrocamento. A Figura 20 apresenta a situação da barragem do Pirocaua após sofrer o galgamento.

Figura 20 – Barragem do Pirocaua após galgamento.



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2021).

2.4.2.2 Córrego Berlim

O incidente no Córrego Berlim, localizado no município Águia Branca/ES, do tipo terra homogênea, de 7 metros de altura e volume de 0,018 hm³, foi provocado pela junção de dois modos de ruptura: galgamento e *piping*. Como a região estava com incidência de grande volume de chuvas, o processo de galgamento foi gerado. Em união a isso, o talude de jusante apresentava desgaste em função de *piping* que ocorria sob a estrutura de saída d'água. Houve a necessidade de retirar os moradores que se encontravam a jusante e foram adotadas medidas corretivas, através do alargamento do canal vertedouro com a finalidade de reduzir o nível da barragem rapidamente.

2.4.3 Mecanismos de ruptura

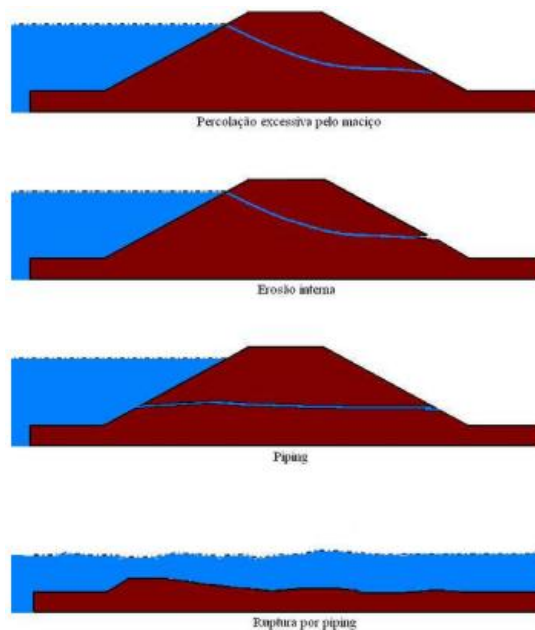
2.4.3.1 Erosão interna (*piping*)

O estudo da erosão interna é de suma importância no contexto da engenharia geotécnica, visto que está entre as principais causas responsáveis pela ruptura de barragens no mundo

(FIDELES e MALVEIRA, 2017). De acordo com Ferreira (2022), *piping* é um fenômeno ligado a uma erosão regressiva que é assim chamada por acontecer do sentido de jusante para montante da barragem, ou seja, na direção oposta ao fluxo de água. A autora explica que esse acontecimento avança de forma gradativa, pois quanto maior o desgaste, menor é a percolação da água e maior será o gradiente hidráulico.

A erosão do solo pode acontecer tanto no corpo quanto na fundação da barragem, uma vez que a água pode percolar ambas as partes da estrutura. Conforme ocorre a erosão interna, forma-se um canal no interior do solo da barragem que vai sendo desenvolvido na medida em que as partículas de solo são removidas pela ação da água. Com isso, vai acontecendo o transporte de material através do aterro e o canal de erosão vai aumentando enquanto a água carrega o solo. Portanto, a continuação desse processo pode levar ao colapso da estrutura, pois os materiais que a compõem perdem resistência e podem dar lugar a uma barragem formada por um único canal aberto (JÓNATAS, 2013). A evolução do fenômeno de *piping* é apresentada na sequência da Figura 21.

Figura 21 – Progresso de ruptura por *piping*.

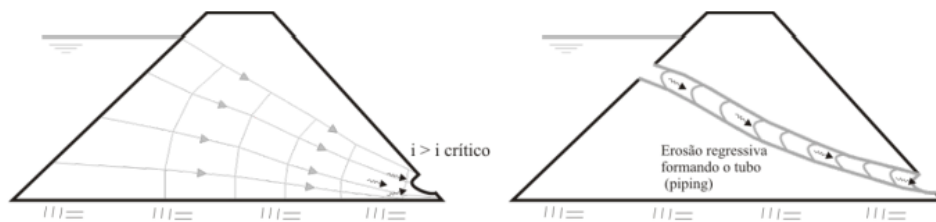


Fonte: Pereira (2009).

Dependendo do estado em que se encontra a barragem, juntamente com o solo e processos que afetam sua estrutura, a erosão por *piping* pode se manifestar de formas diferentes (isolada ou em conjunto). A Agência Federal de Gestão de Emergências (FEMA, 2015) destaca três mecanismos de erosão interna: erosão regressiva, fluxo concentrado e sufusão. A erosão

regressiva é o tipo descrito anteriormente, onde um canal erosivo forma-se e avança de jusante para montante, gerando um caminho de fluxo e carreamento de material. Esse mecanismo é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Iniciação de *piping* por erosão regressiva.

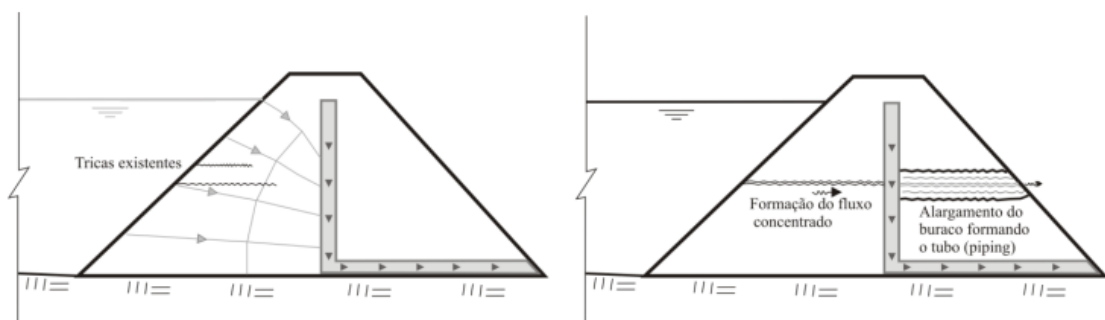


Fonte: Perini (2009).

No fluxo concentrado, a água se movimenta através de fissuras e outras falhas existentes na estrutura da barragem e, enquanto o fluido percola por entre as aberturas, elas desgastam e aumentam, comprometendo a resistência do barramento (Figura 23). Já no mecanismo de sufusão (Figura 24), acontece o carreamento de partículas finas do solo pela água, sendo essa parcela transportada através dos vazios das partículas de materiais mais grossos, deixando esses para trás e removendo os finos por meio da infiltração (FEMA, 2015).

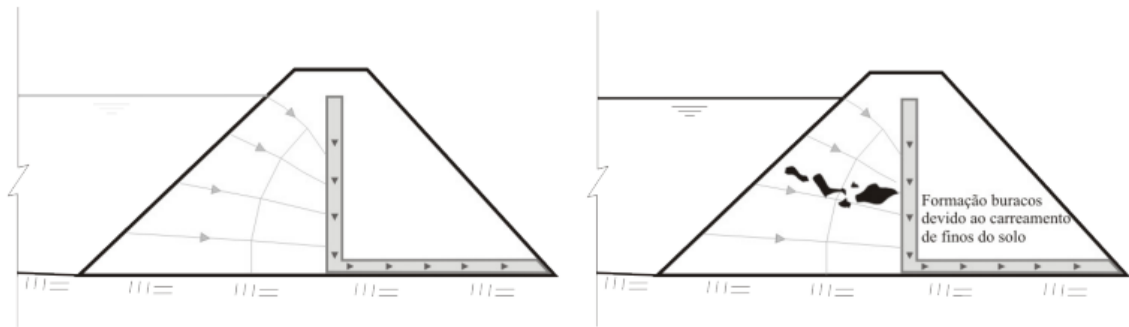
Independente do mecanismo que dá origem ao desenvolvimento do *piping*, percebe-se que o fenômeno da percolação é quem torna todos eles possível, o que prova a necessidade de se prever sistemas que evitem futuros problemas. Ferreira (2022) enfatiza a relevância da implementação de sistema de drenagem interna para prevenir instabilidade que podem comprometer o funcionamento da estrutura, como é o caso da erosão interna.

Figura 23 – Iniciação de *piping* por fluxo concentrado.



Fonte: Perini (2009).

Figura 24 – Iniciação de *piping* por sufusão.



Fonte: Perini (2009).

2.4.3.2 Galgamento

Galgamento, definido pelo termo em inglês de *overtopping*, acontece quando a água passa a elevação do topo da barragem e pode ser causado por ondas formadas na represa, enchentes ou mesmo como resultado de terremotos (JÓNATAS, 2013). Em caso de galgamento, as pressões hidrostáticas exercidas sobre a barragem podem levar a uma instabilidade estrutural e, por ventura, à ruptura. Portanto, é obrigatório controlar e direcionar para o vale a jusante o fluxo que entra no reservatório, através de estruturas de vertedouro dimensionadas de acordo com os tempos de retorno especificados pelas leis e normas em vigor (WILLIINGHOEFER, MULLER e SOUZA, 2023). A Figura 25 apresenta a barragem de aterro localizada no rio Missouri, EUA, que sofreu galgamento.

Figura 25 – Barragem de aterro galgada.

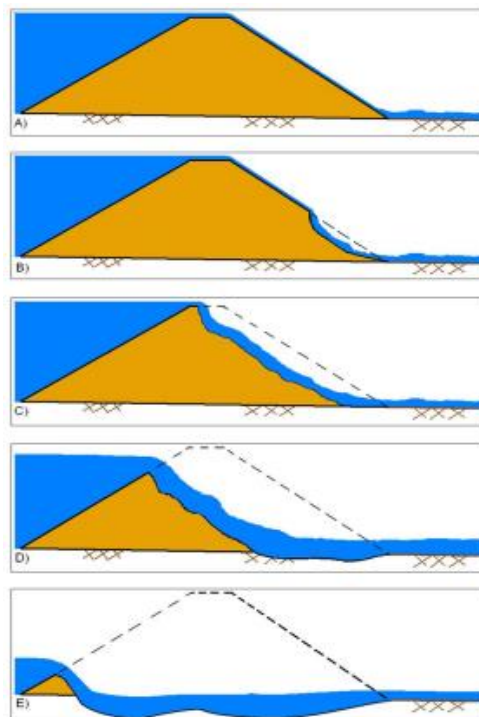


Fonte: Farmland (2011).

No caso das barragens de aterro que sofrem ruptura por galgamento, o fluxo sobre a estrutura sucede em escavação da parte superior da crista e o material que se encontra a montante se desgasta. Com isso, forma-se uma área vulnerável, na qual a barragem pode entrar em colapso e a escavação pode se aprofundar até atingir a base do aterro. Porém, é importante destacar que compactar inadequadamente qualquer parte do aterro pode criar um ponto fraco que se tornará a origem para o desenvolvimento da brecha. Inicialmente, a localização da área vulnerável é incerta, mas levando em consideração que o fluxo geralmente se concentra na parte central da barragem (ocasionando em maiores alturas de água durante o galgamento), é provável que a ruptura comece nessa região (JÓNATAS, 2013).

De acordo com o *United States Army Corps of Engineers* (USACE), quando uma barragem falha por galgamento, o processo de erosão se inicia no talude de jusante, Figura 26 (a). Conforme a água vai passando sobre a barragem, a erosão avança em direção ao lado montante da estrutura, Figura 26 (b) e atinge a crista, tornando sua largura cada vez menor, Figura 26 (c). Com o passar do tempo, a brecha progride provocando a ruptura da barragem, Figura 26 (d) e à medida que se desenvolve, mais o processo aumenta, Figura 26 (e) (USACE, 2014).

Figura 26 – Etapas da ruptura por galgamento.



Fonte: USACE (2014).

2.4.3.3 Instabilização

A instabilidade dos taludes, que pode ser agrupada em duas categorias (ruptura superficial e ruptura profunda), está relacionada com a ocorrência de deslizamentos e deslocamentos. No caso da ruptura superficial, essa pode ocorrer no talude de montante, onde nota-se um rebaixamento rápido acompanhado de deslizamentos superficiais; e talude de jusante, lugar em que os deslizamentos superficiais resultam em uma maior inclinação do talude e podem comprometer a resistência do maciço. A ruptura profunda, por sua vez, simboliza uma grave ameaça à integridade da barragem e é marcada por características como um talude de deslizamento íngreme, um movimento rotacional e horizontal bem definido ou por presença de fissuras em formato de arco (ANA, 2016b).

A ocorrência desses eventos está sujeita a uma série de fatores que podem ser classificados como predisponentes e relacionados a causas externas ou internas ao maciço. Aspectos como a geometria do talude, influências climáticas, atividades humanas e o nível da água desempenham um papel crucial na determinação da estabilidade de um determinado talude. Em determinadas circunstâncias, a presença da água exerce um papel decisivo nos processos de instabilização, pois pode levar à saturação do maciço, ao aumento das poropressões, à eliminação das tensões capilares, à degradação da cimentação e à geração de forças de percolação na direção do fluxo (REIS, 2010). A Figura 27 mostra um talude que rompeu em função da saturação.

Figura 27 – Rompimento de talude decorrente de saturação.



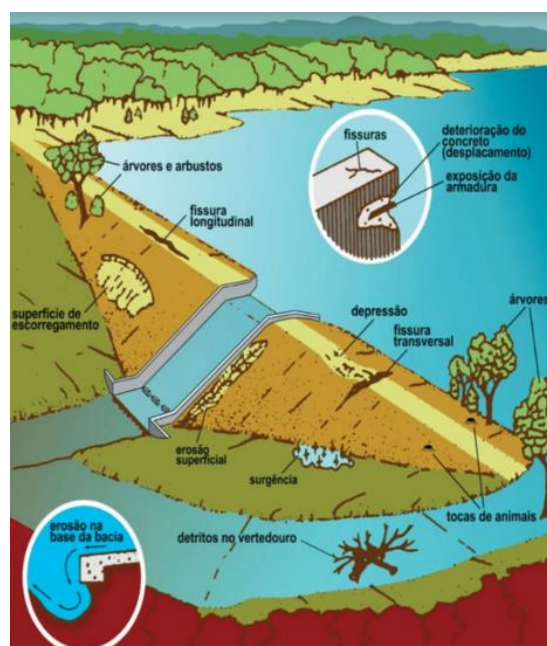
Fonte: Oliveira (2008).

2.5 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM BARRAGENS DE ATERRO

As manifestações patológicas são chamadas na área de Segurança de Barragens de anomalias, que se referem a situações ou condições anômalas, incomuns ou irregulares que podem indicar eventuais problemas de segurança em uma barragem. De acordo com o Volume II do Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2016b), essas anomalias podem ser detectadas durante as inspeções de segurança, que têm como objetivo realizar avaliações das condições físicas de seus componentes, com o propósito de identificar e acompanhar quaisquer anomalias que possam ter um potencial impacto na segurança da estrutura. Essas inspeções permitem verificar com antecedência ou urgência a necessidade de reabilitar barragens que estejam em situação de perigo ou suscetíveis a rupturas iminentes. Isso possibilita tomar medidas a tempo para diminuir danos e reduzir os impactos significativos nas vidas humanas, na economia e no meio ambiente das áreas afetadas.

Sola e Ferreira (2022) citam em sua pesquisa as principais manifestações patológicas nas barragens de aterro: fissuras (longitudinais e transversais), surgências, instabilidade de taludes, erosão interna, depressões, crescimento de árvores e arbustos e tocas de animais (Figura 28). Dentre essas, serão conceituadas as fissuras, surgências e depressões, uma vez que a erosão interna e instabilidade de taludes foram abordadas anteriormente.

Figura 28 – Anomalias nas barragens de aterro.



Fonte: ANA (2016b).

Uma fissura em uma barragem é uma abertura, trinca ou rachadura que se desenvolve na estrutura, seja na sua superfície ou internamente. Em relação a dimensão, as fissuras podem ser classificadas de acordo com o Quadro 3.

Quadro 3 – Classificação das fissuras nas barragens de aterro.

Abertura (mm)	Designação
$e \leq 0,50$	Fissura
$0,50 < e \leq 1,50$	Trinca
$1,50 < e \leq 5,00$	Rachadura
$5,00 < e \leq 10,00$	Fenda
$e > 10,00$	Brecha

Fonte: ANA (2016b).

As fissuras podem ser categorizadas com base em sua localização, incluindo fissuras interiores e exteriores, e em relação à sua orientação, como fissuras longitudinais e transversais. Embora muitas das fissuras sejam visíveis na superfície da barragem, também é importante considerar a presença de fissuras internas no interior do maciço, resultantes de variações nas tensões do solo, que podem ser identificadas, por exemplo, por meio de sondagens e amostragens. As fissuras longitudinais seguem o alinhamento linear da barragem, enquanto as fissuras transversais se estendem em direções que cortam o aterro horizontal ou verticalmente (ANA, 2016b).

A surgência, por sua vez, refere-se à presença de água que penetra na face do talude de jusante da barragem, nas ombreiras, na área imediatamente a jusante do pé da barragem e nas proximidades do pé de jusante. Já as depressões em uma barragem são deformações que podem aparecer em áreas específicas ou em uma extensa região da estrutura. Geralmente surgem devido a recalques no maciço da barragem ou em sua fundação. Esses recalques podem reduzir a altura da borda livre da barragem, aumentando o risco de transbordamento durante períodos de cheias (ANA, 2016b).

2.6 PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE ATERRO

2.6.1 Análise de fluxo

Analisar o fluxo da água em barragens é de grande relevância para entender como esse componente do solo interfere no comportamento desse tipo de obra, uma vez que isso está ligado a segurança da estrutura. Andreetta e Campioni (2021) citam que no campo da segurança estrutural das barragens está a aferição da estabilidade de seus taludes e, que para realizar os cálculos de estabilidade dessas inclinações e conhecer as solicitações que atuam nas barragens, é fundamental a determinação da percolação. Cruz (2004) explica que controlar a atuação da água em projetos de barragens, tanto no maciço quanto na fundação e ombreiras é uma das condições principais à segurança dessas obras.

Nesse sentido, as análises de percolação têm o objetivo de conhecer previamente o comportamento da água, no que diz respeito a distribuição de pressões e valor das vazões não só no corpo da barragem, como também nas fundações e demais locais que for necessário. Com isso, é possível obter informações que contribuirão com as análises de estabilidade e com a escolha e dimensionamento adequados dos instrumentos de drenagem interna e dos sistemas de impermeabilização e drenagem das fundações (ELETROBRÁS, 2003).

2.6.1.1 A permeabilidade do solo

De acordo com a NBR 6502/1995 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o solo é definido como sendo um material oriundo das rochas, que se forma através do processo da decomposição feita por agentes físicos ou químicos. Na composição do solo pode ou não conter a presença de matéria orgânica (ABNT NBR 6502, 1995). Ele é formado por um conjunto de partículas, sendo que cada uma dessas se compõe de três fases: sólida, líquida e gasosa. A fase sólida é compreendida pelas partículas minerais, a líquida é normalmente a água e a gasosa é o ar que está presente nos espaços intermediários (LAMBE e WHITMAN, 1969).

A água livre circula pelo solo ou maciço rochoso através dos seus espaços vazios e, esse movimento é chamado de percolação (ABNT NBR 6502, 1995). Essa movimentação faz com que a força da água interfira no estado de tensões do solo, o que torna o seu conhecimento e controle fundamental, a fim de evitar possíveis problemas. Maia, Oliveira e Filgueiras (2022) citam que os caminhos prioritários de percolação devem ser evitados, uma vez que são eles que contribuem para o carreamento de materiais, podendo causar o processo de erosão interna regressiva (*piping*).

A facilidade ou não que o meio poroso oferece à percolação é chamada de permeabilidade. Quando um solo possui a permeabilidade baixa significa que esse apresenta

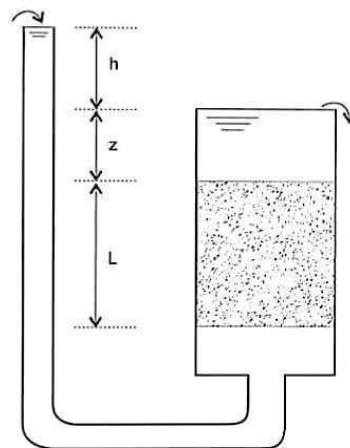
enorme dificuldade à movimentação do fluido, em oposição, um solo com alta permeabilidade possibilita que o fluido o atravessasse facilmente (CRUZ, 2004). O autor explica que embora o termo “condutividade hidráulica” tenha sido usado para conceituar o fenômeno da permeabilidade, existe uma diferença entre a definição de ambos, pois enquanto a permeabilidade acontece num meio poroso, a condutividade acontece num meio confinado.

Via de regra, areias e pedregulhos possuem elevada permeabilidade e solos argilosos têm baixa permeabilidade (GERSCOVICH, 2016). A quantificação da permeabilidade é feita através do coeficiente de permeabilidade, o qual é definido pela ABNT NBR 6502 (1995) como sendo a constante baseada na lei experimental de Darcy que expressa a velocidade com que a água escoar por entre o solo, levando em consideração um gradiente hidráulico unitário.

2.6.1.2 Lei de Darcy

Em 1850, através de experimento com permeâmetro, dispositivo de ensaio similar ao representado na Figura 29, Darcy investigou como a vazão da água era influenciada pelos aspectos geométricos do dispositivo de ensaio (PINTO, 2006). Assim, em 1856 propôs a equação que solucionava a velocidade de percolação e que tinha validade para fluxo laminar (DAS, 2007). Segundo Oliveira (2014), nesse tipo de regime de escoamento as partículas de água se movimentam de tal forma que umas não encontram as trajetórias das outras, ou seja, possuem caminhos retilíneos e paralelos entre si.

Figura 29 – Exemplo de permeâmetro.



Fonte: Pinto (2006).

Dessa maneira, Darcy verificou após realizar diversos ensaios empíricos com a utilização do permeâmetro, que o fluxo de água é proporcional à perda de carga de modo direto e inversamente proporcional ao comprimento da amostra (UNAS, 2010). Essa relação é representada pela Equação 1.

$$Q = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A \quad (1)$$

Onde:

Q = vazão;

k = coeficiente de permeabilidade característico de cada solo;

h = carga dissipada na percolação;

L = distância através da qual a carga é dissipada;

A = área do permeâmetro.

A relação carga dissipada por distância em que essa carga é dissipada é nomeada de gradiente hidráulico, assim, a Equação 1 passa a ter a configuração da Equação 2. Já a vazão dividida pela área mostra a velocidade com que a água está sendo percolada, então a Equação 2 passa a ter o formato da Equação 3. Sendo assim, o coeficiente de permeabilidade representa a velocidade de percolação da água quando o gradiente hidráulico é igual a 1 (PINTO, 2006).

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2)$$

Onde:

Q = vazão;

k = coeficiente de permeabilidade característico de cada solo;

i = gradiente hidráulico;

A = área do permeâmetro.

$$v = k \cdot i \quad (3)$$

Onde:

v = velocidade de percolação da água;

k = coeficiente de permeabilidade característico de cada solo;

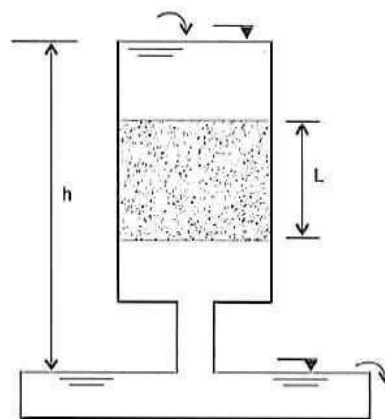
i = gradiente hidráulico.

2.6.1.3 Determinação da permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade dos solos pode ser obtido através de ensaios em laboratório ou *in situ*. Para os materiais das obras de aterro, o uso dos ensaios laboratoriais é mais significativo, já os ensaios *in situ* são mais adequados tanto nos casos em que o procedimento de coleta de amostras seja difícil quanto nas situações em que esse processo altere a disposição das partículas sólidas de maciços estratificados (UNAS, 2010). Os ensaios padrões usados em laboratório são os com permeâmetro de carga constante ou de carga variável, já *in situ*, o coeficiente de permeabilidade pode ser calculado a partir de uma sondagem de simples reconhecimento do solo (PINTO, 2006).

O ensaio de permeabilidade em laboratório com carga constante é realizado com um permeâmetro que apresenta a aparência do representado na Figura 30. Nesse ensaio, como o próprio nome sugere, a perda de carga hidráulica é constante em razão do ajuste na alimentação de água na entrada do conjunto. A água percolada é então recolhida para um frasco graduado e é anotado quanto tempo demorou para coletar essa água. Assim, o coeficiente de permeabilidade é calculado através da própria Lei de Darcy já desenvolvida anteriormente (DAS, 2007).

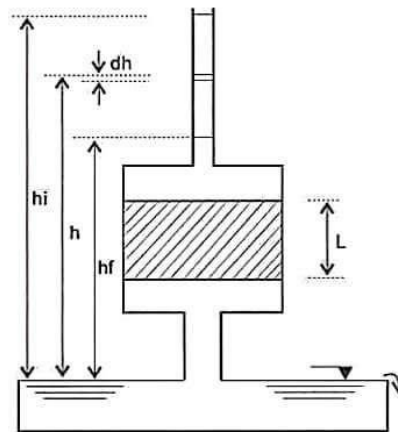
Figura 30 – Exemplo de permeâmetro de carga constante.



Fonte: Pinto (2006).

O ensaio com carga variável é utilizado quando o coeficiente de permeabilidade possui baixos valores e é usado um permeâmetro como o esquematizado na Figura 31. Inicialmente é anotada a diferença de carga inicial h_i no tempo $t = 0$ e em seguida é deixado que a água escoe pelo interior da amostra a fim de que a diferença de carga final no tempo $t = t_2$ é h_f . Desse modo, o coeficiente de permeabilidade é calculado através da Equação 4 (DAS, 2007).

Figura 31 – Exemplo de permeâmetro de carga variável.



Fonte: Pinto (2006).

$$k = 2,3 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \log \frac{h_i}{h_f} \quad (4)$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade característico de cada solo;

a = área da seção da bureta;

L = distância através da qual a carga é dissipada;

A = área do permeâmetro;

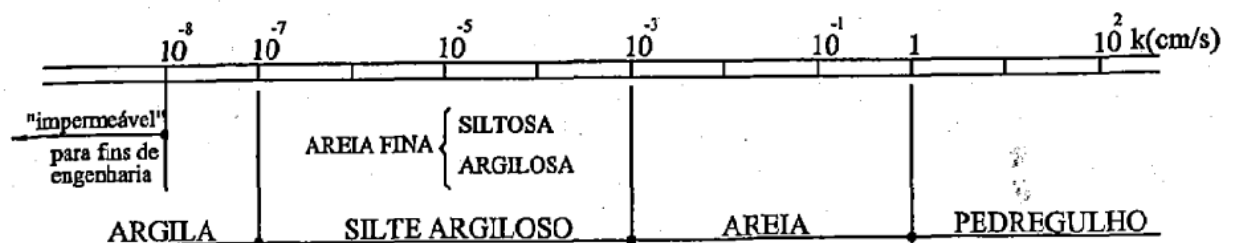
t = instante qualquer;

h_i = carga inicial;

h_f = carga final.

A Figura 32 apresenta uma escala de variação média do valor do coeficiente de permeabilidade dos solos.

Figura 32 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função do tipo de solo.



Fonte: Alonso (1999).

2.6.1.4 Equação de Bernoulli

O movimento da água acontece quando existe uma diferença de potencial hidráulico, assim, ela se desloca do local de maior para o de menor carga hidráulica (RIJO, 2017). Dessa maneira, a carga hidráulica é estabelecida pelo Teorema de Bernoulli como sendo a soma das cargas piezométrica, cinética e altimétrica, como representada pela Equação 5 (DAS, 2007).

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z \quad (5)$$

Onde:

h = carga hidráulica total;

u = pressão na água;

γ_w = peso específico da água;

v = velocidade do escoamento no ponto considerado;

g = aceleração da gravidade;

Z = cota geométrica do ponto considerado.

Levando em consideração que a velocidade do fluxo de água é baixa no meio de solo poroso, a parcela da velocidade ao quadrado dividida por duas vezes a aceleração da gravidade (carga cinética) pode ser desconsiderada. Portanto, a Equação 5 passa a ser representada pela Equação 6 (DAS, 2007).

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + Z \quad (6)$$

2.6.2 Fluxo bidimensional

O fluxo de água é chamado de bidimensional quando ele acontece em trajetórias curvas, mas que são paralelas entre si. Um exemplo desse tipo de fluxo é o que ocorre nas fundações das barragens e, os caminhos da água são representados através das chamadas redes de fluxo. A Equação 7 proposta por Laplace, representa a equação básica do fluxo bidimensional (PINTO, 2006).

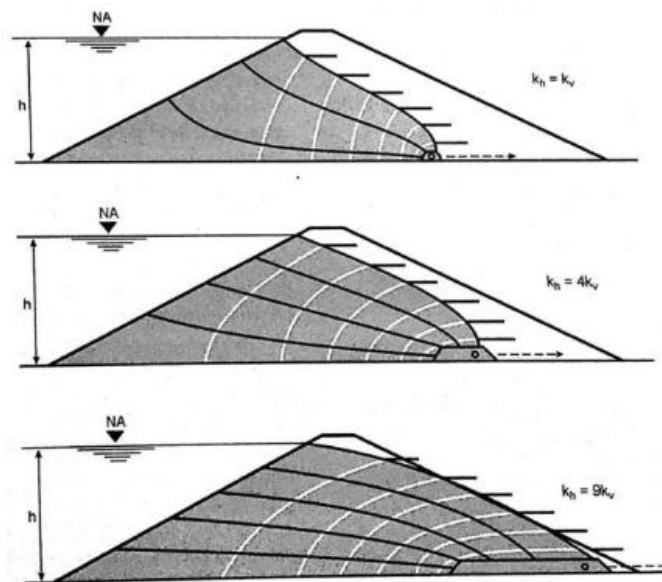
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

Essa equação considera o solo como sendo um meio isotrópico quanto à permeabilidade, ou seja, o valor do coeficiente de permeabilidade é igual tanto na direção x quanto na direção z. O componente da equação $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$ indica o quanto o gradiente hidráulico varia na direção x, da mesma forma que a parte $\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}$ indica a variação na direção z (PINTO, 2006).

2.6.2.1 Anisotropia

Embora visto anteriormente o caso em que o valor do coeficiente de permeabilidade é constante nas direções consideradas, nem sempre isso acontece, ou seja, há situações em que o solo se comporta como um meio anisotrópico. Segundo Pinto (2006), na direção horizontal o valor da permeabilidade tem a tendência de ser maior que na direção vertical. A Figura 33 mostra a diferença de comportamento das redes de fluxo em um meio isotrópico e anisotrópico.

Figura 33 – Comportamento da rede de fluxo em meio isotrópico e anisotrópico.



Fonte: Massad (2010).

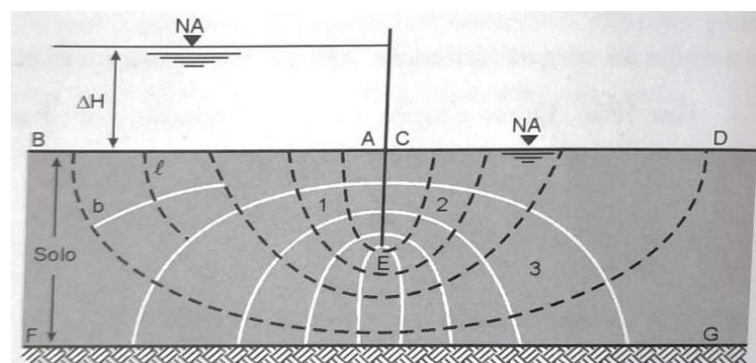
Conforme é possível observar nas figuras, quanto maior o coeficiente de permeabilidade na direção horizontal mais a rede de fluxo se aproxima do lado jusante da barragem. Esse comportamento da água influencia na segurança do barramento e aumenta as chances de ocorrer problemas como *piping* e liquefação.

2.6.2.2 Condições de contorno

A equação de Laplace é complexa e são usadas condições de contorno que facilitam a sua resolução. Gerscovich (2011) explica que essas fronteiras tem relação com a geometria do problema e que são importantes para se definir as redes de fluxo, podendo ser classificadas em problemas de fluxo confinado e problemas de fluxo não-confinado.

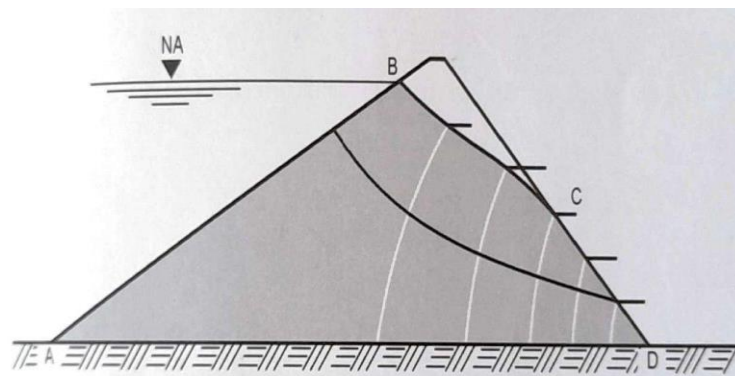
No caso do fluxo confinado, as fronteiras do problema são conhecidas, ou seja, estão bem definidas, como representa a Figura 34, onde o fluxo de água acontece na região ABCDEFG. Já no fluxo não-confinado, que é representado pela Figura 35, as fronteiras não estão bem definidas e é necessário pré-determinar uma parte delas para que seja possível solucionar o problema, assim, a linha BCD que inicialmente não é conhecida, deve ser traçada para que seja possível continuar com a resolução (GERSCOVICH, 2011).

Figura 34 – Fluxo confinado.



Fonte: Massad (2010).

Figura 35 – Fluxo não-confinado.

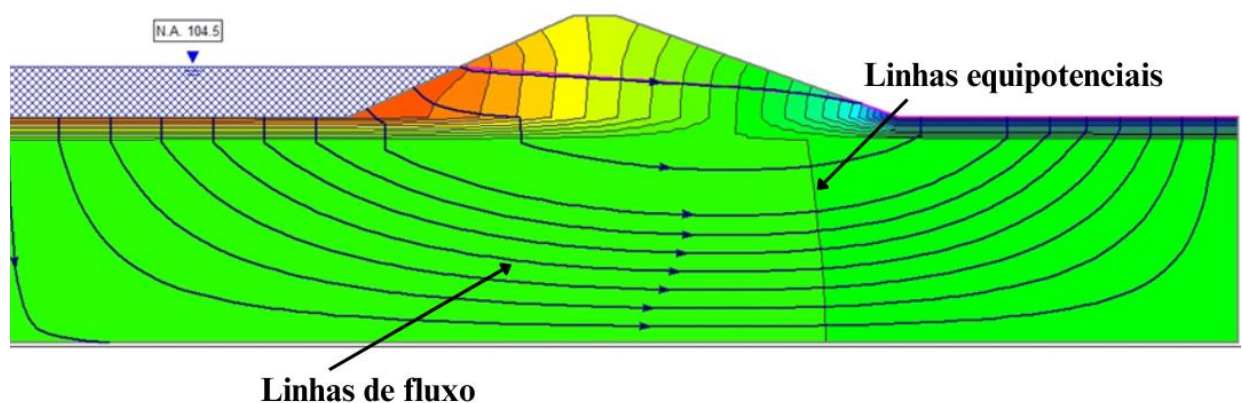


Fonte: Massad (2010).

2.6.3 Redes de fluxo

A representação do caminho percorrido pela água e a carga que é dissipada nesse processo é feita através das chamadas redes de fluxo. Stancati (1984) explica que uma rede de fluxo é o conjunto formado por dois tipos de linhas: as linhas de fluxo e as linhas equipotenciais. Gerscovich (2011) cita que essas linhas são caracterizadas por serem perpendiculares entre si e por formarem figuras que podem ser retangulares ou quadradas retilíneas ou curvilíneas, conforme representa a Figura 36.

Figura 36 – Exemplo de rede de fluxo.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

As linhas equipotenciais representam o conjunto de pontos onde o valor da carga hidráulica é igual, já as linhas de fluxo são a representação dos caminhos por onde a água se movimenta ao longo da seção transversal (OLIVEIRA, 2008). Lambe e Whitman (1969) citam que através das redes de fluxo é possível obter propriedades importantes para a engenharia de solos, como o gradiente hidráulico, a vazão e a disposição das subpressões.

2.6.3.1 Gradiente hidráulico crítico

O gradiente hidráulico é uma medida que representa a dissipação da carga total por unidade de comprimento. Ele é o de gradiente que leva ao estado de areia movediça, onde as forças de percolação resultam em tensões efetivas nulas. Esse estado pode ocorrer quando há um fluxo ascendente, como é o caso da saída de água no pé do talude de jusante de barragens de terra construídas sobre fundações de solos arenosos (PINTO, 2006). O gradiente hidráulico crítico é calculado através da Equação 8.

$$i_{crit} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} \quad (8)$$

Onde:

i_{crit} = gradiente hidráulico crítico;

γ_{sub} = peso específico submerso (kN/m³);

γ_w = peso específico da água (kN/m³).

De acordo com Massad (2010), é importante notar que gradientes hidráulicos na faixa de 0,5 a 0,8 já são considerados críticos, especialmente nas áreas próximas ao pé do talude de jusante, onde a água escoar. Além disso, esses gradientes elevados estão muitas vezes relacionados com a perda de resistência em pontos específicos, aumentando o risco de início de processos erosivos, como o *piping*. Esse tipo de erosão pode progredir regressivamente até atingir o talude de montante e eventualmente resultar na ruptura da barragem. Portanto, é fundamental conhecer o valor do gradiente hidráulico no ponto de saída do fluxo, uma vez que essa localização pode ser crítica. Se o gradiente estiver acima do valor crítico calculado, medidas de controle de fluxo devem ser implementadas.

2.6.3.2 Método dos Elementos Finitos

Devido a complexibilidade das barragens, em que a maioria é composta por diferentes materiais que possuem características distintas, a construção gráfica das redes de fluxo se torna um processo difícil. Dessa forma, devido a evolução dos *softwares* disponíveis no mercado que permitem a resolução de equações complexas, cada vez mais usa-se das análises numéricas, principalmente através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Oliveira (2008) cita que tratando de percolação de água através da fundação das barragens, o MEF é o mais usado.

Ainda segundo Oliveira (2008), esse método soluciona a equação de Laplace ao transformá-la em um conjunto de equações integrais, assim, é solucionada através da discretização do domínio dos elementos. A análise da percolação é feita em três passos:

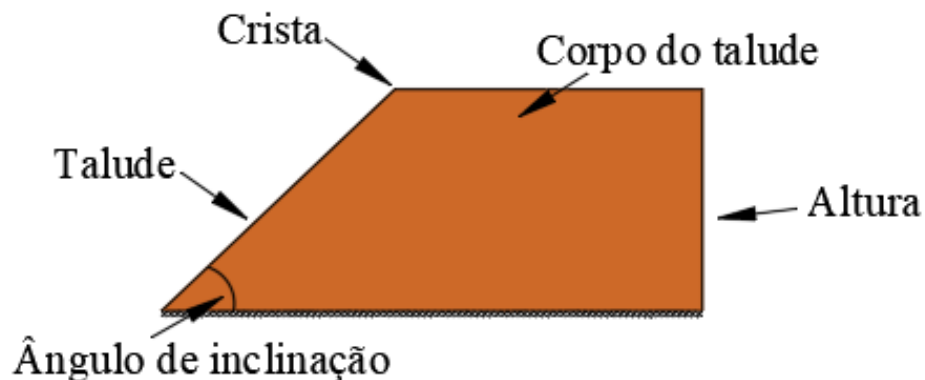
- primeiro o problema é modelado, isso envolve a definição da malha de elementos finitos, a determinação das características dos materiais e as condições de contorno;
- segundo o modelo é processado, por meio da resolução das equações envolvidas nos elementos finitos;
- terceiro é obtido e interpretado os resultados de cargas hidráulicas, vazões, gradientes e pressões.

2.7 ESTABILIDADE EM BARRAGENS DE ATERRO

2.7.1 Análise de estabilidade

Segundo Das (2013), um talude é uma face de solo que em relação ao plano horizontal forma um ângulo. Já para Caputo (1987) e Carmignani e Fiori (2009), os taludes são superfícies com a característica inclinada que limitam os maciços, sejam eles de terra, de rocha ou de terra e rocha e, podem se apresentar de duas formas: naturais (encostas) ou artificiais (taludes de cortes e aterros). Oliveira e Brito (1998) complementam essa definição explicando que tanto processos geológicos quanto geomorfológicos podem dar origem a esses elementos e que eles estão sujeitos a sofrerem alterações resultantes da intervenção humana, como cortes, desmatamentos, introdução de cargas, etc. A Figura 37 representa um talude juntamente com sua terminologia.

Figura 37 – Terminologia de taludes.



Fonte: Adaptado de Carmignani e Fiori (2009).

A estabilidade dessas estruturas está ligada tanto às características dos materiais que os compõem quanto a fatores diversos, que podem estar associados a geologia, hidrologia e geotecnia (CAPUTO, 1987). Assim, Carmignani e Fiori (2009) destacam que as forças que as massas de solos (taludes) estão submetidas podem ser agrupadas em três níveis: forças devidas ao peso dos materiais, ao escoamento da água e a resistência ao cisalhamento. Para que a estrutura esteja estável, deve haver um equilíbrio entre essas forças, sendo que as forças devido ao peso dos materiais somam-se com as do escoamento da água tendendo a movimentar o solo do talude para baixo. A força de cisalhamento por sua vez, tende a frear a massa de solo. Diante desse cenário, Vilhete (2017) afirma que é essencial a aferição da estabilidade de taludes nas

grandes obras de engenharia em que esses elementos estão presentes, como barragens, estradas, canais, fundações, túneis e outros.

Nesse sentido, analisar a estabilidade dos taludes é muito importante para entender como esses elementos se comportam sob os fatores que estão sujeitos e que podem levar a sua ruptura. De acordo com Gerscovich (2016), o objetivo dessa análise é justamente aferir a possibilidade de acontecer desprendimento de massa de solo, através da comparação das tensões cisalhantes mobilizadas com as imobilizadoras.

Assim, a ruptura de um talude acontece quando se forma uma área de cisalhamento com característica contínua na massa de solo. Ao redor dessa superfície, uma faixa de solo perde suas propriedades no decorrer do processo de ruptura, resultando em uma região de instabilidade chamada de zona cisalhada. Em suma, primeiro se forma a zona cisalhada e essa desaba pela superfície de cisalhamento (GERSCOVICH, 2016).

2.7.1.1 Fator de segurança

O Fator de Segurança (FS) ou Coeficiente de Segurança (CS) representa a estabilidade de um talude quando se faz o uso dos métodos analíticos utilizando o equilíbrio limite (OLIVEIRA e BRITO, 1998). De acordo com Das (2013), o profissional que fica responsável por analisar a estabilidade de um talude tem por responsabilidade a determinação do fator de segurança, que é definido pela Equação 9.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (9)$$

Onde:

F_s = fator de segurança da resistência;

τ_f = resistência média do solo ao cisalhamento;

τ_d = tensão de cisalhamento média na superfície potencial de ruptura.

O Quadro 4 apresenta a relação do resultado do FS com a condição de estabilidade que o talude se encontra, conforme Carvalho (1991).

Quadro 4 – Condição de estabilidade do talude de acordo com o FS.

Fator de Segurança (FS)	Condição do talude
FS < 1,0	Talude instável
FS = 1,0	Condição limite de estabilidade em relação a ruptura
FS > 1,0 (pouco maior)	Talude estável: quanto mais próximo de 1,0, maiores são as chances de o talude sofrer ruptura
FS >> 1,0 (muito maior)	Condição estável: quanto mais longe de 1,0, menores são as chances de o talude sofrer ruptura

Fonte: Adaptado de Carvalho (1991).

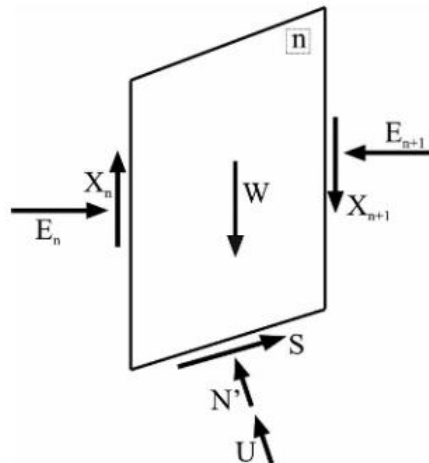
2.7.1.2 Métodos de equilíbrio limite

Os métodos de equilíbrio-limite são assim denominados por se fundamentarem na condição de haver equilíbrio em uma massa de solo que está submetida a duas condições: é considerada como um corpo rígido-plástico e está próxima de entrar em processo de ruptura (MASSAD, 2010). Além disso, o autor complementa que as possibilidades que os derivam são:

- o solo tem comportamento de material rígido-plástico, ou seja, seu processo de ruptura é rápido, de modo que não acontece deformação antes;
- as equações de equilíbrio estático só se aplicam nas proximidades da ruptura, visto que esse processo é dinâmico;
- o fator de segurança permanece constante ao longo da linha de ruptura, de modo que são desprezados os fenômenos de ruptura gradual que eventualmente acontecer.

Conforme cita Vilhete (2017), a massa de solo pode ter a superfície de ruptura circular, poligonal ou composta. Para o caso da superfície composta, o método do equilíbrio limite utiliza-se do método das fatias, onde a superfície é dividida em diversas partes e em cada uma delas atuam as forças representadas na Figura 38.

Figura 38 – Método das fatias com forças atuando em uma fatia genérica.



Fonte: Vilhete (2017).

Onde:

W = peso da lamela;

U = poropressão na base da lamela;

E = forças laterais, que podem ser horizontais ou inclinadas;

X = forças verticais no contato das fatias;

N = força normal à base da lamela;

S = força de cisalhamento na base da lamela.

Existem diversos métodos baseados no equilíbrio-limite e Reis (2010) cita que é possível dividir esses métodos em dois grupos principais. Essa divisão é baseada na conformidade das premissas adotadas com os requisitos de equilíbrio global e também se aplicam a cada seção individualmente (Quadro 5). São definidas da seguinte forma:

- Métodos não rigorosos: aqueles que não atendem completamente às premissas do equilíbrio estático global ou das seções individuais;
- Métodos rigorosos: aqueles que satisfazem plenamente essas condições de equilíbrio e, portanto, teoricamente proporcionam resultados mais confiáveis.

Quadro 5 – Métodos usuais de análise da estabilidade de taludes.

Método de análise	Equilíbrio de forças		Equilíbrio de momentos	Referências
	Direção 1	Direção 2*		
Fellenius	Sim	Não	Sim	Fellenius (1936)
Bishop Simplificado	Sim	Não	Sim	Bishop (1955)
Janbu Simplificado	Sim	Sim	Não	Janbu (1954, 1973)
Janbu Generalizado**	Sim	Sim	Sim	Janbu (1973)
Spencer	Sim	Sim	Sim	Spencer (1967, 1973)
Morgenstern-Price	Sim	Sim	Sim	Morgenstern e Price (1965)
GLE***	Sim	Sim	Sim	Fredlund e Krahn (1977) Fredlund et al (1981)
Sarma	Sim	Sim	Sim	Sarma (1973, 1979)
* Qualquer uma de duas direções ortogonais (por ex.: vertical e horizontal) pode ser utilizada no somatório das forças ** Equilíbrio de momentos utilizado no cálculo das forças cisalhantes entre fatias *** Método Geral de Equilíbrio Limite				

Fonte: Reis (2010).

Conforme Massad (2010), um dos métodos mais rigorosos e seguros é o de Morgenstern-Price. Reis (2010) explica que o método de Morgenstern-Price aborda uma superfície de ruptura arbitrária, determinando a direção da resultante das forças entre as lamelas por meio da aplicação de uma função escolhida. O parâmetro ' λ ' desse método é um componente crucial da função, cuja seleção é realizada com o objetivo de garantir o equilíbrio tanto das forças quanto dos momentos, considerando que as lamelas possuem espessura finita.

2.7.2 Condições de carregamento

Segundo ANA (2016a), os taludes de uma barragem devem ter sua estabilidade ao escorregamento verificada para diferentes condições de carregamento. As três condições principais são citadas e caracterizadas por Meirelles (2013), que são:

- final da construção: o processo construtivo de uma barragem faz com que ao a tensão total vai aumentando, como resultado da compressão do material e da consequente permeabilidade baixa do mesmo;

- reservatório máximo em operação: quando o reservatório é enchido pela primeira vez, o fenômeno da percolação da água acontece do sentido de montante para jusante, fazendo com que o talude de montante apresenta uma estabilidade mais favorável se comparada com a do talude de jusante;
- rebaixamento rápido: quando acontece uma situação de rebaixamento rápido do reservatório, o talude de montante se encontra em uma situação crítica.

A Tabela 3 mostra os fatores de segurança mínimos exigíveis para cada uma das fases descritas.

Tabela 3 - Fatores de segurança mínimos para as condições de carregamento.

Condição de solicitação	Talude	FS
Final de construção	Montante	1,3
	Jusante	1,3
Rebaixamento do reservatório	Montante	1,1
Regime permanente de operação	Montante	1,5
	Jusante	1,5

Fonte: Adaptado de Carvalho e Paschoalin Filho (2004).

2.8 CONTROLE DA PERCOLAÇÃO

O controle da percolação em barragens de terra é um conjunto de medidas e técnicas destinadas a gerenciar e limitar a passagem de água através do corpo da barragem, especialmente em barragens de terra. A percolação ocorre quando a água infiltra no solo ou material do aterro e se move através dos poros e vazios, potencialmente comprometendo a estabilidade da estrutura. O objetivo do controle de percolação é prevenir a saturação do solo, a erosão e a perda de resistência do material.

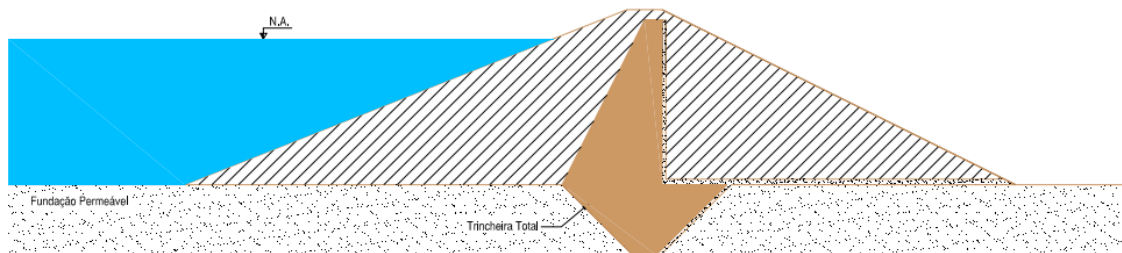
Controlar a percolação da água através da fundação de barragens é importante para reduzir a quantidade de água que está se movimentando, diminuir ou controlar os gradientes hidráulicos de saída e conter as subpressões (OLIVEIRA, 2008). Os sistemas de drenagem e vedação são usados para controlar os efeitos da percolação, enquanto o sistema de drenagem lida com o controle do fluxo de água dentro e ao redor da barragem para evitar a saturação, o sistema de vedação se concentra em impedir a percolação excessiva de água através da estrutura. Ambos são importantes para garantir a segurança e estabilidade de uma barragem. Os

dispositivos de vedação abordados serão a trincheira de vedação, a parede diafragma, cortina de injeção e tapete impermeável à montante. Já os dispositivos de drenagem destacados serão filtro vertical e filtro horizontal.

2.8.1 Trincheira de vedação

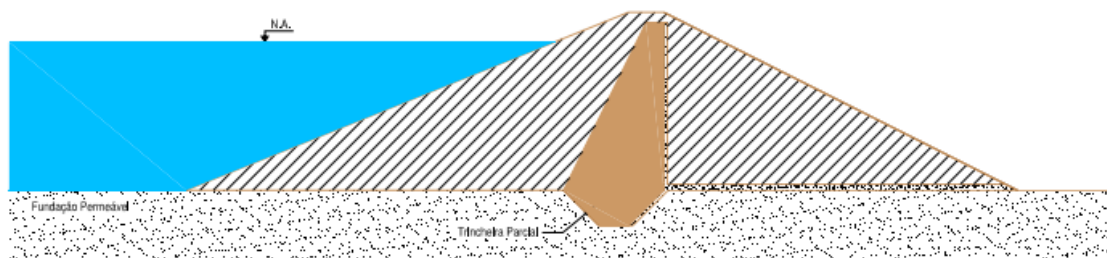
A trincheira de vedação, também chamada de *cut off*, corresponde a uma escavação que é feita na fundação e que é completada com material que possui baixa permeabilidade. Pode se apresentar de duas formas, trincheira de vedação total, como mostra a Figura 39, ou parcial, representada pela Figura 40.

Figura 39 – Trincheira de vedação total.



Fonte: Oliveira (2008).

Figura 40 – Trincheira de vedação parcial.

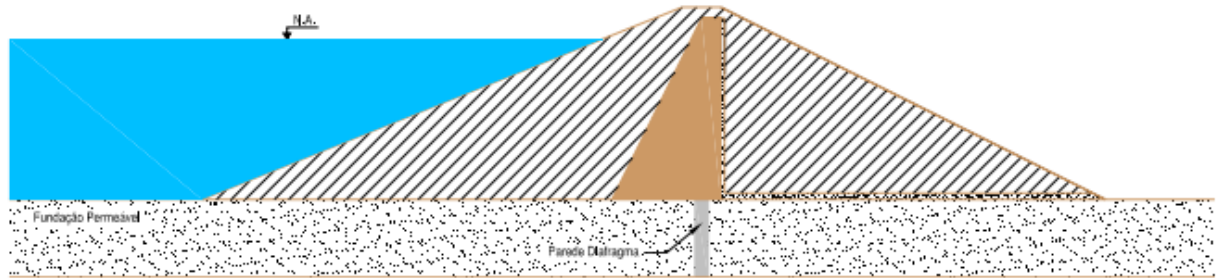


Fonte: Oliveira (2008).

2.8.2 Parede diafragma

Como o próprio nome sugere, a parede diafragma é uma parede que é construída na região que fica abaixo do núcleo das barragens. Pode ser uma parede rígida, como no caso em que é produzida de concreto, ou pode ser plástica, quando é feita com material solo-cimento (GAIOTO, 2003). Um exemplo de parede diafragma é representada pela Figura 41.

Figura 41 – Exemplo de parede diafragma.

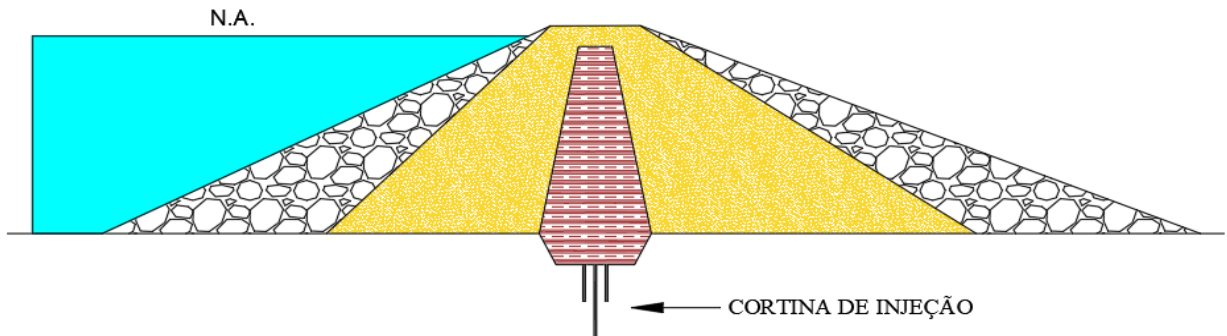


Fonte: Oliveira (2008).

2.8.3 Cortina de injeção

A cortina de injeção consiste na técnica de injetar calda de cimento ou qualquer outro material ao longo do maciço da fundação. Para isso, são usados equipamentos rotativos ou roto-percussivos para a realização dos furos por onde são inseridos os materiais. Esse procedimento é feito de forma controlada para que o maciço da fundação não tenha a sua estrutura comprometida e não venha a ter problemas (GAIOTO, 2003). Um exemplo de cortina de injeção é mostrado na Figura 42.

Figura 42 – Exemplo de barragem com cortina de injeção.



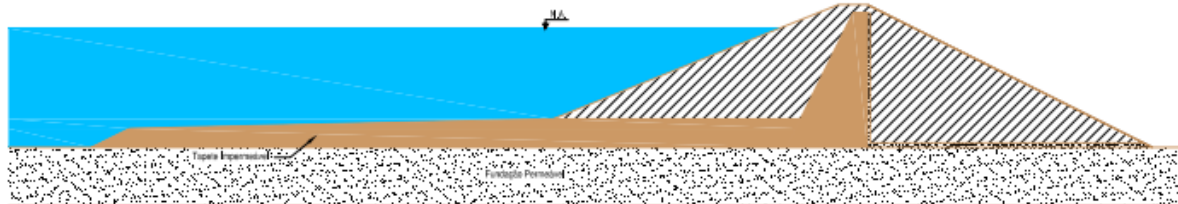
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

2.8.4 Tapete impermeável à montante

O tapete impermeável à montante é um dispositivo construído como o próprio nome diz do lado montante da barragem e que tem o objetivo de reduzir o gradiente hidráulico da água, uma vez que essa terá que percorrer um caminho maior ao longo da fundação. Comparado com as cortinas de injeção ou paredes diafragma profundas, o tapete impermeável à montante apresenta-se como uma alternativa econômica interessante, principalmente quando a fundação

requer tratamento em uma longa camada (GAIOTO, 2003). A Figura 43 mostra uma barragem com tapete impermeável à montante.

Figura 43 – Exemplo de tapete impermeável à montante.

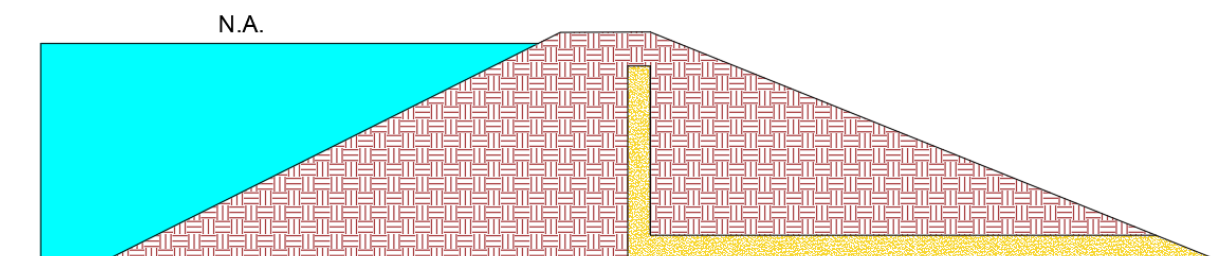


Fonte: Oliveira (2008).

2.8.5 Filtro vertical

A principal finalidade do filtro vertical é minimizar a ocorrência de percursos preferenciais que podem se desenvolver em possíveis rachaduras no maciço ou em virtude de imperfeições que possam surgir durante o processo de construção (CRUZ, 2004). Adicionalmente, os filtros verticais têm a capacidade de impedir o transporte de material do lado montante para jusante e contribuem com a redução do nível da água subterrânea no interior do aterro. De acordo com as orientações da Eletrobrás (2003), é recomendado que o filtro vertical apresente uma largura mínima de 0,60 metros, e sua elevação na parte superior deve coincidir com a cota máxima do nível d'água do reservatório. A Figura 44 apresenta uma barragem com filtro vertical.

Figura 44 – Exemplo de filtro vertical em barragem.



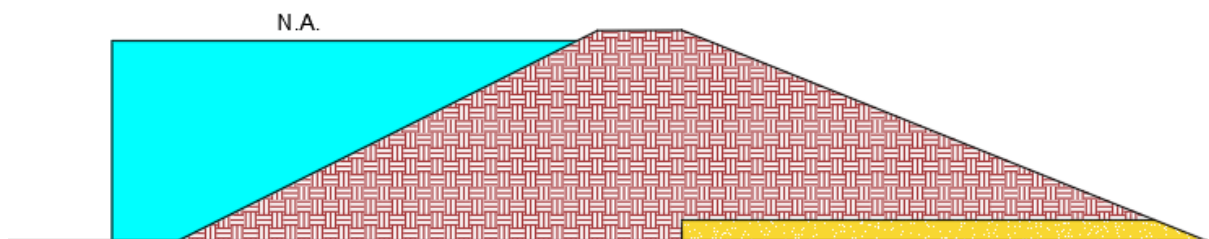
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

2.8.6 Filtro horizontal

O filtro horizontal desempenha um papel fundamental no gerenciamento e orientação do movimento da água que percola através do maciço e da base da barragem. Os materiais

utilizados neste dispositivo devem possuir uma permeabilidade adequada para cumprir sua função e estar em conformidade com os critérios de filtragem estabelecidos. Além disso, é necessário garantir uma espessura mínima de 0,25 metros, conforme as diretrizes da Eletrobrás (2003). Também é essencial prever um dispositivo adicional para capturar as vazões de percolação direcionadas pelo filtro e conter os materiais granulares transportados pelo fluxo, como mencionado por Cruz (2004)

Figura 45 – Exemplo de filtro horizontal em barragem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo são expostos os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Segundo Marconi e Lakatos (2003), a base fundamental de todas as ciências é a utilização de método científico, sendo este um conjunto ordenado de procedimentos que devem ser seguidos para que um objetivo específico seja alcançado. Dessa maneira, os procedimentos metodológicos desta pesquisa são:

Em relação a natureza, classifica-se em pesquisa aplicada. Este tipo é definido por Gerhardt e Silveira (2009), como sendo a pesquisa que tem o objetivo de reproduzir os conhecimentos adquiridos de forma teórico para solucionar problemas reais. Assim, este trabalho buscou reunir conhecimentos para contribuir com questões relacionadas à segurança das barragens brasileiras, como é o caso de prevenir o aparecimento de problemas através da análise de fluxo e estabilidade ainda na fase de projetos.

Quanto à abordagem, esta pesquisa é quantitativa, que, de acordo com Fonseca (2002), é uma metodologia que faz o uso da matemática para investigar fenômenos, identificar relações entre variáveis e assim, gerar resultados que podem ser quantificados. Portanto, esta pesquisa

caracterizou-se como quantitativa pois através de análises numéricas será observado o fenômeno da percolação da água e sua importância nos resultados de estabilidade.

Quanto aos objetivos, a pesquisa é explicativa. Gil (2002) cita que essas pesquisas têm como objetivo principal entender quais agentes estão envolvidos no acontecimento de fenômenos, buscando a compreensão do porquê entre a relação de variáveis e não somente como acontece essas relações. É considerada explicativa porque a segurança ou não das barragens serão explicadas a partir das variáveis que regem os fenômenos de percolação e consequente estabilidade dos taludes.

Quanto aos procedimentos técnicos, foi realizado um estudo de caso. De acordo com Fonseca (2002), essa é uma abordagem de pesquisa que busca investigar de forma profunda uma situação em particular, com a intenção de compreender suas características e âmbitos próprios. Por consequência, no estudo de caso foi escolhida uma região específica e a partir disso, conhecida suas características e a influência dessa no comportamento do modelo de barragem próprio para o caso estudado.

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

A presente pesquisa é dividida em 05 (cinco) partes principais: introdução, revisão de literatura, procedimentos metodológicos, resultados e discussões e as considerações finais. Na introdução foi contextualizado sobre a importância das barragens para uma sociedade e o quanto essas estruturas, quando mal projetadas, oferecem riscos de diversas naturezas para uma população. Além disso, foi nessa parte em que o problema de pesquisa, a justificativa e os objetivos (geral e específicos) foram definidos.

A revisão de literatura é a seção em que se reúne as principais fontes de pesquisa que estão relacionadas ao tema do trabalho. Em vista disso, foram abordados os seguintes temas: história das barragens e seus tipos; segurança de barragens; causas de ruptura de barragens de terra; principais anomalias que acometem as barragens de aterro; percolação em barragens de aterro; estabilidade em barragens de aterro; dispositivos de controle de percolação.

Na etapa dos procedimentos metodológicos foram citados os processos adotados e seguidos para que o objetivo deste trabalho fosse alcançado. Dessa maneira, apresentou-se a metodologia usada; as etapas que compõem o trabalho; as propriedades da região escolhida; as investigações geológico-geotécnicas realizadas; a seção principal da barragem e as mudanças inseridas nela; o *software* de análise dos dados e a forma de apresentação dos resultados; os parâmetros necessários para as análises de percolação e estabilidade; as condições de contorno

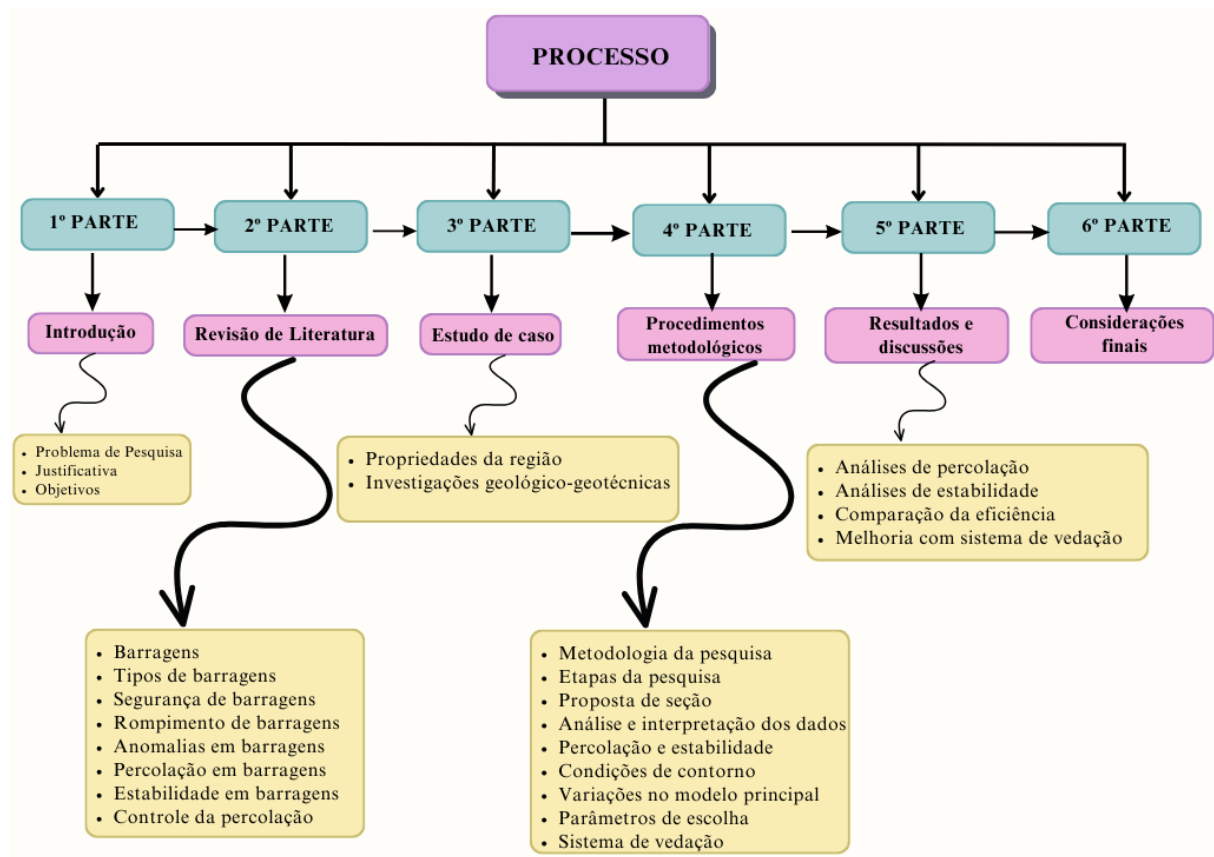
que delimitam o problema; os critérios de escolha da seção; e a apresentação do dispositivo de vedação que será incrementado no modelo escolhido.

Na seção de resultados e discussões, cujo objetivo é transmitir os resultados da pesquisa de maneira clara e interpretativa, iniciou-se mostrando os resultados provenientes das análises de percolação e em seguida, os resultados obtidos nas análises de estabilidade. Posteriormente, procedeu-se ao cálculo e comparação da eficiência dos modelos e, por último, apresentou-se os resultados para a seção formada pelo sistema de drenagem e sistema de vedação. Nas considerações finais foram resumidos e destacados os principais pontos de vista do trabalho, bem como os resultados e contextualização na área de pesquisa.

3.2.1 Fluxograma

Na Figura 46 apresenta-se o fluxograma deste trabalho, abordando o processo percorrido para a elaboração desta pesquisa, desde a revisão de literatura até as considerações finais.

Figura 46 – Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.



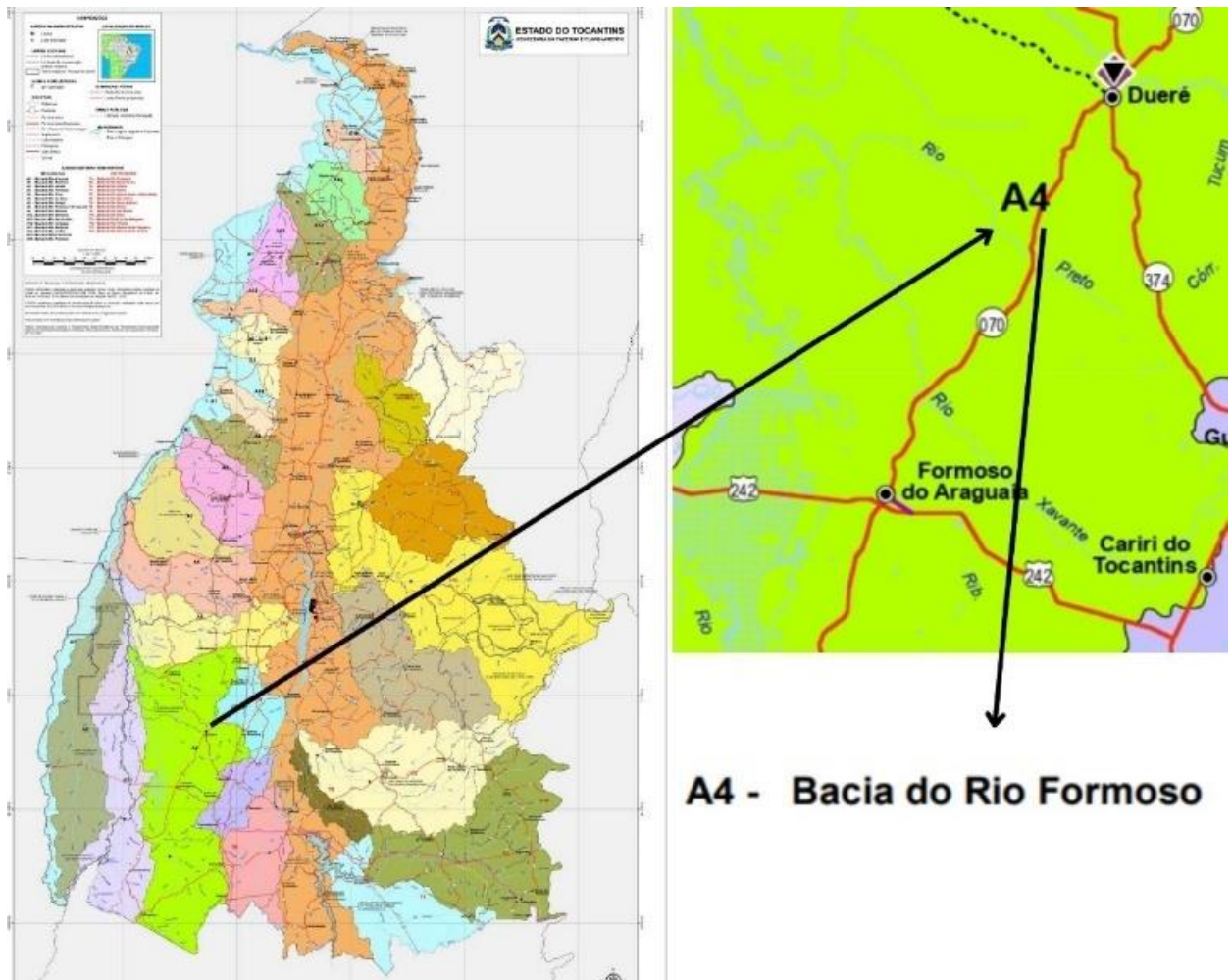
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

3.3 PROPRIEDADES DA REGIÃO DE ESTUDO

O Estado do Tocantins ocupa a porção central do território brasileiro, fazendo parte da Região Norte. É caracterizado, segundo suas propriedades fisiográficas, em cinco grandes áreas de estudo: geomorfologia, clima, hidrografia, solos e vegetação. No que diz respeito à sua geologia, está compartimentado em quatro principais domínios geomorfológicos: a) Formas estruturais: caracterizado por relevos controlado pelas estruturas geológicas em que as camadas mais resistentes sobressaem no relevo; b) Formas erosivas: relevos formados por processos morfodinâmicos erosivos onde ocorre rebaixamento e nivelamento; c) Tipos de dissecação: relevos acentuados moldados por agentes erosivos principalmente relacionado a redes hidrográficas; d) Formas de acumulação: determinado pelo acúmulo de sedimento em regiões de inundação como as zonas fluviais, paludais e lacustres (REZENDE e RODRIGUEZ, 2018).

A bacia hidrográfica do rio Formoso está localizada entre os paralelos S 13° 08' 00" e S 10° 27' 43" e os meridianos W 50° 21' 49" e W 48° 52' 56", conforme apresenta a Figura 47. Esse sistema fluvial encontra-se na Bacia Sedimentar do Bananal. Essa é a maior bacia sedimentar intracratônica do Quaternário na América do Sul, que é um baixo estrutural ainda pouco estudado e que está em processo de subsidência (VALENTE, 2007; VALENTE e LATRUBESSE, 2012; *apud* SANTOS, 2016). Ainda segundo Santos (2016), a nascente do canal principal se situa no município de Novo Planalto, norte do estado de Goiás. Além desse, a rede de drenagem se desenvolve nos municípios tocantinenses de Araguaçu, Sandolândia, Talismã, Alvorada, Aliança do Tocantins, Gurupi, Figueirópolis, Cariri do Tocantins, Formoso do Araguaia, Dueré, Crixás do Tocantins, Santa Rita do Tocantins até o município de Lagoa da Confusão, onde ocorre a confluência com o rio Javaés.

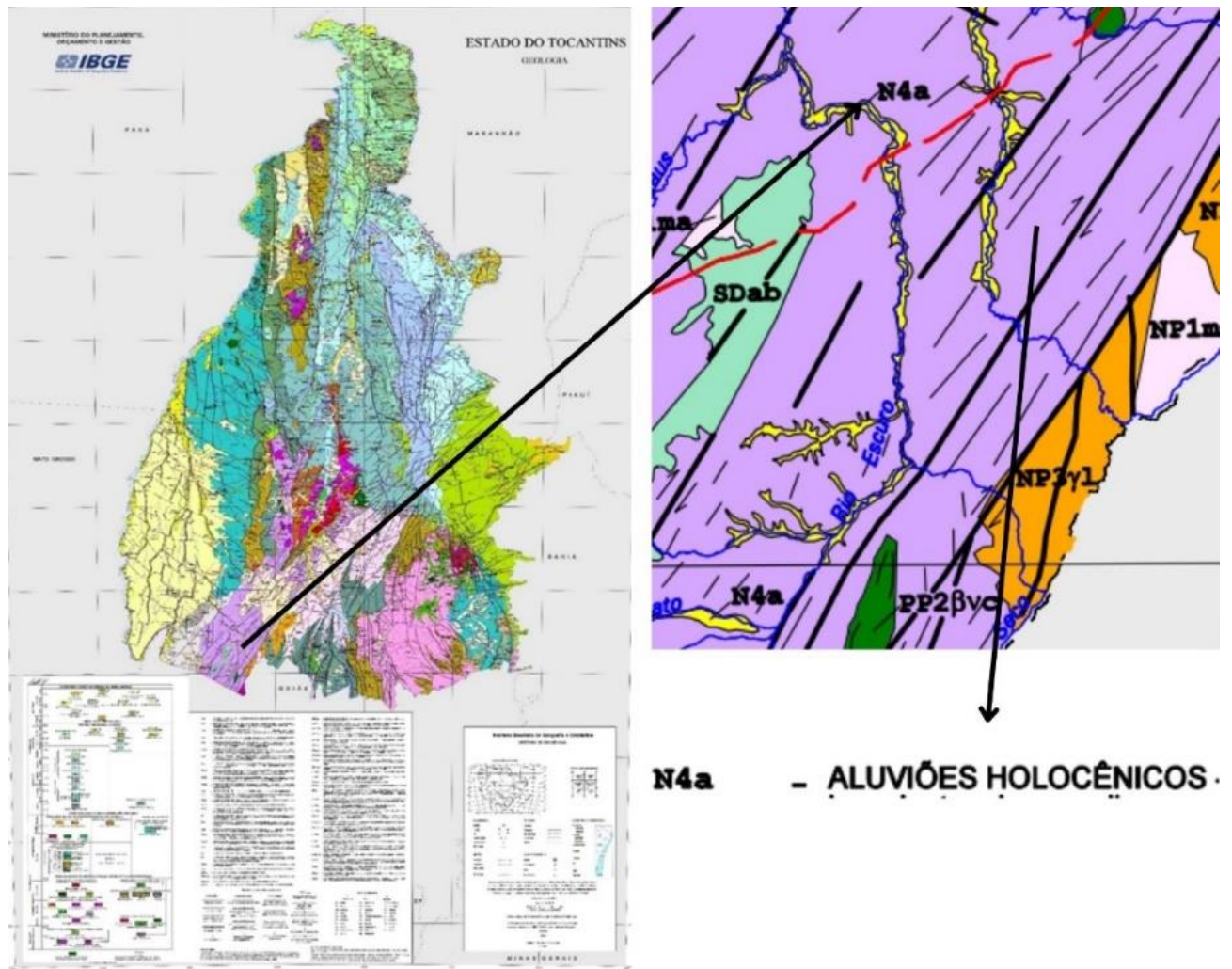
Figura 47 – Localização da bacia do rio Formoso no estado do Tocantins.



Fonte: Secretaria da Fazenda e Planejamento (2019), adaptado pela Autora (2023).

De acordo com o Mapa Geológico do Estado do Tocantins elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística no Pará (IBGE, 2007), a região de estudo em que estão localizadas as barragens, possui formação geológica surgida durante a era Cenozóica, no período Quaternário, na época do Holoceno, essa é classificada como Aluviões Holocênicos (Figura 48) que estão compostos por sedimentos arenosos e argilo-arenosos, localmente areias, argilas e lentes de cascalho.

Figura 48 – Geologia da região de estudo.



Fonte: IBGE (2007), adaptado pela Autora (2023).

3.4 INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

3.4.1 Pesquisa de campo

Foram realizadas investigações geológico-geotécnicas que compreenderam em sondagens mistas (rotativa e percussão) e sondagens rotativas em cada uma das barragens. No eixo de cada barragem foi executada 01 (uma) sondagem mista (SM) e na ombreira mais acessível (direita ou esquerda) foi realizada 01 (uma) sondagem rotativa (SR). Além disso, foram coletadas *in situ* amostras do tipo deformadas e indeformadas. Na Figura 49 é apresentada a localização das barragens ao longo do rio Formoso, que são identificadas pelas letras A, B e C.

Figura 49 – Localização das barragens ao longo do rio Formoso.



Fonte: Google Earth Pro (2023), adaptado pela Autora (2023).

Na Tabela 4 e Tabela 5 são apresentadas as propriedades das sondagens mistas e sondagens rotativas, respectivamente. Na Figura 50 é apresentada a locação dos furos das sondagens mistas no eixo de cada barragem ao longo do rio Formoso, e nas Figuras 51, 52 e 53 são apresentadas as locações dos furos das sondagens rotativas na ombreira direita de cada barragem.

Tabela 4 – Sondagens mistas realizadas no eixo de cada barragem.

Furo	Ponto	Cota do furo (m)	Profundidade (m)
SM – 01	Eixo	186,00	13,05
SM – 02	Eixo	179,00	15,01
SM - 03	Eixo	178,00	15,00

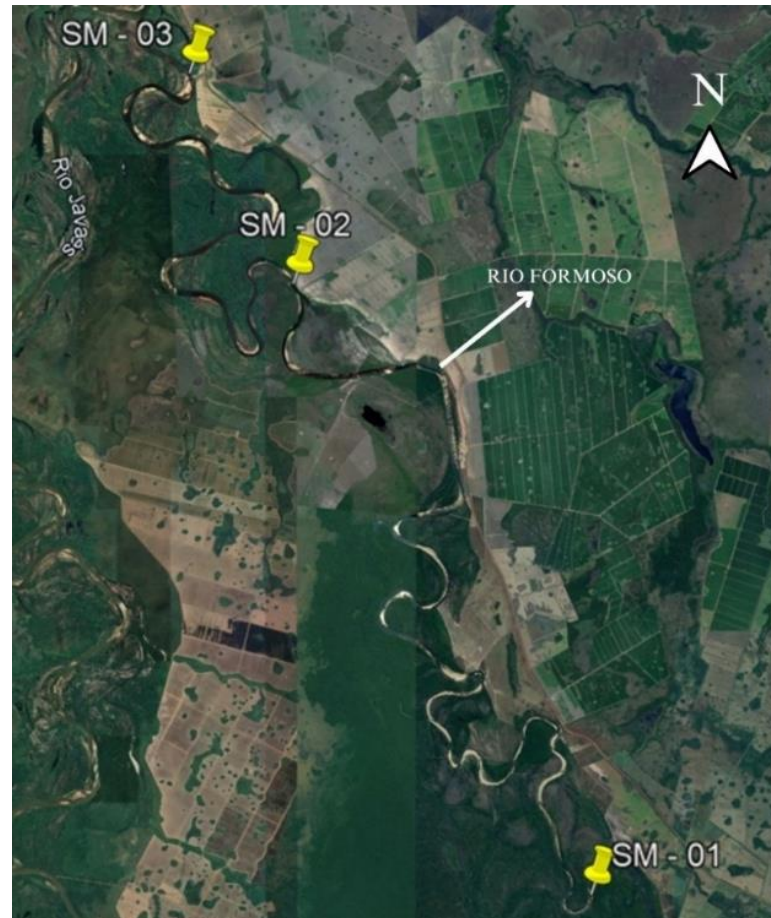
Fonte: Relatório de Sondagem Mista (2022), adaptado pela Autora (2023).

Tabela 5 – Sondagens rotativas realizadas nas ombreiras de cada barragem.

Furo	Ponto	Cota do furo (m)	Profundidade (m)
SR – 01	Ombreira direita	187,00	20,50
SR – 02	Ombreira direita	178,00	24,50
SR - 03	Ombreira direita	180,00	25,00

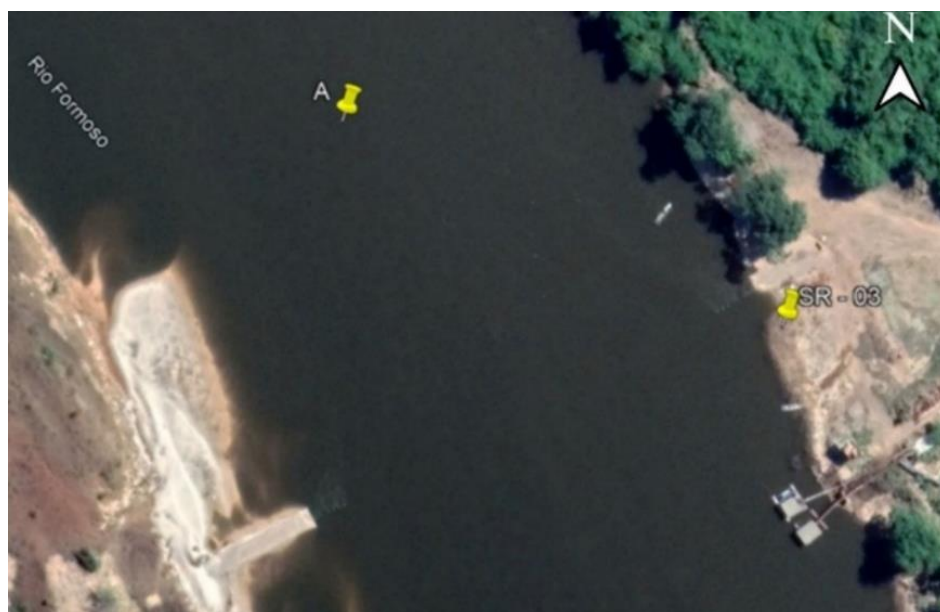
Fonte: Laudo de Sondagem Rotativa (2022), adaptado pela Autora (2023).

Figura 50 – Localização dos furos das sondagens mistas.



Fonte: Google Earth Pro (2023), adaptado pela Autora (2023).

Figura 51 – Localização do furo SR – 03 na barragem A.



Fonte: Google Earth Pro (2023), adaptado pela Autora (2023).

Figura 52 – Localização do furo SR – 02 na barragem B.



Fonte: Google Earth Pro (2023), adaptado pela Autora (2023).

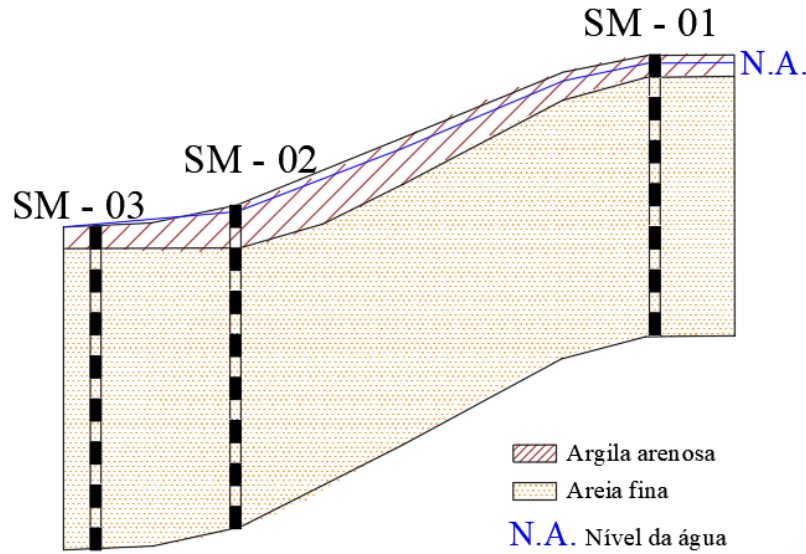
Figura 53 – Localização do furo SR – 01 na barragem C.



Fonte: Google Earth Pro (2023), adaptado pela Autora (2023).

As sondagens mistas foram conduzidas nas barragens para avaliar o maciço da fundação. O perfil geotécnico revelou duas camadas distintas: uma predominantemente de argila arenosa com N_{spt} médio de 19,0 e outra de areia, com espessura média de 13,0 m, granulometrias variadas e N_{spt} médio de 15,40. Devido à natureza permeável do maciço arenoso, é necessário um tratamento adequado para prevenir problemas relacionados à percolação da água. O perfil geotécnico, apresentado na Figura 54, indica que o maciço da fundação ao longo das barragens possui a mesma caracterização.

Figura 54 – Perfil geotécnico do maciço da fundação.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

As sondagens rotativas executadas forneceram informações acerca das espessuras das camadas dos materiais que compõem as ombreiras das barragens, mais especificamente a ombreira direita, que foi o lado mais acessível para a realização das sondagens. Assim, verificou-se através do furo SR – 01 feito na ombreira da barragem C que: em 1,0 m encontra-se uma camada de argila arenosa marrom (aterro); de 1,0 a 2,0 m têm-se areia fina siltosa medianamente compacta amarela; de 2,0 a 3,0 m possui areia fina siltosa pouco compacta amarela; de 3,0 a 4,0 m areia fina medianamente compacta amarela; de 4,0 a 4,45 m areia fina compacta amarela; de 4,45 a 4,95 m areia fina muito compacta amarela; de 4,95 a 11,95 m areia fina amarela; de 11,95 a 14,95 m areia pouco argilosa amarela; de 14,95 a 20,50 m areia grossa branca.

A partir do furo SR – 02 realizado na ombreira da barragem B, verificou-se que: até 3,0 m existe uma camada de argila arenosa marrom (aterro); de 3,0 a 12,0 m argila arenosa vermelha com pedregulhos de laterita; de 12,0 a 19,5 m areia siltosa amarela; de 19,5 a 22,5 m areia fina branca; de 22,5 a 24,5 m areia média amarela. Com o furo SR – 03 feito na ombreira direita da barragem A, verificou-se a existência de argila arenosa marrom (aterro) até os 4,5 m; areia fina amarela de 4,5 a 13,5 m; areia fina branca de 13,5 a 16,5 m; areia fina a média amarela de 16,5 a 21,0 m; areia média branca de 21,0 a 25,0 m.

3.4.2 Ensaios geotécnicos

Os ensaios geotécnicos são procedimentos que analisam as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas do solo, tanto em laboratório quanto em campo. Essenciais para a engenharia geotécnica, esses ensaios fornecem parâmetros cruciais para projetos de barragens, fundações, estradas e outras obras. Os ensaios realizados nas barragens que vão fornecer informações para este trabalho são:

- Caracterização geotécnica dos solos;
- Resistência ao cisalhamento direto;
- Permeabilidade de carga constante e/ou variável;
- Compactação dos solos – Proctor normal;
- Massa específica aparente – *in situ*.

A caracterização geotécnica compreende um conjunto de ensaios e técnicas que visam o entendimento das características do subsolo, permitindo a identificação e o fornecimento de parâmetros físicos dos solos como seu teor de umidade, massa específica dos sólidos, limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade) e análise granulométrica conjunta (peneiramento e sedimentação). Os ensaios geotécnicos requerem amostras deformadas, cujas características são alteradas durante a coleta em comparação com o subsolo em seu estado natural. Para amostras indeformadas, é necessário limpar o local, remover a vegetação superficial antes da coleta. Os resultados da caracterização geotécnica dos solos das ombreiras das barragens estão compilados nas Tabela 6, Tabela 7, Gráfico 1, Gráfico 2 e Gráfico 3.

Tabela 6 – Valores de massa específica dos sólidos.

Barragem	Ponto	Massa específica dos sólidos (g/cm ³)
A	Ombreira direita	2,595
B	Ombreira direita	2,606
C	Ombreira direita	2,483

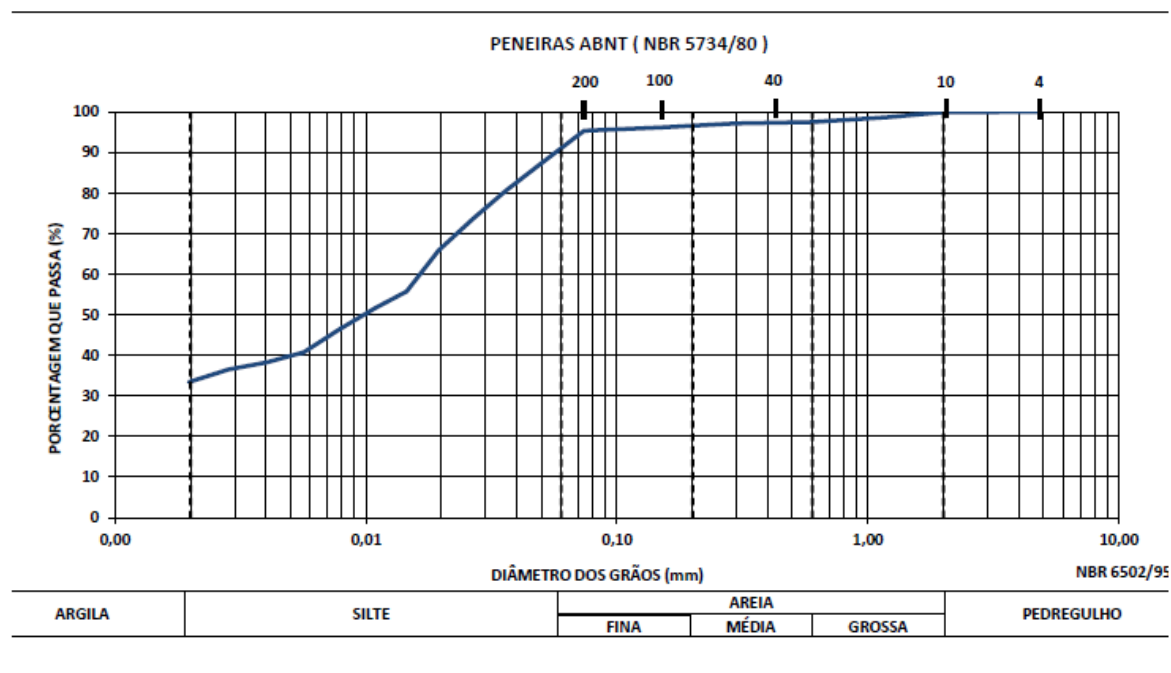
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 7 – Valores de limites de Atterberg.

Barragem	Ponto	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
A	Ombreira direita	39	10	29
B	Ombreira direita	39	17	22
C	Ombreira direita	19	10	9

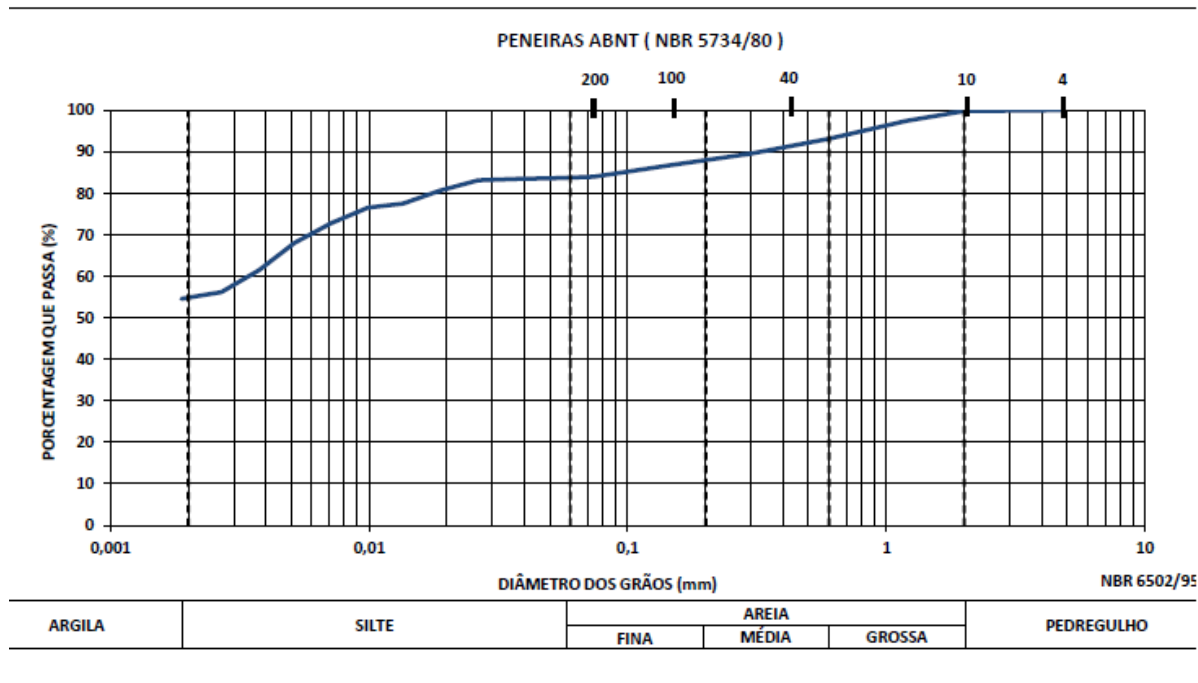
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Gráfico 1 – Curva granulométrica da amostra coletada na ombreira direita da barragem A.



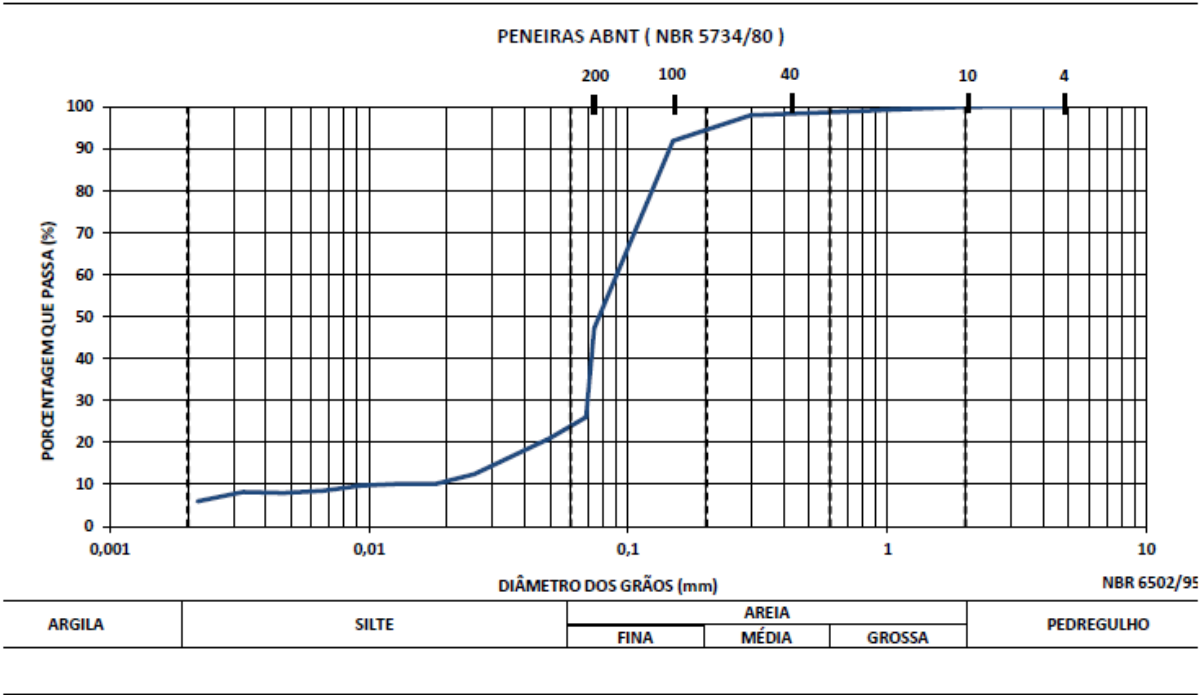
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Gráfico 2 - Curva granulométrica da amostra coletada na ombreira direita da barragem B.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Gráfico 3 - Curva granulométrica da amostra coletada na ombreira direita da barragem C.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Os ensaios de permeabilidade e de resistência ao cisalhamento direto refletem o comportamento hidráulico e mecânico dos solos, respectivamente. Para a realização destes ensaios é necessária à coleta de amostras indeformadas, ou seja, de solo que apresente as menores alterações possíveis ao seu estado natural. Quando esse tipo de extração não é possível, as amostras de solo devem ser moldadas em laboratório de modo que suas características físicas sejam as mesmas de quando realizados os ensaios de campo, que foi o caso para as amostras utilizadas.

Como o próprio nome sugere, o ensaio de resistência ao cisalhamento direto fornece os parâmetros de resistência do solo, que são a coesão e o ângulo de atrito interno. O ensaio de permeabilidade mede a facilidade com que um fluido passa através de um meio poroso e é expressa por meio do coeficiente de permeabilidade. Esse coeficiente é obtido mediante ensaio em laboratório, utilizando-se de permeâmetros de carga constante ou de carga variável, a depender do tipo de solo que será encontrado em cada barragem. Na Tabela 8 estão reunidos os resultados do ensaio de resistência ao cisalhamento direto e na Tabela 9 do ensaio de permeabilidade.

Tabela 8 – Valores de coesão e ângulo de atrito interno.

Barragem	Ponto	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
A	Ombreira direita	23,1	22,6
B	Ombreira direita	31,1	18,1
C	Ombreira direita	0,0	31,1

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 9 – Valores do coeficiente de permeabilidade.

Barragem	Ponto	Coeficiente de permeabilidade (cm/s)
A	Ombreira direita	$1,1 \times 10^{-3}$
B	Ombreira direita	$3,1 \times 10^{-3}$
C	Ombreira direita	$5,3 \times 10^{-5}$

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

O ensaio de compactação é um procedimento essencial para examinar o comportamento do solo e através dele é possível indicar os melhores estados que um solo deve ter, no que diz respeito a compactação, em projetos. Esse ensaio consiste em estabilizar o solo através da transferência de energia mecânica, dando a ele maior massa específica seca, aumentando a sua resistência ao cisalhamento e diminuindo o seu índice de vazios, sua permeabilidade e sua compressibilidade. Por meio desse ensaio é possível determinar duas importantes propriedades do solo, que é a sua massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e o seu teor de umidade ótimo ($w_{\acute{o}tima}$). Na Tabela 10 encontram-se os resultados obtidos com o ensaio de compactação - Proctor Normal.

Tabela 10 – Valores de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo.

Barragem	Ponto	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	$w_{\acute{o}tima}$ (%)
A	Ombreira direita	1,571	18,7
B	Ombreira direita	1,356	27,0
C	Ombreira direita	1,780	11,5

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

O ensaio de massa específica aparente “*in situ*” compreende a determinação da relação entre a massa total do solo e o seu volume. Essa proporção pode ser obtida por meio da remoção de um cilindro metálico que é cravado no solo e, através do conhecimento da massa do cilindro,

da massa do conjunto formado pelo “cilindro + solo” e do volume do cilindro, é possível obter a massa específica aparente ao se fazer a divisão da massa total do solo pelo volume do cilindro. Foram realizados os procedimentos desse ensaio em dois pontos diferentes da ombreira escolhida de cada barragem, com a finalidade de verificar a existência ou não de variabilidade no processo de compactação. Na Tabela 11 e Tabela 12 estão compilados os resultados da massa específica aparente “*in situ*” e dos teores de umidade, respectivamente.

Tabela 11 – Valores de massa específica aparente “*in situ*”.

Barragem	Ponto	Ponto 1 (g/cm ³)	Ponto 2 (g/cm ³)
A	Ombreira direita	1,831	1,899
B	Ombreira direita	1,670	1,737
C	Ombreira direita	1,649	1,677

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 12 – Valores do teor de umidade.

Barragem	Ponto	Ponto 1 (%)	Ponto 2 (%)
A	Ombreira direita	27,08	24,31
B	Ombreira direita	42,76	21,05
C	Ombreira direita	15,20	15,42

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Conhecidos os valores de massa específica aparente e teor de umidade, é possível definir a massa específica seca por meio da divisão entre a massa específica aparente e o somatório de um mais o teor de umidade. Esse parâmetro foi compilado na Tabela 13. Com o valor da massa específica seca de campo e com a massa específica seca máxima encontrada em laboratório é possível estabelecer uma relação entre eles que é conhecida como grau de compactação dos solos (Tabela 14), importante para a verificação da qualidade do processo de compactação.

Tabela 13 – Valores da massa específica seca.

Barragem	Ponto	Ponto 1 (g/cm ³)	Ponto 2 (g/cm ³)
A	Ombreira direita	1,441	1,528
B	Ombreira direita	1,170	1,435
C	Ombreira direita	1,431	1,453

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 14 – Valores do grau de compactação.

Barragem	Ponto	Ponto 1 (%)	Ponto 2 (%)
A	Ombreira direita	91,73	97,26
B	Ombreira direita	86,28	105,83
C	Ombreira direita	80,39	81,63

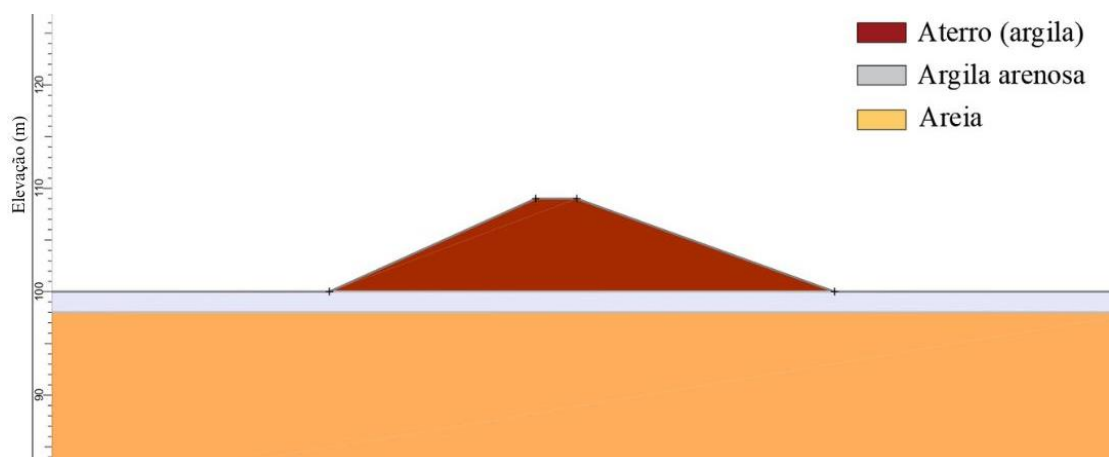
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

3.5 PROPOSTA DE SEÇÃO

Perante as características e levantamentos descritos nos itens 3.3 e 3.4, este trabalho irá propor um modelo de seção de barragem de terra para a região estudada. De acordo com os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica, o solo coletado na ombreira direita da barragem A trata-se de uma argila com baixa plasticidade; o coletado na ombreira direita da barragem B trata-se de argila de baixa plasticidade com areia; e o solo coletado na ombreira direita da barragem C trata-se de argila siltosa de baixa plasticidade. Dessa forma, os materiais encontrados nas ombreiras de todas as barragens apresentam características semelhantes, sendo esse escolhido para compor a parte central da estrutura (aterro).

No que se refere a composição da fundação, levou-se em conta uma espessura total de 20 (vinte) metros de solo, sendo essa largura dividida em uma camada de 2 m formada por argila arenosa e outra de 18 m de areia, sendo esses materiais considerados a partir dos resultados obtidos com as sondagens mistas e que teve o perfil geotécnico do maciço da fundação traçado no item 3.4.1. A Figura 55 apresenta a seção modelo com os atributos mencionados.

Figura 55 – Modelo da seção a ser analisado.

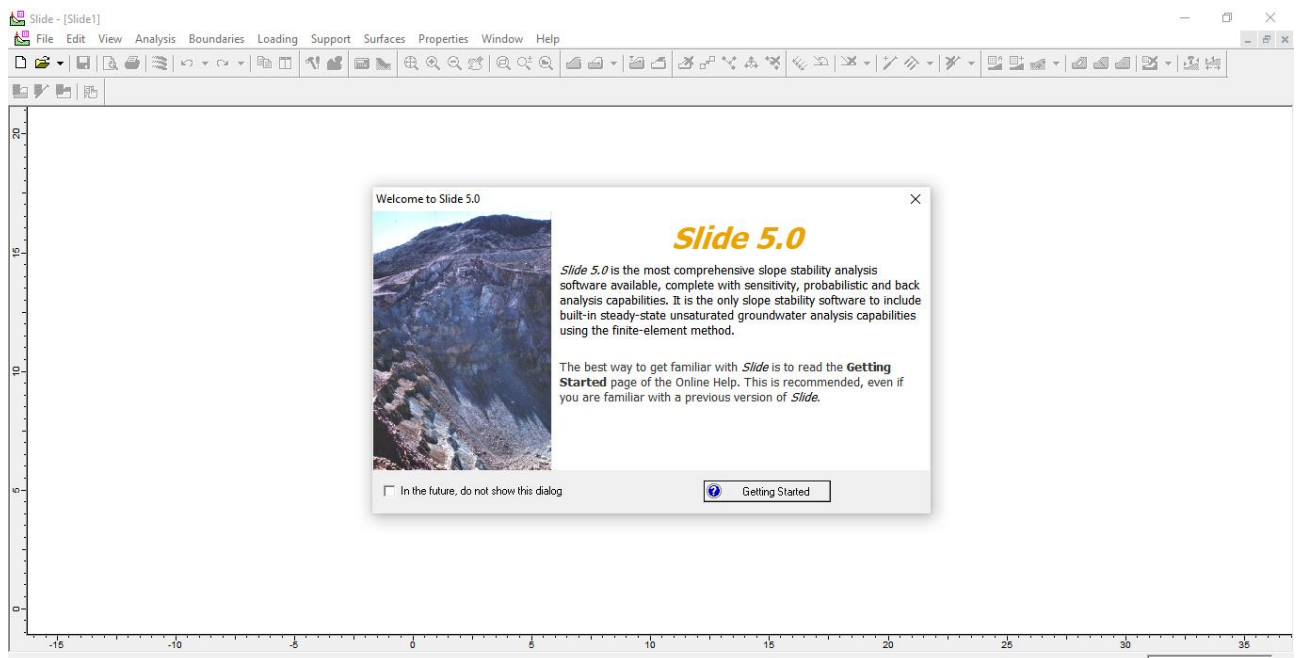


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

3.6 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Visando as análises de percolação e estabilidade de taludes, referente às características geológicas-geotécnicas encontradas nos ensaios de campo e de laboratório, será empregado o programa de modelagem computacional Slide da companhia Rocscience, versão 5.0 (Figura 56). Inicialmente esse programa foi desenvolvido para realizar apenas análises de estabilidade, mas com a evolução e atualização de suas versões foi incrementada a capacidade de realizar análises de percolação, fato esse que foi levado em consideração para a escolha da ferramenta, pois permitiu a realização de ambas as análises dentro de um único *software*.

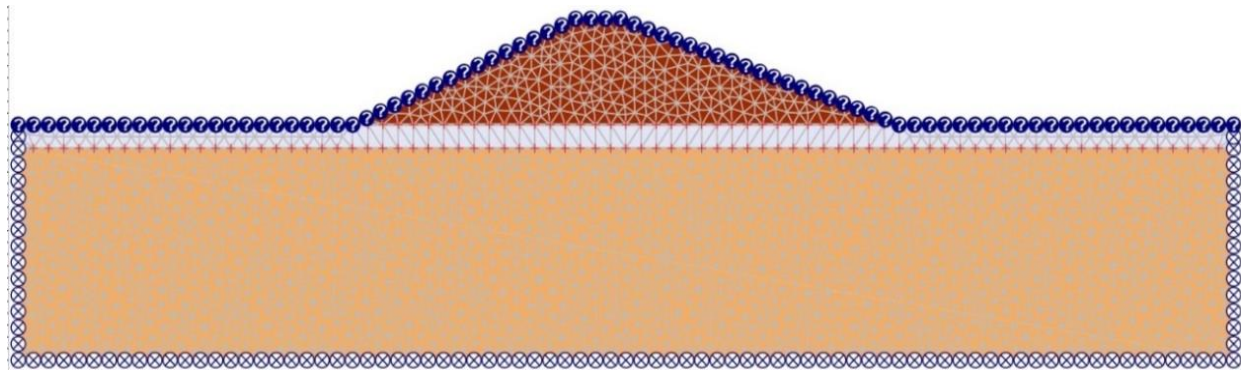
Figura 56 – Interface do *software*.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

O Slide faz uso do método do equilíbrio-limite para a realização das análises de estabilidade de taludes e do método dos elementos finitos para as análises de percolação. No MEF o corpo é transformado em uma malha de elementos finitos para que o problema possa ser resolvido. Posto isto, definiu-se uma malha triangular com elementos de três e com um número aproximado de 5000 (cinco mil) elementos, então o *software* gerou uma malha com 4707 elementos e 2451 nós, conforme apresenta a Figura 57.

Figura 57 – Malha de elementos finitos.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Quanto aos resultados, esses serão apresentados por meio de imagens geradas no próprio programa e em seguida serão compilados em tabelas para melhor organizar, visualizar e facilitar a comparação. Assim, tanto os resultados das análises de percolação quanto das análises de estabilidade, bem como as eficiências de cada caso serão visualizados em tabelas após a exposição em imagens.

3.7 PERCOLAÇÃO E ESTABILIDADE

Foram efetuadas análises de percolação e estabilidade com a finalidade de avaliar o comportamento do modelo escolhido. Dessa forma, será proposto um modelo de barragem e a partir desse serão testadas alternativas de modelos que venham a controlar o fluxo de água tanto no corpo da barragem quanto na sua fundação. Como esses dois conceitos estão interligados, ou seja, a presença de água pode afetar significativamente a estabilidade de um talude, também serão feitas análises de estabilidade de taludes nas seções das barragens.

A partir das análises de percolação que determina a rede de fluxo, formada pelas linhas de fluxo, linhas equipotenciais e linha freática, é possível conhecer a pressão da água, os valores de gradientes hidráulicos, a localização da linha freática e as vazões que estão percolando pela barragem. Com o estudo da estabilidade, é possível obter o valor do fator de segurança (FS) para uma determinada condição de carregamento considerada e, assim analisar a estabilidade ou não do talude em questão. Massad (2010) cita que o método de equilíbrio-limite de Morgenstern-Price é o mais rigoroso quando comparado com outros métodos, como por exemplo o de Fellenius e Bishop Simplificado para a resolução de problemas de estabilidade de taludes de obras de terra e devido a isso, será utilizado este método neste trabalho.

3.7.1 Definição de parâmetros

Para prosseguir com as análises do comportamento hidráulico e mecânico das barragens, torna-se necessária a determinação dos parâmetros referentes ao coeficiente de permeabilidade dos solos e a resistência ao cisalhamento do mesmo, sendo estes apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Parâmetros geotécnicos utilizados.

Símbolo	Descrição	Unidade
γ	Peso específico natural	kN/m ³
ϕ	Ângulo de atrito interno efetivo	°
c	Coesão efetiva	kPa
k	Coeficiente de permeabilidade	m/s

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Os parâmetros utilizados nos materiais que irão compor o corpo e a fundação da barragem foram obtidos com os resultados das investigações geológico-geotécnicas realizadas em laboratório e em campo, que foram relatados no item 3.4. Conforme descrito anteriormente, o material do corpo da barragem trata-se de uma argila de baixa plasticidade, ou seja, de um material que não se deforma facilmente quando submetido a alguma tensão. Então, para o coeficiente de permeabilidade do material do aterro adotou-se um valor igual a $3,1 \times 10^{-3}$ cm/s que equivale a $3,1 \times 10^{-5}$ m/s, sendo esse o maior dos coeficientes de permeabilidade encontrados para os materiais das ombreiras das barragens e o que apresenta o resultado mais favorável para a segurança.

Quanto aos parâmetros de resistência do solo do aterro, esses foram obtidos através do ensaio de resistência ao cisalhamento direto, que fornece a coesão e ângulo de atrito interno necessários para as análises de estabilidade de taludes. Embora a resistência de um material não possa ser avaliada apenas levando em consideração seu valor de coesão e ângulo de atrito, uma vez que existem outros fatores importantes para determinar a resistência do solo a esforços, será adotado resultados com o intuito de trabalhar a favor da segurança da estrutura. Portanto, para a coesão adotou-se um valor igual a 31,1 kPa e ângulo de atrito igual a 18, 1°.

Os materiais que compõem a fundação não foram ensaiados, logo não se tem informações a respeito dos parâmetros mínimos necessários a serem inseridos nos modelos matemáticos de análise do comportamento hidráulico-mecânico. Diante disso, buscou-se adotar valores encontrados em trabalhos semelhantes, como o desenvolvido por Pessini *et al.* (2022).

Esses autores realizaram um estudo em seu artigo sobre alternativas para melhorar o controle da percolação em uma barragem específica e, os parâmetros tanto da camada de argila arenosa quanto do maciço arenoso que compõem a fundação serão baseados nesse estudo. Além disso, o peso específico natural e a anisotropia dos materiais também foram fundamentados na pesquisa elaborada por Pessini *et al.* (2022). A Tabela 15 apresenta o resumo dos parâmetros que serão usados neste trabalho.

Tabela 15 – Resumo dos parâmetros geotécnicos.

Material	Coef. de permeabilidade	Coesão	Ângulo de atrito	Peso específico	Anisotropia
Argila (aterro)	$3,1 \times 10^{-5}$ m/s	31,1 kPa	18, 1°	20 kN/m ³	0,5
Argila arenosa	$1,5 \times 10^{-7}$ m/s	35 kPa	28°	20 kN/m ³	1,0
Maciço arenoso	$1,0 \times 10^{-4}$ m/s	0 kPa	35°	20 kN/m ³	1,0

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

3.8 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para a realização das análises de percolação é necessário definir as fronteiras que vão delimitar o problema, que são as chamadas condições de contorno e, que são elas que irão definir a rede de fluxo. Dessa maneira, para a realização deste trabalho foram adotadas para o nível de água: reservatório com o nível d'água na cota de 104,5 m (N.A. normal); reservatório com o nível d'água na cota de 108 m (N.A. máximo); e saída de água pelo lado jusante acompanhando o nível do terreno.

Para as análises de estabilidade, dentre os fatores que devem ser levados em consideração, as condições de carregamento serão os limites do problema, uma vez que variar o nível da água no reservatório é fundamental para compreender como a pressão da água atua nos taludes de uma barragem e afeta sua estabilidade. Assim sendo, serão analisadas duas situações: reservatório em operação normal com o nível d'água na cota 104,5 m; reservatório em operação excepcional com o nível d'água na cota 108 m. Devido à característica típica do estudo, somente o talude de jusante será avaliado, uma vez que o foco do trabalho são as condições normais de carregamento e uma variação no nível d'água.

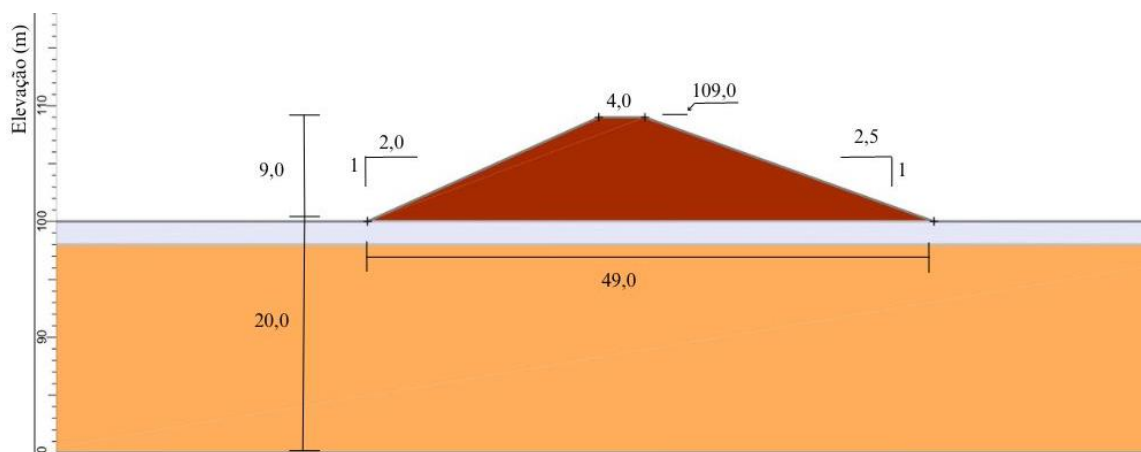
3.9 VARIAÇÕES NO MODELO PRINCIPAL

Nos tópicos seguintes serão apresentados os casos propostos para o trabalho em questão, que tem por finalidade principal propor modelos que controlarão o movimento da água tanto no aterro quanto na fundação da barragem. Através disso, serão propostos casos que diferem no sistema de drenagem adotado e após isso, será verificada a necessidade ou não de impermeabilização da fundação mediante um sistema de vedação. Optou-se por analisar um caso com filtro horizontal e outro com a combinação do filtro horizontal com o vertical. Em seguida serão detalhados os casos escolhidos para esta pesquisa.

3.9.1 Caso I

Para o Caso I será considerado o modelo apresentado no item 3.5. Este não possuirá nenhum dispositivo de drenagem e vedação e, isso se dá ao fato dele ser a base de comparação deste trabalho, sendo que as modificações que serão feitas nesse protótipo serão comparadas a ele, em termos de opção mais adequada para percolação e estabilidade. Trata-se de uma seção de barragem de terra com altura de 9,0 m, comprimento de 49,0 m e espessura da fundação de 20,0 m. O talude a montante possui inclinação de 1V:2H e o talude a jusante 1V:2,5H. A crista possui largura de 4,0 m e se encontra a uma elevação de 109,0 m. A Figura 58 apresenta as características da seção considerada no Caso I.

Figura 58 – Modelo do Caso I.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

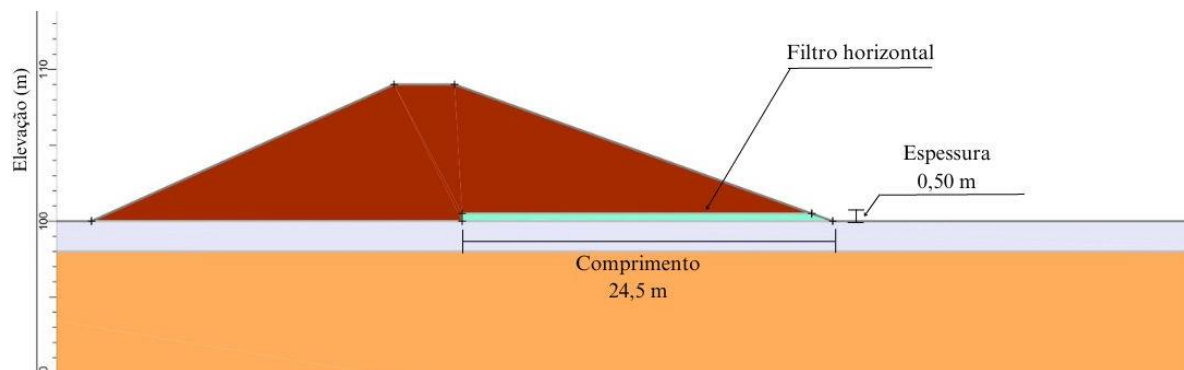
3.9.2 Caso II

Este caso considera a construção de um filtro horizontal, a fim de controlar o fluxo d'água por entre o corpo da barragem, que sairá do pé do talude de jusante da barragem e se

prolongará a montante até a medida do eixo da barragem (Figura 59). Por razões construtivas, Eletrobrás (2003) recomenda um valor mínimo de 0,25 m para a espessura de filtros horizontais, por isso, adotou-se a medida de 2 vezes o mínimo recomendado. Portanto, esse caso possui um filtro de 0,50 m de espessura e 24,5 m de comprimento (eixo da barragem). Os materiais que compõem o filtro devem apresentar permeabilidade alta, dessa forma, será composto por cascalho, sendo os parâmetros extraídos dos estudos de Pessini *et al.* (2022):

- **Coef. de permeabilidade:** $1,0 \times 10^{-2}$ m/s;
- **Coesão:** 0 kPa;
- **Ângulo de atrito:** 35° ;
- **Peso específico:** 20 kN/m³;
- **Anisotropia:** 1,0.

Figura 59 - Modelo do Caso II.

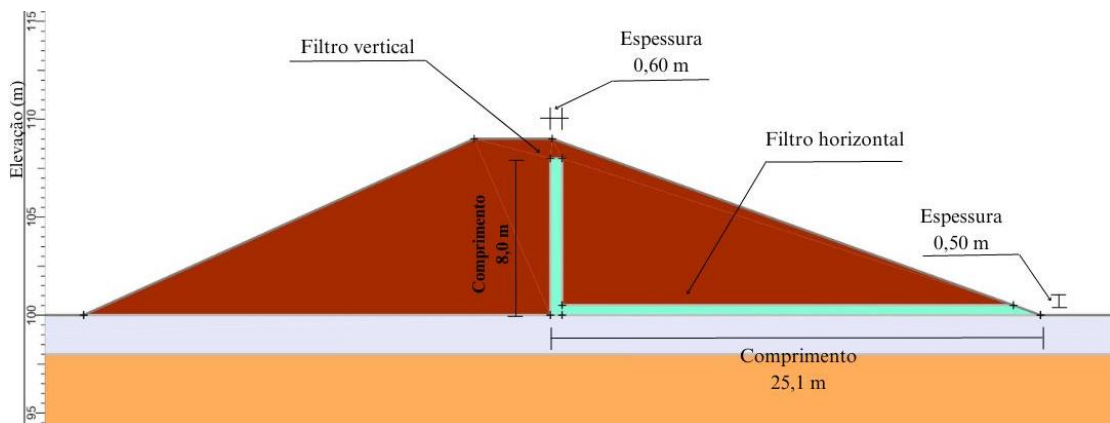


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

3.9.3 Caso III

No Caso III, considerou-se a construção de um sistema de drenagem formado pela combinação de um filtro horizontal com um filtro vertical. As características do filtro horizontal são as mesmas descritas no item 3.9.2, já para o filtro vertical será adotada a largura mínima recomendada por Eletrobrás (2003), que é igual a 0,60 m e seu comprimento será de 8,0 m, delimitado pela cota do nível d'água máximo (108,0 m). Em relação ao material que comporá este sistema, será o mesmo do filtro horizontal que já teve seus parâmetros citados no item anterior. A Figura 60 apresenta o modelo desse caso.

Figura 60 - Modelo do Caso III.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

3.10 PARÂMETROS DE ESCOLHA

Oliveira (2008) realizou em sua dissertação de mestrado um estudo sobre a eficácia dos dispositivos de vedação e drenagem utilizados em fundações permeáveis de barragens de terra, sendo assim, a análise da eficiência dos dispositivos utilizados neste trabalho baseou-se na metodologia adotada por este autor. Os parâmetros considerados no que diz respeito a percolação e estabilidade de taludes são:

- Vazão;
- Gradiente hidráulico;
- Fator de segurança (FS).

Isto posto, inicialmente será analisada a seção descrita no Caso I para definição das variáveis mencionadas e em seguida, os resultados obtidos serão comparados aos Casos II e III, onde foram implementados sistemas de drenagem na barragem. Feito isso, será analisada a necessidade de implementação de um dispositivo de vedação para controle de fluxo pela fundação, uma vez que essa é formada por material permeável.

Em relação a vazão, é fundamental a sua determinação para conhecer as condições hidrológicas da barragem, uma vez que valores descontrolados podem oferecer diversos riscos para a estrutura. A recomendação para vazão específica de drenagem é de até 5,0 l/min/m (SILVEIRA, 2006). Esse parâmetro será verificado no pé do talude de jusante do aterro, conforme apresenta a Figura 61, e a eficácia será calculada segundo a Equação 10, usada por Oliveira (2008).

$$E = 1 - \frac{q}{q_0} \quad (10)$$

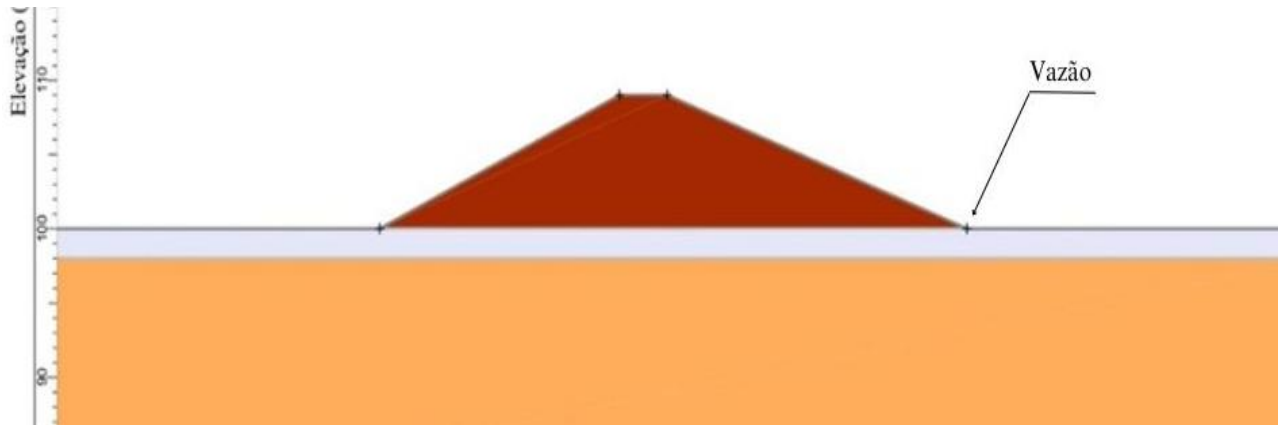
Onde:

E = eficácia do sistema;

Q = vazão com dispositivo de controle de percolação (l/min/m);

Q_0 = vazão sem dispositivo de controle de percolação (l/min/m).

Figura 61 – Localização do ponto de análise da vazão.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Quanto ao gradiente hidráulico, esse também pode causar uma série de problemas em uma barragem quando possui valores que fogem dos recomendados, como erosão interna, instabilidade da estrutura e assim, afetar áreas a jusante de uma barragem. Assim, nesta pesquisa será averiguada as medidas de gradiente hidráulico também no lado jusante da seção. Nos estudos de Pessini *et al.* (2022), os autores além de analisar o valor do gradiente hidráulico no pé do talude de jusante, também verificaram o parâmetro a 10 m de distância desse ponto, à vista disso, para esta pesquisa adotou-se uma verificação no pé do talude de jusante e outra a 15 m de distância deste, conforme apresenta a Figura 62. A eficácia será calculada segundo a Equação 11, baseada em Oliveira (2008).

$$E = 1 - \frac{i}{i_0} \quad (11)$$

Onde:

E = eficácia do sistema;

i = gradiente hidráulico com dispositivo de controle de percolação;

i_0 = gradiente hidráulico sem dispositivo de controle de percolação.

Ferreira (2022) explica que, com o intuito de alcançar um fator de segurança (FS) contra o fenômeno específico da erosão interna (*piping*), é necessário avaliar tanto os gradientes de saída quanto o gradiente crítico, sendo que para valores de atenção (carece de monitoramento constante) usa-se um $FS = 3,0$ e para valores de alerta (precisa averiguar a demanda ou não de intervenção) adota-se $FS = 2,0$. Oliveira (2008) apresenta a Equação 12 para o cálculo do fator de segurança. A parcela referente ao gradiente hidráulico de saída é obtida pelo próprio *software*, já a parte do gradiente hidráulico crítico é calculada através da Equação 13 (CEDERGREN, 1977 *apud* OLIVEIRA, 2008).

$$FS = \frac{i_0}{i} \quad (12)$$

Onde:

FS = fator de segurança;

i_0 = gradiente hidráulico crítico;

i = gradiente hidráulico de saída.

$$i_0 = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} \quad (13)$$

Onde:

i_0 = gradiente hidráulico crítico;

γ_{sub} = peso específico submerso (kN/m^3);

γ_w = peso específico da água (kN/m^3).

O peso específico submerso é a diferença do peso específico saturado com o peso específico da água, sendo este último já conhecido. Assim, para encontrar o valor do gradiente hidráulico crítico (i_0), considerou-se:

- **Peso específico natural:** 20 kN/m^3 ;
- **Teor de umidade:** $15,31 \%$;
- **Índice de vazios:** $0,5$;
- **Peso específico da água:** 10 kN/m^3 .

Para encontrar o peso específico saturado, usou-se das relações dos índices físicos, conforme é demonstrado nas Equações 14, 15 e 16. De posse desse valor, foi calculado o gradiente hidráulico crítico (Equação 17).

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1+w} \rightarrow \frac{20}{1+0,1531} \rightarrow \frac{20}{1,1531} = 17,34 \text{ kN/m}^3 \quad (14)$$

Onde:

γ_d = peso específico aparente seco (kN/m³);

γ_n = peso específico natural (kN/m³);

w = teor de umidade (%).

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \rightarrow \gamma_s = 1,5 \times \gamma_d \rightarrow 1,5 \times 17,34 \rightarrow \gamma_s = 26,01 \text{ kN/m}^3 \quad (15)$$

Onde:

e = índice de vazios (adimensional);

γ_s = peso específico dos grãos ou sólidos (kN/m³).

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e \times \gamma_w}{1+e} \rightarrow \frac{26,01 + 0,5 \times 10}{1+0,5} \rightarrow 20,67 \text{ kN/m}^3 \quad (16)$$

Onde:

γ_{sat} = peso específico saturado (kN/m³);

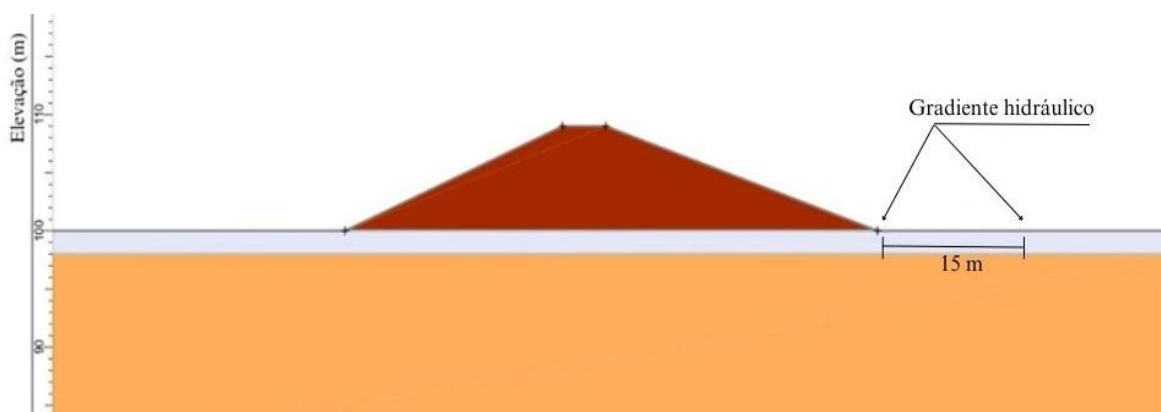
γ_w = peso específico da água (kN/m³).

$$i_0 = \frac{20,67 - 10}{10} \rightarrow i_0 = 1,07 \quad (17)$$

Detendo o i_0 e adotando um fator de segurança contra erosão interna com medida de atenção ($FS = 3,0$), é possível encontrar o valor do gradiente hidráulico de saída (Equação 18), que será usado de comparação com os valores gerados pelo programa, sendo que esses não podem ultrapassar o valor calculado.

$$FS = \frac{i_0}{i} \rightarrow i = \frac{i_0}{FS} \rightarrow \frac{1,07}{3} \rightarrow i = 0,36 \quad (18)$$

Figura 62 - Localização dos pontos de análise do gradiente hidráulico.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Quanto aos resultados das análises de estabilidade de taludes, esses são examinados através dos fatores de segurança, sendo que os mínimos recomendados devem ser atendidos para que a estrutura esteja operando em segurança em relação aos estados de carga que a ela são impostas. Os valores mínimos de FS foram buscados em bibliografias e a partir disso, foi elaborada a Tabela 16, sendo que o valor para regime normal foi baseado em Carvalho e Paschoalin Filho (2004) e para regime excepcional em Cruz (2004).

Tabela 16 – Fatores de segurança mínimos para as condições de carregamento.

Solicitação	Talude	FS
Regime normal	Jusante	1,5
Regime excepcional	Jusante	1,3

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

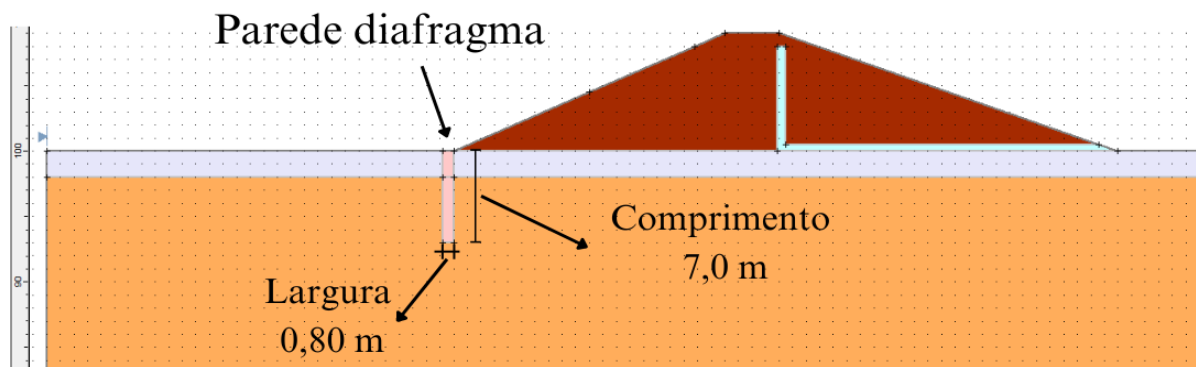
3.11 SISTEMA DE VEDAÇÃO

A presença de um sistema de vedação desempenha um papel fundamental na gestão e mitigação de vazamentos e infiltrações de água através da estrutura da barragem. Esse componente é de importância vital para assegurar tanto a segurança quanto a eficácia, sendo particularmente crucial em barragens que têm a finalidade de reter água. Assim sendo, será introduzido um sistema de vedação na seção escolhida, a fim de controlar o fluxo de água por meio do material permeável da fundação e avaliar o impacto resultante da combinação de um sistema de drenagem com um sistema de vedação nessa seção específica.

Serão testados dois dispositivos de vedação: parede diafragma e tapete impermeável à montante. A parede diafragma será construída utilizando uma mistura de solo-cimento, com uma largura de 0,80 metros, de acordo com a orientação apresentada por Massad (2010), e um comprimento igual a 7,0 metros, conforme ilustrado na Figura 63. Em relação aos parâmetros do material, tem-se:

- **Coef. de permeabilidade:** $1,5 \times 10^{-8}$ m/s;
- **Coesão:** 38 kPa;
- **Ângulo de atrito:** 30° ;
- **Peso específico:** 21 kN/m³;
- **Anisotropia:** 0,1.

Figura 63 – Características da parede diafragma.

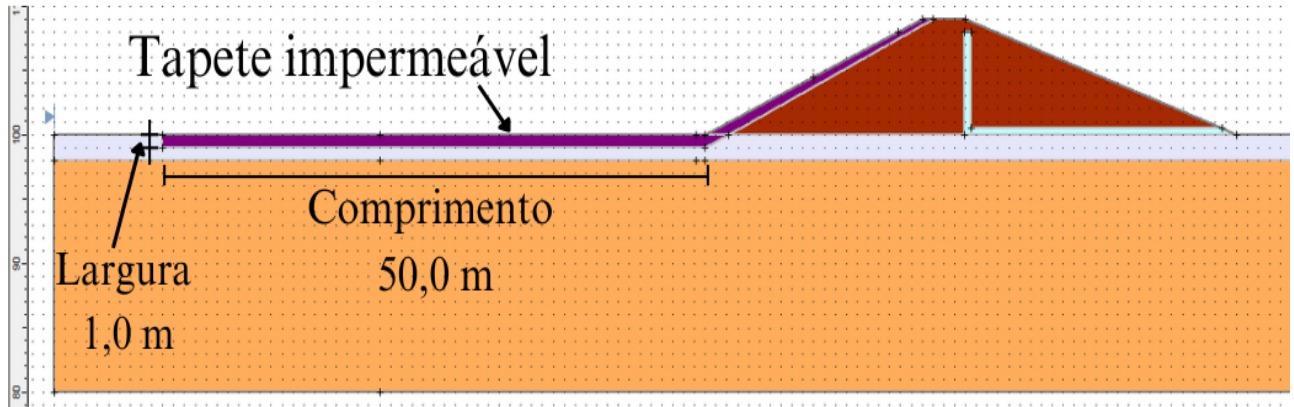


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Conforme Oliveira (2008), o tapete impermeável à montante compreende uma camada de aterro compactado, constituída por solo de baixa permeabilidade, que é aplicada na face montante da barragem. Por isso, esse dispositivo será composto por material compactado e terá 1,0 m de espessura, que é a largura mínima sugerida por Cruz (2004). Quanto ao comprimento, Cruz (2004) recomenda um valor que seja de 5 a 7 vezes o desnível montante-jusante. Logo, considerando o nível montante igual a 108 m (N.A. máximo) e o nível jusante igual a 100 m (nível do terreno) e, adotando um valor de 6 vezes, será usado um comprimento de 50,0 m (Figura 64). Em relação aos parâmetros do material, tem-se:

- **Coef. de permeabilidade:** $1,0 \times 10^{-8}$ m/s;
- **Coesão:** 35 kPa;
- **Ângulo de atrito:** 28° ;
- **Peso específico:** 20 kN/m³;
- **Anisotropia:** 0,1.

Figura 64 – Características do tapete impermeável à montante.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados e discussões das análises de percolação e estabilidade que serão realizadas nos casos detalhados no item 3.9 deste trabalho. Inicialmente serão mostrados os resultados para percolação dos diferentes casos, com ênfase nos valores de cargas hidráulicas, vazões e gradientes hidráulicos para o nível d'água normal e nível d'água máximo.

Após a conclusão das análises de percolação, serão feitas as avaliações de estabilidade dos taludes em cada seção. Através dos resultados obtidos, será avaliada a eficácia dos sistemas de drenagem utilizados em comparação com a seção que não possui qualquer mecanismo de drenagem. A alternativa que demonstrar maior eficiência será selecionada e, posteriormente, sujeita a novas análises de percolação e estabilidade. O objetivo é verificar os resultados obtidos com a alternativa escolhida, que será aprimorada por meio de um dispositivo de vedação.

4.1 ANÁLISES DE PERCOLAÇÃO

As análises de percolação foram executadas no *software* Slide, versão 5.0, com o objetivo de gerar informações sobre as redes de fluxo, vazões e gradientes hidráulicos em duas situações distintas: uma com o nível d'água (N.A.) normal na cota de 104.5 m (condição de regime permanente normal) e outra com o N.A. máximo atingindo a cota de 108 m (uma condição excepcional de regime permanente). Esses resultados têm relevância direta para as futuras análises de estabilidade, conforme detalhado na seção 4.2.

A avaliação de duas posições de nível de água durante a fase de projeto em uma barragem é uma prática essencial para garantir a segurança. Dentre os instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010) é citado o Plano de Segurança da Barragem, que abarca o Plano de Operação. Entre o conteúdo de um Plano de Operação estão as regras operacionais dos órgãos extravasores de uma barragem, tanto para operação normal quanto para operação em regime de cheia, que são os dois casos considerados neste trabalho. Portanto, avaliar esses dois níveis de água permite analisar os riscos, proporciona planejamento operacional e garante a segurança de uma barragem.

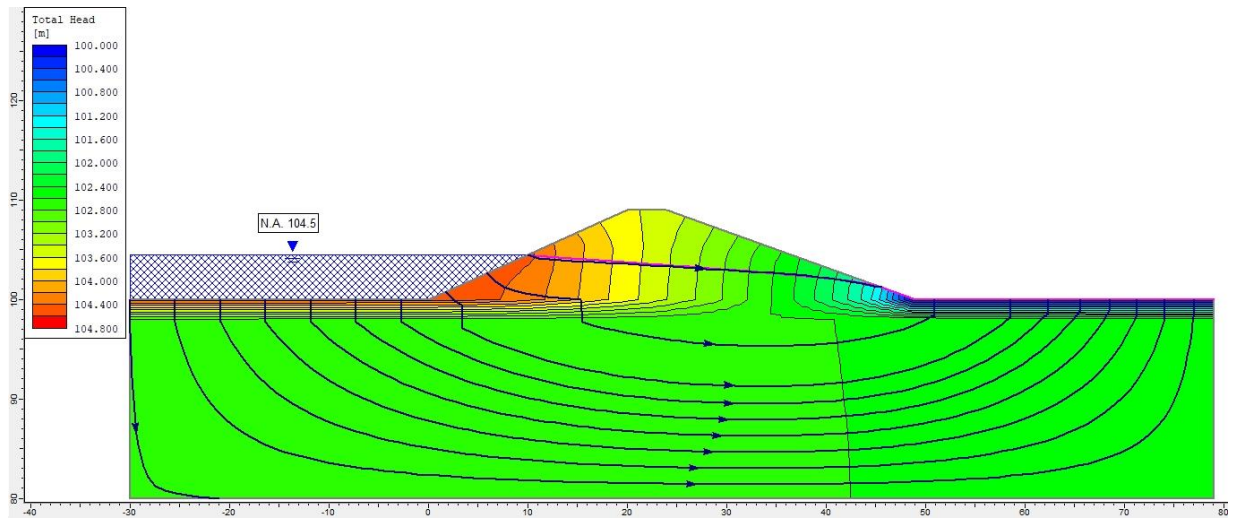
4.1.1 Caso I

Neste caso, considerou uma seção de barragem sem a implementação de sistemas de drenagem e vedação. O objetivo era estabelecer uma base de comparação para as seções que foram equipadas com tais sistemas. Inicialmente, os valores das cargas hidráulicas foram determinados para o nível de água normal, que é de 104,5 metros e, em seguida, para o nível de água máximo, que atinge 108 metros.

A simulação da percolação no programa gerou a chamada rede de fluxo, composta por: as linhas de fluxo, que ilustram o percurso da água dentro da barragem, e as linhas equipotenciais, que se cruzam perpendicularmente às linhas de fluxo e indicam os pontos onde as cargas hidráulicas possuem valores iguais.

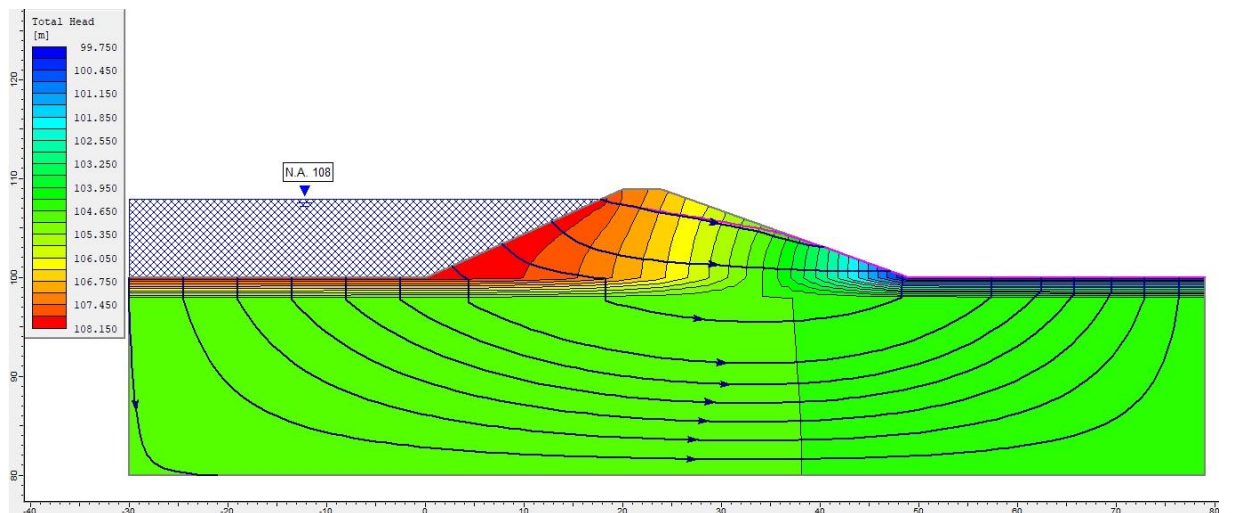
As Figuras 65 e 66 ilustram a variação dos valores das cargas hidráulicas à medida que o fluxo percola. Os valores mais elevados são encontrados a montante, enquanto os valores mais baixos estão a jusante, representados na legenda pelas cores que vai do "frio ao quente". A diminuição nas cargas hidráulicas ocorre à medida que o fluido se desloca, perdendo gradualmente sua energia ao longo da trajetória. Além disso, é importante notar a formação da linha freática na simulação, que começa ao nível da água a montante e sai no pé do talude na parte jusante da barragem.

Figura 65 – Cargas hidráulicas para o N.A. normal do Caso I.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

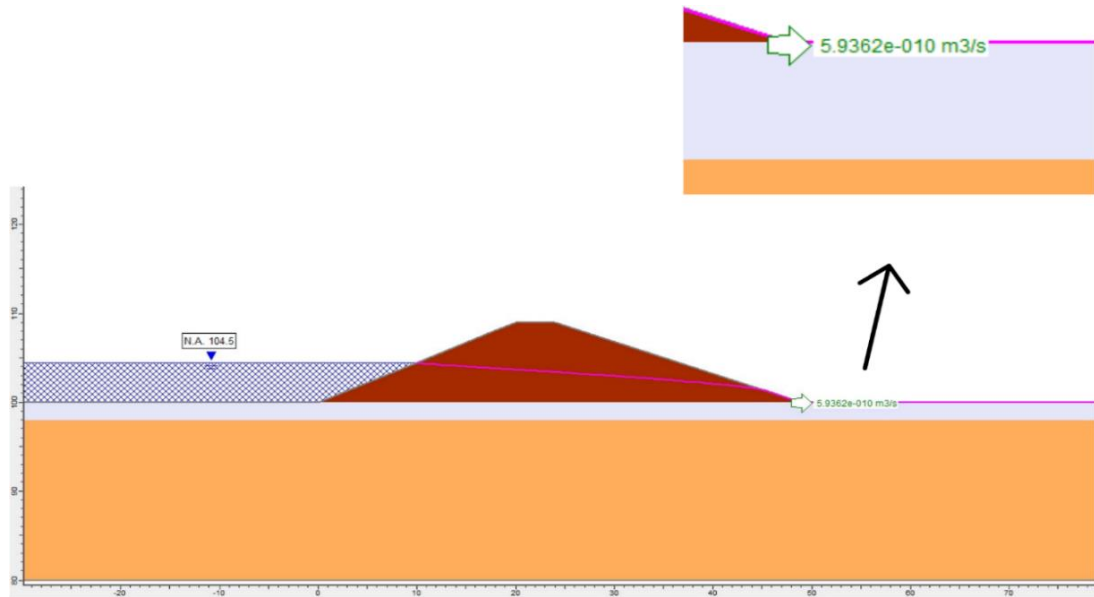
Figura 66 – Cargas hidráulicas para o N.A. máximo do Caso I.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

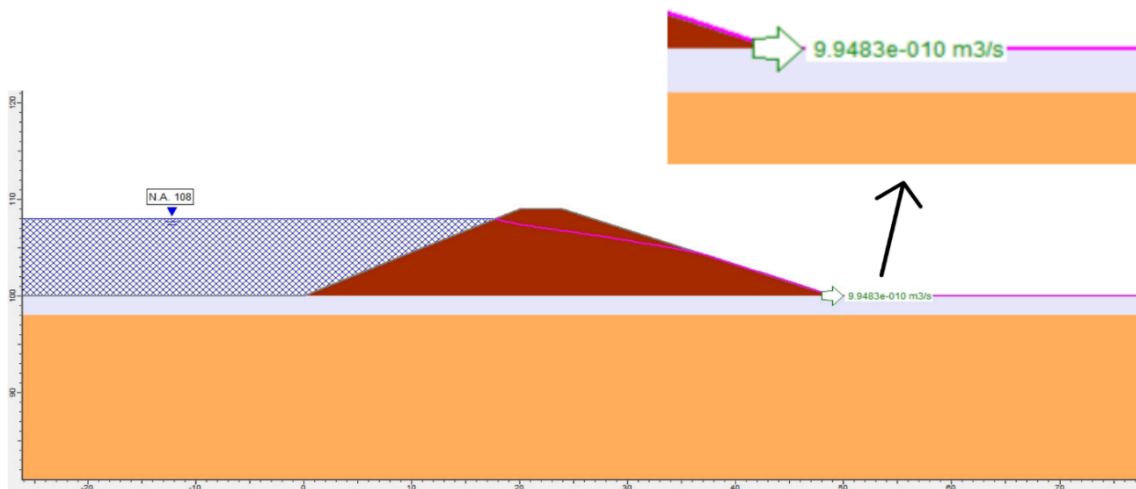
Conforme observado nas Figuras 67 e 68, o programa fornece os valores de vazão em m^3/s , no entanto, a referência de Silveira (2006), que servirá como base de comparação, apresenta as recomendações em $\text{l}/\text{min}/\text{m}$. Portanto, os valores de vazão foram convertidos para as unidades mencionadas na literatura de referência, resultando em uma taxa de 0,0000356 $\text{l}/\text{min}/\text{m}$ para o Nível de Água (N.A.) normal e 0,0000597 $\text{l}/\text{min}/\text{m}$ para o N.A. máximo. Consequentemente, ambos os valores estão abaixo do aconselhado, mais precisamente inferior a 1,0 $\text{l}/\text{min}/\text{m}$, que é citado por Ferreira (2022) como sendo o valor comum de percolação usado em barragens brasileiras.

Figura 67 – Vazão para o N.A. normal do Caso I.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 68 – Vazão para o N.A. máximo do Caso I.



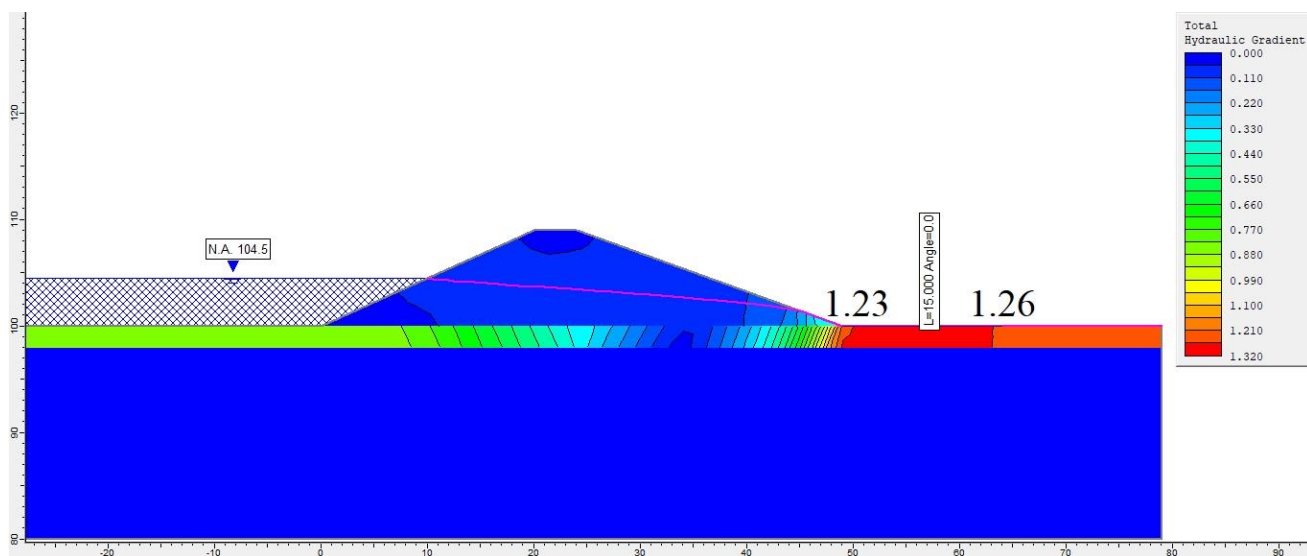
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Em relação aos gradientes hidráulicos apresentados nas Figuras 69 e 70, observa-se que, tanto em termos de níveis d'água quanto de localização, todos os resultados obtidos superaram o gradiente hidráulico de saída calculado (0,36). Percebe-se que a região a jusante possui os gradientes hidráulicos mais significativos, representados pela coloração vermelha, indicando que a penetração de água na estrutura não está ocorrendo de maneira uniforme, resultando em uma pressão elevada no talude a jusante.

Verifica-se uma concentração de pressões na região intermediária da estrutura e valores pequenos de gradientes hidráulicos no corpo e fundação da barragem. Este fato acontece

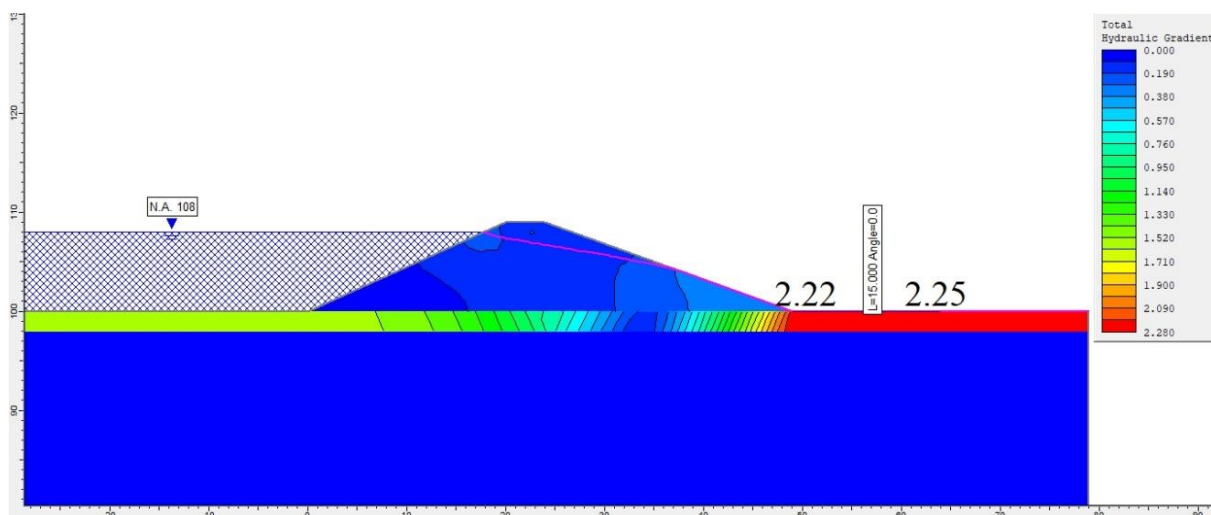
devido a composição e características dos materiais de cada região e por isso, a presença de materiais permeáveis que permitem a passagem fácil da água colabora para que a água que percola sob uma determinada pressão em uma parte da estrutura chegue com valores elevados em outras partes. Então, no que diz respeito a limites de segurança, os resultados não estão em conformidade com o recomendado.

Figura 69 – Gradientes hidráulicos para o N.A. normal do Caso I.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 70 – Gradientes hidráulicos para o N.A. máximo do Caso I.



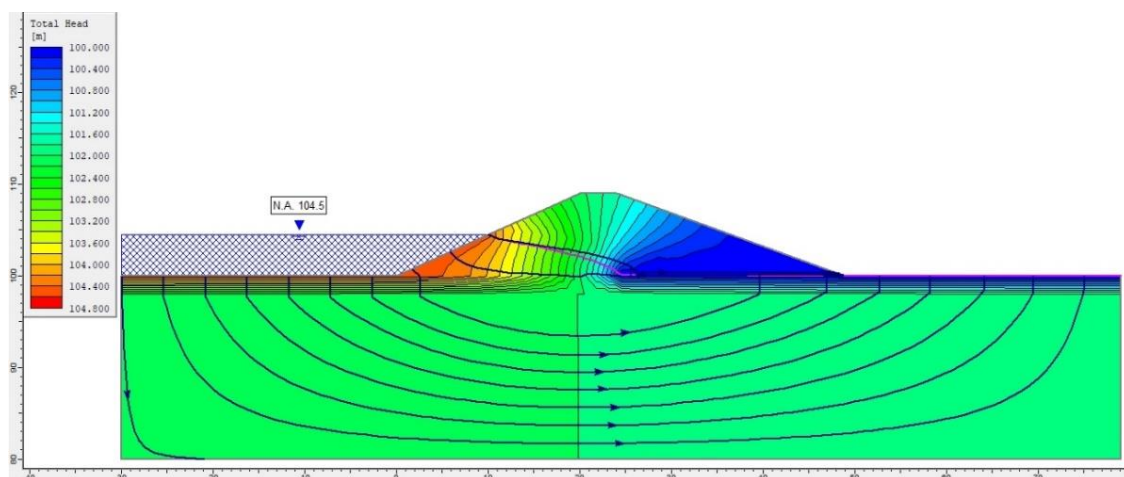
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.1.2 Caso II

No Caso II, foi avaliada a inclusão de um filtro horizontal para regular o fluxo de água, com as características detalhadas no item 3.9.2. As análises foram feitas considerando o nível de água normal (N.A.) de 104,5 metros e o nível de água máximo (N.A.) de 108 metros. Em ambas as condições, observou-se uma alteração na posição da linha freática em comparação com as mesmas situações no Caso I, resultando em mudanças nas cargas hidráulicas.

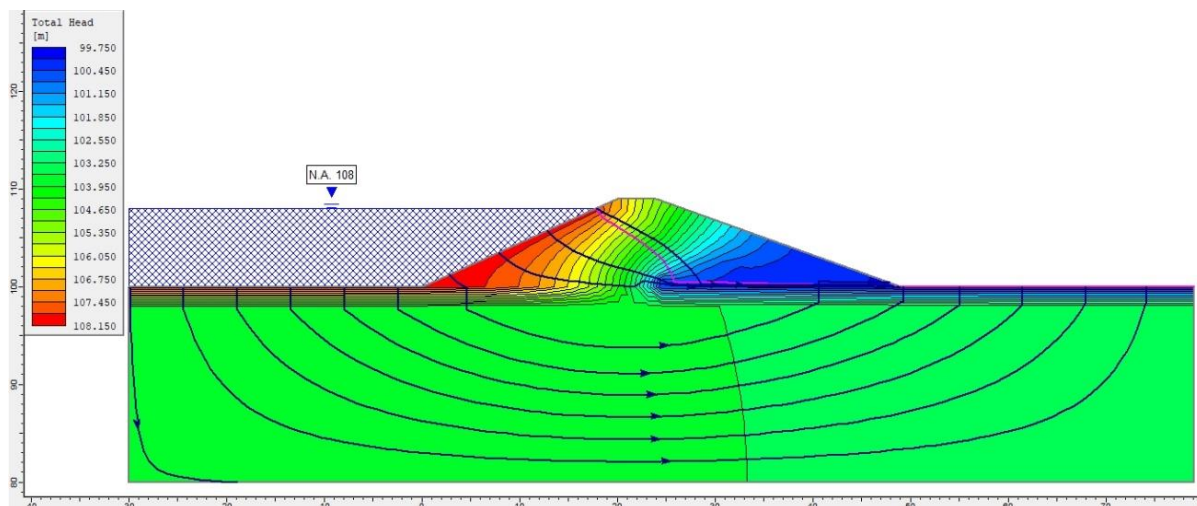
Observa-se, no Cenário I, que a cor azul escura, que indica as cargas mais baixas, começa no próprio pé do talude de jusante. Após a instalação do filtro horizontal, verificou-se uma redução nas cargas antes de atingirem a base de jusante. Essa variação pode ser visualizada nas Figuras 71 e 72, que exibem os valores das cargas hidráulicas para os níveis d'água normais e máximos, respectivamente.

Figura 71 – Cargas hidráulicas para o N.A. normal do Caso II.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

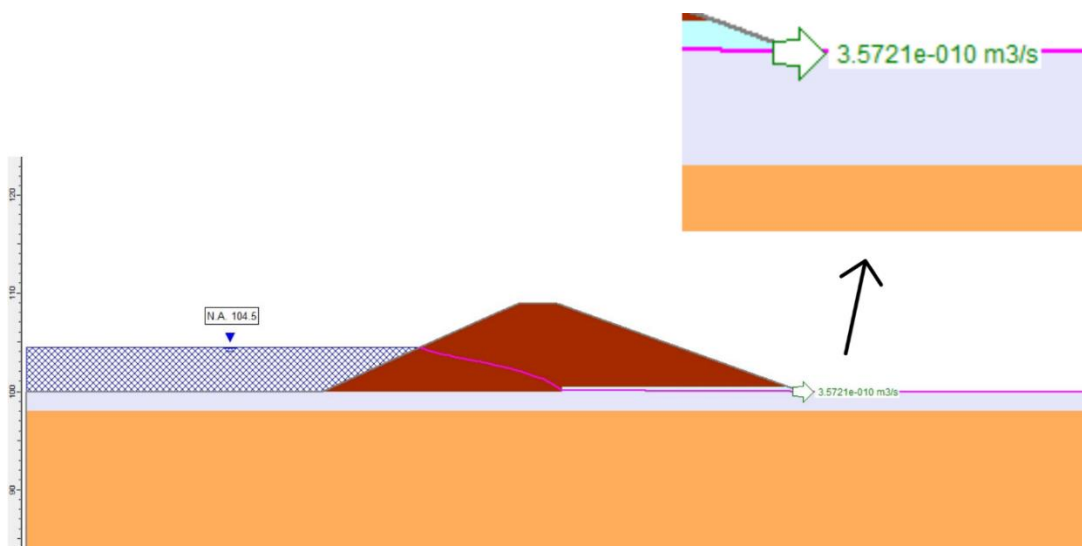
Figura 72 – Cargas hidráulicas para o N.A. máximo do Caso II.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

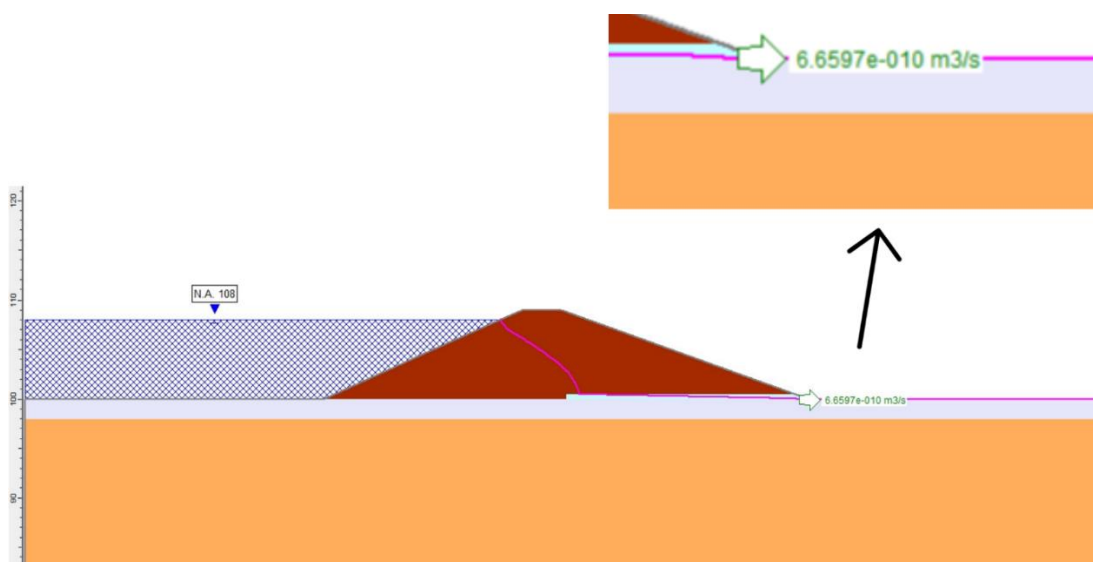
Os resultados das vazões estão ilustrados nas Figuras 73 e 74. Para o nível d'água (N.A.) normal, foi registrado um valor de 0,0000214 l/min/m, enquanto para o N.A. máximo, foi observado um valor de 0,00004 l/min/m. Com o uso do filtro horizontal, ambas as vazões demonstraram uma redução e continuaram abaixo das recomendações sugeridas.

Figura 73 – Vazão para o N.A. normal do Caso II.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 74 – Vazão para o N.A. máximo do Caso II.

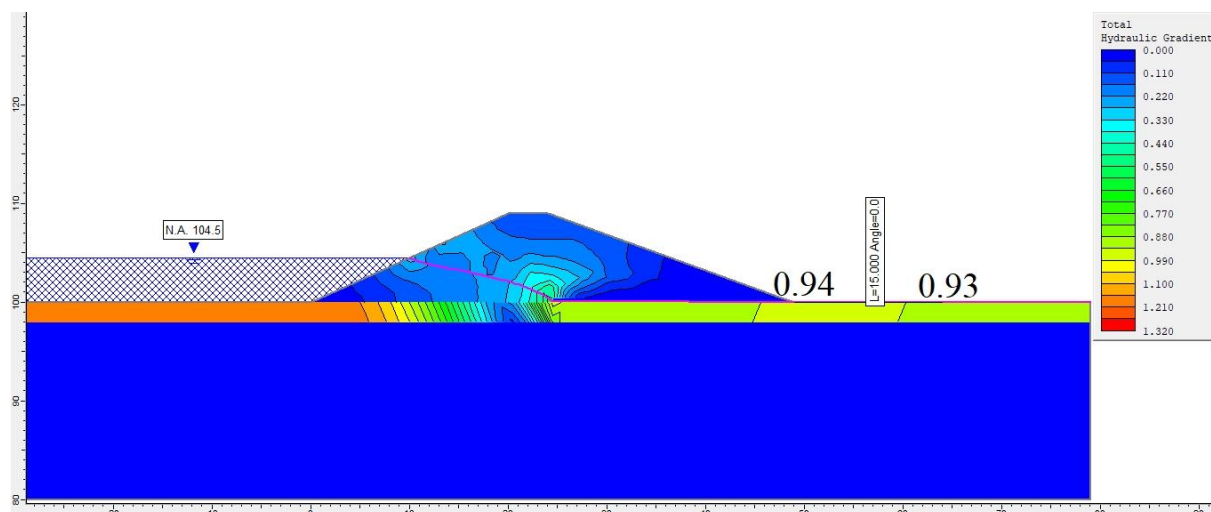


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Assim como no Caso I, os gradientes hidráulicos do Caso II continuaram superiores ao valor do gradiente de saída de 0,36, porém, neste caso, eles se apresentaram reduzidos. Isso acontece devido a presença do filtro horizontal, que permite uma percolação controlada da água

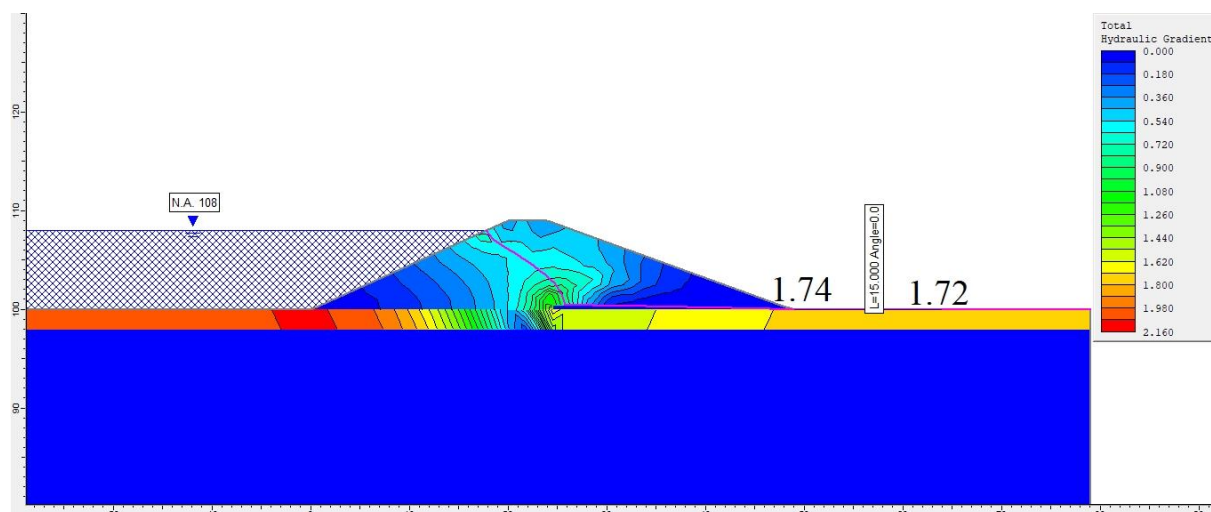
através dele. Isso resulta em um movimento gradual do fluxo, que atinge o pé do talude de jusante com uma pressão menor. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 75 e 76.

Figura 75 – Gradientes hidráulicos para o N.A. normal do Caso II.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 76 – Gradientes hidráulicos para o N.A. máximo do Caso II.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

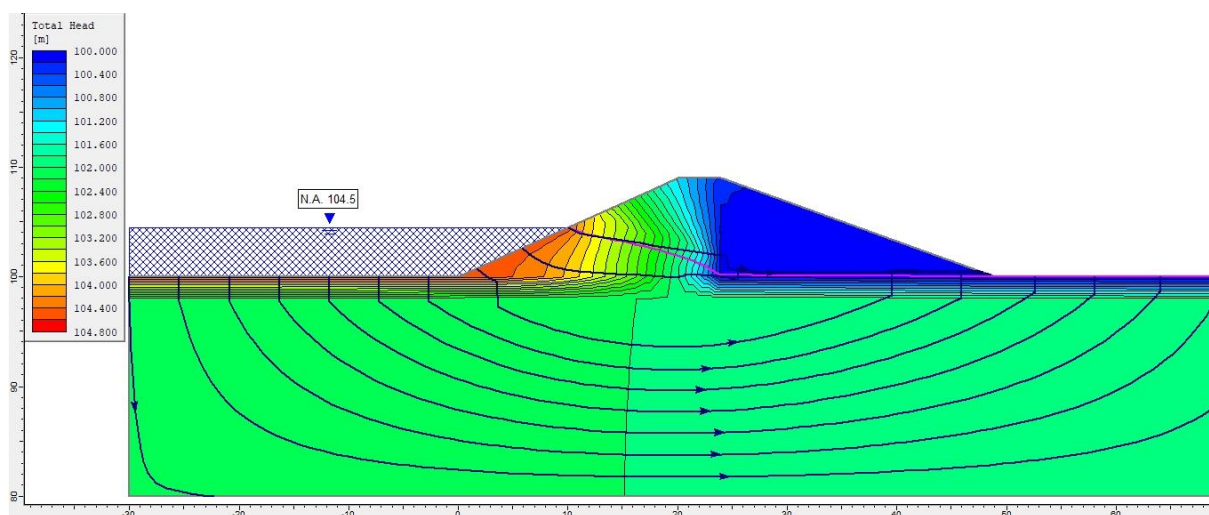
4.1.3 Caso III

O Caso III analisou o comportamento da barragem ao implementar um sistema de filtro composto por elemento vertical e horizontal, conforme detalhado na seção 3.9.3. Como este trabalho não se concentra no dimensionamento dos materiais utilizados no sistema de

drenagem, optou-se por empregar os mesmos materiais que compõem o filtro horizontal para formar a combinação com o filtro vertical. Assim, a escolha desse sistema tem como objetivo conferir à estrutura a capacidade de controlar o fluxo, prevenindo adversidades, como o potencial problema de erosão interna. As Figuras 77 e 78 apresentam os valores das cargas obtidas para este caso.

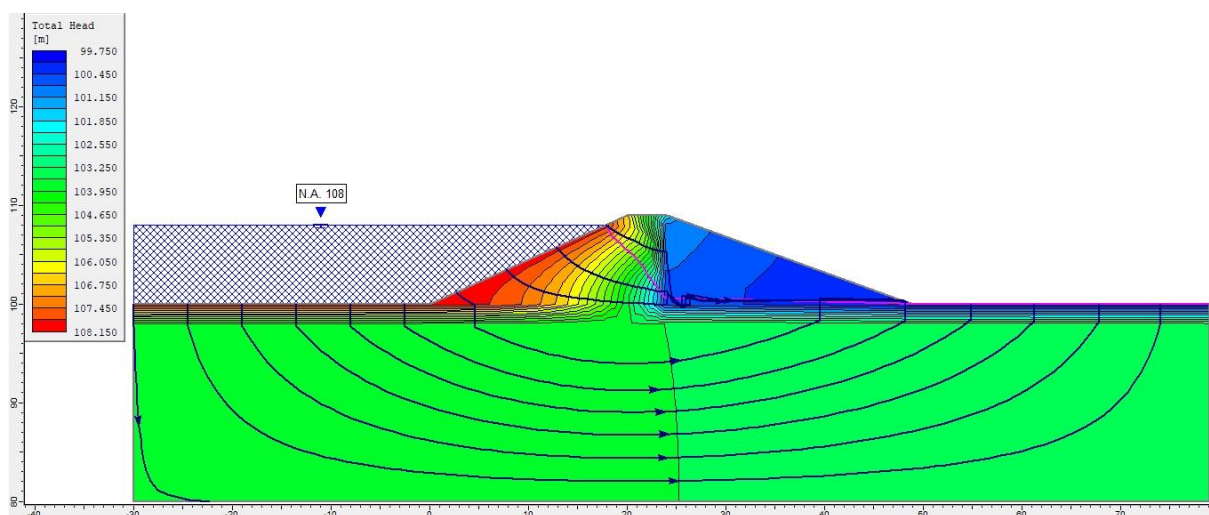
Observou-se que os resultados obtidos são semelhantes aos alcançados no Caso II, ou seja, o comportamento das cargas hidráulicas para a utilização do filtro horizontal combinado com o vertical foi parecido ao uso somente do filtro horizontal, com exceção do pequeno rebaixo que a linha freática sofreu no N.A. máximo com o incremento do filtro vertical.

Figura 77 – Cargas hidráulicas para o N.A. normal do Caso III.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

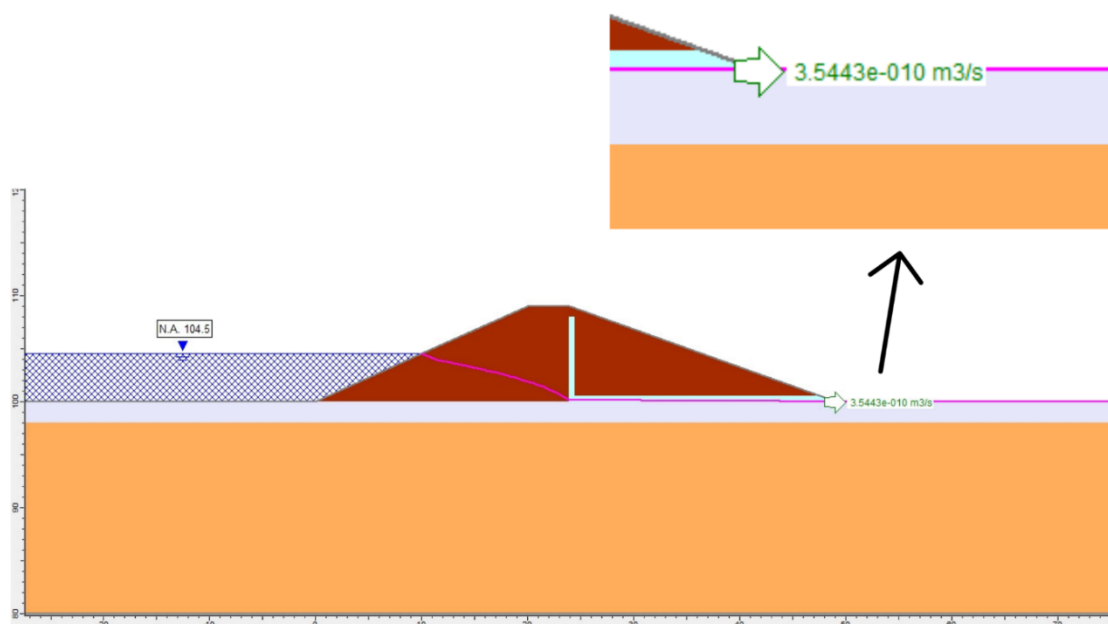
Figura 78 – Cargas hidráulicas para o N.A. máximo do Caso III.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

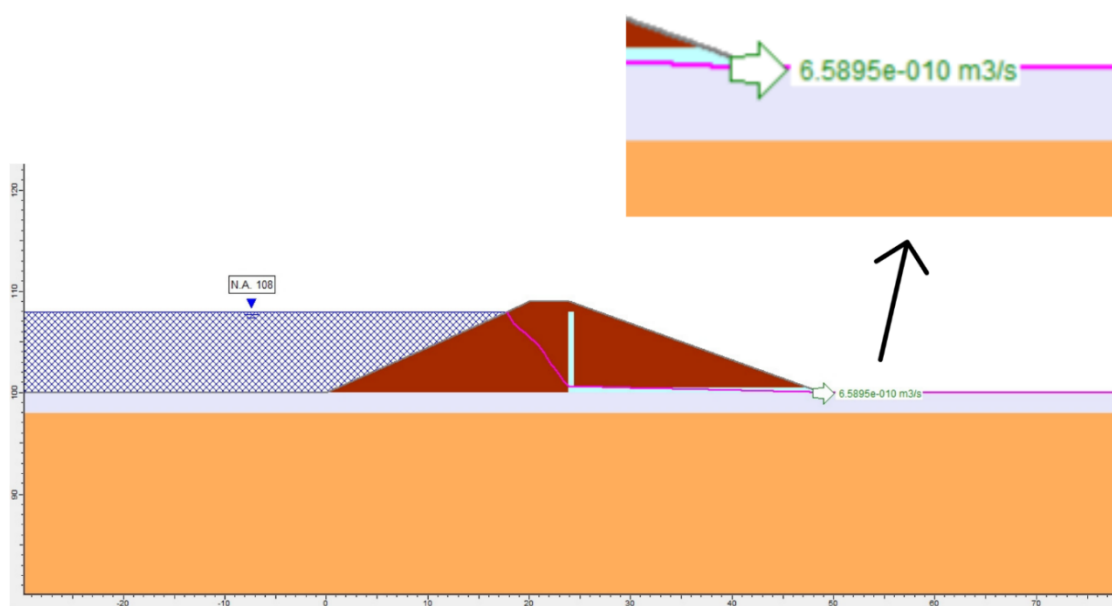
Nas Figuras 79 e 80, apresentam-se os resultados das vazões, com uma taxa de 0,0000212 l/min/m para o Nível de Água normal e 0,0000395 l/min/m para o Nível de Água máximo. Ao analisar esses dados, nota-se que as vazões obtidas no Caso III são inferiores as registradas nos Casos I e II.

Figura 79 – Vazão para o N.A. normal do Caso III.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

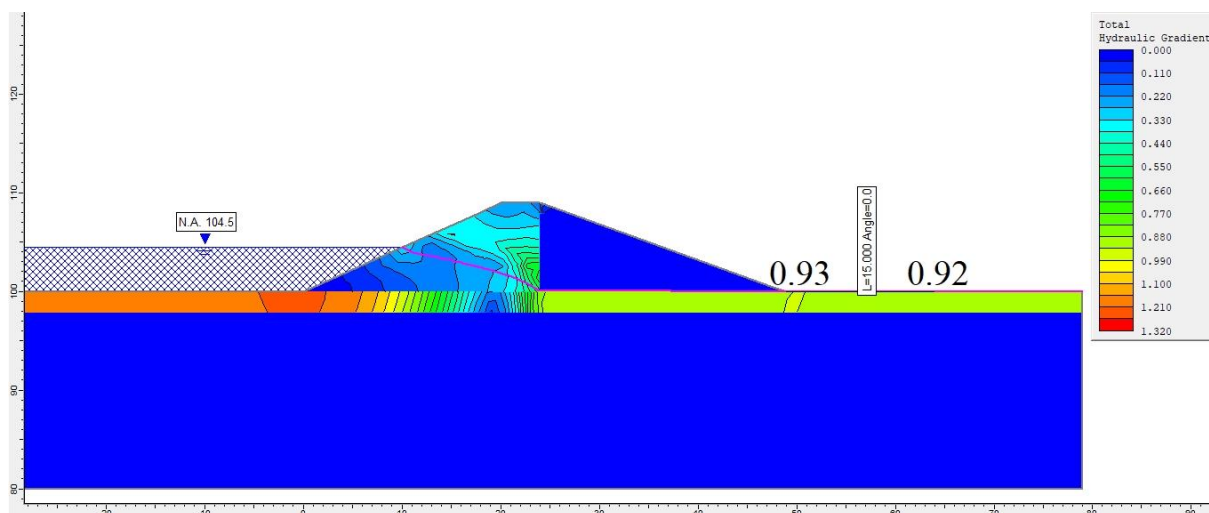
Figura 80 – Vazão para o N.A. máximo do Caso III.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

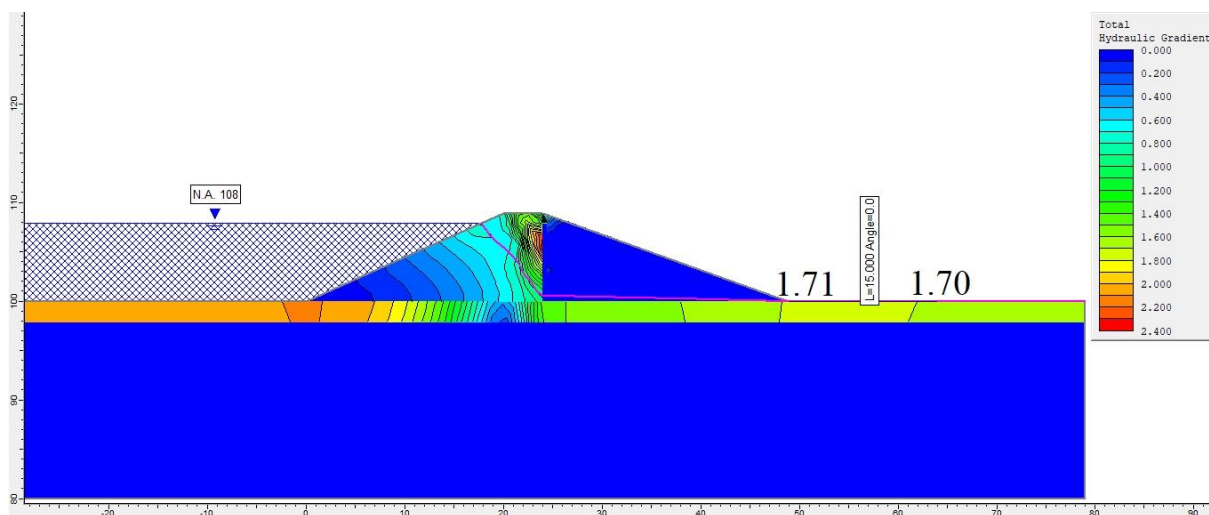
Os resultados dos gradientes hidráulicos de saída no Caso III (como mostrado nas Figuras 81 e 82) revelaram-se inferiores em comparação aos valores alcançados tanto no Caso I quanto no Caso II. Essa diminuição foi observada em relação a ambos os níveis de água e em ambas as posições de gradientes consideradas neste estudo. Embora houve redução nos valores, os mesmos ainda permaneceram acima do gradiente máximo de saída calculado.

Figura 81 – Gradientes hidráulicos para o N.A. normal do Caso III.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 82 – Gradientes hidráulicos para o N.A. máximo do Caso III.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.1.4 Resumo das análises de percolação

Este item apresenta a compilação de todos os resultados obtidos nas análises de percolação em tabelas, para melhor visualização e compreensão dos resultados que serão posteriormente comparados. Nos subitens de 4.1.4.1 a 4.1.4.3, encontram-se resumidos os resultados obtidos em cada um dos casos, enquanto o subitem 4.1.4.4 apresenta um resumo abrangente de todos os casos combinados, categorizados de acordo com o nível de água no reservatório. Isso visa a organização dos dados e facilita a identificação das tendências dos resultados em relação às diferentes condições de análise, permitindo uma visualização mais clara e precisa de cada cenário e condição de carga avaliada.

4.1.4.1 Resumo dos resultados do Caso I

A Tabela 17 apresenta o resumo dos resultados alcançados nas análises de percolação para o Caso I.

Tabela 17 – Resumo dos resultados obtidos nas análises de percolação – Caso I.

Parâmetro	Descrição	N.A. normal	N.A. máximo
Vazão	programa (m ³ /s)	5,94E-10	9,95E-10
	conversão (l/min)	0,0000356	0,0000597
Gradiente	pé de jusante	1,23	2,22
	15 m a jusante	1,26	2,25

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.1.4.2 Resumo dos resultados do Caso II

A Tabela 18 apresenta o resumo dos resultados alcançados nas análises de percolação para o Caso II.

Tabela 18 – Resumos dos resultados obtidos nas análises de percolação – Caso II.

Parâmetro	Descrição	N.A. normal	N.A. máximo
Vazão	programa (m ³ /s)	3,57E-10	6,66E-10
	conversão (l/min)	0,0000214	0,00004
Gradiente	pé de jusante	0,94	1,74
	15 m a jusante	0,93	1,72

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.1.4.3 Resumo dos resultados do Caso III

A Tabela 19 apresenta o resumo dos resultados alcançados nas análises de percolação para o Caso III.

Tabela 19 – Resumo dos resultados obtidos nas análises de percolação – Caso III.

Parâmetro	Descrição	N.A. normal	N.A. máximo
Vazão	programa (m ³ /s)	3,54E-10	6,59E-10
	conversão (l/min)	0,0000212	0,0000395
Gradiente	pé de jusante	0,93	1,71
	15 m a jusante	0,92	1,70

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.1.4.4 Resumo dos resultados por N.A.

Neste tópico apresenta-se a compilação organizada em tabelas dos resultados alcançados nos diferentes casos. Na Tabela 20, encontram-se os resultados das análises de percolação para o N.A normal, na cota de 104.5 m, enquanto na Tabela 21 estão registrados os resultados das análises para o N.A. máximo, na cota de 108 m.

Tabela 20 - Resultados obtidos nas análises de percolação para o N.A. normal.

Parâmetro	Descrição	Caso I	Caso II	Caso III
Vazão	programa (m ³ /s)	5,94E-10	3,57E-10	3,54E-10
	conversão (l/min)	0,0000356	0,0000214	0,0000212
Gradiente	pé de jusante	1,23	0,94	0,93
	15 m a jusante	1,26	0,93	0,92

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 21 – Resultados obtidos nas análises de percolação para o N.A. máximo.

Parâmetro	Descrição	Caso I	Caso II	Caso III
Vazão	programa (m ³ /s)	9,95E-10	6,66E-10	6,59E-10
	conversão (l/min)	0,0000597	0,00004	0,0000395
Gradiente	pé de jusante	2,22	1,74	1,71
	15 m a jusante	2,25	1,72	1,70

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

No que diz respeito aos resultados das vazões, todas apresentaram valores inferiores aos limites recomendados de até 5,0 l/min/m, e também abaixo do padrão comum de 1,0 l/min/m para barragens. O valor mínimo de vazão foi obtido quando se combinou o filtro horizontal com o filtro vertical no nível de água normal, registrando apenas 0,0000212 l/min/m. Por outro lado, o valor máximo de vazão foi observado no Caso I, durante a condição de regime permanente excepcional, alcançando 0,0000597 l/min/m.

Quanto aos gradientes hidráulicos, observa-se que houve uma redução nos valores com a implementação do sistema de drenagem nos Casos II e III, em comparação com o Caso I, que não possui nenhum dispositivo de drenagem. No entanto, em todos os casos, os valores ainda permaneceram acima do máximo recomendado de 0,36. Os Casos II e III apresentaram os valores mais baixos, com uma diferença pequena entre eles, principalmente quando se considera a operação normal. Por outro lado, os valores mais elevados foram registrados na condição de nível máximo de água no caso em que nenhum dispositivo de drenagem estava em uso.

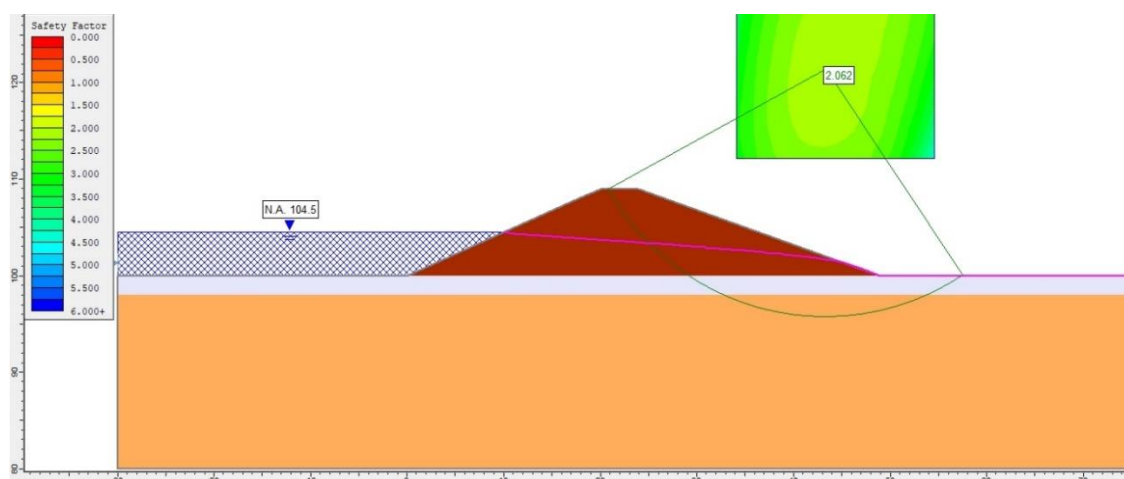
4.2 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

Foram realizadas análises de estabilidade também utilizando o *software* Slide, versão 5.0. Essas análises tiveram como objetivo calcular os fatores de segurança em dois estados distintos: o primeiro corresponde à operação normal do reservatório, com o nível de água mantido a 104,5 metros; o segundo refere-se à operação excepcional, com o nível de água elevado para 108 metros. Essa avaliação de estabilidade é fundamental para determinar a capacidade da estrutura em suportar as diversas cargas impostas pelo nível da água, proporcionando uma análise abrangente da segurança da barragem em cenários diversos.

4.2.1 Caso I

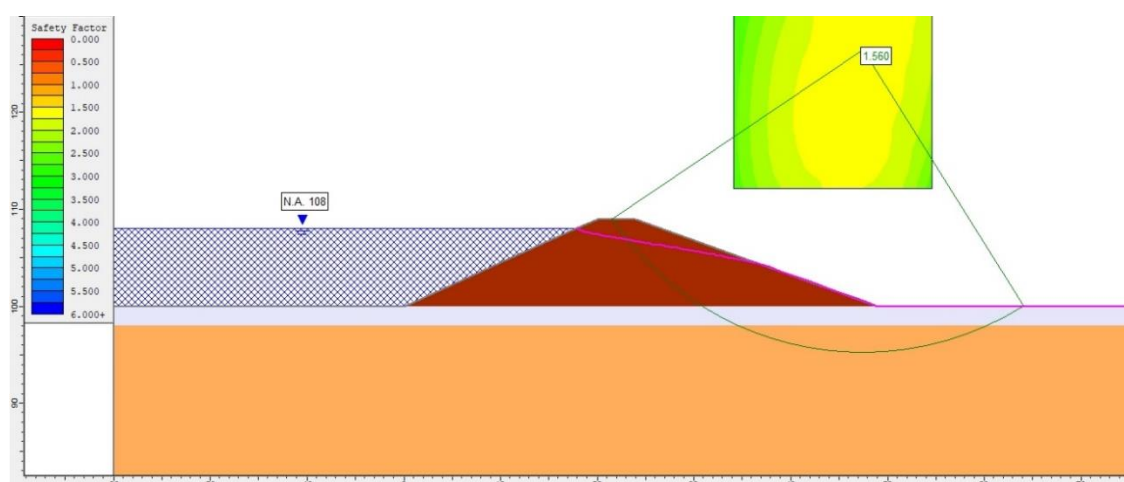
A Figura 83 e a Figura 84 exibem os fatores de segurança resultantes das análises de estabilidade de taludes para as situações de N.A. normal e N.A. excepcional, respectivamente. Na Tabela 16, presente no item 3.10, foram estabelecidos os valores mínimos de fator de segurança para cada condição de carregamento, com 1,5 sendo o mínimo para operação em regime normal e 1,3 para operação em regime excepcional. É importante observar que o valor calculado para o N.A. normal foi de 2,062, enquanto para o N.A. excepcional foi de 1,560. Ambos os valores superam as recomendações mínimas estabelecidas para suas respectivas condições de aplicação.

Figura 83 – Fator de segurança para o N.A. normal do Caso I.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 84 – Fator de segurança para o N.A. máximo do Caso I.



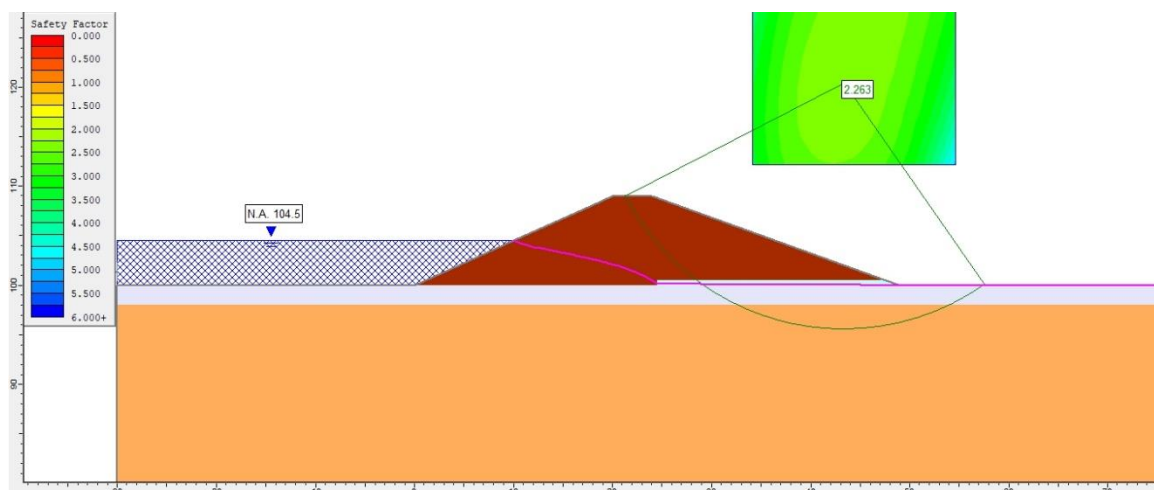
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.2.2 Caso II

Observou-se um aumento nos fatores de segurança ao comparar o Caso I e o Caso II em ambas as condições de carregamento. No cenário de carga normal, os valores passaram de 2,062 para 2,263, enquanto no caso de carga máxima, eles aumentaram de 1,560 para 1,929. É importante destacar que esses valores permaneceram acima do mínimo recomendado. Esse aumento nos fatores de segurança é atribuído às modificações introduzidas no Caso II, que resultaram na mudança da posição da linha freática. Essa alteração contribuiu significativamente para a melhoria da estabilidade da estrutura e este aumento nos fatores de

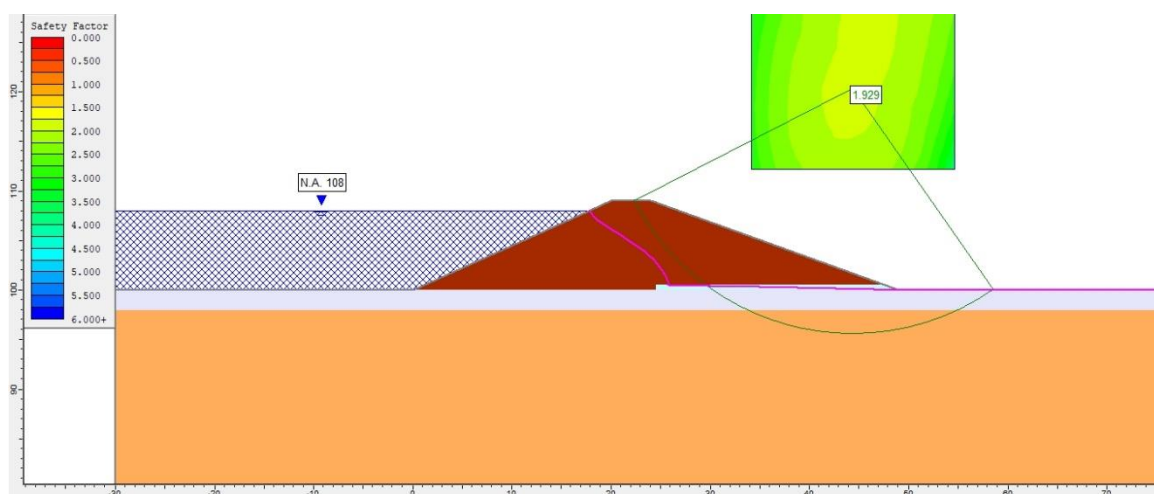
segurança em relação ao Caso I é uma evidência sólida de que a estrutura se tornou mais segura em termos de estabilidade. Os resultados detalhados estão ilustrados nas Figuras 85 e 86.

Figura 85 – Fator de segurança para o N.A. normal do Caso II.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 86 – Fator de segurança para o N.A. máximo do Caso II.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

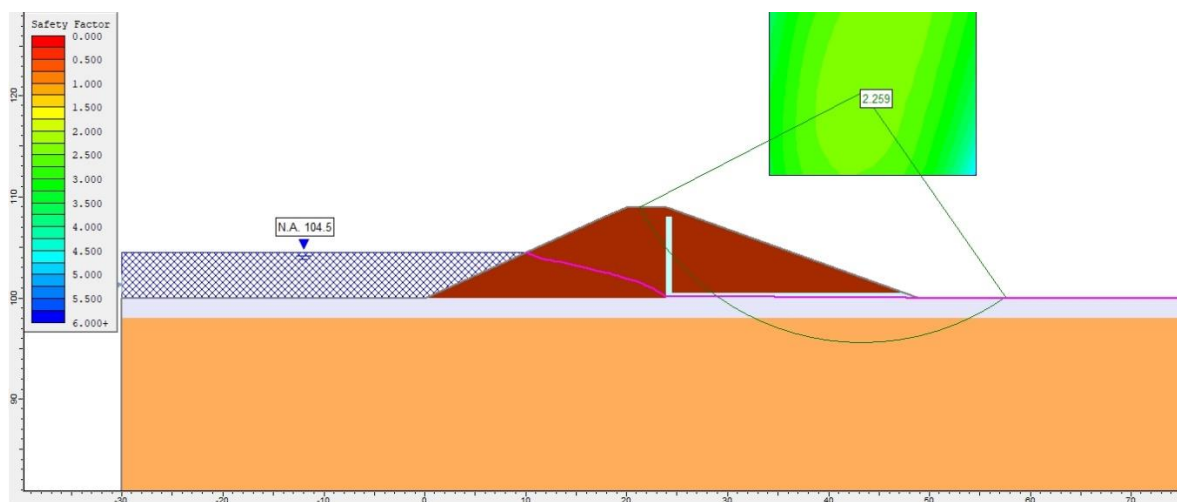
4.2.3 Caso III

Comparando o Caso III com o Caso I, observa-se uma melhora significativa na estabilidade. Isso se deve à redução nos gradientes hidráulicos, resultante da introdução do sistema de drenagem. Para a condição de carga normal do Caso I, o fator de segurança aumentou de 2,062 para 2,259 no Caso III. No caso de carga excepcional, passou de 1,560 (Caso I) para

1,921 (Caso III). Portanto, em comparação com o Caso I, os valores dos fatores de segurança aumentaram, mantendo-se acima dos valores mínimos recomendados.

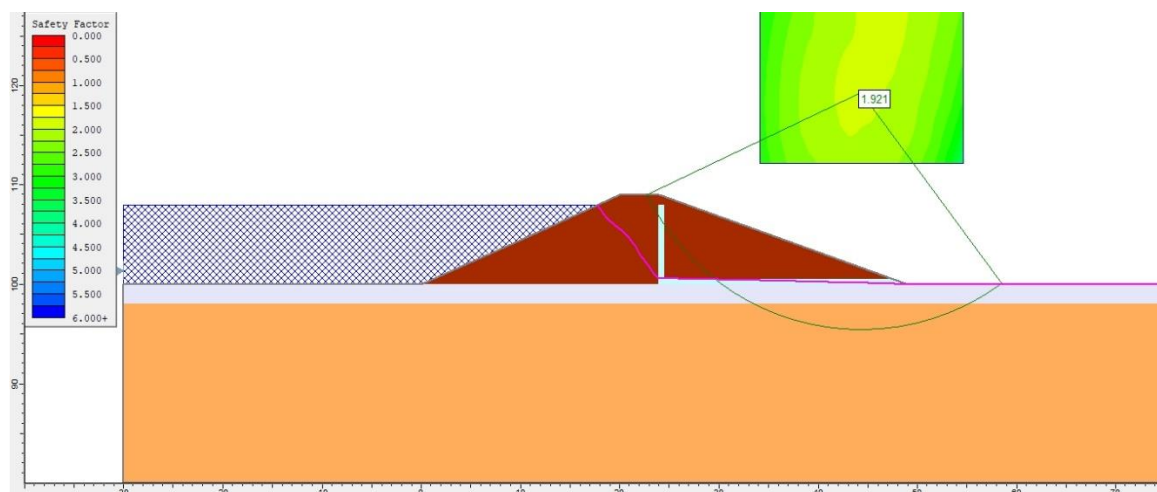
Por outro lado, quando comparado ao Caso II, o Caso III apresentou resultados ligeiramente menores. No regime normal, o fator de segurança passou de 2,263 (Caso II) para 2,259 (Caso III), e no regime excepcional, passou de 1,929 (Caso II) para 1,921 (Caso III). Essa redução em relação ao Caso II também pode ser atribuída ao gradiente hidráulico, uma vez que os valores do gradiente hidráulico no pé do talude de jusante e a 15 metros desse ponto foram próximos tanto para a implantação do filtro horizontal no Caso II quanto para a combinação do filtro horizontal com o vertical no Caso III. Os valores dos fatores de segurança para as análises de estabilidade do Caso III estão representados nas Figuras 87 e 88.

Figura 87 – Fator de segurança para o N.A. normal do Caso III.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 88 – Fator de segurança para o N.A. máximo do Caso III.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.2.4 Resumo das análises de estabilidade

Este tópico apresenta a organização dos resultados obtidos nas análises de estabilidade em tabelas. Nos subitens 4.2.4.1 a 4.2.4.3 estão o resumo dos resultados atingidos em cada caso específico e no subitem 4.2.4.4 está o resumo dos resultados de todos os casos juntos, separado em relação ao nível de água do reservatório. Esse enfoque visa aprimorar a identificação das tendências e comportamentos individuais dos resultados, levando em consideração as diferentes configurações de casos e condições de carga analisadas.

4.2.4.1 *Resumo dos resultados do Caso I*

A Tabela 22 apresenta o resumo dos resultados alcançados nas análises de estabilidade para o Caso I.

Tabela 22 – Resultados obtidos nas análises de estabilidade – Caso I.

Solicitação	Talude	FS mínimo	FS obtido
Regime normal	Jusante	1,5	2,062
Regime excepcional	Jusante	1,3	1,560

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.2.4.2 *Resumo dos resultados do Caso II*

A Tabela 23 apresenta o resumo dos resultados alcançados nas análises de estabilidade para o Caso II.

Tabela 23 – Resultados obtidos nas análises de estabilidade – Caso II.

Solicitação	Talude	FS mínimo	FS obtido
Regime normal	Jusante	1,5	2,263
Regime excepcional	Jusante	1,3	1,929

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.2.4.3 *Resumo dos resultados do Caso III*

A Tabela 24 apresenta o resumo dos resultados alcançados nas análises de estabilidade para o Caso III.

Tabela 24 – Resultados obtidos nas análises de estabilidade – Caso III.

Solicitação	Talude	FS mínimo	FS obtido
Regime normal	Jusante	1,5	2,259
Regime excepcional	Jusante	1,3	1,921

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.2.4.4 Resumo dos resultados por N.A.

Neste tópico encontra-se a compilação em tabelas dos resultados obtidos nos casos, sendo que na Tabela 25 estão reunidos os resultados das análises de estabilidade para o N.A normal na cota de 104.5 m e na Tabela 26, os resultados das análises de estabilidade para o N.A. máximo na cota de 108 m.

Tabela 25 – Resultados obtidos nas análises de estabilidade para o N.A. normal.

Situação	Talude	FS mínimo	FS obtido
Caso I	Jusante	1,5	2,062
Caso II	Jusante	1,5	2,263
Caso III	Jusante	1,5	2,259

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 26 – Resultados obtidos nas análises de estabilidade para o N.A. máximo.

Situação	Talude	FS mínimo	FS obtido
Caso I	Jusante	1,3	1,560
Caso II	Jusante	1,3	1,929
Caso III	Jusante	1,3	1,921

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Nota-se que tanto para o nível de água normal quanto para o nível de água máximo, todos os casos apresentaram valores acima do mínimo recomendado para cada regime de operação. Os valores do Caso II e Caso III, tanto para o N.A. normal quanto para o N.A. máximo foram valores próximos, sendo os valores do Caso II um pouco superior aos do Caso III, por isso os resultados obtidos no Caso II foram os maiores dentre os três casos.

Em comparação com o Caso I, tanto o Caso II quanto o Caso III apresentaram um aumento nos seus níveis de segurança devido à implementação do sistema de drenagem em ambos os casos. Isso resultou em alterações nos gradientes hidráulicos, que, embora ainda permanecessem acima do limite máximo permitido para a barragem, mostraram uma redução significativa com a introdução dos sistemas de drenagem. Portanto, em termos de estabilidade, todos os casos exibiram um comportamento adequado. No entanto, em relação à percolação, a situação é diferente, uma vez que os casos ainda apresentaram gradientes acima do limite máximo permitido. Isso sugere uma preocupação com a estabilidade da estrutura.

Assim, é importante destacar que a segurança de uma barragem não pode ser determinada exclusivamente com base nos valores dos fatores de segurança. Ter fatores de segurança acima dos mínimos exigidos não garante necessariamente a segurança da estrutura, uma vez que a segurança de uma barragem depende de uma variedade de fatores complexos.

4.3 CÁLCULO E COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA

Os resultados das análises de percolação e estabilidade serão usados para calcular e comparar a eficiência dos parâmetros de percolação (vazão e gradiente hidráulico). O objetivo é avaliar a eficácia de cada sistema de drenagem em comparação com a ausência de qualquer dispositivo de drenagem na barragem. Além disso, serão comparados os valores dos fatores de segurança em cada caso para identificar a solução mais eficiente.

A equação usada para o cálculo da eficiência da vazão foi a Equação 10 e para o cálculo da eficiência do gradiente hidráulico foi a Equação 11, ambas explicadas no item 3.10 deste trabalho. Em relação ao parâmetro de estabilidade (fator de segurança), esses serão comparados diretamente entre os casos. A Tabela 27 apresenta as porcentagens de eficiência da vazão de percolação e do gradiente hidráulico dos Casos II e III em comparação com o Caso I, considerando o N.A. normal. Enquanto isso, a Tabela 28 mostra as eficiências correspondentes para o N.A. máximo.

Tabela 27 – Eficiência da vazão e gradiente hidráulico para o N.A. normal.

Parâmetro	Descrição	Eficiência Caso II %	Eficiência Caso III %
Vazão	l/min/m	39,9	40,4
Gradiente hidráulico	pé de jusante	23,6	24,4
	15 m a jusante	26,2	27,0

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 28 – Eficiência da vazão e gradiente hidráulico para o N.A. máximo.

Parâmetro	Descrição	Eficiência Caso II %	Eficiência Caso III %
Vazão	l/min/m	33,0	33,8
Gradiente hidráulico	pé de jusante	21,6	23,0
	15 m a jusante	23,6	24,4

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Com base nos resultados obtidos, é evidente que o Caso III, que emprega a combinação de filtros horizontais e verticais, demonstrou uma eficiência significativamente superior em comparação com a utilização exclusiva do filtro horizontal (Caso II). Essa superioridade foi observada tanto em condições de nível de água normal quanto no nível máximo, abrangendo tanto a vazão quanto os gradientes hidráulicos em dois pontos distintos. A eficiência máxima alcançada foi de 40,4%, representando uma redução notável na vazão em condições de nível de água normal no Caso III. Por outro lado, a eficiência mínima, de 21,6%, foi registrada em relação à diminuição do gradiente hidráulico no pé do talude de jusante durante o nível de água máximo.

É relevante destacar que todos os fatores de segurança obtidos superaram as recomendações mínimas, o que confirma a segurança do sistema avaliado. Portanto, a alternativa preferencial é a adoção do sistema de drenagem composto pela combinação de filtros, uma vez que demonstrou o melhor desempenho quando comparado com o outro método de drenagem testado. Assim, esse sistema, com as características mencionadas anteriormente, será a escolha para dar continuidade às análises de eficiência visando aprimorar ainda mais os resultados na implementação do sistema de vedação.

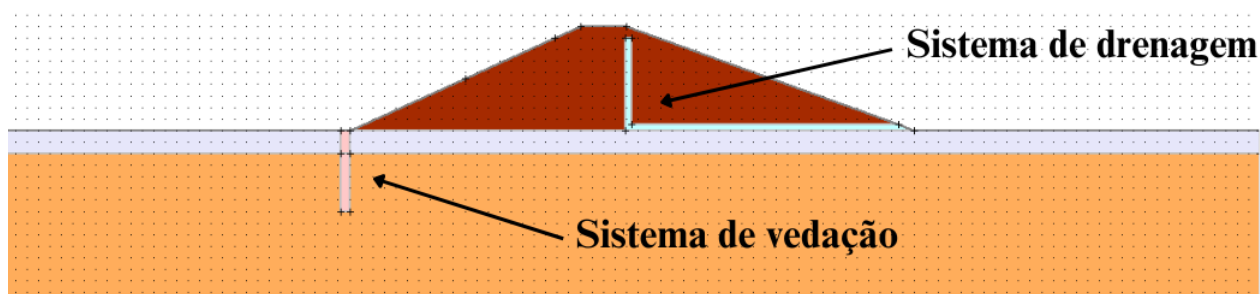
4.4 MELHORIA COM SISTEMA DE VEDAÇÃO

4.4.1 Parede diafragma

Em conformidade com o item 3.11, está planejada a instalação de uma parede diafragma na barragem, integrando-se ao sistema de drenagem. O objetivo é controlar o fluxo de água na fundação, reduzindo gradientes hidráulicos que excedem os valores calculados. O sistema de vedação será utilizado para complementar o sistema de drenagem, visando melhorar a segurança e o funcionamento da estrutura. A integração eficaz desses sistemas desempenha um

papel crucial no controle e gerenciamento do fluxo de água ao redor da estrutura, conforme ilustrado na Figura 89.

Figura 89 – Parede diafragma em conjunto com sistema de drenagem.

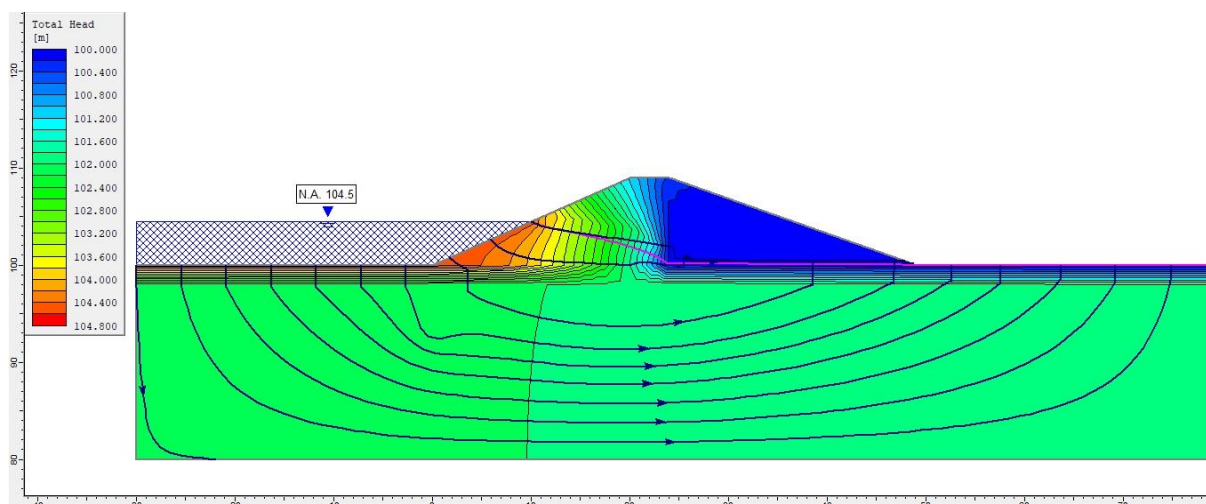


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.4.1.1 Percolação

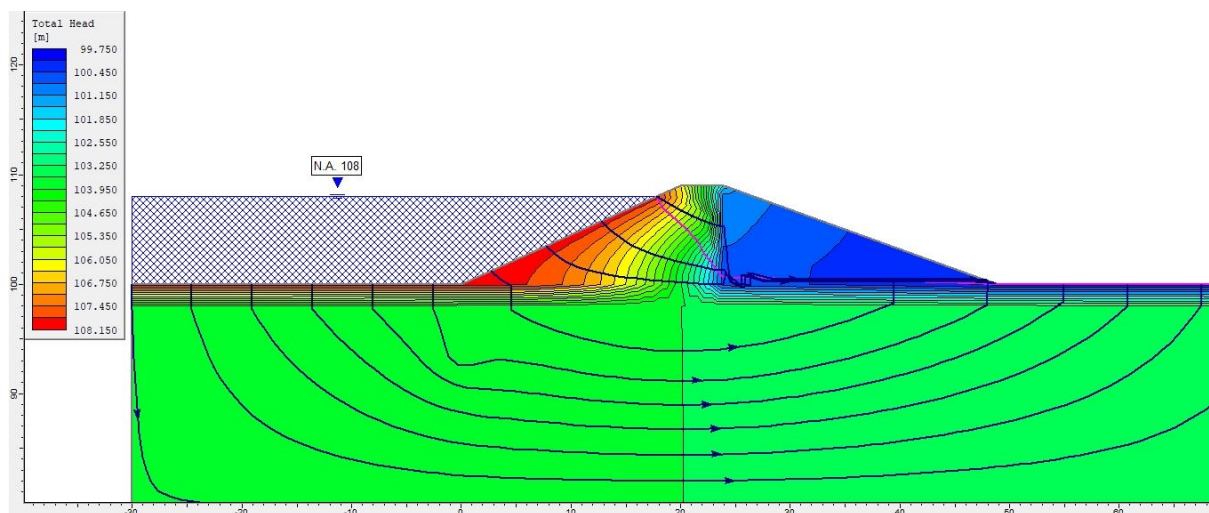
A utilização da parede diafragma na fundação permeável tem o objetivo de controlar o comportamento hidráulico da barragem, pois atua como uma barreira vertical que regula o fluxo de água, restringindo sua movimentação. Esse efeito é evidenciado nas Figuras 90 e 91, que apresentam variações nos valores das cargas hidráulicas. Notavelmente, as linhas de fluxo demonstram um abaixamento na região adjacente à parede diafragma para ambos os níveis de água (N.A. normal e máximo), induzindo a água a percorrer um caminho mais extenso, o que, por consequência, resulta na diminuição dos valores das cargas hidráulicas na área da fundação à medida que se aproxima do lado jusante da seção.

Figura 90 – Cargas hidráulicas para o N.A. normal – Parede diafragma + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

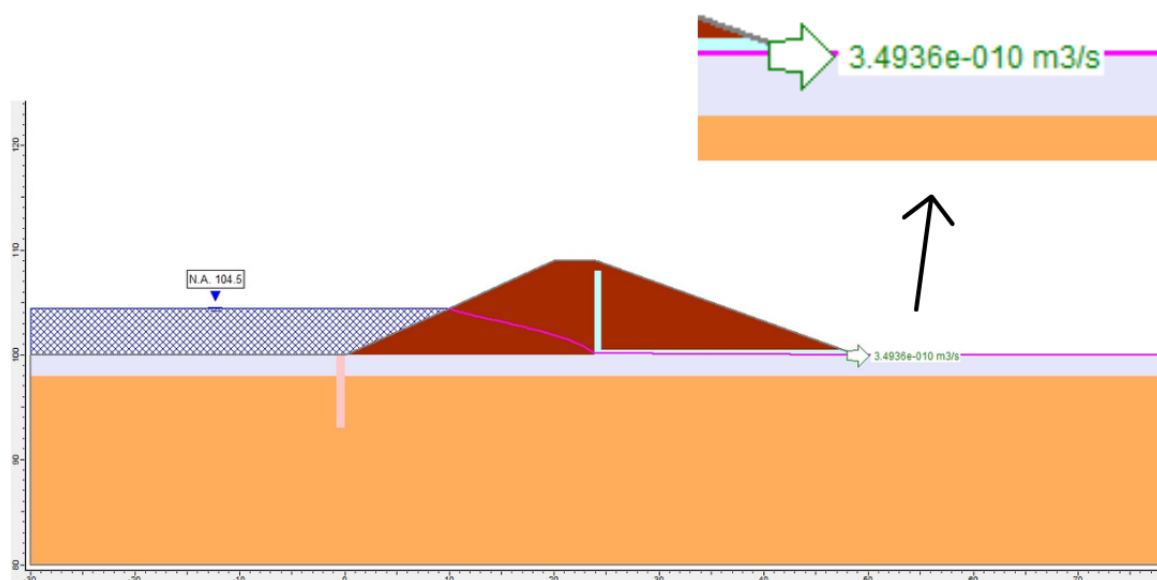
Figura 91 – Cargas hidráulicas para o N.A. máximo – Parede diafragma + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

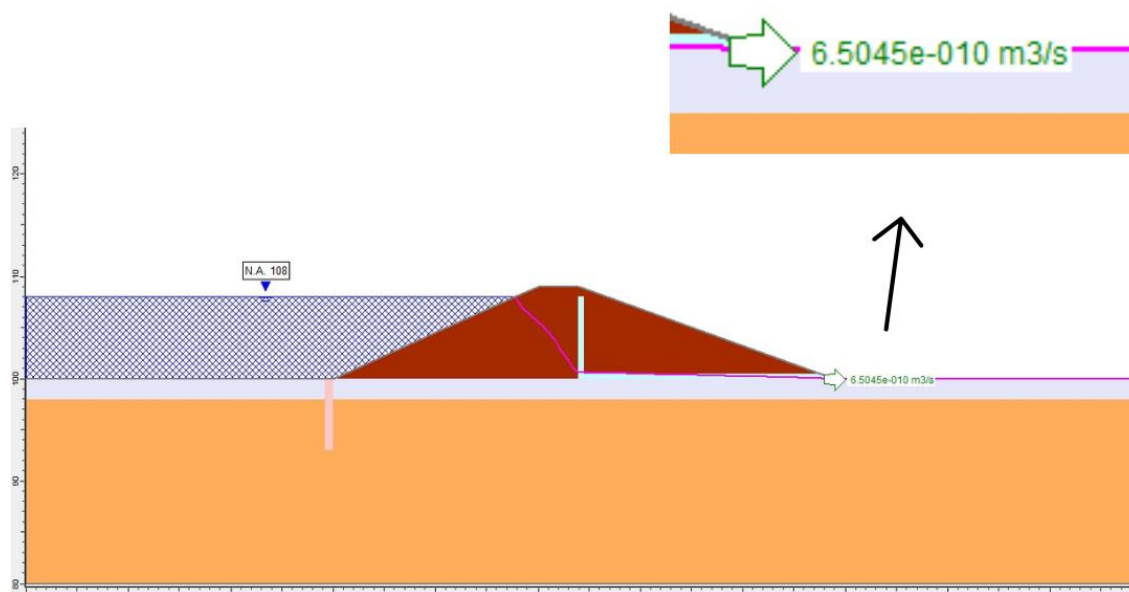
Os dados das vazões estão retratados nas Figuras 92 e 93. Para o N.A. normal, foi registrado um valor de 0,0000209 l/min/m, ao passo que para o N.A. máximo observou-se um valor de 0,0000390 l/min/m. Com a implementação do sistema de vedação, houve uma pequena diminuição nos valores de vazão em comparação com o Caso III, no qual apenas o sistema de drenagem é utilizado.

Figura 92 – Vazão para o N.A. normal – Parede diafragma + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

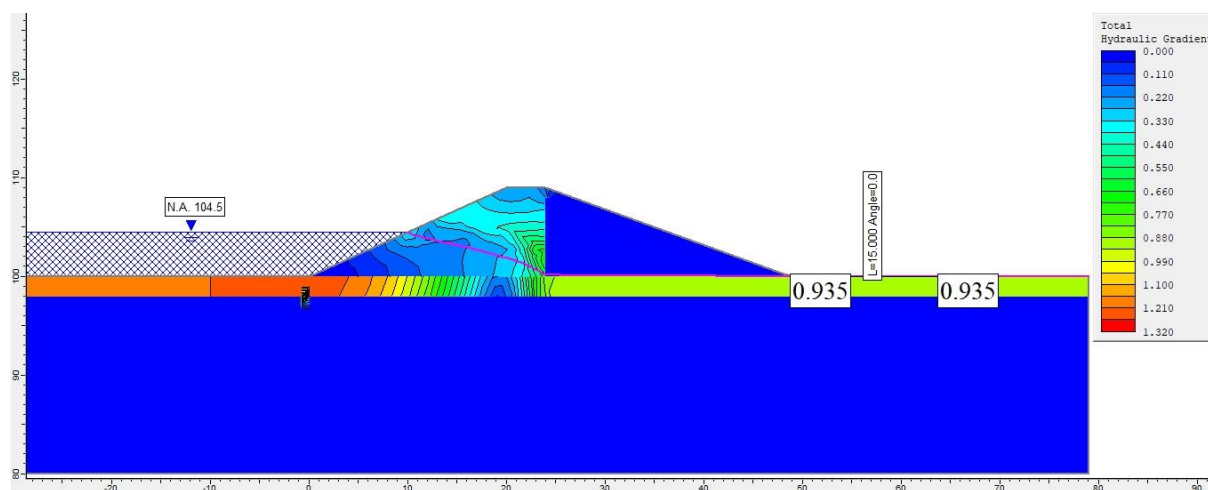
Figura 93 – Vazão para o N.A. máximo – Parede diafragma + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

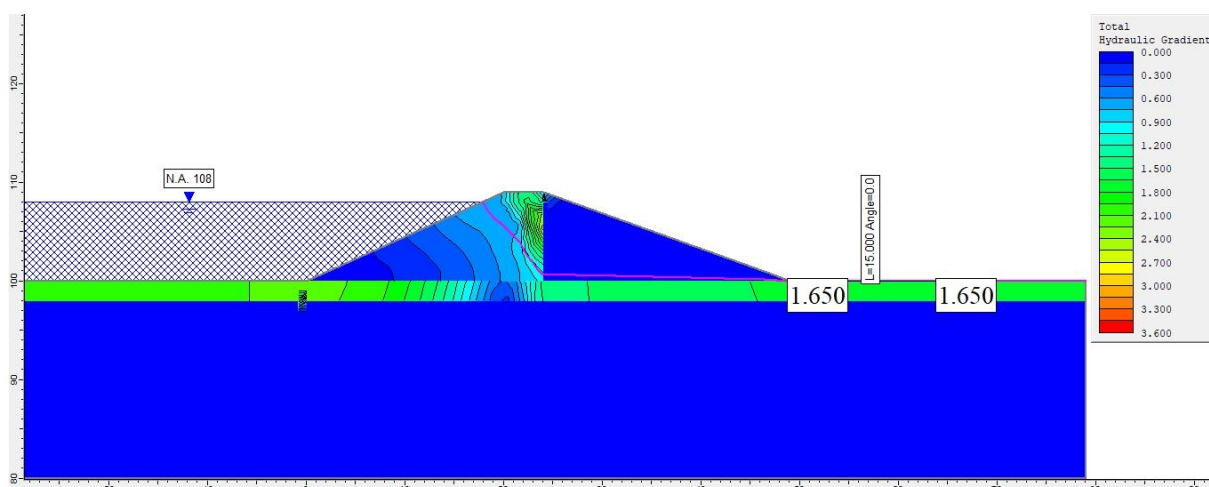
No que diz respeito aos gradientes hidráulicos ilustrados nas Figuras 94 e 95, nota-se que os valores obtidos foram de 0,93 no pé do talude e 0,93 a 15 metros para o nível de água normal, enquanto atingiram 1,65 no pé do talude e 1,65 a 15 metros para o nível de água máximo. Assim, observa-se que houve uma redução no gradiente hidráulico em comparação com o Caso III, para o N.A. máximo. No entanto, essa combinação de sistemas não foi capaz de reduzir os gradientes a ponto de os valores ficarem abaixo do máximo calculado para o gradiente de saída.

Figura 94 – Gradientes hidráulicos para N.A. normal – Parede diafragma + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 95 – Gradientes hidráulicos para N.A. máximo – Parede diafragma + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Na Tabela 29, estão apresentados os resultados das análises de percolação para o N.A normal, na elevação de 104.5 m, ao passo que na Tabela 30, estão registrados os resultados das análises para o N.A. máximo, na cota de 108 m.

Tabela 29 – Resultados para percolação - N.A. normal.

Parâmetro	Descrição	Drenagem + Vedação
Vazão	programa (m³/s)	3,49E-10
	conversão (l/min)	0,0000209
Gradiente	pé de jusante	0,93
	15 m a jusante	0,93

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 30 – Resultados para percolação - N.A. máximo.

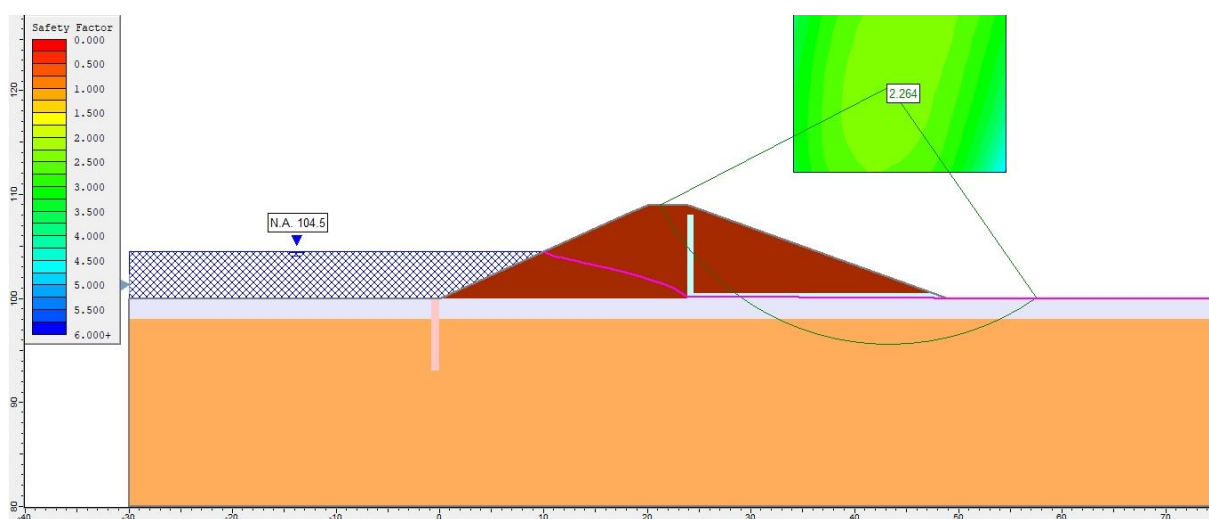
Parâmetro	Descrição	Drenagem + Vedação
Vazão	programa (m³/s)	6,50E-10
	conversão (l/min)	0,0000390
Gradiente	pé de jusante	1,65
	15 m a jusante	1,65

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.4.1.2 Estabilidade

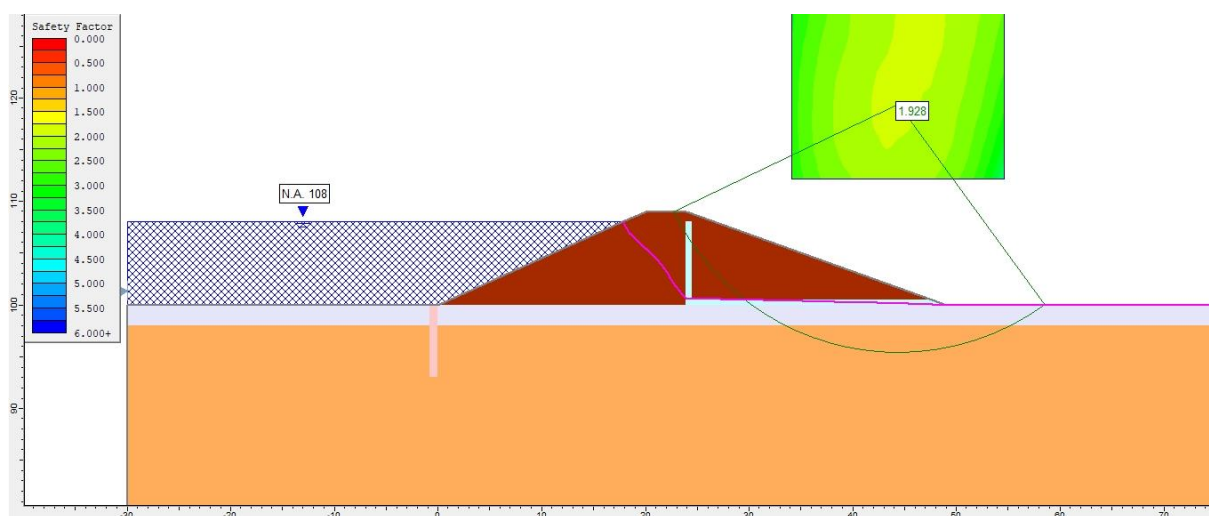
As Figuras 96 e 97 apresentam os fatores de segurança resultantes das análises de estabilidade de taludes, considerando a implementação do sistema de vedação (parede diafragma) para os níveis d'água normal e excepcional, respectivamente. A presença da parede diafragma, ao controlar o fluxo de água e reduzir gradientes hidráulicos, resulta em fatores de segurança superiores, sendo inferior apenas ao Caso II para o nível de água máximo. Essa melhoria é crucial para prevenir problemas como erosão na fundação e deslizamentos de terra, contribuindo assim para a robustez e estabilidade global da barragem.

Figura 96 – Fator de segurança para o N.A. normal – Parede diafragma + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 97 – Fator de segurança para o N.A. máximo – Parede diafragma + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Na Tabela 31 estão apresentados os resultados das análises de estabilidade para o N.A. normal, na elevação de 104.5 m e N.A. máximo, na cota de 108 m, para o caso em que o sistema de drenagem é usado em conjunto com o sistema de vedação (parede diafragma).

Tabela 31 – Resultados para estabilidade - N.A. normal e N.A. máximo.

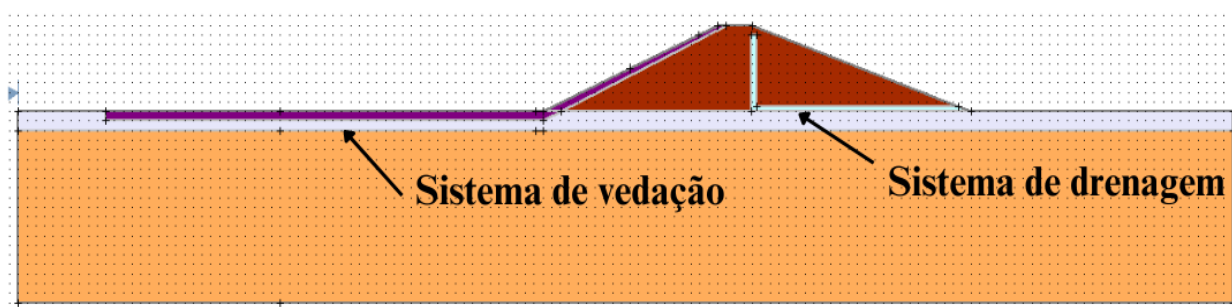
Solicitação	Talude	FS mínimo	FS obtido
Regime normal	Jusante	1,5	2,264
Regime excepcional	Jusante	1,3	1,928

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.4.2 Tapete impermeável à montante

Conforme estabelecido no item 3.11, está prevista a simulação de um segundo elemento de vedação, representado pelo tapete impermeável à montante. Essa análise tem o propósito de avaliar os efeitos na percolação e estabilidade quando a barragem incorpora um dispositivo que amplia o caminho de percolação, com o intuito de reduzir os valores dos gradientes hidráulicos. A integração do tapete impermeável com o sistema de drenagem busca uma gestão controlada do fluxo hídrico ao redor da barragem. O sistema de drenagem coleta a água na base da barragem, evitando infiltração prejudicial e o acúmulo excessivo de pressão hidráulica na fundação, promovendo a estabilidade global da estrutura. A Figura 98 apresenta o sistema de drenagem escolhido em conjunto com o tapete impermeável à montante.

Figura 98 – Tapete impermeável em conjunto com sistema de drenagem.

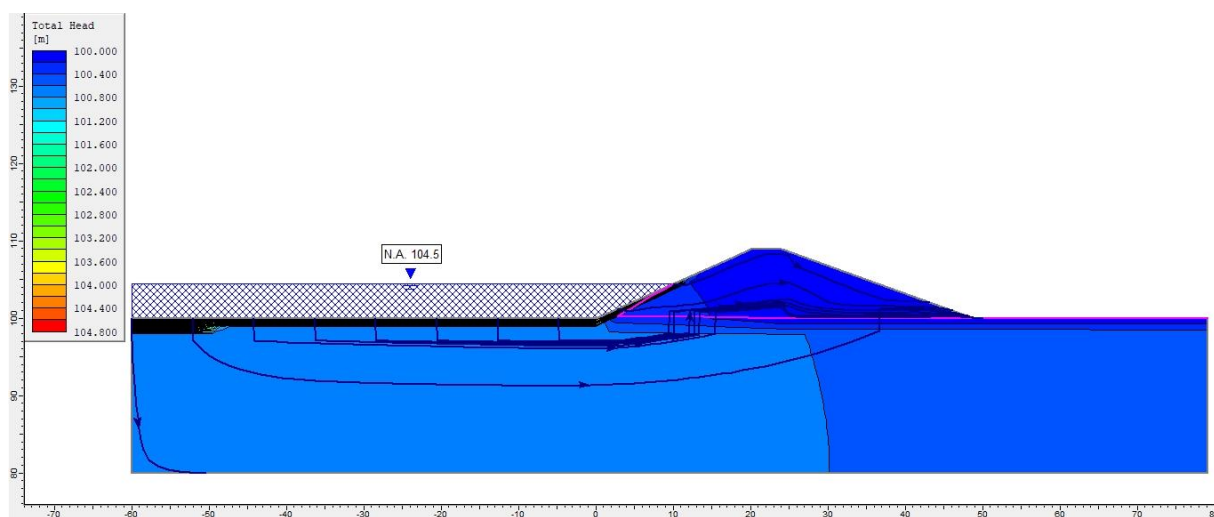


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.4.2.1 Percolação

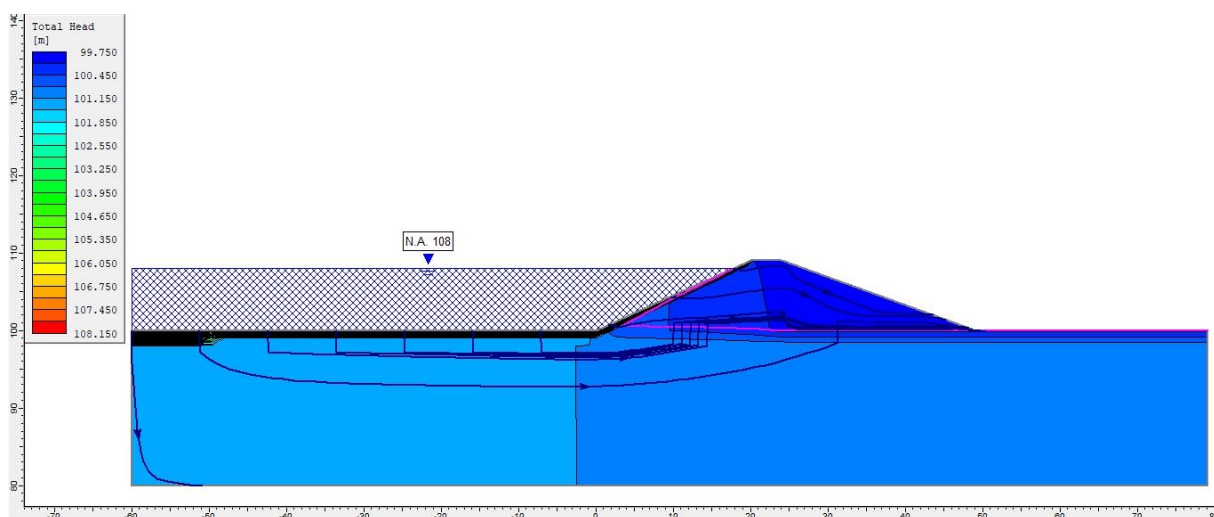
As cargas totais foram analisadas no N.A. normal, conforme mostrado na Figura 99, e no N.A. máximo, como apresentado na Figura 100. Observa-se que o tapete impermeável foi eficaz em rebaixar a linha freática e reduzir as cargas dentro do aterro e fundação da barragem, em comparação com o uso da parede diafragma.

Figura 99 – Cargas hidráulicas para N.A. normal – Tapete impermeável + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 100 – Cargas hidráulicas para N.A. máximo – Tapete impermeável + Drenagem.

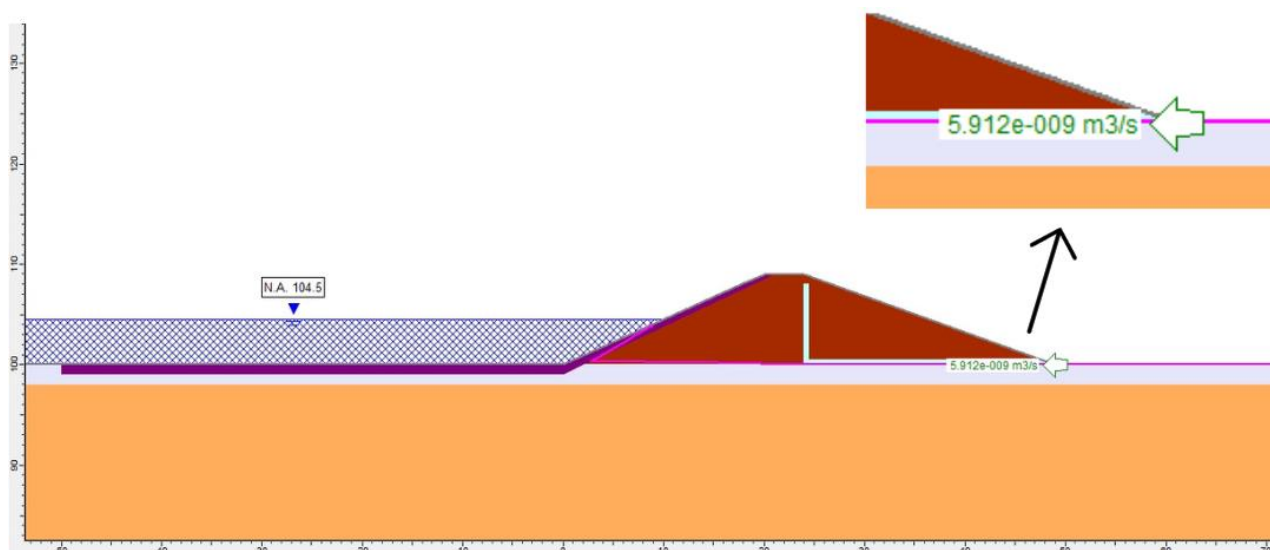


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

As informações sobre as vazões estão representadas nas Figuras 101 e 102. No Nível d'Água (N.A.) normal, foi registrado um valor de 0,000355 l/min/m, enquanto para o N.A. máximo, observou-se um valor de 0,00063 l/min/m. Com a introdução do tapete impermeável

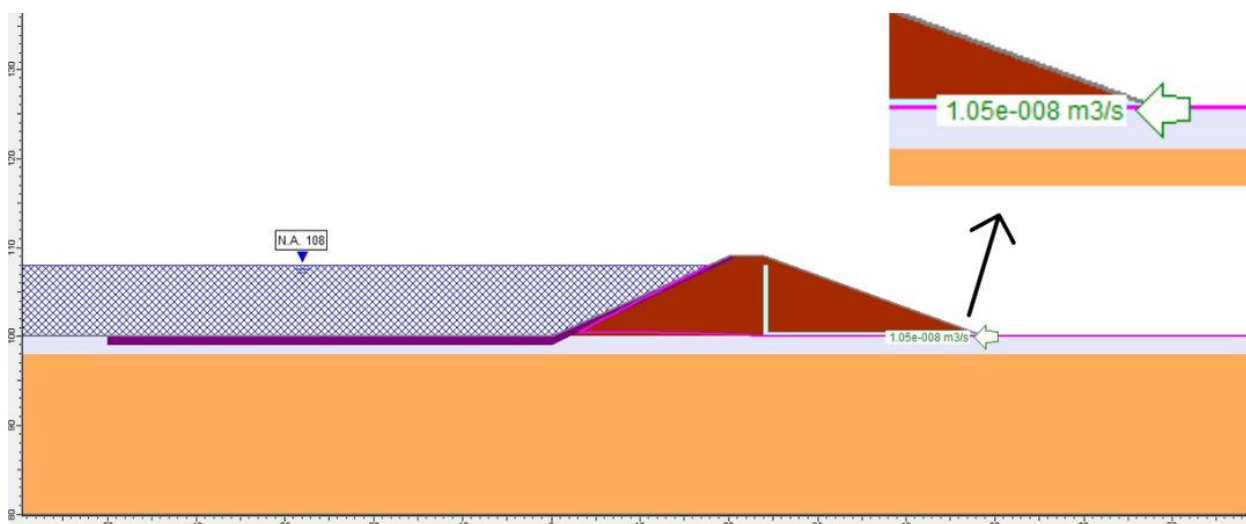
à montante, notou-se que os valores de vazão se apresentaram maiores que para o caso em que a parede diafragma é utilizada como opção de dispositivo de vedação.

Figura 101 - Vazão para o N.A. normal – Tapete impermeável + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 102 - Vazão para o N.A. máximo – Tapete impermeável + Drenagem.

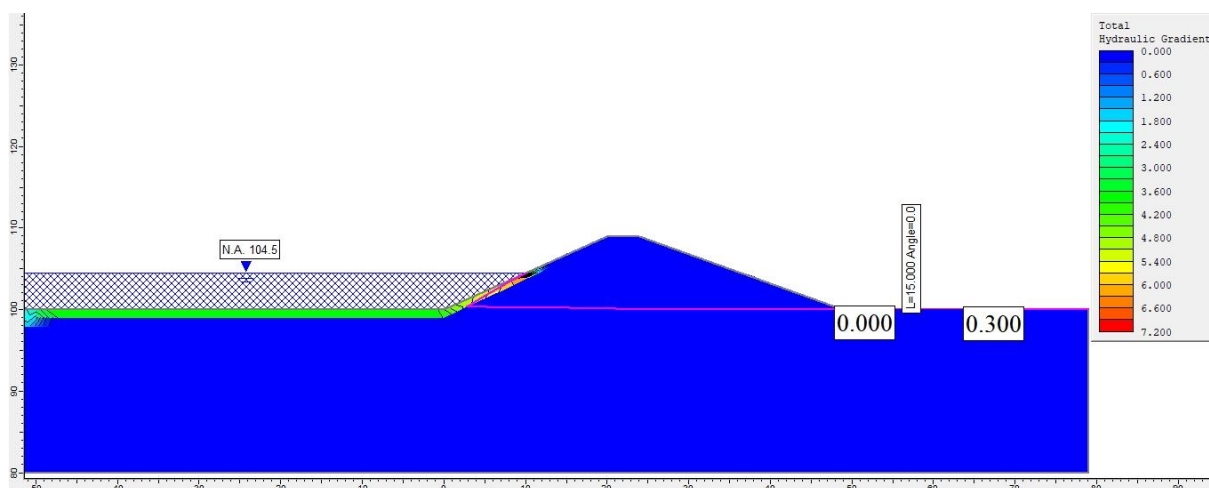


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Em relação aos gradientes hidráulicos representados nas Figuras 103 e 104, é possível notar que os valores registrados foram de 0,00 no pé do talude e 0,30 a 15 metros para o nível de água normal. Já para o nível de água máximo, os gradientes alcançaram 0,00 no pé do talude

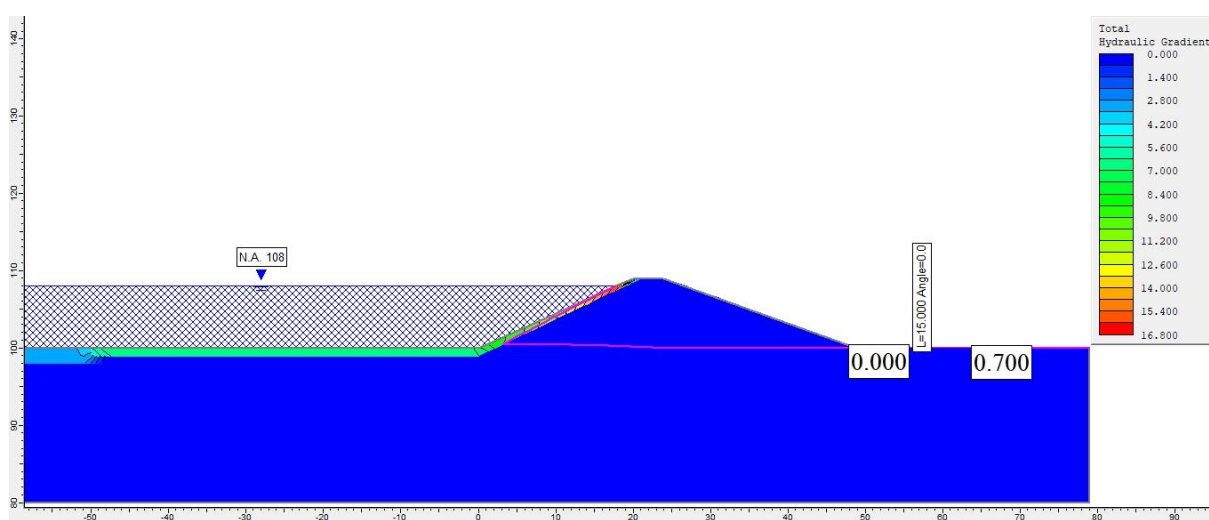
e 0,70 a 15 metros. Dessa forma, percebe-se uma redução no gradiente hidráulico em comparação com o uso da parede diafragma, para ambos os níveis de água a 15 metros do talude. Especificamente para o N.A. normal, o valor do gradiente hidráulico foi menor que o máximo de saída calculado.

Figura 103 – Gradientes hidráulicos para N.A. normal – Tapete + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 104 – Gradientes hidráulicos para N.A. máximo – Tapete + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Na Tabela 32, estão apresentados os resultados das análises de percolação para o N.A normal, na elevação de 104.5 m, ao passo que na Tabela 33, estão registrados os resultados das análises para o N.A. máximo, na cota de 108 m.

Tabela 32 – Resultados para percolação - N.A. normal.

Parâmetro	Descrição	Drenagem + Vedação
Vazão	programa (m ³ /s)	5,91E-09
	conversão (l/min)	0,000355
Gradiente	pé de jusante	0,00
	15 m a jusante	0,30

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 33 – Resultados para percolação - N.A. máximo.

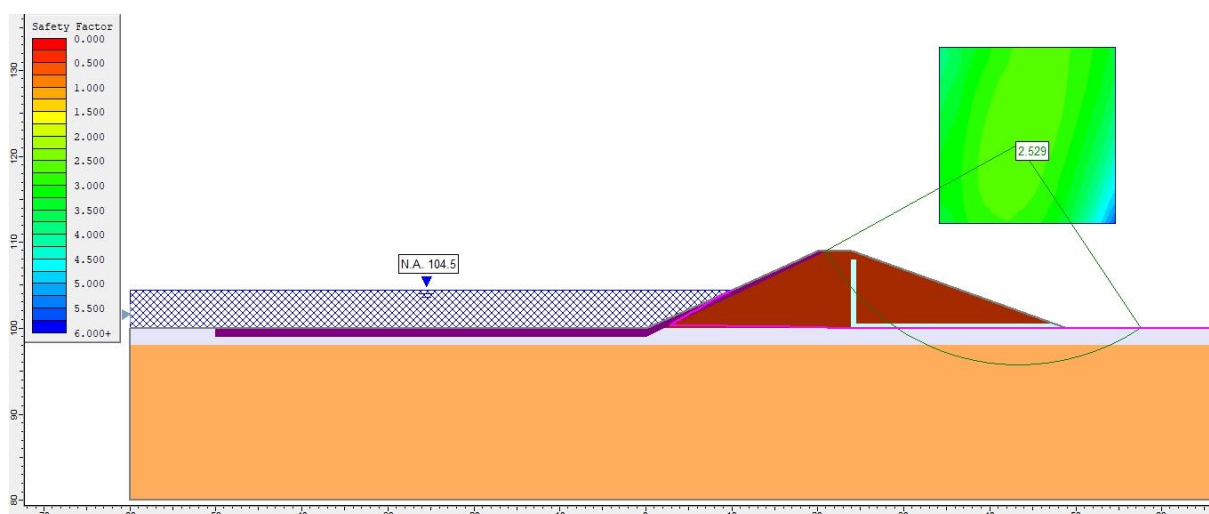
Parâmetro	Descrição	Drenagem + Vedação
Vazão	programa (m ³ /s)	1,05E-08
	conversão (l/min)	0,00063
Gradiente	pé de jusante	0,00
	15 m a jusante	0,70

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.4.2.2 Estabilidade

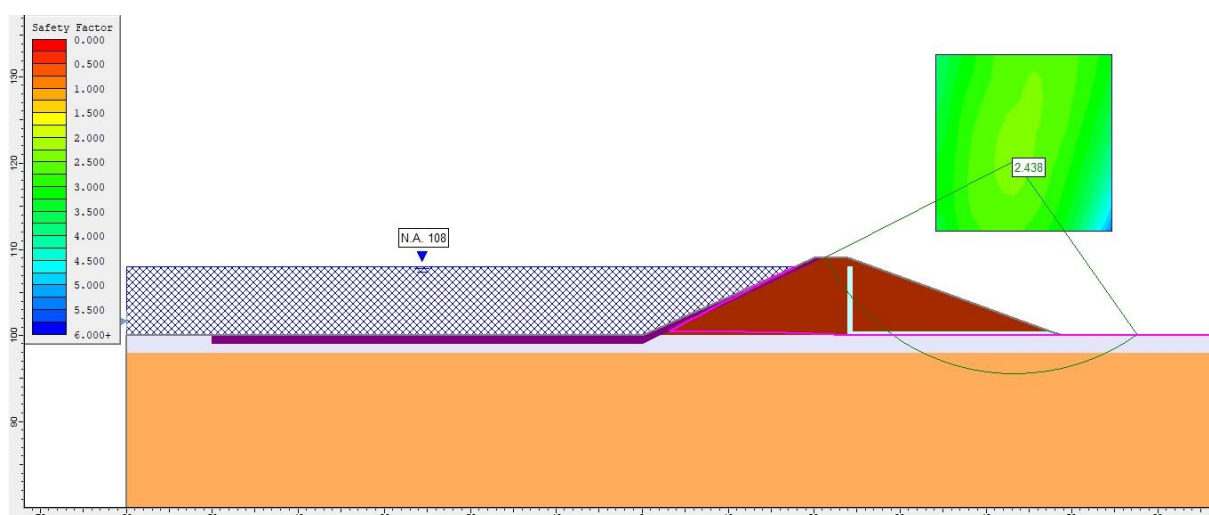
As Figuras 105 e 106 exibem os fatores de segurança derivados das análises de estabilidade de taludes, levando em consideração a implementação do dispositivo de vedação tapete impermeável à montante para os níveis d'água normal e excepcional, respectivamente. A presença do tapete impermeável, ao regular o fluxo de água e reduzir os gradientes hidráulicos, resulta em índices de segurança superiores, ficando acima dos encontrados para o uso da parede diafragma.

Figura 105 – Fator de segurança para N.A. normal – Tapete impermeável + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 106 – Fator de segurança para N.A. máximo – Tapete impermeável + Drenagem.



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Na Tabela 34 estão apresentados os resultados das análises de estabilidade para o N.A. normal, na elevação de 104.5 m e N.A. máximo, na cota de 108 m, para o caso em que o sistema de drenagem é usado em conjunto com o sistema de vedação (parede diafragma).

Tabela 34 – Resultados para estabilidade - N.A. normal e N.A. máximo.

Solicitação	Talude	FS mínimo	FS obtido
Regime normal	Jusante	1,5	2,529
Regime excepcional	Jusante	1,3	2,438

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

4.4.3 Eficiência

De maneira semelhante ao descrito na seção 4.3, também foi conduzida uma análise comparativa da eficiência entre o sistema de vedação, em conjunto com o sistema de drenagem, e a ausência de qualquer dispositivo. Os valores de eficiência calculados para o uso da parede diafragma estão apresentados nas Tabelas 35 e 36. Já as Tabelas 37 e 38 exibem os resultados correspondentes ao uso do tapete impermeável à montante, considerando os níveis d'água normal e máximo, respectivamente.

Além disso, as Tabelas 39, 40, 41 e 42 proporcionam uma comparação entre os índices de eficiência nos cenários em que apenas o sistema de drenagem é utilizado e naqueles em que o sistema de drenagem é aprimorado pela inclusão do sistema de vedação. Com base nos resultados, é evidente que a introdução dos dispositivos de vedação ocasionou mudanças substanciais nos valores de vazão e gradientes hidráulicos. Essas alterações decorrem do fato de que esses elementos atuam interrompendo ou redirecionando o fluxo da água subterrânea.

Aprimoramentos significativos na eficiência da vazão foram evidenciados no N.A. normal, passando de 40,4% com a utilização exclusiva do sistema de drenagem para 41,3% com a adição da parede diafragma. Já com a implementação do tapete impermeável, embora as vazões tenham se mantido abaixo de 1,0 l/min/m, registrou-se um aumento em relação ao Caso III. No que tange aos gradientes hidráulicos, as melhorias mais notáveis foram observadas nas condições normais, quando se empregou o tapete impermeável a montante, resultando em um aumento de 24,4% para 100% no pé do talude de jusante e de 27,0% para 76,2% a 15 metros do talude.

Apesar da melhoria nas eficiências com a combinação de sistemas para controlar gradientes hidráulicos, estes ainda se mantiveram acima do gradiente de saída calculado para o uso da parede diafragma. Embora tenham alcançado um valor inferior ao máximo gradiente de saída para o uso do tapete impermeável à montante, é crucial destacar a necessidade contínua de monitorar barragens e regular os gradientes de saída conforme as diretrizes de segurança e critérios de projeto. Mesmo que a parede diafragma influencie as condições hidráulicas e a estrutura mantenha-se segura em relação aos fatores mínimos de segurança, a manutenção adequada de estruturas de controle de fluxo, como comportas e vertedores, é essencial para assegurar que o gradiente de saída permaneça dentro de limites seguros, garantindo a operação segura e eficiente da barragem.

Tabela 35 – Eficiência para o N.A. normal – Parede diafragma.

Parâmetro	Descrição	Eficiência Vedação + Drenagem %
Vazão	l/min/m	41,3
Gradiente hidráulico	pé de jusante	24,0
	15 m a jusante	25,8

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 36 – Eficiência para o N.A. máximo – Parede diafragma.

Parâmetro	Descrição	Eficiência Vedação + Drenagem %
Vazão	l/min/m	34,7
Gradiente hidráulico	pé de jusante	25,7
	15 m a jusante	26,7

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 37 – Eficiência para o N.A. normal – Tapete impermeável.

Parâmetro	Descrição	Eficiência Vedação + Drenagem %
Vazão	l/min/m	---
Gradiente hidráulico	pé de jusante	100
	15 m a jusante	76,2

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 38 – Eficiência para o N.A. máximo – Tapete impermeável.

Parâmetro	Descrição	Eficiência Vedação + Drenagem %
Vazão	l/min/m	---
Gradiente hidráulico	pé de jusante	100
	15 m a jusante	68,9

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 39 – Comparação da eficiência para o N.A. normal – Parede diafragma.

Parâmetro	Descrição	Eficiência Caso III %	Eficiência Vedação + Drenagem %
Vazão	l/min/m	40,4	41,3
Gradiente hidráulico	pé de jusante	24,4	24,0
	15 m a jusante	27,0	25,8

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 40 – Comparação da eficiência para o N.A. máximo – Parede diafragma.

Parâmetro	Descrição	Eficiência Caso III %	Eficiência Vedação + Drenagem %
Vazão	l/min/m	33,8	34,7
Gradiente	pé de jusante	23,0	25,7
hidráulico	15 m a jusante	24,4	26,7

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 41 – Comparação da eficiência para o N.A. normal – Tapete impermeável.

Parâmetro	Descrição	Eficiência Caso III %	Eficiência Vedação + Drenagem %
Vazão	l/min/m	40,4	---
Gradiente	pé de jusante	24,4	100,0
hidráulico	15 m a jusante	27,0	76,2

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Tabela 42 – Comparação da eficiência para o N.A. máximo – Tapete impermeável.

Parâmetro	Descrição	Eficiência Caso III %	Eficiência Vedação + Drenagem %
Vazão	l/min/m	33,8	---
Gradiente	pé de jusante	23,0	100,0
hidráulico	15 m a jusante	24,4	68,9

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou uma solução para a construção de uma barragem de terra na região da bacia hidrográfica do Rio Formoso. A necessidade dessa barragem surge da demanda por armazenamento de água, controle de enchentes e fornecimento de recursos hídricos para a agricultura e abastecimento público. O estudo começa com uma análise detalhada da bacia hidrográfica do Rio Formoso, identificando as características geográficas e geológicas da área. A proposta de um modelo de barragem visa oferecer uma solução segura em termos de análise de fluxo e estabilidade.

Após a escolha do modelo de análise, considerando a inclinação dos taludes a montante e a jusante, bem como a profundidade da fundação, procedeu-se com as modificações que seriam incrementadas a ele: um modelo com sistema de drenagem composto apenas por filtro horizontal e outro modelo com sistema de drenagem formado pela combinação do filtro horizontal e vertical. Portanto, foram analisados três casos diferentes no *software* Slide: modelo sem dispositivo, modelo com filtro horizontal e modelo com filtro horizontal e vertical combinados.

A seleção do modelo foi baseada nos resultados gerados no programa de vazões e gradientes hidráulicos, além de atender aos fatores de segurança mínimos recomendados. Para o Caso I, foi possível concluir que embora o modelo se apresentasse estável em relação aos fatores de segurança, apresentava-se com a estabilidade comprometida em relação aos valores dos gradientes de saída, que foram maiores que os máximos recomendados. Assim, a implementação dos dispositivos de drenagem objetivou o controle adequado do fluxo de água na barragem, a fim de manter a estabilidade da estrutura e prevenir danos.

O uso dos modelos com dispositivos de drenagem conseguiu reduzir os valores de vazão e gradiente hidráulico. Para o uso somente do filtro horizontal, a eficiência para a vazão foi de 39,9% e 26,2% para o gradiente hidráulico a 15 metros do pé do talude de jusante, ambos no N.A. normal. Já para o uso do filtro horizontal em combinação com o vertical, a eficiência foi de 40,4% na redução da vazão e 27,0% para o gradiente hidráulico a 15 m do pé do talude de jusantes, também ambos para o N.A. normal. Os fatores de segurança foram acima dos mínimos recomendados, e à medida que a vazão e o gradiente hidráulico diminuam, eles aumentavam, reforçando a relação entre eles.

O dispositivo de drenagem que apresentou os melhores resultados foi a combinação do filtro horizontal com o vertical, formando o sistema de drenagem da barragem. Para esse caso, os valores de vazões permaneceram abaixo dos recomendados e os fatores de segurança acima

dos mínimos exigidos. No entanto, quanto aos gradientes de saída, esses permaneceram acima do gradiente máximo de saída calculado. Dessa forma, considerando a permeabilidade da fundação composta por material arenoso, dois dispositivos de vedação foram selecionados para testes como sistemas de vedação: parede diafragma e tapete impermeável à montante.

Posteriormente, o modelo, composto pela combinação do sistema de drenagem selecionado e a implementação do sistema de vedação, foi submetido a análises adicionais de percolação e estabilidade. O objetivo era avaliar o impacto dessa configuração nos resultados anteriores. A eficácia desse modelo foi então comparada ao Caso I (sem dispositivo) para avaliar o desempenho do sistema de drenagem e vedação. Além disso, foram contrastados os resultados do modelo que utilizava apenas o sistema de drenagem inicial com aqueles em que o sistema de vedação foi aprimorado. A eficiência na vazão (N.A. normal) aumentou de 40,4% para 41,3% com a introdução da parede diafragma. Já em relação ao gradiente hidráulico a 15 metros do pé do talude de jusante, a eficiência subiu de 27,0% para 76,2% com a aplicação do tapete impermeável à montante, também para o N.A. normal.

O modelo proposto para a região consiste em um sistema de drenagem que integra filtros verticais e horizontais, complementado por um sistema de vedação composto por um tapete impermeável a montante. Apesar de essa abordagem ter efetivamente reduzido os gradientes hidráulicos para valores inferiores ao máximo calculado, houve um aumento nas taxas de vazão. No entanto, dado que essas taxas permanecem abaixo dos valores mínimos recomendados, essa solução se destaca como a mais apropriada. É crucial observar que, apesar da significativa redução nos gradientes hidráulicos com a introdução da parede diafragma, esses valores ainda se mantêm acima do máximo recomendado, podendo resultar em impactos adversos na estrutura, como pressão hidrostática excessiva, erosão dos taludes, infiltração de água e potencial para falhas na barragem.

Por fim, destaca-se a importância da análise do fluxo e da estabilidade de uma barragem antes de sua construção, pois essa avaliação minuciosa é fundamental para garantir a segurança a longo prazo da estrutura, a mitigação de riscos potenciais e a proteção das comunidades a montante e a jusante da barragem. Além disso, essa análise ajuda no dimensionamento adequado dos sistemas de drenagem, na escolha dos materiais de construção apropriados e na implementação de medidas de controle essenciais para prevenir possíveis falhas catastróficas. Ao compreender plenamente os desafios hidráulicos e geotécnicos envolvidos, é possível construir barragens robustas e seguras que atendam às necessidades de abastecimento de água, controle de enchentes, geração de energia e outros fins, enquanto protegem vidas, propriedades e o meio ambiente.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar outros dispositivos de vedação, com a finalidade de encontrar uma solução melhor, no que se refere a economia e comportamento hidráulico;
- Aprimorar os modelos de drenagem utilizados, através da combinação de dispositivos que otimizem ainda mais a eficiência na redução de vazões e gradientes hidráulicos;
- Avaliar barragens reais na bacia hidrográfica do rio Formoso ou até mesmo em outras regiões, através de análises de fluxo e estabilidade e, comparação com os resultados encontrados.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens**: guia prático de pequenas barragens. Brasília, DF: ANA, 2016a. v. 8. 120 p., il. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/volume-viii-guia-pratico-de-pequenas-barragens. Acesso em: 20 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens**: guia de orientação e formulários para inspeções de segurança de barragem. Brasília, DF: ANA, 2016b. v. 2. 218 p., il. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/volume-ii-guia-de-orientacao-e-formularios-para-inspecoes-de-seguranca-de-barragem. Acesso em: 20 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens**: guia de revisão periódica de segurança de barragem. Brasília, DF: ANA, 2016c. v. 3. 66 p., il. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/volume-iii-guia-de-revisao-periodica-de-seguranca-de-barragem. Acesso em: 20 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Relatório de Segurança de Barragens 2021**. Brasília, DF: ANA, 2022. 68 p., il. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2021/rsb-2021.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Relatório de Segurança de Barragens 2020**. Brasília, DF: ANA, 2021. 130 p., il. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2020/rsb-2020.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Resolução nº 121/2022, de 09 de maio de 2022**. Altera a Resolução ANA nº 236, de 30 de janeiro de 2017. Brasília, DF: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-ANA/2022/Resolucao-ANA-121.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Report mensal: Barragens de Mineração**. Brasília, DF: ANM, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/arquivos/report-mensal-marco-v3.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2023.

AIROLDI, Júlia Botan; DINIZ, Felipe Pereira; UDA, Patrícia Kazue. Análise sobre a evolução da legislação de segurança de barragens no Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, Rio de Janeiro, ano VIII, n. 14, p. 11-18, mar. 2023. Disponível em: https://cbdb-web-uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/revista/documento/16/RevEngBarragens_14_mar%C3%A7o_2023.pdf?X-Amz-Expires=600&X-Amz-Date=20230724T023235Z&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3J5R2XFMWWFTLOL%2F20230724%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-

Signature=810ade3ba7bccaf2c0f461ab0fc762372e02895c95408779bf07ff3bfe194ef6. Acesso em: 20 jun. 2023.

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Rebaixamento temporário de aquíferos**. 1. ed. São Paulo: Tecnogeo e Geofix, 1999.

ANDREETTA, Arthur Bucciarelli; CAMPIONI, César Antonio. Importância dos elementos construtivos para a estabilidade de barragens de terra. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, Rio de Janeiro, ano VII, n. 10, p. 84-91, jun. 2021. Disponível em: [https://cbdb-web-](https://cbdb-web-uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/revista/documento/12/RevEngBarragens_10_Junho_2021.pdf?X-Amz-Expires=600&X-Amz-Date=20221110T182742Z&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3J5R2XFMWWFTLOL%2F20221110%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=d332645e15b9129df90958cfd34bb2cef8b2f967221ed41fd2b630a9cfac4401)

[uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/revista/documento/12/RevEngBarragens_10_Junho_2021.pdf?X-Amz-Expires=600&X-Amz-Date=20221110T182742Z&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3J5R2XFMWWFTLOL%2F20221110%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=d332645e15b9129df90958cfd34bb2cef8b2f967221ed41fd2b630a9cfac4401](https://cbdb-web-uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/revista/documento/12/RevEngBarragens_10_Junho_2021.pdf?X-Amz-Expires=600&X-Amz-Date=20221110T182742Z&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3J5R2XFMWWFTLOL%2F20221110%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=d332645e15b9129df90958cfd34bb2cef8b2f967221ed41fd2b630a9cfac4401). Acesso em: 20 jun. 2023.

ANNOVI, Alessandro. **La frana del Vajont. Un fenomeno naturale trasformato dall'uomo in tragedia**. Página web compilada. Disponível em: https://www.moproc.com/drupal/files/note_vajont.pdf. Acesso em: 20 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

BARBOSA, Rodrigo de Andrade *et al.* Diagnóstico e execução de ações corretivas em barragem de terra: Estudo de caso da barragem Poleiros em Barra de Santa Rosa – PB. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 51, p. 86-96, abr. 2020. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/viewFile/4103/1435>. Acesso em: 20 jan. 2023.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens [...] cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília: Presidência da República, [2010]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 15 jun. 2023.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) [...] a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Brasília: Presidência da República, [2020]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm. Acesso em: 17 jun. 2023.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: mecânica das rochas, fundações, obras de terra. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1987.

CARMIGNANI, Luigi; FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas:** aplicações na estabilidade de taludes. 2. ed. Curitiba: Ed. UFPR Oficina de Textos, 2009.

CARVALHO, David de; PASCHOALIN FILHO, João Alexandre. Estudo da estabilidade de pequenas barragens de terra compactadas em três teores de umidade. **Exacta**. v. 2, p. 55-68. São Paulo: UNINOVE, nov. 2004. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/545/587>. Acesso em: 16 jan. 2023.

CARVALHO, P. A. S. de. **Manual de geotecnia:** taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991.

COMISSÃO MUNDIAL DE BARRAGENS. **Relatório da Comissão Mundial de Barragens, Barragens e Desenvolvimento:** um novo modelo para tomada de decisões. [Londres: CMB], 2000. Disponível em: https://www2.mppa.mp.br/sistemas/gcsubsites/upload/41/cmb_sumario.pdf. Acesso em: 12 jun. 2023.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (Brasil). **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI:** cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens / [coordenador, supervisor, Flavio Miguez de Mello; editor, Corrado Piasentin]. Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 524 p., il., 29 cm.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 Barragens Brasileiras:** casos históricos, materiais de construção, projeto. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica:** tradução da 6ª edição norte-americana. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DAS, Braja. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica:** tradução da 7ª edição norte-americana. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

ELETROBRÁS. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 2003. Disponível em: <https://q.eletronbras.com/pt/AreasdeAtuacao/geracao/Manuais%20para%20Estudos%20e%20Projetos%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Energia/Crit%C3%A9rios%20de%20Projetos.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2023.

FARMLAND, Missouri River Floods a Million Acres of. Big Picture Agriculture. **U.S. Army Corps of Engineers photo by Carlos J. Lazo**. 19 de junho de 2011. Disponível em: <http://bigpictureagriculture.blogspot.pt/2011/06/missouri-river-floods-million-acres-of.html>. Acesso em: 18 jun. 2023.

FEMA. **Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion**. Interagency Committee on Dam Safety (ICODS), Federal Emergency Management Agency (FEMA). [S.I.]. 2015. Disponível em: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_p1032_eval_monitoring_seepage_internal_erosion.pdf. Acesso em: 18 jun. 2023.

FERREIRA, Jaqueline Antunes. Critérios para definição de valores de controle para piezômetros e medidores de vazão em barragens de aterro. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, Rio de Janeiro, ano VIII, n. 13, p. 58-63, dez. 2022. Disponível em: https://cbdb-web-uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/revista/documento/15/RevEngBarragens_13_dezembro_2022.pdf?X-Amz-Expires=600&X-Amz-Date=20230821T141206Z&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3J5R2XFMWWFTLOL%2F20230821%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=0672e7d196ade9e03e9349bca67d8c3d57d790cd8487055f8bf528cc123daf01. Acesso em: 10 jun. 2023.

FIDELES, Bruna Tayna Macedo; MALVEIRA, Vanda Tereza Costa. Segurança nas barragens Gangorra e Itaúna contra erosão interna. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 38, n. 2, p. 1-19, dez. 2017. DOI 10.5020/23180730.2017.V38.2.6778. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/6778/5611>. Acesso em: 15 jan. 2023.

FONSECA, João José Saraiva da. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UECE, 2002. Apostila. Disponível em: <http://www.ia.ufrj.br/ppgea/conteudo/conteudo-2012-1/1SF/Sandra/apostilaMetodologia.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2023.

GAIOTO, Nélcio. **Introdução ao Projeto de Barragens de Terra e de Enrocamento**. São Carlos: EESC – USP, 2003. 126 p., il.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. 120 p., il., 17,5 x 25 cm. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/52806>. Acesso em: 02 jul. 2023.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Estabilidade de taludes**: 2ª edição com exercícios resolvidos. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Fluxo em solos saturados**. Notas de aula. Faculdade de Engenharia – Departamento de Estruturas e Fundações, 2011.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/150/o/Anexo_C1_como_elaborar_projeto_de_pesquisa_-_antonio_carlos_gil.pdf. Acesso em: 15 jul. 2023.

GUIDICINI, Guido; SANDRONI, Sandro Salvador; MELLO, Flavio Miguez de. **Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil**. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2021. Disponível em: https://www.abge.org.br/downloads/livro_acidentes_incidentes_barragens.pdf. Acesso em: 15 jun. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (BRASIL). **Estado do Tocantins - Geologia**. Brasil: IBGE, 2007. Mapa. Escala: 1:1.000.000. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geologia/levantamento_geologico/mapas/unidades_da_federacao/to_geologia.pdf. Acesso em: 06 jun. 2023.

JANSEN, Robert B. **Dams and Public Safety**: a water resources technical publication. United States: Simetric, 1983. Disponível em: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/mands-pdfs/AZ1130.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2023.

JÓNATAS, Ricardo Jorge Lourenço. **Rotura de barragens de aterro por galgamento: ensaios experimentais com aterros homogêneos**. 2013. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Faculdade de Ciências, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/10259/1/ulfc106012_tm_Ricardo_J%C3%B3natas.pdf. Acesso em: 18 jan. 2023.

KUPERMAN, Selmo Chapira; CIFU, Sergio. Projeto de barragens de concreto. **Revista Concreto**, São Paulo, ano XXXIV, n. 42, p. 82-89, mar./abr./maio 2006. Disponível em: http://ibracon.org.br/site_revista/concreto_construcoes/pdfs/revista42.pdf. Acesso em: 15 jul. 2023.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969.

MAIA, Gustavo; OLIVEIRA, Lucas de; FILGUEIRAS, Leandro. Tamponamento de galeria de drenagem em barragem de rejeito – estudo de caso. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, Rio de Janeiro, ano VIII, n. 12, p. 82-90, jun. 2022. Disponível em: https://cbdb-web-uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/revista/documento/14/RBEB_12_Jun2022_FINAL.pdf?X-Amz-Expires=600&X-Amz-Date=20221117T165223Z&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3J5R2XFMWWFTLOL%2F20221117%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=e0785955596b7ea9bc6b5eb544a1e26f2bbe5db19daab5cbb5e0aa3a13f32. Acesso em: 15 jul. 2023.

MARANGON, M. **Geotecnia de Fundações e Obras de Terra**: Unidade 05 – Barragens de terra e enrocamento. 2019. Notas de aula. Disponível em: <https://www.ufjf.br/nugeo/files/2017/07/MARANGON-OT-05-Barragens-de-Terra-e-Enrocamento-2018-1.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2023.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003. Disponível em: https://docente.ifrn.edu.br/olivianeta/disciplinas/copy_of_historia-i/historia-ii/china-e-india. Acesso em: 15 jul. 2023.

MASSAD, Façal. **Obras de terra**: curso básico de geotecnia. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MEIRELLES, Fernando Setembrino Cruz. **Curso segurança de barragens**: Módulo I – Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais: Unidade 9: Barragens de terra e enrocamento. Brasília: ANA, 2013. Disponível em: https://capacitacao2.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2179/9/Unidade_9-modulo1.pdf. Acesso em: 17 jul. 2023.

OLIVEIRA, Antonio Gilberto Simões de. **Análise da eficácia dos dispositivos de vedação e drenagem utilizados em fundações permeáveis de barragens de terra**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-13042010-091918/publico/dissertacao.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2023.

OLIVEIRA, Desireé Alves de. **Análise do fluxo d'água na barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves – Açú/RN**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

OLIVEIRA, Jader Roosevelt de Carvalho. **Contribuição para a verificação e controle da segurança de pequenas barragens de terra**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos; BRITO, Sérgio Nertan Alves de. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

PALMAS (Município). Secretaria da Fazenda e Planejamento, Superintendência de Planejamento Governamental, Diretoria de Gestão de Informações Territoriais e Socioeconômicas, Gerência de Zoneamento Territorial. **Bacias Hidrográficas**. Palmas: SEFAZ, abril de 2019. Mapa. Escala: 1:1.000.000. Disponível em: <https://central3.to.gov.br/arquivo/468397/>. Acesso em: 06 jun. 2023.

PEREIRA, Frank Marcos da Silva. **Gestão de riscos e plano de ações emergenciais aplicado à barragem de contenção de rejeitos Casa De Pedra/CSN**. 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: <https://docplayer.com.br/110654055-Dissertacao-de-mestrado.html>. Acesso em: 18 jul. 2023.

PERINI, Daniel Sosti. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra**. 2009. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/33534219.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2023.

PERSECHINI, Maria Inês Muanis *et al.* **Segurança de barragens: engenharia a serviço da sociedade**. 1. ed. Brasília: Banco Mundial, 2015. 104 p. Disponível em: https://www.snib.gov.br/Entenda_Mais/outros/serie-agua-brasil-do-banco-mundial-11-seguranca-de-barragens. Acesso em: 11 jul. 2023.

PESSINI, Pâmela Bogo *et al.* Estudo de alternativas para melhorar o controle de fluxo por uma barragem de terra. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, Rio de Janeiro, ano VIII, n. 13, p. 84-91, dez. 2022. Disponível em: https://cbdb-web-uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/revista/documento/15/RevEngBarragens_13_dez_embro_2022.pdf?X-Amz-Expires=600&X-Amz-Date=20230904T162440Z&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3J5R2XFMWWFTLOL%2F20230904%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-

Signature=7dd92457ff39178814f503d730ad754041bd8939cf7171a1a2f4a989e5ea90e7.

Acesso em: 20 jan. 2023.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**: 3ª edição com exercícios resolvidos. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

REIS, Renato Capucho. **Estudo de estabilidade de taludes da mina de Tapira - MG**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia aplicada à Mineração) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em:

https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2359/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_EstudoEstabilidadeTaludes.pdf. Acesso em: 18 jan. 2023.

REZENDE, Bárbara Oliveira de; RODRIGUEZ, Irene Mariel Urdapilleta. **Projeto de mapeamento geológico final**: Projeto Monte do Carmo – TO: Área XV. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

RIJO, Manuel. **Movimento da água no solo**. Notas de aula. Repositório Universidade de Évora, 2017.

SANTOS, Daniel Araújo Ramos dos. **A rede de drenagem e seu significado geomorfológico**: anomalias de drenagens e tectônica recente na bacia do rio formoso, Tocantins. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós – Graduação *Stricto Sensu* em Geografia, Universidade Federal do Tocantins, Porto Nacional – TO, 2016.

SILVA, Eliane Lima e; SILVA, Mariano Andrade da. Segurança de barragens e os riscos potenciais à saúde pública. **Saúde Debate**, Rio de Janeiro, v. 44, n. especial 2, p. 242-261, jul. 2020. DOI: 10.1590/0103-11042020E217. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/sdeb/a/GxCcNJjsWLzNqmN9HbsFgqG/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 20 jan. 2023.

SILVA, Dayana Santos. **Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

SILVA, Romário Stéffano Amaro da. *et al.* Acidentes e incidentes em barragens brasileiras: uma análise dos dados disponíveis nos relatórios de segurança de barragens e da legislação vigente. **Revista Holos**, Rio Grande do Norte, ano 37, v. 6, p. 1-17, set. 2021. DOI: 10.15628/holos.2021.10245. Disponível em:

<https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/10245/pdf>. Acesso em: 22 jan. 2023.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SOARES, Keroly Shaene Guedes *et al.* Geologia aplicada a Barragens. **Revista Pesquisa e Ação**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 161-170, jun. 2019. Disponível em:

<https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/view/681/718>. Acesso em: 10 jul. 2023.

SOLA, Karina Guimarães Lopes; FERREIRA, Ana Luisa Moreira. Proposta de metodologia para determinação das prioridades da manutenção de barragens de usinas hidrelétricas e

estruturas associadas. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, Rio de Janeiro, ano VIII, n. 12, p. 91-102, jun. 2022. Disponível em: https://cbdb-web-uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/revista/documento/14/RBEB_12_Jun2022_FINAL.pdf?X-Amz-Expires=600&X-Amz-Date=20230729T010100Z&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3J5R2XFMWWFTLOL%2F20230729%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=2ee6e7061018ea319239aa56ec726ab626dc70c52918b658fbfa0a9dfaae6d3a. Acesso em: 20 ago. 2023.

SOUZA, Natália Pereira de; LADEIRA, Josias Eduardo Rossi. Avaliação do comportamento de barragens de terra de usinas hidrelétricas com a utilização de *checklist* de inspeção direcionado para modos de falhas. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, Rio de Janeiro, ano VI, n. 09, p. 26-33, dez. 2020. Disponível em: https://cbdb-web-uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/revista/documento/11/RevEngBarragens_9_Dez_2020.pdf?X-Amz-Expires=600&X-Amz-Date=20230731T192701Z&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3J5R2XFMWWFTLOL%2F20230731%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=236bc2e231cc7a9c5f08d4bd4279f0bda9cd4fd7e8b1b8ee834dc6098bee3efb. Acesso em: 20 ago. 2023.

STANCATI, Gene. **Redes de fluxo**. Notas de aula. Escola de Engenharia de São Carlos, 1984.

UNAS, Mário Sérgio Pereira. **Estudo experimental e numérico de problemas de percolação em modelo reduzido**. 2010. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION. **Design of Small Dams**: a water resources technical publication. 3. ed. Washington: USBR, 1987.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Using HEC-RAS for Dam Break Studies**. Davis, CA: U.S Army Corps Of Engineers, 2014. 74 p. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/publications/TrainingDocuments/TD-39.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2023.

VILHETE, Didoney Fernandes. **Retroanálise da ruptura do talude de montante da Barragem do Açú no final do período construtivo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2017.

VIRGILI, Gabriela Silveira; QUEIROZ, Isabela Moreira. Avaliação da probabilidade de ruptura de uma barragem de rejeitos por instabilização e galgamento. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, Rio de Janeiro, ano V, n. 08, p. 26-32, dez. 2019. Disponível em: https://cbdb-web-uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/revista/documento/10/RevEngBarragens_8_Dez2019_v3.pdf?X-Amz-Expires=600&X-Amz-Date=20230731T192741Z&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3J5R2XFMWWFTLOL%2F20230731%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=2ee6e7061018ea319239aa56ec726ab626dc70c52918b658fbfa0a9dfaae6d3a

Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3J5R2XFMWWFTLOL%2F20230731%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=886ee685cfe2f7d8e7fbf2586dc4d2d3e7980bf8fd97bf4df6d095ffd4b3d2cf. Acesso em: 20 ago. 2023.

WISEU, Maria Teresa Fontelas. **Segurança dos vales a jusante de barragens:** metodologias de apoio à gestão do risco. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008. 420f.

WILLINGHOEFER, Matheus; MULLER, Anaximandro Steckling; SOUZA, Diego David Baptista de. Comparativo entre metodologia empírico-analítica e modelagem CFD na avaliação da capacidade de descarga de um vertedouro. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, Rio de Janeiro, ano VIII, n. 15, p. 18-27, jul. 2023. Disponível em: https://cbdb-web-uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/revista/documento/17/RBEB_15_JUL2023_Final.pdf?X-Amz-Expires=600&X-Amz-Date=20230925T142056Z&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3J5R2XFMWWFTLOL%2F20230925%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=f595e9371a547091d0f0cdd1fe61a520019ab166d5001b7b6f4ba9d20dc40970. Acesso em: 21 ago. 2023.

XU, YAO. **Analysis of dam failures and diagnosis of distresses for dam rehabilitation.** 2010. 297 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Ciência e Tecnologia de Hong Kong, China, 2010. Disponível em: <https://lbezone.hkust.edu.hk/pdfviewer/web/viewer.php?file=aHR0cHM6Ly9sYmV6b25lLmhrdXN0LmVkdS5oay9vYmovMS9vL2IxMDk3OTM4L2IxMDk3OTM4LnBkZg==#page=1>. Acesso em: 10 fev. 2023.

ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. Analysis of earth dam failures – A database approach. **Isgsr2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk**, Shanghai, p. 293-302, out. 2007. Disponível em: <https://geosnet.geoengineer.org/ISGSR2007/Part2Paper1.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2023.