



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

AUGUSTO DE LIMA MONTE  
LEONARDO DOS SANTOS SILVA

**BARRAGEM DE TERRA:** estudo da viabilidade técnica com ênfase na análise de estabilidade e percolação em barramento para fins de irrigação em Goianésia do Pará

GOIANÉSIA DO PARÁ – PA  
2025

AUGUSTO DE LIMA MONTE  
LEONARDO DOS SANTOS SILVA

**BARRAGEM DE TERRA:** estudo da viabilidade técnica com ênfase na análise de estabilidade e percolação em barramento para fins de irrigação em Goianésia do Pará

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Me. Davi Barbosa Costa da Silva.

GOIANÉSIA DO PARÁ – PA  
2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

S586b Silva, Leonardo dos Santos.  
Barragem de terra : estudo da viabilidade técnica com ênfase na análise de estabilidade e percolação em barramento para fins de irrigação em Goianésia do Pará. / Leonardo dos Santos Silva, Augusto de Lima Monte . — 2025.  
xiii, 91 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Davi Barbosa Costa da Silva  
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Civil, Tucuruí, 2025.

1. segurança de barragens. 2. taludes de barragem. 3. poropressão em barragens. I. Título.

CDD 627.83

---

AUGUSTO DE LIMA MONTE  
LEONARDO DOS SANTOS SILVA

**BARRAGEM DE TERRA:** estudo da viabilidade técnica com ênfase na análise de estabilidade e percolação em barramento para fins de irrigação em Goianésia do Pará

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Data da aprovação: 10/02/2025

Conceito: Excelente

Banca Examinadora:

---

Orientador

Me. Davi Barbosa Costa da Silva  
Universidade Federal do Pará

---

Examinadora interna

Ma. Grazielle Tigre De Souza  
Universidade Federal do Pará

---

Examinador externo

Me. Jedson Henryque Correa Abrantes  
Universidade Federal do Pará

## RESUMO

A irrigação, que visa complementar ou suprir a ausência total de água para as plantações, é uma tecnologia que potencializa a produtividade agrícola ao reduzir os riscos climáticos. O uso de reservatórios artificiais de irrigação é uma alternativa para complementar a rega das plantações, especialmente em regiões onde as mudanças climáticas influenciam a quantidade de chuva. Nesse contexto, a instalação de um barramento, mesmo de pequeno porte, é um procedimento intrincado que abrange diversas fases, desde a seleção do local até a construção e operação da estrutura. Este estudo teve como objetivo identificar a alternativa que proporciona as melhores condições de segurança, considerando critérios de estabilidade de taludes e pressão por poropressão entre diferentes configurações para um barramento com finalidade de irrigação em Goianésia do Pará. A metodologia consiste na abordagem de diferentes etapas, tendo como ponto de partida visitas ao possível local de construção da estrutura, obtenção de informações e análise de literatura. Em uma etapa posterior, foram estabelecidas as opções de construção a serem comparadas com base no conhecimento do tipo de solo e dos materiais disponíveis na área do município. A modelagem da barragem foi realizada com o uso de *softwares* especializados. Para as análises, foi utilizado um *software* que analisava a dinâmica dos fluidos e outro que analisava a sua estabilidade. A partir da análise de todas as condições, os fatores de segurança alcançados para a configuração de argila siltosa foram consideravelmente satisfatórios quando comparados ao mínimo necessário para assegurar sua estabilidade. Ao analisar três tipos de solos distintos, notou-se que a linha piezométrica exibia padrões similares em todas as situações do regime de operação. Isso indica que, mesmo com as variações nas características físicas e hidráulicas dos solos, elementos como a geometria do barramento e as condições de carga têm um impacto significativo no comportamento hidráulico da estrutura. Em todas as situações, a poropressão negativa na parte superior da estrutura após a instalação do filtro, além de diminuir conforme os elementos de drenagem são dispostos, indica que a pressão da água estabelecida pelo reservatório está sendo adequadamente direcionada. A partir do estudo, concluiu-se que a configuração do sistema de drenagem tem um impacto considerável no controle do nível de água e da pressão hidrostática na barragem, ao obter para a estrutura com todos os elementos de drenagem (barramento com filtro horizontal, vertical, dreno de pé e poços de alívio) os maiores valores de fator de segurança e identificar que a disposição desses instrumentos foi crucial para proporcionar um caminho com menor resistência à água, reduzindo o gradiente hidráulico na região crítica da barragem e evitando a erosão interna. Identificou-se que essa seria a opção mais segura para o projeto.

Palavras-chave: taludes de barragem; poropressão em barragens; segurança de barragens.

## ABSTRACT

Irrigation, which aims to supplement or fully supply water for crops, is a technology that enhances agricultural productivity by reducing climate-related risks. The use of artificial irrigation reservoirs is an alternative to complement crop watering, especially in regions where climate change affects rainfall patterns. In this context, the installation of a dam, even a small one, is a complex process that involves various stages, from site selection to construction and operation of the structure. This study aimed to identify the alternative that provides the best safety conditions, considering slope stability and pore pressure criteria among different configurations for an irrigation dam in Goianésia do Pará. The methodology consists of a multi-step approach, starting with visits to the potential construction site, data collection, and literature review. In a subsequent stage, construction options were established based on the knowledge of the soil type and materials available in the municipality. The dam modeling was carried out using specialized software. For the analyses, one software was used to analyze fluid dynamics, and another to assess stability. From the analysis of all conditions, the safety factors achieved for the silty clay configuration were considerably satisfactory compared to the minimum required to ensure stability. When analyzing three distinct soil types, it was noted that the piezometric line exhibited similar patterns in all operational scenarios. This indicates that, even with variations in the physical and hydraulic characteristics of the soils, elements such as the dam's geometry and loading conditions have a significant impact on the hydraulic behavior of the structure. In all scenarios, the negative pore pressure in the upper part of the structure after filter installation, which decreases as drainage elements are arranged, indicates that the water pressure established by the reservoir is being adequately directed. From the study, it was concluded that the drainage system configuration has a considerable impact on controlling water levels and hydrostatic pressure in the dam. The structure with all drainage elements (dam with horizontal and vertical filters, toe drain, and relief wells) achieved the highest safety factor values, and the arrangement of these elements was crucial in providing a path with lower resistance to water, reducing the hydraulic gradient in the critical region of the dam and preventing internal erosion. It was identified that this would be the safest option for the project.

Keywords: dam slopes; pore pressure in dams; dam safety.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquemática de processos envolvidos na construção de uma barragem. ....	16
Figura 2 – Barragem de concreto por gravidade. ....	20
Figura 3 – Barragem de concreto por gravidade aliviada. ....	20
Figura 4 – Barragem de concreto com contraforte .....	21
Figura 5 – Barragem de concreto em arco. ....	22
Figura 6 – Seção típica de uma barragem de terra homogênea – Barragem de Ponte Nova, SP. .....	23
Figura 7 – Seção típica de uma barragem de terra. Barragem de Três Marias, MG – seção no leito do rio. ....	23
Figura 8 – Principais elementos de uma barragem de terra do tipo zoneada. ....	25
Figura 9 – Principais elementos de uma barragem de terra do tipo homogênea. ....	25
Figura 10 – Barragem de enrocamento. ....	26
Figura 11 – Classificação em níveis dos impactos de um reservatório de água. ....	29
Figura 12 – Esquema de medidor de nível d’água. ....	32
Figura 13 – Esquema de marco superficial. ....	34
Figura 14 - Esquema de um medidor de recalque de tubos telescópicos. ....	35
Figura 15 – Esquema de inclinômetro. ....	36
Figura 16 – Desenho de uma célula de tensão total. ....	36
Figura 17 - Carta de plasticidade de Casagrande .....	43
Figura 18 - Rede de fluxo pelo interior de barragens de terra. ....	46
Figura 19 – Organograma de análise do modelo estrutural. ....	48
Figura 20 – Ensaio triaxial. ....	49
Figura 21 – Esforços considerados na fatia do método de Morgenstern-Price .....	55
Figura 22 - Etapas da metodologia. ....	56
Figura 23 - Localização do Município. ....	57

Figura 24 - Nuvem de pontos do local do reservatório. ....	58
Figura 25 – Precipitação anual do município vizinho, Tucuruí. ....	61
Figura 26 - Seção transversal do barramento. ....	62
Figura 27 – Representação tridimensional do terreno, vista 01. ....	63
Figura 28 - Representação tridimensional do terreno, vista 02. ....	63
Figura 29 – Localização dos furos de sondagem e do barramento.....	64
Figura 30 – Laudo de sondagem 01. ....	65
Figura 31 – Laudo de sondagem 02. ....	66
Figura 32 – Mapa pedológico da região de integração do lago de Tucuruí. ....	67
Figura 33 – Barramento com filtro horizontal, vertical, dreno de pé e poços de alívio. ....	69
Figura 34 – Barramento com filtro horizontal, vertical e dreno de pé. ....	69
Figura 35 – Barramento com filtro horizontal, vertical e poços de alívio.....	70
Figura 36 – Barramento com dreno de pé. ....	70
Figura 37 - Malhas de tamanho variado. ....	71
Figura 38 – Comportamento da linha piezométrica considerando o regime permanente de operação.....	78
Figura 39 – Comportamento da linha piezométrica considerando o rebaixamento do reservatório do nível máximo para o mínimo.....	78
Figura 40 – Comportamento da linha piezométrica considerando o rebaixamento total do nível do reservatório em uma duração de 5 horas. ....	79
Figura 41 – Comportamento da linha piezométrica considerando o rebaixamento total do nível do reservatório em uma duração de 5 dias. ....	79
Figura 42 - Comportamento das tensões internas no solo argila arenosa no regime de operação.....	80
Figura 43 – Comportamento das tensões internas no solo argila arenosa no decorrer de 5 dias na condição de rebaixamento do reservatório do nível máximo para o nível mínimo.....	81
Figura 44 - Comportamento das tensões internas no solo argila arenosa no decorrer de 5 dias na condição de esvaziamento. ....	82
Figura 45 - Comportamento das tensões internas no solo argila arenosa no decorrer de 5 horas na condição de esvaziamento emergencial. ....	82
Figura 46 – Comportamento das linhas de fluxo a montante.....	83

Figura 47 – Direcionamento das linhas de fluxo para os filtros.....	83
Figura 48 - Comportamento das tensões internas no solo argila siltosa no regime de operação. .....	84
Figura 49 - Comportamento das tensões internas no solo argila siltosa no decorrer de 5 dias na condição de rebaixamento do reservatório do nível máximo para o nível mínimo.....	84
Figura 50 - Comportamento das tensões internas no solo argila siltosa no decorrer de 5 dias na condição de esvaziamento. ....	85
Figura 51 - Comportamento das tensões internas no solo argila siltosa no decorrer de 5 horas na condição de esvaziamento emergencial. ....	85
Figura 52 - Comportamento das tensões internas no solo silte argiloarenoso no regime de operação.....	86
Figura 53 - Comportamento das tensões internas no solo silte argiloarenoso no decorrer de 5 dias na condição de rebaixamento do reservatório do nível máximo para o nível mínimo. ....	86
Figura 54 - Comportamento das tensões internas no solo silte argiloarenoso no decorrer de 5 dias na condição de esvaziamento .....	87
Figura 55 - Comportamento das tensões internas no solo silte argiloarenoso no decorrer de 5 horas na condição de esvaziamento emergencial. ....	87
Figura 56 – Comportamento da poropressão considerando o solo argila arenosa no decorrer de 5 dias na condição de rebaixamento do reservatório do nível máximo para o nível mínimo. .	88
Figura 57 – Comportamento da poropressão considerando o solo argila siltosa no decorrer de 5 dias na condição de rebaixamento do reservatório do nível máximo para o nível mínimo ..	89
Figura 58 – Comportamento do poropressão considerando o solo silte argiloarenoso no decorrer de 5 dias na condição de rebaixamento do reservatório do nível máximo para o nível mínimo.....	89
Figura 59 - Comportamento da poropressão considerando o solo argila arenosa na condição de rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo em uma duração de 5 horas.....	90
Figura 60 - Comportamento da poropressão considerando o solo argila siltosa na condição de rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo em uma duração de 5 horas.....	90
Figura 61 - Comportamento da poropressão considerando o solo silte argiloarenoso na condição de rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo em uma duração de 5 horas. ....	91
Figura 62 - Comportamento da poropressão considerando o solo argila arenosa na condição rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo em uma duração de 5 dias .....	92
Figura 63 - Comportamento da poropressão considerando o solo argila siltosa na condição rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo em uma duração de 5 dias .....	92

Figura 64 - Comportamento da poropressão considerando o solo silte argiloarenoso na condição rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo em uma duração de 5 dias.....	93
Figura 65 - Localização dos instrumentos utilizados. ....	94

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Elementos básicos de barragens de terra. ....	24
Quadro 2 – Outros componentes de uma barragem de terra. ....	26
Quadro 3 – Danos causados a populações a jusante do barramento. ....	28
Quadro 4 – Danos causados a populações a montante do barramento. ....	28
Quadro 5 – Objetivo da instrumentação de barragens em cada etapa. ....	31
Quadro 6 - Frequências usuais de leitura.....	37
Quadro 7 - Coeficientes mínimos de segurança. ....	52
Quadro 8 - Coeficientes de segurança mínimos para diferentes condições de solicitação.....	52
Quadro 9 - Propriedade de resistência física dos solos encontrados. ....	68
Quadro 10 – Propriedade de permeabilidade dos solos encontrados. ....	68
Quadro 11 – Valores mínimos de dispositivos de drenagem. ....	72
Quadro 12 - Fatores de segurança para os modelos considerando material argila siltosa como estrutura do barramento e da fundação.....	74
Quadro 13 - Fatores de segurança para os modelos considerando material argila arenosa como estrutura do barramento e argila siltosa como material da fundação. ....	75
Quadro 14 - Fatores de segurança para os modelos considerando material silte argiloarenoso como estrutura do barramento e argila siltosa como material da fundação.....	76

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>16</b>
1.1.1 Objetivo geral .....	16
1.1.2 Objetivos específicos .....	17
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Principais definições sobre barragens .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Tipos de barragens .....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Barragem de concreto .....	19
2.2.1.1 Barragem de concreto com contraforte .....	21
2.2.1.2 Barragem de concreto em arco .....	21
2.2.2 Barragem de terra .....	22
2.2.2.1 Componentes da barragem de terra .....	24
2.2.3 Barragem de enrocamento .....	26
<b>2.3 Impactos .....</b>	<b>27</b>
2.3.1 Às populações e ao meio .....	27
<b>2.4 Instrumentação .....</b>	<b>30</b>
2.4.1 Medidor de nível d'água.....	32
2.4.2 Piezômetros .....	33
2.4.3 Marco superficial.....	33
2.4.4 Medidores de recalque com tubos telescópicos.....	34
2.4.5 Inclinômetros .....	35
2.4.6 Célula de tensão total.....	36
2.4.7 Frequência de leituras .....	37
<b>2.5 Critérios de projeto para barragens de terra .....</b>	<b>38</b>
2.5.1 Investigações geológico-geotécnicas.....	38
<b>2.6 Bacia hidrográfica .....</b>	<b>39</b>
2.6.1 Tempo de concentração .....	40
2.6.2 Intensidade de precipitação .....	40
2.6.3 Estimativa de vazão de projeto .....	41

2.6.4 Produção hídrica da bacia.....	41
<b>2.7 Drenagem interna.....</b>	<b>41</b>
<b>2.8 Índices físicos do solo.....</b>	<b>42</b>
2.8.1 Índice de vazios .....	42
2.8.2 Porosidade .....	43
2.8.3 Limite de liquidez e limite de plasticidade.....	43
2.8.4 Teor de umidade .....	44
2.8.5 Permeabilidade .....	44
2.8.6 Ângulo de repouso interno e externo.....	44
2.8.7 Resistência ao cisalhamento .....	45
2.8.8 Peso específico .....	45
<b>2.9 Redes de fluxo .....</b>	<b>46</b>
<b>2.10 Estabilidade de taludes.....</b>	<b>47</b>
2.10.1 Estabilidade dos taludes durante o período de construção .....	48
2.10.2 Estabilidade de regime permanente de operação.....	50
2.10.3 Rebaixamento rápido do reservatório.....	50
2.10.4 Softwares de análise .....	53
2.10.4.1 Software para análise de estabilidade de taludes.....	53
2.10.4.2 Software para análise de percolação.....	54
2.10.4.3 Método de Morgensten-Price .....	54
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>56</b>
<b>3.1 Caracterização do local de estudo.....</b>	<b>57</b>
<b>3.2 Dados do projeto.....</b>	<b>58</b>
<b>3.3 Pré-dimensionamento.....</b>	<b>58</b>
3.3.1 Volume de Água Armazenada.....	58
3.3.2 Altura do Barramento .....	59
3.3.3 Determinação da Largura da Crista .....	60
3.3.4 Cálculo do vertedouro .....	60
<b>3.4 Geometria .....</b>	<b>62</b>
<b>3.5 Propriedade dos materiais .....</b>	<b>63</b>
<b>3.6 Criação do modelo .....</b>	<b>69</b>
<b>3.7 Definição da malha .....</b>	<b>70</b>
<b>3.8 Variação dos elementos .....</b>	<b>71</b>
<b>3.9 Dimensionamento da drenagem interna .....</b>	<b>71</b>

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>73</b>
<b>4.1 Análise de estabilidade. ....</b>	<b>73</b>
<b>4.2 Análise de percolação. ....</b>	<b>77</b>
<b>4.3 Considerações acerca da instrumentação.....</b>	<b>94</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>96</b>
<b>5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>97</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água desempenha um papel crucial em diferentes setores da economia. Por isso, a instalação de reservatórios, juntamente com a adoção de práticas sustentáveis, possui relevância na sociedade e traz benefícios, como garantia da segurança alimentar, fornecimento de água potável, geração de energia, controle de inundações e incentivo a setores econômicos como a agricultura, a indústria e o turismo. No entanto, a segurança das barragens que armazenam essa água é igualmente importante, a definição de níveis de controle para situações de atenção, alerta e emergência é vital para monitorar a integridade dessas estruturas e proteger as comunidades ao redor, como indicado pela Resolução ANM nº 95/2022 estabelece que esses níveis. Com um planejamento apropriado, é possível ter um aumento de segurança enquanto custos e impactos ambientais são reduzidos, contribuindo para uma economia durável e sustentável.

De acordo com Buainain e Souza Filho (2001), o potencial do agronegócio é incontestável e os efeitos confiantes das atividades agropecuárias perante o desenvolvimento do setor contribuem para o crescimento de um país e até mesmo de uma região. A difusão das práticas agropecuárias na região sudoeste do Pará ampliou os horizontes dos pequenos proprietários de terra e marcam um intenso movimento de chegada de produtores, principalmente vindos da região sul do Brasil.

Essa expansão do agronegócio representa uma importante fonte de renda para os proprietários, o que resulta em um aumento do fluxo de renda no município em que a lavoura está instalada. Nestes sistemas, o plantio da soja e outras culturas em consórcio, associado a rotação com as áreas de pasto, permite a recuperação da fertilidade e o aumento da produção das pastagens. Outra vantagem é a possibilidade do cultivo de lavouras forrageiras<sup>1</sup>, após a colheita da soja, seguida do pastejo do gado.

Para a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (2021), a prática de irrigação, que tem como objetivo complementar ou suprir a falta total de água para as plantações, é uma tecnologia que aumenta a produtividade na agricultura ao diminuir os riscos climáticos. Permite o plantio em áreas com escassez de água mais severa, como no semiárido do Brasil, ou em áreas com períodos prolongados de baixa precipitação (seca), como a região central do país

---

<sup>1</sup> forrageira - são plantas cultivadas com o objetivo de proteger o solo, fornecer palha para o plantio direto e alimentar os animais.

Segundo ANA (2021), no Brasil, 8,5 milhões de hectares (Mha) são irrigados, dos quais 5,5 Mha são de mananciais 2,9 Mha são de água de reuso para fertirrigação. A projeção é que o uso de sistemas de irrigação aumente em 3 milhões de hectares até 2030, e que até 2040, aproximadamente 4,2 milhões de hectares sejam irrigados. “Com um crescimento anual de 211 mil hectares de terras irrigadas” (Abimaq, 2019).

Para CIGB (2008), a agricultura irrigada é a atividade que mais demanda água no mundo, sendo que, das terras produtivas, 20% é irrigada e esta parcela é responsável por 33,33% da produção mundial de alimentos. De acordo com CIGB (op. cit.), pesquisas apontam que, em 2025, 80% da produção alimentar virá de áreas irrigadas, tornando imprescindível a construção de mais projetos de reservatórios, mesmo com medidas de economia de água através de aprimoramentos na tecnologia de irrigação e períodos de estiagem.

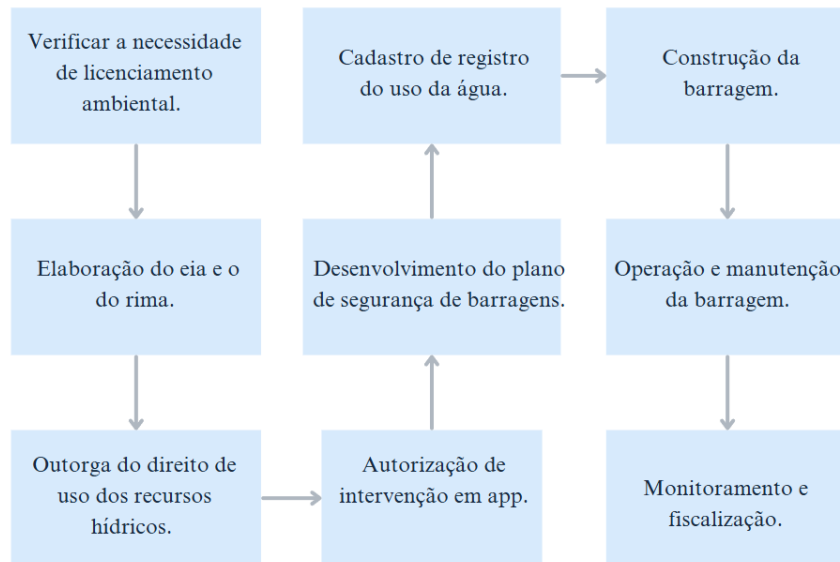
De acordo com Arnaldo Augusto Setti et al. (2001), a adoção de reservatórios artificiais de irrigação, popularmente conhecidas também como açudes ou represas, representam uma opção para complementar a rega das plantações, particularmente em áreas onde as alterações climáticas afetam a quantidade de precipitação. Ao se considerar a construção desses empreendimentos, sobretudo nos interiores, o empreendedor, ao esbarrar em normas e regulamentos estabelecidos pelos órgãos competentes, tende a optar por pequenos barramentos irregulares nos cursos d'água. Essa adoção imprópria de barragens pode provocar mudanças na organização e operação dos ecossistemas aquáticos, o que pode até desestabilizar os ecossistemas.

“Os impactos do barramento de um curso d'água ultrapassam os limites estabelecidos pela área diretamente inundada pelo reservatório.” (Richter et al., 2010). “A jusante, a ausência ou diminuição do nível de oxigênio da água mata muitos peixes e impede que os outros entrem no rio por baixo, como no caso dos peixes que ascendem os afluentes do Rio Amazonas.” (V. M. F. Almeida-Val; Chippari-Gomes; Lopes, 2006). Estando diretamente relacionado também a população que tira dali o seu sustento. Já a montante do reservatório, entre outros aspectos, a área inundada transpassará uma área anteriormente habitada por toda uma fauna e flora, modificando totalmente o ecossistema ali instalado.

A implementação de um barramento, mesmo que de pequeno porte, é um processo complexo que envolve várias etapas, desde a escolha do local até a construção e operação da estrutura. Embora o projeto de uma barragem envolva diversas etapas, como estudos de impacto ambiental, obtenção de licenças e autorizações, e elaboração de planos de segurança, entre outros, optou-se por restringir a abordagem ao dimensionamento propriamente dito. Dessa forma, para fins de simplificação, o foco do trabalho será a construção da barragem e seu

processo de concepção, implementação e análise de estabilidade, sem considerar os demais aspectos presentes na Figura 1.

Figura 1 – Esquematização de processos envolvidos na construção de uma barragem.



Fonte: Autores (2024).

Dessa forma, aspectos como estudos hidrológicos, reconhecimento do terreno, definição da geometria de construção, cálculo estrutural e dimensionamento hidráulico serão apresentados e discutidos. Outras questões relevantes, como licenciamento ambiental, planos de emergência e monitoramento da barragem, embora mencionadas, não serão aprofundadas neste trabalho.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Identificar a alternativa que apresenta as condições mais adequadas de segurança a partir de análises de segurança e estabilidade de barragens de terra, com foco na avaliação da poropressão e carga hidráulica em diferentes cenários, utilizando modelagem computacional e

dados geotécnicos para um barramento destinado a irrigação no município de Goianésia do Pará no estado do Pará.

#### 1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o possível local de instalação do barramento, identificando as características topográficas e os tipos de solo e rochas presentes na área.
- Analisar as alternativas de projeto, pré-dimensionando um elemento de barragem que consiga atender a demanda local, analisando os materiais e avaliando os diferentes sistemas de drenagem propostos para controlar a pressão neutra nos maciços.
- Criar modelo para análise da estabilidade de taludes da barragem e da percolação da água pelo maciço.
- Estimar valores de poropressão e carga hidráulica para diversos cenários, visando criar um conjunto de referências que permita comparar os resultados reais, caso esses cenários ocorram no futuro, e verificar a validade das hipóteses de projeto.
- Estabelecer, com base nas análises realizadas, os dispositivos de drenagem e suas localizações apropriadas no barramento.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresentou-se nesta seção a fundamentação teórica necessária para desenvolvimento e compreensão do material apresentado neste trabalho. Discutiram-se as definições fundamentais sobre o assunto, os tipos mais comuns de barragens, com foco em barragens de terra, apresentando seus componentes principais, além dos fatores a serem levados em conta na avaliação de segurança, estabilidade, percolação e instrumentação de barragens em geral, dando a devida relevância ao método empregado na análise. Também foram discutidos os efeitos dessas construções nas comunidades e no meio ambiente, os parâmetros hídricos essenciais para o funcionamento adequado dessas estruturas e os componentes de drenagem interna que estão diretamente ligados a este tipo de construção.

### 2.1 Principais definições sobre barragens

Para Brasil (2020), define-se barragem como qualquer estrutura erguida dentro ou fora de um curso de água, em talvegue ou cava exaurida com dique, com o propósito de conter ou acumular substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos, incluindo o barramento e as estruturas relacionadas. A Lei nº 12.334/2010<sup>2</sup>, ao distribuir a competência pela segurança das barragens conforme o seu uso, apresenta quatro empregos para esse tipo de estrutura, sendo eles a acumulação de água, a hidroeletricidade, a disposição final ou temporárias de rejeitos minerais e a disposição de resíduos industriais.

Costa (2012) apresenta duas divisões ao se tratar de barragens de água. Na primeira divisão, quanto ao objetivo para quais foram construídas, pode-se classificá-las como barragens de regularização ou de contenção. O primeiro tipo é utilizado para controlar a disponibilidade anual de água, permitindo a acumulação de água para abastecimento, irrigação, piscicultura e até mesmo produção de energia elétrica. O objetivo do segundo grande grupo de barragens é reduzir as ondas de cheia para evitar enchentes que possam afetar áreas vizinhas ao curso d'água.

Ainda segundo Costa (2012), a tecnologia no desenvolvimento de soluções para construção de barragens vem apresentando uma importante evolução no decorrer do tempo. Esse desenvolvimento deu origem a uma segunda divisão que se refere ao seu tipo. Existindo diversos tipos de barragens, o autor cita as soluções convencionais, sendo elas: barragens de terra, barragens de enrocamento e barragens de concreto.

---

<sup>2</sup> A Lei nº 12.334/2010 foi modificada pela Lei nº 14.066/2020. A Lei nº 12.334/2010 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

Além das classificações apresentadas por Costa, de acordo com Moliterno (1995), as barragens também podem apresentar uma divisão quanto ao seu tamanho. Para ele, as barragens pequenas são aquelas com até 30 metros de altura; barragens médias, as de altura de 30 a 90 metros; e as barragens de grande porte, aquelas que apresentam estrutura superior a 90 metros.

Uma última classificação refere-se ao material empregado na construção da estrutura da barragem. Segundo Novak (2007), a depender do material de uso, inicialmente, a estrutura de barragem pode estar classificada em dois grupos genéricos: barragem de aterro ou de concreto. As barragens de aterro são construídas utilizando terra ou rocha, apresentando inclinações semelhantes tanto na face a montante quanto a jusante, com ângulos moderados. Essa configuração proporciona uma seção ampla e um grande volume de material de construção em relação à altura da barragem.

Por outro lado, as barragens de concreto são construídas com concreto maciço e possuem inclinações de face diferentes. Geralmente, a face da jusante tem uma inclinação íngreme, enquanto a face a montante é quase vertical. Essas barragens de concreto possuem perfis relativamente delgados, embora isso possa variar de acordo com o tipo de barragem.

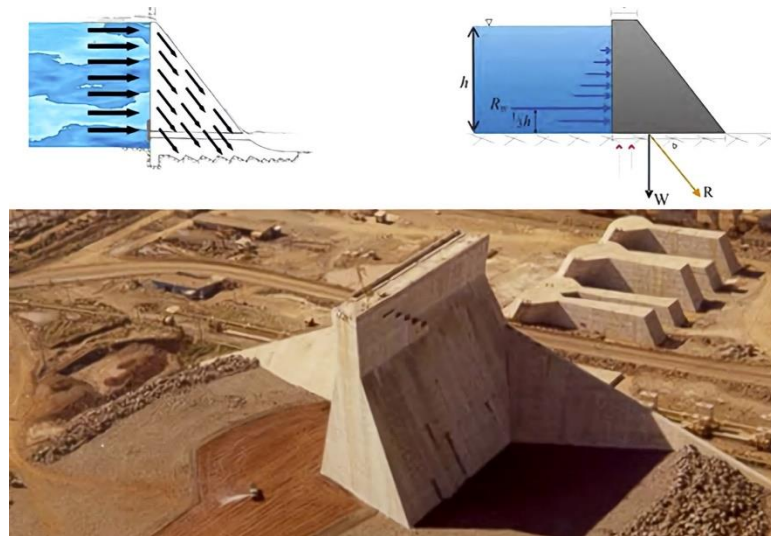
## **2.2 Tipos de barragens**

### **2.2.1 Barragem de concreto**

Para Gusmão Filho (2006), as barragens de concreto, a depender de sua estrutura, podem se dividir em três tipos: barragem de concreto por gravidade, barragem de concreto com contraforte e barragem de concreto em arco.

As barragens de concreto por gravidade, segundo Moliterno (1995), possuem a vantagem de ter a sua estabilidade assegurada pelo peso próprio da própria estrutura de concreto, em razão da gravidade, de onde vem seu nome, a considerar que esses sejam superiores aos esforços que a estrutura esteja submetida. São geralmente construídas em um perfil triangular como ilustrado na Figura 2, mas admite-se ângulos considerando condições topográficas. Esse tipo de barragem é bastante difundido pelo mundo, especialmente por apresentar simplicidade de projeto e construção e elevado grau de segurança.

Figura 2 – Barragem de concreto por gravidade.



Fonte: Luiz e Ferreira (2024).

Segundo Novak (2007), esse tipo de barragem apresenta algumas características principais, características estas que possuem total relevância dado o tipo de estrutura, pois demonstram ser altamente sensíveis à possibilidade de transbordamento, mesmo em cenários de inundação extrema, além de exibirem uma forte capacidade de resistir a distúrbios sísmicos sem colapsar de maneira catastrófica.

Semelhante a essa estrutura de barragem, cita-se a barragem de concreto por gravidade aliviada (Figura 3), que, segundo Novak (2007), é definida como uma barragem de gravidade em que o concreto é espalhado com esteira e depois compactado. Como não é vibrado, sua estanqueidade é garantida por uma camada de concreto convencional construída à montante.

Figura 3 – Barragem de concreto por gravidade aliviada.

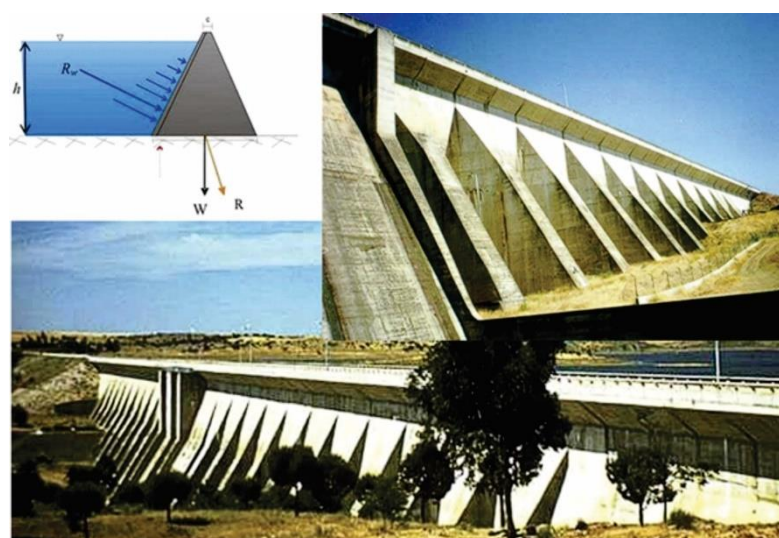


Fonte: Luiz e Ferreira (2024).

### 2.2.1.1 Barragem de concreto com contraforte

Barragens de concreto com contraforte baseiam-se em um mecanismo onde o esforço exercido sobre a montante é transmitido à fundação através de uma série de contrafortes (Figura 4), perpendiculares ao eixo do paramento de montante. De acordo com Schreiber (1977), os contrafortes são estruturas de forma similar aos "pilares" que descarregam o esforço do empuxo do paramento de montante para as fundações. A parede vedante é composta por lajes de concreto armado apoiadas em contrafortes ou abóbadas cilíndricas, geralmente em forma de semicírculo.

Figura 4 – Barragem de concreto com contraforte



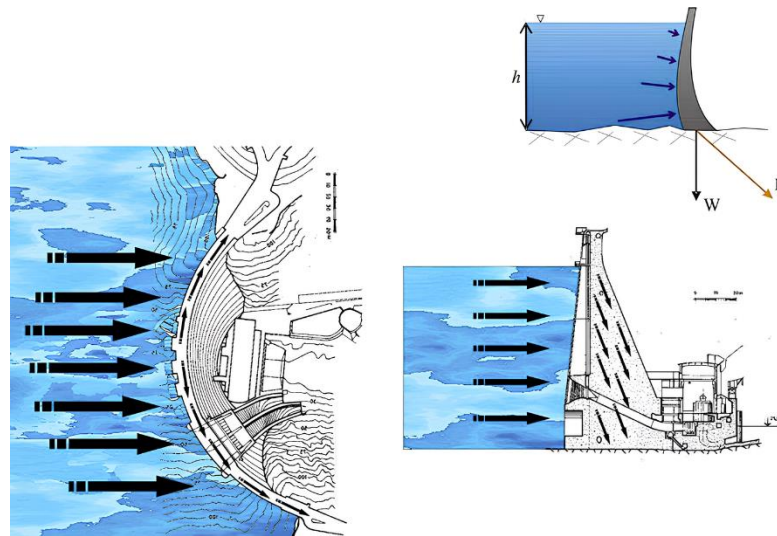
Fonte: Luiz e Ferreira (2024).

Se comparada à barragem de concreto por gravidade, possuem menor volume e, por consequência, uma menor pressão na base, porém exigem um projeto estrutural mais complexo e apresentam maior custo de execução em função das formas e cimbramentos utilizados na execução dos contrafortes. Por isso, a aplicação desse tipo de barragem restringe-se a situações especiais.

### 2.2.1.2 Barragem de concreto em arco

Segundo Souza *et al.* (1983), as barragens em arco transmitem cargas para suas ombreiras devido à capacidade das estruturas em arco de suportar cargas uniformemente distribuídas sobre seu dorso. As forças do empuxo hidrostático são transferidas para as margens e para o fundo do rio nessas condições (Figura 5). Portanto, seu emprego requer condições naturais extremamente especiais, como margens altas feitas de rocha sã e resistente. Seu peso é menos importante para o equilíbrio estático devido às suas pequenas seções transversais. Pode ser feita de concreto ou concreto armado.

Figura 5 – Barragem de concreto em arco.



Fonte: Luiz e Ferreira (2024).

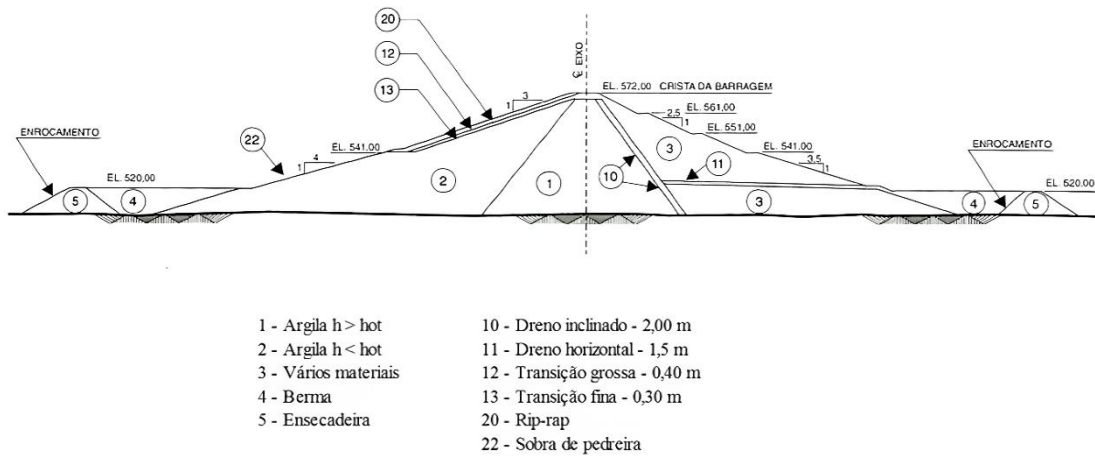
Essa construção faz com que esse tipo de barragem consuma bem menos concreto que o modelo por gravidade, considerando que nesse caso o peso próprio possui um papel secundário na sua estabilidade. No entanto, as condições necessárias para a sua adoção são muito específicas.

### 2.2.2 Barragem de terra

As barragens de terra são as mais comuns no Brasil. Para Mendonça (2012), isso se deve, principalmente, à disponibilidade abundante de materiais, bem como às condições topográficas favoráveis e à possibilidade de construir sobre diversos tipos de fundações. Essas barragens, por não possuírem uma estrutura rígida, possibilitam a construção em fundações mais maleáveis, transmitindo esforços reduzidos para as fundações em comparação com as barragens mencionadas anteriormente.

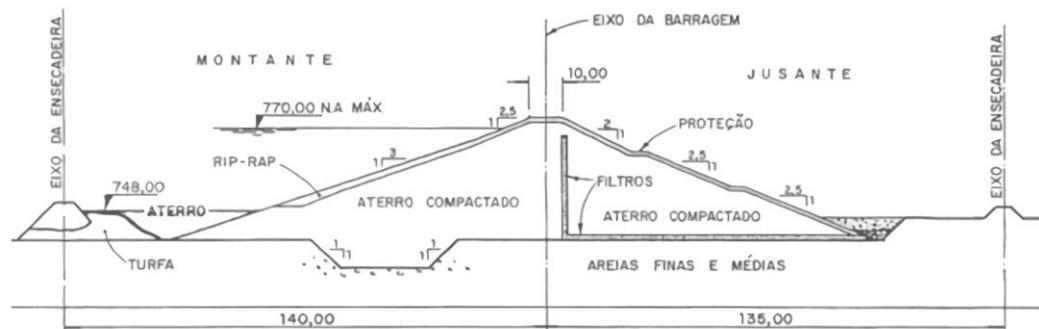
Para Chiossi (2013), as barragens de terra podem ser divididas em dois grandes grupos: as barragens de terra homogêneas e as barragens de terra zoneadas. As barragens homogêneas (Figura 6), são constituídas por um mesmo material (solo argiloso) compactado, enquanto as barragens do tipo zoneadas (Figura 7), são compostas por mais de um tipo de solo ou por um mesmo solo compactado em condições diferentes para garantir uma otimização da seção ou considerando a disponibilidade de materiais.

Figura 6 – Seção típica de uma barragem de terra homogênea – Barragem de Ponte Nova, SP.



Fonte: Cruz (2004).

Figura 7 – Seção típica de uma barragem de terra. Barragem de Três Marias, MG – seção no leito do rio.



Fonte: Cruz 2004

Gaioto (2003) menciona um terceiro tipo de barragens de terra, chamadas de barragens de aterro hidráulico. Essas barragens são construídas transportando material pastoso entre diques de contenções laterais. Como é uma estrutura sem compactação, tem baixa resistência, resultando em taludes menos inclinados que os de barragens de terra tradicionais.

As estruturas erguidas em aterro requerem manutenção contínua, principalmente focada no controle da percolação e erosão, para evitar a deterioração do maciço ou da fundação, e a criação de rotas de percolação mais favoráveis (Brasil, 2002).

Conforme recomendação da Agência Nacional de Águas (ANA, 2014), programas de manutenção periódica para estruturas em aterro devem incluir: a manutenção regular da instrumentação, da crista e do enrocamento; o controle desde a vegetação até as tocas de animais; estabilização de taludes; manutenção dos sistemas de drenagem e a remoção de entulhos a montante, a fim de garantir-se a segurança da estrutura.

De acordo com Novak (2007), atualmente, o uso de aterros homogêneos é geralmente limitado a reservatórios menores, requerendo uma disponibilidade imediata e suficiente de solo de baixa permeabilidade, além de um projeto meticuloso e internamente detalhado para o controle de infiltrações e pressões hidrostáticas.

#### 2.2.2.1 Componentes da barragem de terra

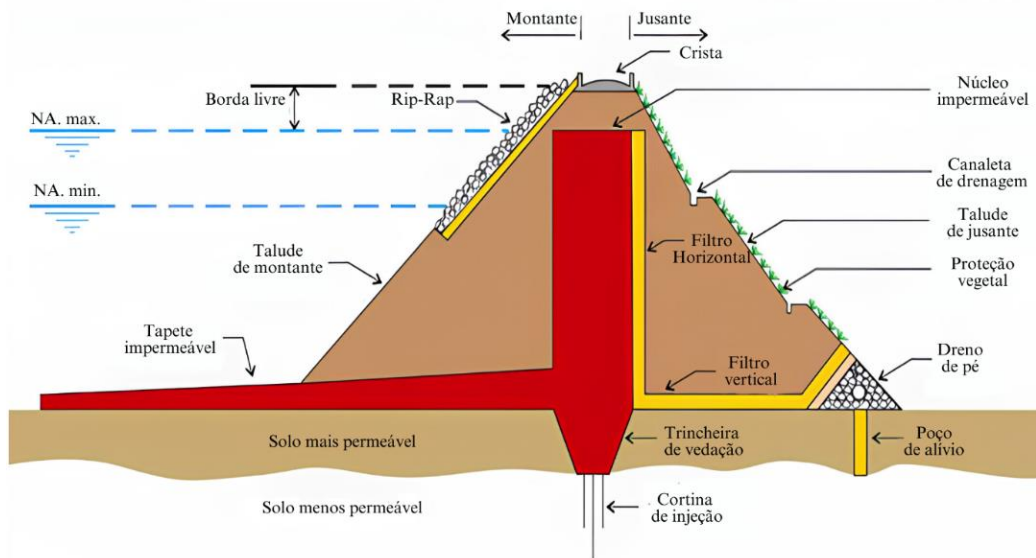
Segundo Carvalho (2011), existem alguns elementos básicos na construção de barragens de terra. Eles estão definidos no Quadro 1 e apresentados nas Figuras 8 e 9.

Quadro 1 – Elementos básicos de barragens de terra.

<b>ELEMENTOS</b>	<b>DEFINIÇÃO</b>
Crista	Parte superior do aterro. Normalmente destinada ao tráfego de veículos;
Borda livre (folga)	Distância vertical entre a crista e o nível de acumulação máximo. Tem o objetivo de segurança contra o transbordamento;
Talude de montante	Parte do maciço que está em contato com a água represada;
Rip-rap	Proteção do talude de montante contra a ação das ondas e intempéries;
Talude de jusante:	Parte do maciço que não está em contato com a água represada;
Proteção do talude de jusante	Normalmente grama ou enrocamento. Deve ser utilizada para evitar erosão, causada pelas águas pluviais;
Trincheira de vedação ( <i>cut-off</i> )	Vala construída no eixo do maciço e preenchida com solo de baixa permeabilidade, devidamente compactado. Tem a finalidade de evitar o fluxo de água subterrâneo sobre a barragem;
Filtro	. Há o filtro vertical que tem a função de baixar a linha freática, encaminhando o fluxo para a base do aterro, evitando o seu aparecimento na face do talude de jusante e o horizontal que recebe o fluxo interrompido pelo filtro vertical e encaminha a água percolada para o dreno de pé (MASSAD, 2010);
Dreno de pé	Capta toda a água percolada através dos filtros (vertical e/ou horizontal), conduzindo-a ao curso d'água à jusante da barragem. Corresponde a uma seção de enrocamento construído com rochas de granulometria variada em transição;
Cortina de injeção	Trata-se de injeção de material impermeável (cimento, silicatos ou resinas) abaixo da trincheira de vedação nas falhas ou fissuras caso a fundação ainda apresente permeabilidade elevada;
Poços de alívio	São furos de drenagem abertos no terreno, com o objetivo de reduzir as subpressões desenvolvidas pela percolação de água na fundação;
Tapete impermeável	Estrutura construída em material impermeável e conectada à seção impermeável da barragem com o objetivo de diminuir a percolação de água através da fundação;
Sistema de drenagem das águas pluviais	Estruturas localizadas na crista e nos taludes que coletam e transportam a água das chuvas, evitando a sua erosão.

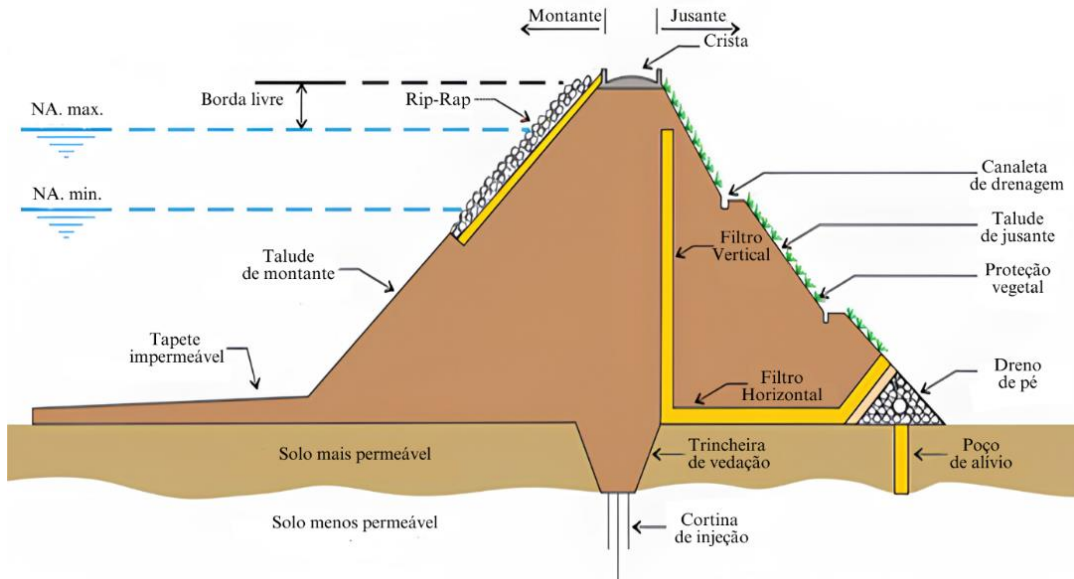
Fonte: Dos autores, adaptado de Carvalho (2011).

Figura 8 – Principais elementos de uma barragem de terra do tipo zoneada.



Fonte: Carvalho (2011).

Figura 9 – Principais elementos de uma barragem de terra do tipo homogênea.



Fonte: Carvalho (2011).

De acordo com Abreu (2015), outros componentes possuem grande importância para o ideal funcionamento de uma barragem de terra e completam a lista apresentada com os elementos definidos no Quadro 2.

Quadro 2 – Outros componentes de uma barragem de terra.

ELEMENTOS	DEFINIÇÃO
Núcleo	Elemento construído no eixo da barragem com material de baixa permeabilidade para diminuição da infiltração.
Vertedor	Estrutura que tem a finalidade de escoar o excesso de água da represa após esta atingir seu nível de acumulação máximo
Desarenador	Consiste em uma tubulação instalada no fundo, transpassando toda a barragem e tem a função de controle do nível da represa, como também, garantir o escoamento à jusante;
Dissipador de energia	Estrutura instalada no vertedor que tem a função de diminuir a energia cinética da água.

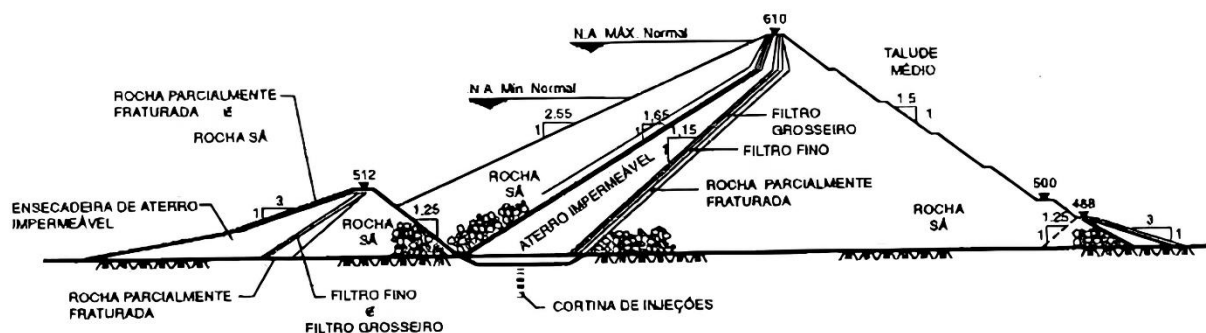
Fonte: Dos autores, adaptado de Abreu (2015).

### 2.2.3 Barragem de enrocamento

Segundo a Agência Nacional das Águas (ANA, 2016), a barragem de enrocamento costuma ser usada na impossibilidade da construção da barragem de terra, seja por falta de material argiloso, seja pelo excesso de material rochoso de escavação

Esse tipo de barragem é composto por um aglomerado de terra e pedras usadas para sua sustentação. Uma vez que é geralmente usada para o armazenamento permanente de água, deve possuir então um elevado grau de estanqueidade. Para Novak (2007) uma das vantagens do uso de enrocamento em barragens é sua resistência ao cisalhamento, que é relativamente alta. Além disso, o enrocamento apresenta alta permeabilidade, o que pode ajudar a eliminar problemas de pressão da água e permitir inclinações mais íngremes.

Figura 10 – Barragem de enrocamento.



Fonte: Luiz e Ferreira (2024).

De acordo com Costa (2012), nas barragens de enrocamento, a rocha predomina e as divisões ocorrem conforme o método de impermeabilização. Em barragens com núcleo

impermeável, a água é vedada através de um núcleo argiloso, que pode estar no centro ou inclinado para a montante, separado por zonas de transição, prevenindo o transporte de material fino para o interior da rocha. Por outro lado, nas barragens de enrocamento com face impermeável, a água é mantida vedada através da impermeabilização da face de montante. Isso pode ser feito através de uma camada de asfalto, uma placa de concreto ou até mesmo com o uso de chapas de aço.

De acordo com Massad (2010), não existem registros de ruptura de taludes em barragens mistas de terra e enrocamento, o que sugere que esse tipo de barragem seja o mais estável entre as barragens de aterro.

## **2.3 Impactos**

Nesta seção, a partir de uma revisão com ênfase no Relatório de Impacto Ambiental do aproveitamento hidrelétrico de Belo Monte, buscou-se apresentar os impactos relacionados direta ou indiretamente à construção de um barramento.

### **2.3.1 Às populações e ao meio**

Para garantir que grandes projetos de infraestrutura sejam sustentáveis e minimizem seus impactos negativos sobre a população e o meio ambiente, a avaliação prévia dos impactos e a criação de planos de mitigação são etapas cruciais no processo de licenciamento e autorização, como os Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e a elaboração de Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA). Esses estudos visam identificar, avaliar e prever os impactos ambientais, sociais e econômicos que o empreendimento pode causar, tanto a montante quanto a jusante da estrutura. Com base nessas previsões de impacto, são propostas medidas de mitigação e programas de compensação para minimizar os efeitos negativos sobre as comunidades locais, o meio ambiente e os ecossistemas afetados.

A construção de uma Usina Hidrelétrica (UHE) na Amazônia, por exemplo, pode ser caracterizada como uma obra de risco econômico e de diversos conflitos sociais e ambientais, não sendo uma tecnologia ambientalmente limpa e sustentável, as intensas perdas sociais e ambientais ligadas às grandes obras hidrelétricas sinalizam a necessidade de um debate democrático sobre o atual sistema de planejamento e desenvolvimento.

Um exemplo notório é a Usina Hidrelétrica de Belo Monte, que, apesar dos esforços para implementar um Plano de Desenvolvimento Sustentável, teve impactos socioambientais classificados como "desastre" por pesquisadores e ambientalistas, entre os problemas

identificados, destacam-se o assoreamento e os obstáculos à navegação no rio Xingu, a alta mortalidade de árvores, a inviabilização da reprodução de peixes e a desestruturação do modo de vida de povos indígenas e comunidades ribeirinhas. A experiência de Belo Monte ilustra a necessidade de considerar as interligações entre projetos de diferentes infraestruturas como uma condição prévia para autorizar ou construir qualquer projeto. De acordo com Freire (2019), o relatório de impacto ambiental de Belo Monte afirma que a construção e operação da barragem afetaram as populações a jusante e a montante de maneiras diretas e diversas. Os efeitos sobre essas populações são representados nos Quadros 3 e 4.

Quadro 3 – Danos causados a populações a jusante do barramento.

<b>IMPACTOS</b>	<b>DANOS</b>
<b>Alteração da qualidade da água</b>	Afeta a pesca e comprometendo a fonte de subsistência e renda das populações e povos indígenas.
<b>Aumento da pressão sobre as terras e áreas indígenas devido ao aumento da população migrante</b>	Conflitos internos e insegurança territorial
<b>Reassentamento da população</b>	Perda das terras e moradias tradicionais das comunidades locais, conflitos com as autoridades e outros atores envolvidos no processo, perda de moradias, terras e meios de subsistência.

Fonte: Dos autores, adaptado de Brasil (2009).

Quadro 4 – Danos causados a populações a montante do barramento.

<b>IMPACTOS</b>	<b>DANOS</b>
<b>Geração de expectativas quanto ao futuro da população local e da região</b>	Mudanças na ocupação do solo e aumento da pressão sobre as terras e áreas indígenas;
<b>Aumento da população e ocupação desordenada do solo</b>	Perda de imóveis, benfeitorias e atividades produtivas, tanto na área rural quanto na área urbana;
<b>Aumento das necessidades por mercadorias e serviços, oferta de trabalho</b>	Dinâmica social e econômica das comunidades a montante do empreendimento;
<b>Aumento da pressão sobre as terras e áreas indígenas devido ao aumento da população migrante</b>	Conflitos internos e insegurança territorial;
<b>Impactos socioeconômicos</b>	Perda de imóveis, benfeitorias, renda, fontes de sustento, equipamentos sociais.

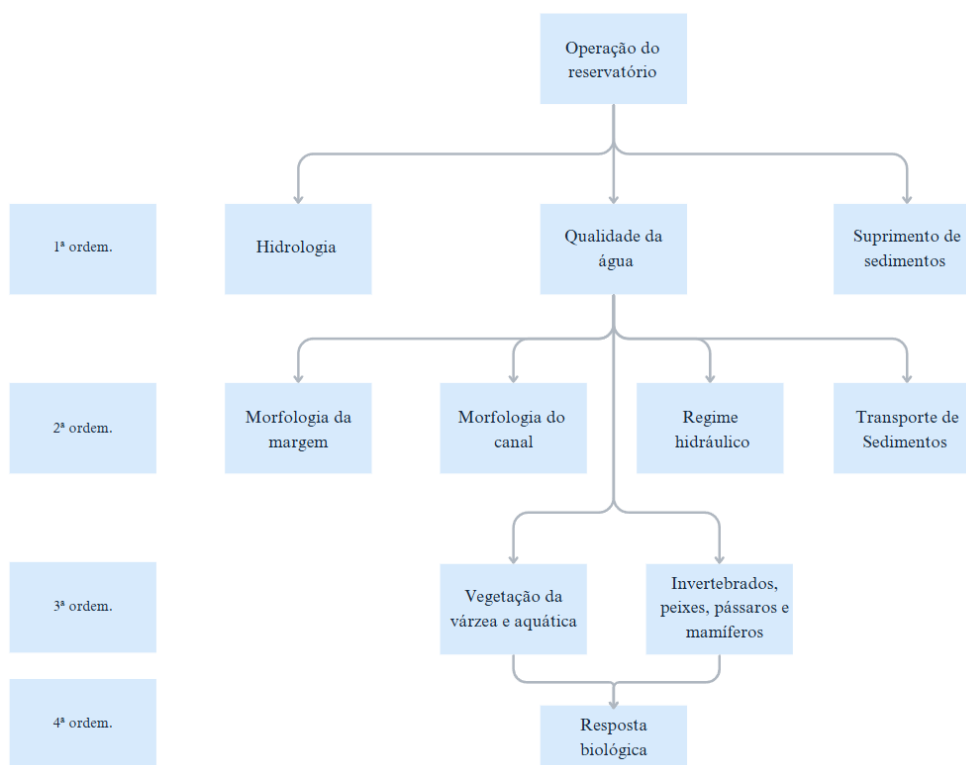
Fonte: Dos autores, adaptado de Brasil (2009).

De acordo com Pinto (2010), a construção de reservatórios artificiais afeta negativamente a fauna aquática, que também é afetada pela área de inundação. Várias espécies de peixes foram extintas ou estão ameaçadas como resultado da construção destes. A mudança do ambiente lótico<sup>3</sup> para lêntico<sup>4</sup> tem o maior impacto na fauna aquática, pois altera a estrutura e o funcionamento do ambiente.

Segundo Silva (2017), os sedimentos são partículas de granulometria variada que são erodidas de solos e rochas ao longo dos rios. O equilíbrio dinâmico dos rios pode ser alcançado por meio do transporte adequado de sedimentos. Portanto, quando uma barreira artificial é construída, esse transporte é reduzido drasticamente, ou até mesmo pode ser impedido. Como resultado, ocorrências a jusante e a montante do reservatório podem diminuir gradualmente sua capacidade de armazenamento, o que pode prejudicar a operação de aproveitamento.

Burke *et al.* (2009) apresentam uma hierarquia dos impactos físicos e biológicos causados pela operação de barragens (Figura 11), classificando os impactos em quatro ordens que, por fim, irão desencadear uma resposta biológica.

Figura 11 – Classificação em níveis dos impactos de um reservatório de água.



Fonte: Dos autores, adaptado de Burke *et al.*, (2009).

<sup>3</sup> ambiente aquáticos de água parada, ou calma sem correntes como vê-se em lago, lagoas, pântanos.

<sup>4</sup> sistema fica suscetível a distúrbios devido ao pouco espaço e ciclo de vida curto, o que faz com que a fauna e flora se adaptem ao ambiente.

Segundo Vorosmarty *et al.* (1997), entre os grandes impactos do barramento de um curso de água estão: deslocamento de grandes grupos humanos; silenciamento do reservatório; impacto na migração, ciclo de vida e habitat de seres aquáticos, incluindo peixes de valor comercial; elevação na incidência e gravidade de enfermidades de água estagnada; perda de água irrecuperável por evaporação do reservatório e subterrânea.

Esteves (1998) divide os danos causados após o barramento de um curso de água, em danos a montante e a jusante. No primeiro caso, o barramento afeta na elevação do nível do lençol freático com potenciais impactos na agricultura local (elevação da umidade do solo) e na epidemiologia (formação de brejos com a proliferação de mosquitos e outros insetos propagadores de doenças); na elevação da taxa de sedimentação à frente em seus afluentes; e na inundação de áreas florestais ou agrícolas, que podem provocar mudanças físicas e químicas no ambiente aquático (como mudanças no pH e aparecimento de gás sulfídrico). Os danos causados a jusante, por sua vez, estão relacionados a mudança no ciclo hidrológico, que passa a apresentar um ciclo de seca e cheia aperiódico, independentemente do ciclo de chuvas da região, além de mudanças na qualidade física e química da água.

Segundo Stevaux *et al.* (2009), as barragens provocam significativas alterações na dinâmica fluvial, alterando o ciclo natural do rio e afetando os processos de transporte e deposição. Além disso, elas contribuem para a diminuição da biodiversidade ao devastarem os habitats de muitas espécies. Nesse mesmo sentido, para Poff e Hart (2002) a modificação do fluxo de água e sedimentos a jusante afeta diretamente os ciclos biogeoquímicos e a estrutura e dinâmica de habitats aquáticos e ripários, interferindo na elevação da temperatura da água, que afeta a bioenergia do organismo e as taxas de vida; ocorre, ainda, instalação de obstáculos ao deslocamento de organismos e nutrientes a montante e a jusante, o que complica a troca biótica.

A construção e a operação de barragens requerem uma supervisão técnica rigorosa, principalmente em relação à avaliação da percolação e da estabilidade das estruturas. A adoção de modelos numéricos e a instrumentação das barragens são ferramentas essenciais para monitorar o comportamento das estruturas e garantir a segurança das obras. É crucial adotar uma estratégia multidisciplinar que leve em conta os elementos técnicos, sociais e ambientais para reduzir os efeitos adversos das barragens e assegurar sua sustentabilidade a longo prazo.

## **2.4 Instrumentação**

O interesse crescente pela segurança de barragens levou vários países a adotarem normas e critérios específicos para projeto, construção, observação, inspeção e monitoramento

da operação de barragens e outras obras de engenharia geotécnica. O uso da instrumentação deve atender às demandas que surgirão durante a construção da barragem e posteriormente.

A segurança de barragens busca preservar a integridade estrutural e operacional, além de proteger a vida, a saúde, o patrimônio e o ambiente natural.

A Lei no 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Esta legislação também estabeleceu o Sistema Nacional de Dados sobre Segurança de Barragens, além disso, entre outras normativas, a ABNT NBR 13.028/2024 define normas para a criação e exibição de projetos de barragens, a ABNT NBR 17.188/2024 define orientações para uma eventual ruptura de barragens. A Resolução ANA no 236/2017 define a frequência, a competência técnica e o conteúdo do Plano de Segurança de Barragens e o volume VII do SNISB, que determina diretrizes básicas para a criação do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação.

Devido ao fato de que a segurança de uma barragem está diretamente ligada ao seu projeto e construção, a utilização de instrumentos não apenas complementa, mas é essencial para a segurança da obra, esses instrumentos servem como ferramentas vitais para coletar informações que permitem a tomada de decisões informadas e a realização de reparos quando necessário. De acordo com Silveira (2006), parâmetros como pressão da água nos poros, pressão da água na rocha de fundação, pressões totais, recalques, deslocamentos horizontais, cargas e tensão nos componentes estruturais, temperatura e vazões de drenagem devem ser monitorados.

A Comissão De Auscultação e Instrumentação De Barragens (1996) estabeleceu os objetivos fundamentais da instrumentação de uma barragem e efetuou uma divisão em três etapas principais. São elas: construção, enchimento e operação, descritas no Quadro 5.

Quadro 5 – Objetivo da instrumentação de barragens em cada etapa.

<b>PERÍODO</b>	<b>IMPORTÂNCIA DA INSTRUMENTAÇÃO</b>
<b>Construção</b>	Alertar sobre a ocorrência de possíveis anomalias no comportamento da barragem como, por exemplo, condições térmicas que possam dar origem a fissuras em estruturas de concreto ou tensões de tração que possam causar fissuras transversais em aterros compactados.
<b>Enchimento</b>	Possibilitar avaliação do desempenho estrutural, geotécnico e hidráulico da obra, em função das comparações entre grandezas medidas <i>in situ</i> e aquelas previstas por modelos teóricos ou experimentais de análise. Verificar a adequação das simplificações introduzidas nas hipóteses de projeto.
<b>Operação</b>	Verificar se a barragem está apresentando um desempenho geral satisfatório, conforme previsto em projeto. Caracterizar o comportamento no tempo dos solos ou do maciço rochoso de fundação, determinando o prazo necessário para a estabilização dos deslocamentos, tensões, subpressões, vazões etc.

Fonte: Dos autores, adaptado de Comissão de Auscultação e Instrumentação de Barragens (1996).

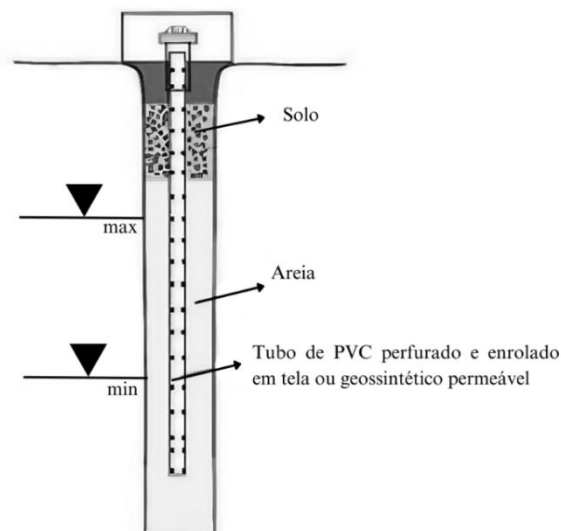
De modo geral, uma combinação de experiência, bom senso e intuição deve ser usada para escolher com sucesso o número, o tipo e a localização dos instrumentos necessários para uma barragem (US Army Corps Of Engineers, 2004). As barragens representam situações distintas e oferecem uma variedade de soluções personalizadas para seus requisitos de instrumentação. Dessa forma, medidores de nível d'água, piezômetros, inclinômetros, entre outros, passam a ter uma importância maior ou menor, de acordo com características próprias a serem estudadas em cada caso.

A seguir, serão apresentados alguns elementos empregados no monitoramento de barragens. A compreensão desses instrumentos é fundamental para garantir a segurança e a integridade dessas estruturas, prevenindo acidentes e minimizando os riscos associados à sua operação.

#### 2.4.1 Medidor de nível d'água

Os medidores do nível d'água (Figura 12) para Santos (2019), são os instrumentos mais básicos utilizados no monitoramento de barragem. Conforme o nome sugere, seu objetivo principal é determinar o nível do lençol freático que se forma em maciços de terra ou rocha. Em termos gerais, é suficiente a realização de um furo ou poço de sondagem e posterior determinação da cota do nível d'água.

Figura 12 – Esquema de medidor de nível d'água.



Fonte: Dos autores, adaptado de Georio (2000).

O nível d'água geralmente é medido por meio de um cabo graduado equipado com um sensor elétrico na parte inferior e um emissor luminoso ou sonoro na superfície<sup>5</sup>. O circuito elétrico é fechado quando a água atinge o nível do sensor no tubo. A leitura é feita ao topo do tubo, por trena ou metro de madeira. O arranjo de instalação está apresentado na .

#### 2.4.2 Piezômetros

Os piezômetros medem as pressões neutras em maciços de terra ou rocha. É um dos instrumentos mais importantes para a segurança de barragens, apresentando uma diversidade de tipos. Então uma escolha adequada do tipo de piezômetro depende de vários fatores, como as medidas, o posicionamento do instrumento em relação ao terminal de leitura, seja estático ou dinâmico, a necessidade de uma medida de pressão negativa neutra, a disponibilidade comercial do instrumento, entre outros aspectos.

De acordo com Silveira (2006), entre as principais vantagens do piezômetro de tubo aberto estão a confiabilidade, a durabilidade, a sensibilidade, a possibilidade de verificação do seu desempenho por meio de ensaios de recuperação do nível d'água e a estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo onde se encontra instalado o instrumento. Além disso, este piezômetro apresenta vantagens econômicas e facilidade na instalação. Para Cruz (2004), os piezômetros hidráulicos apresentam vantagens como simplicidade, confiabilidade, bom tempo de resposta mesmo em solos de baixa permeabilidade, técnica de construção relativamente simples, entre outras.

Outros tipos de piezômetros são os pneumáticos e hidráulicos, onde, segundo Machado (2007), o primeiro apresenta as vantagens de alta resolução e precisão dos resultados, a possibilidade de transmissão dos sinais a longa distância e a acessibilidade para instalação e leitura. Cruz (2004) destaca vantagens como a não interferência dos recalques sofridos pelos instrumentos sobre as medidas, inexistência das limitações quanto à localização do instrumento, insensibilidade a descargas atmosféricas, tempo de resposta relativamente pequeno, entre outras.

#### 2.4.3 Marco superficial

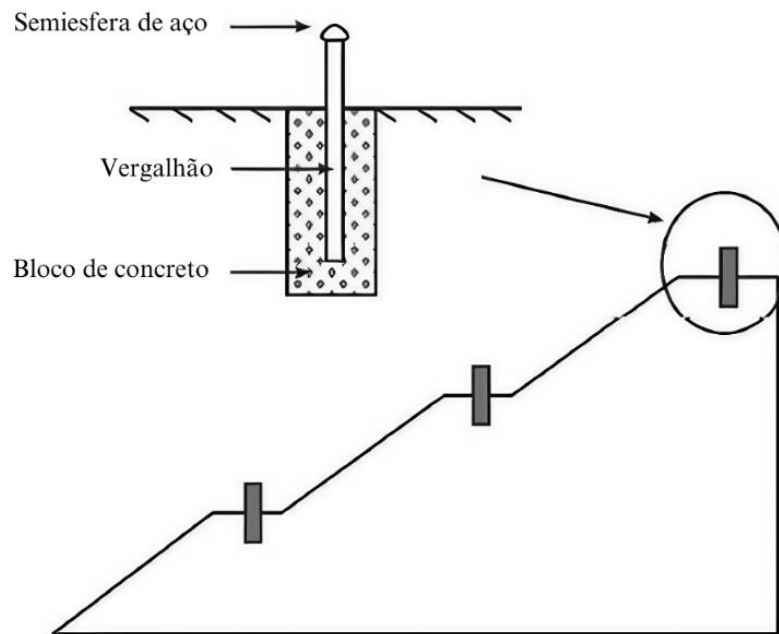
Fonseca (2003) afirma que os marcos superficiais são ferramentas utilizadas para medir os deslocamentos verticais e horizontais de maciços rochosos e enrocamentos. Vergalhões de aço CA-50, com 1,10 m de comprimento e diâmetro de meia polegada, são utilizados. Uma

---

<sup>5</sup> Este cabo é conhecido técnica e comercialmente como “pio elétrico”.

semiesfera é colocada no topo do vergalhão. Finalmente, a estrutura é ancorada com um bloco de concreto de 0,30 m de diâmetro e 1,20 m de profundidade, nas áreas de crista, margens e talude de montante. Entre as vantagens desta instrumentação estão os baixos custos e as leituras com precisões satisfatórias. Na Figura 13 são mostrados exemplos de posicionamento.

Figura 13 – Esquema de marco superficial.

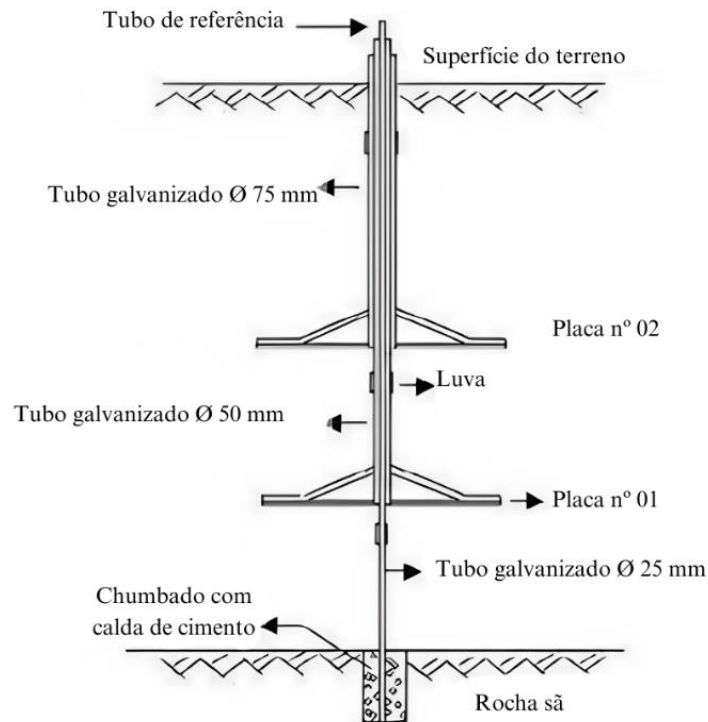


Fonte: Dos autores, adaptado de Fonseca (2003).

#### 2.4.4 Medidores de recalque com tubos telescópicos

De acordo com Affonso (2004), consiste em um tubo galvanizado de diâmetro 25mm, chumbado em rocha sã (considerada como incompressível, em termos práticos), e de uma ou mais placas solidárias a tubos também galvanizados como ilustrado a instalação na Figura 14.

Figura 14 - Esquema de um medidor de recalque de tubos telescópicos.



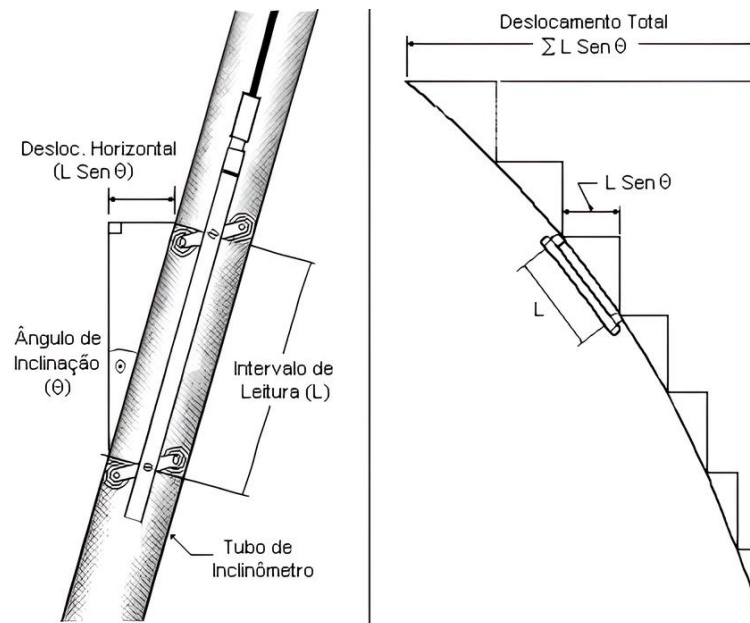
Fonte: Dos autores, adaptado de Fonseca (2003).

Tem como objetivo determinar os deslocamentos verticais nos maciços e na fundação. Os recalques são medidos em relação ao tubo de referência interno, que está solidário à rocha de fundação. Os medidores podem ser usados para medir os deslocamentos verticais em vários pontos do maciço, em locais que são mais importantes.

#### 2.4.5 Inclinômetros

Os inclinômetros medem mudanças horizontais. Estes instrumentos são utilizados com o objetivo de determinar deslocamentos horizontais, superficiais e em subsuperfície. Consistem em um conjunto de segmentos de tubos de plástico ou de alumínio, confeccionados especialmente para esta finalidade, montados através de luvas telescópicas em posição subvertical. “Tais tubos possuem dois pares de ranhuras, diametralmente opostas, com os dois diâmetros estando perpendiculares entre si, dispostos na barragem nas direções montante/jusante e ombreira esquerda/ombreira direita” (Affonso, 2004). Na Figura 15 apresenta-se o processo de obtenção dos deslocamentos.

Figura 15 – Esquema de inclinômetro.

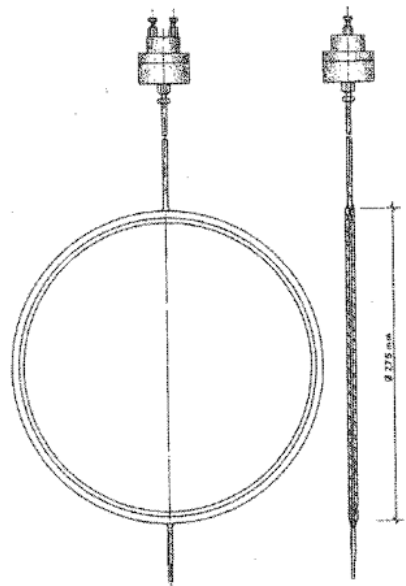


Fonte: UFBA (2024).

#### 2.4.6 Célula de tensão total

De acordo com Santos (2019), as tensões totais são determinadas pelos esforços que os maciços de terra exercem sobre o concreto na interface entre o maciço compactado e a estrutura de concreto. Além disso, podem ser medidos no encontro de vários materiais diferentes, como entre o aterro e a fundação ou entre o aterro e as ombreiras. Para medir essas tensões, são usadas células de tensão total (Figura 16).

Figura 16 – Desenho de uma célula de tensão total.



Fonte: 100 barragens Brasileiras (1966).

Usualmente as células de pressão total são instaladas na posição horizontal, para que a medição seja feita na base das barragens. As células de pressão são particularmente recomendadas para regiões de barragem suscetíveis a processos de arqueamento, como nos núcleos das barragens de enrocamento, no interior de *cut-offs* mais profundos, nas paredes verticais dos muros de ligação em concreto etc. (Silveira, 2006).

#### 2.4.7 Frequência de leituras

A frequência de leitura de cada instrumento instalado em uma barragem varia de acordo com a fase em que o empreendimento se encontra. São recomendadas frequências mínimas de leituras, que devem ser reconsideradas e intensificadas em situações extraordinárias. Essas situações incluem enchentes que excedam o nível máximo normal do reservatório, rebaixamento rápido do reservatório, sismos e quaisquer outros eventos que resultem em uma mudança drástica no enchimento da estrutura.

A frequência ideal para as leituras dos instrumentos pode variar entre diferentes autores, mas há um consenso de que essas frequências devem ser ajustadas conforme a fase em que a barragem se encontra. Por exemplo, Silveira (2006) classifica a vida útil da obra em quatro fases distintas: o período de construção, o enchimento do reservatório, o início da operação e a fase de operação contínua. Em contrapartida, Cruz (2004) sugere uma divisão em intervalos mensais. O Quadro 6 ilustra as sequências recomendadas de leituras para diversos instrumentos, conforme indicado por Cruz (2004).

Quadro 6 - Frequências usuais de leitura.

INSTRUMENTO	PERÍODO DE CONSTRUÇÃO	MESES DE OPERAÇÃO				
		1° ao 3° (Enchimento)	4° ao 6°	7° ao 12°	13° ao 36°	37° em diante
<b>Piezômetros de fundação</b>	Semanal	2/semana	2/semana	Semanal	Semanal	Quinzenal
<b>Piezômetros de maciço</b>	Semanal	1/semana	Semanal	Semanal	Quinzenal	Quinzenal
<b>Inclinômetros</b>	Quinzenal	Semanal	Quinzenal	Quinzenal	Mensal	Trimestral
<b>Medidores de recalque</b>	Semanal	2/semana	Semanal	Quinzenal	Mensal	Bimestral
<b>Medidores de vazão</b>	Semanal	3/semana	3/semana	2/semana	Semanal	Quinzenal
<b>Extensômetros de haste</b>	Semanal	3/semana	2/semana	Semanal	Quinzenal	Quinzenal

Fonte: Dos autores, adaptado de Cruz (2004).

Silveira (2006) enfatiza que, após quatro ou cinco anos de operação, se a barragem e suas fundações apresentarem uma condição geral de aparente estabilidade, é possível aumentar os intervalos entre as leituras, desde que as inspeções visuais continuem a ser realizadas periodicamente.

## **2.5 Critérios de projeto para barragens de terra**

As barragens de terra são fundamentalmente construídas utilizando materiais naturais ou processados, os quais necessitam de uma exploração cuidadosa para alcançar um zoneamento apropriado (ANA, 2016). Esses materiais consistem em solos com variações de granulometria que vão de fina a grossa, possuindo baixa permeabilidade e sua capacidade de resistência é influenciada tanto pela compactação quanto pela influência das pressões dentro do maciço. O processo de construção é direto e envolve a compactação controlada de camadas de solo utilizando compactadores de rolo. Os solos, que são os principais componentes das barragens de terra, exigem medidas de proteção contra erosão interna e externa e exigem um dimensionamento com taludes inclinados para prevenir deslizamentos, em contraste com materiais de construção como o concreto, que exibem alta resistência mecânica e baixa permeabilidade.

### **2.5.1 Investigações geológico-geotécnicas**

De acordo com o manual *Instrumentation of Embankment Dams and Levees* (US Army Corps Of Engineers, 2004), é essencial realizar análises geológicas e geotécnicas nos locais onde as barragens serão erguidas e nas áreas potenciais para a obtenção de materiais, a fim de obter informações que determinem os parâmetros da fundação da estrutura, possíveis aprimoramentos na base, se necessário, inclinações dos taludes, além das propriedades e disponibilidade dos materiais que serão empregados na construção do aterro.

A norma americana ainda afirma que as investigações devem abranger a classificação dos materiais, a definição de suas propriedades físicas, localização e extensão das camadas do solo, os estratos de rocha e as variações nos níveis piezométricos das águas subterrâneas em profundidade. Além disso, a pesquisa de materiais de construção destinados à criação de barragens de terra deve seguir critérios progressivos em cada etapa do projeto. Assim, nas fases iniciais de estudo, devido às múltiplas alternativas de solução, os volumes de materiais necessários para definir o eixo da barragem ainda estão incertos. Entretanto, nas fases posteriores de estudos de viabilidade, projeto básico e projeto executivo, as demandas de

materiais já estão mais bem definidas, possibilitando a previsão e a execução de um programa abrangente e apropriado de investigações geológico-geotécnicas. Como complemento, a Agência Nacional de Águas do Brasil (2016) instrui em seu manual que o projeto de uma barragem de terra deve englobar estudos sobre os materiais que comporão a estrutura, abordando aspectos essenciais, como:

- Identificação das jazidas junto com a localização correspondente, zonificação, avaliação dos volumes disponíveis e considerações sobre a escavação do solo ou desmonte de rochas;
- Balanço de materiais, conforme as origens e os pontos de aplicação, seguindo as fases construtivas e o cronograma do projeto;
- Avaliação das características físicas e mecânicas dos materiais (solo) para determinar sua adequação;
- Análise das propriedades de compactação (teor de umidade ótimo e densidade aparente seca) com base em amostras deformadas das jazidas, considerando as energias de compactação especificadas no projeto;
- Realização de ensaios laboratoriais em amostras compactadas em diferentes níveis de compactação e umidade, conforme previsto na obra, com o objetivo de obter dados sobre resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade;
- Condução de aterros experimentais utilizando os materiais e equipamentos que serão efetivamente utilizados na construção, com o propósito de determinar suas características mecânicas e hidráulicas;
- Realização de investigações geotécnicas sobre os materiais destinados a drenos, filtros e transições.

Os elementos que compõem a estrutura da barragem podem ser classificados em materiais destinados à vedação e em materiais usados para filtração e transição.

## **2.6 Bacia hidrográfica**

De acordo com Carvalho (2014), a bacia hidrográfica pode ser definida como um território delimitado naturalmente com base na estrutura geomorfológica e na produção de recursos hídricos em diversas dimensões territoriais. Segundo Lengler e Stam (2012), a região é delimitada por cotas altimétricas que seguem pelo ponto mais elevado das elevações periféricas, conhecidas como divisores de água ou interflúvios. Essa área é formada por uma

malha de drenagem que converge em direção a um canal principal, ao longo do qual a água flui até alcançar a foz.

Para Carvalho e Silva (2006), o sistema de drenagem de uma bacia é constituído por um canal principal e seus afluentes. Sendo assim, faz-se necessário estudar bem como analisar todas as ramificações do canal principal para uma melhor definição da velocidade de escoamento da água que sai da bacia hidrográfica. Conhecer as condições hidrológicas sob as quais a bacia hidrológica de estudo está, norteará características construtivas essenciais ao perfeito funcionamento da estrutura de barramento.

Segundo Carvalho e Silva (2006), tempo de concentração é definido como sendo o tempo, a partir do início da precipitação, necessário para que toda a bacia contribua com a vazão na seção de controle. Segundo Flizikowski *et al.* (2008), sua determinação é de grande importância para análise de enchentes para projetos de estruturas, com este dado podem ser tomadas medidas para a segurança dos projetos, aumentando assim a confiabilidade do material estudado.

#### 2.6.1 Tempo de concentração

Segundo Chow *et al.* (1988), o tempo de concentração corresponde ao tempo gasto para a gota de chuva se deslocar do ponto mais afastado da bacia até sua foz. Conforme Pavlovic e Moglen (2008), esse parâmetro reflete a velocidade com que o divisor de águas responde a eventos de precipitação. Fang *et al.* (2007) atentam quanto à importância da precisão na estimativa do tempo de concentração ( $T_c$ ) pois, se o seu valor é subestimado, tem-se como resultado uma vazão de pico superestimada e vice-versa

Diversos métodos de cálculo estão disponíveis para determinação do tempo de concentração de bacia hidrográfica em horas. Em cada um desses, deve-se levar em consideração as especificidades para o cálculo e a variabilidade dos valores encontrados.

#### 2.6.2 Intensidade de precipitação

Segundo Carvalho (2006), intensidade de precipitação é a quantidade de chuva que ocorre em um determinado período, estando diretamente vinculada ao tamanho da bacia analisada. Essa informação é capturada pelo pluviógrafo, um dispositivo que registra a altura da precipitação em relação ao tempo. Relacionado à sua intensidade, é importante considerar o tempo de retorno, pois esse valor desempenha um papel crucial no dimensionamento de obras hidráulicas. Utilizando uma série histórica dos valores registrados pelos pluviógrafos e

processos estatísticos, é possível prever a intensidade da precipitação que pode acontecer em um período específico e com uma duração específica.

### 2.6.3 Estimativa de vazão de projeto

Segundo Tucci *et al.* (2004), a determinação precisa das vazões máximas é de importância crucial na avaliação dos custos e na garantia da segurança em projetos de engenharia. Essa informação é fundamental para orientar a implementação de medidas, tanto estruturais quanto não estruturais, com o objetivo de controlar e mitigar os efeitos das cheias. Dada sua importância, percebe-se que o dimensionamento da obra depende diretamente desse parâmetro.

De acordo com Leão (2012), na sua determinação, várias equações ajustadas são empregadas. Essas equações deveriam ser aplicadas apenas nos locais para os quais foram criadas, mas devido à escassez de dados hidrológicos, podem ser aplicadas em qualquer lugar, contanto que haja similaridade com o local original.

### 2.6.4 Produção hídrica da bacia

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA, 2010), a adequação da vazão na bacia hidrográfica deve estar em conformidade com as necessidades planejadas para o projeto, as infraestruturas envolvidas e os princípios da hidrologia, incluindo a vazão a ser mantida a jusante da obra. É essencial assegurar que a água apresente a qualidade apropriada para o fim específico ao qual se destina. Isso implica considerar a quantidade de água disponível na bacia e garantir que atenda às demandas planejadas, como abastecimento público, irrigação e outros usos, sem prejudicar os ecossistemas aquáticos.

Segundo Carvalho (2008), em pequenas bacias, não existem informações sobre fluxo. A construção de pequenas barragens, na sua maioria, envolve pequenas bacias hidrográficas para as quais não existem registros de fluxo. Nesses cenários, utiliza-se a transposição de dados com base no conhecimento da produção hídrica de bacias próximas, tidas como homogêneas, ou da bacia maior, da qual existem registros e na qual a área em análise está inserida.

## 2.7 Drenagem interna

A drenagem interna desempenha um papel crucial na segurança e estabilidade de pequenas barragens de terra. Ela tem como objetivo controlar a percolação de água através do maciço da barragem, evitando problemas como erosão interna, surgências no paramento de

jusante e até mesmo a ruptura da estrutura. Conforme Pinto (2006), a drenagem interna é considerada indispensável em barragens homogêneas e zoneadas, pois ajuda a controlar a percolação de água através do maciço.

De acordo com Carvalho (2011), os seguintes componentes são utilizados pelos barramentos no sistema de drenagem interna: drenagem de pé; trincheira drenante; poços de alívio; galerias de drenagem; filtros verticais e horizontais; e transição entre vários tipos de materiais. Destaca-se a importância dos dispositivos de filtro vertical e horizontal, compostos por camadas de material granular que funcionam como drenos, captando a água que percola através do maciço e da fundação.

Esses sistemas devem ser dimensionados cuidadosamente, levando em consideração as características dos solos da região, a fim de garantir sua eficácia. De acordo com Caputo (2015), o dimensionamento adequado dos sistemas de drenagem interna é essencial para evitar problemas como erosão interna e surgências no paramento de jusante.

A ausência ou o dimensionamento inadequado dos sistemas de drenagem interna é uma das principais causas de falhas em pequenas barragens de terra. Portanto, é essencial que os projetistas e construtores deem a devida atenção a este aspecto, realizando estudos aprofundados e seguindo as melhores práticas de engenharia. Segundo Silveira (2013), a falta de um sistema de drenagem interno adequado é uma das principais causas de falhas em pequenas barragens.

Mesmo após a construção, a manutenção e o monitoramento constante da drenagem interna são fundamentais. É necessário evitar a colmatção dos drenos e identificar prontamente quaisquer problemas, a fim de realizar as devidas ações corretivas. Conforme destaca Pinto (2006), a manutenção corretiva imediata é essencial caso seja detectado algum problema na drenagem interna.

## **2.8 Índices físicos do solo**

### **2.8.1 Índice de vazios**

O índice de vazios ( $e$ ) é a relação entre o volume de vazios ( $V_v$ ) e o volume de sólidos ( $V_s$ ) em uma amostra de solo. Em geral, quanto maior o índice de vazios, menor será a resistência do solo. Isso ocorre porque um solo com maior volume de vazios tende a ter partículas menos confinadas e uma estrutura mais deformável. No caso de barragens de terra, o controle do índice de vazios do solo utilizado no aterro é essencial para garantir a estabilidade

da estrutura. “Um solo com índice de vazios muito alto pode apresentar problemas como: maior compressibilidade, menor resistência ao cisalhamento, maior permeabilidade” (Pinto, 2006).

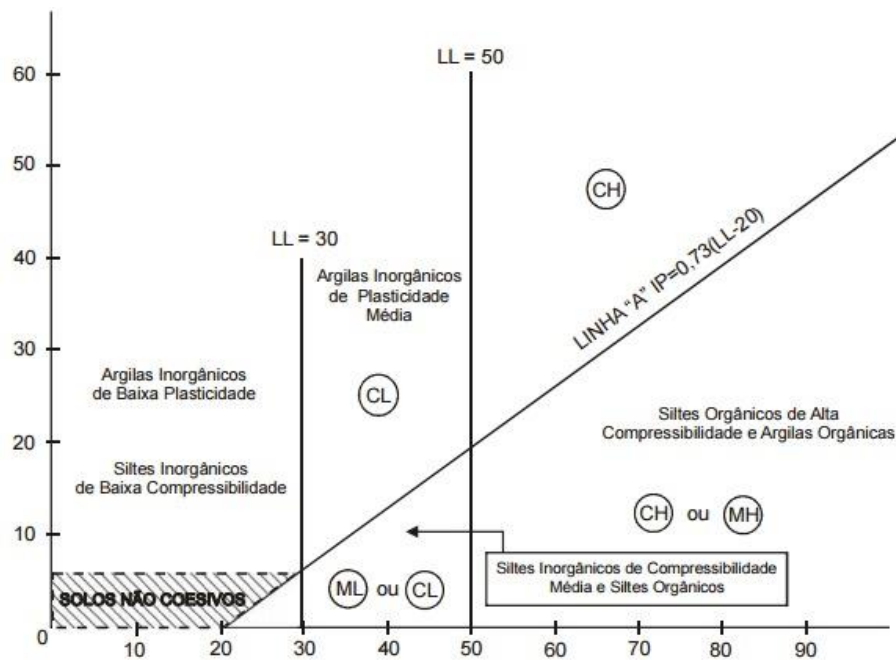
### 2.8.2 Porosidade

Porosidade ( $n$ ) é a relação entre o volume de vazios ( $V_v$ ) e o volume total ( $V$ ) da amostra de solo. Representa a porcentagem do volume do solo ocupada por vazios, como ar e água (Pinto, 2006). Relaciona-se diretamente com o índice de vazios, podendo ser determinada por meio dele. Em geral, aumentar o índice de vazios resultará no aumento da porosidade e vice-versa. Assim, um solo com alta porosidade pode ter problemas de drenagem e estabilidade.

### 2.8.3 Limite de liquidez e limite de plasticidade.

O estado líquido é caracterizado pela ausência de resistência ao cisalhamento do solo. Neste estado, o material assume o comportamento de um fluido, deformando-se sem incrementos de tensão. Para Cooper (2016), um limite de liquidez ( $LL$ ) alto indica um solo mais argiloso e com maior capacidade de retenção de água, enquanto um  $LL$  baixo indica um solo mais arenoso e com menor capacidade de retenção de água, esse comportamento pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 - Carta de plasticidade de Casagrande



Fonte: Brasil (2006).

A deformação com variação volumétrica (sem fissurar-se ao ser trabalhado) caracteriza a perda de umidade do solo, indicando comportamento plástico. Assim, existe um teor de água mínimo que o solo precisa conter para se tornar plástico, ou seja, para poder ser moldado sem se desfazer. Segundo Cooper (op. cit.) Um Limite de plasticidade (*LP*) alto indica um solo mais coesivo e menos permeável, enquanto um *LP* baixo indica um solo menos coesivo e mais permeável. Tanto o *LL* quanto o *LP* são *teores de umidade*, que é especificamente outro índice físico do solo.

#### 2.8.4 Teor de umidade

O teor de umidade é um dos principais índices físicos do solo, que indica a quantidade de água presente em uma amostra de solo, expressa em percentual da massa seca do solo. O teor de umidade varia tipicamente entre 10% e 40% para a maioria dos solos, podendo chegar a valores muito mais altos em solos orgânicos ou muito baixos em solos extremamente secos. Os solos de origem argilosa e siltosa seca possuem maior resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito). Contudo, a sua resistência pode ser reduzida ao se aumentar o nível de umidade. “Por outro lado, um solo muito úmido apresentará menor resistência e maior compressibilidade, dificultando o processo de compactação adequado” (Pinto, 2006).

#### 2.8.5 Permeabilidade

A permeabilidade do solo representa a facilidade com que a água flui através de seus poros. É expressa pelo coeficiente de permeabilidade (*k*), que indica a velocidade de fluxo da água por unidade de área e tempo e é influenciada por diversos fatores, como granulometria (tamanho das partículas do solo), estrutura (arranjo das partículas do solo), compactação (densidade do solo) e teor de umidade (Pinto, 2006).

A permeabilidade do solo é crucial para o controle do fluxo de água através do barramento, uma permeabilidade adequada resiste à erosão causada pela água, protegendo os taludes da barragem e reduzindo o risco de desmoronamentos. Além disso, influencia a pressão de percolação, que é associada à força exercida pela água que se infiltra no solo na e sob a barragem (Pinto, 2006).

#### 2.8.6 Ângulo de repouso interno e externo

Ângulo de repouso é o ângulo formado pelo produto ao escoar através de um fluxo constante, com o plano horizontal, sendo este ângulo influenciado pelo tamanho, forma,

orientação de partículas e teor de água do produto (Mohsenin, 1986). Diversos fatores influenciam o ângulo de repouso, como a granulometria (tamanho das partículas), a coesão (força que une as partículas), a densidade e a presença de água nos vazios.

Esse indicador de comportamento do solo, quando empregado a taludes da barragem, é crucial para sua estabilidade. Um ângulo inadequado pode levar ao desmoronamento dos taludes, comprometendo a segurança da estrutura e causando graves danos. Já o ângulo de repouso externo representa o ângulo máximo em que o solo pode se manter em pé sob a ação de fatores externos, como chuva ou vento. É importante para o dimensionamento das medidas de proteção contra erosão. Quando inadequado, pode dificultar a drenagem, levando ao acúmulo de água no interior dos taludes, o que pode comprometer sua estabilidade.

#### 2.8.7 Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento do solo assume um papel crucial na construção de barragens, sendo um parâmetro fundamental para garantir a segurança e a estabilidade da estrutura. Ela representa a capacidade do solo de resistir à deformação sob a ação de forças de cisalhamento, que são forças que tendem a "cortar" o solo em diferentes camadas. Em barragens, a resistência ao cisalhamento garante a estabilidade dos taludes e do núcleo da estrutura. Solos com resistências inadequadas podem levar ao escorregamento dos taludes ou à ruptura do núcleo, comprometendo a segurança.

#### 2.8.8 Peso específico

Existem definições distintas para os pesos específicos que um solo pode assumir. Destacam-se aqui quatro variáveis: peso específico dos grãos, peso específico seco, peso específico natural (ou aparente) e peso específico saturado.

O peso específico dos grãos ( $\gamma_s$  ou  $G_s$ , caso esteja referindo-se ao peso específico relativo dos grãos) é um índice físico que representa o peso por unidade de volume das partículas sólidas que compõem o solo, excluindo os vazios entre elas. É uma propriedade intrínseca do material que compõe o solo. Mesmo que o peso específico dos grãos não seja um parâmetro que varie significativamente em um mesmo depósito de solo, sua determinação é importante para o cálculo de outros índices físicos. Pode, ainda, ser utilizado indiretamente como indicativo da qualidade do material utilizado no aterro. Por exemplo, no caso de solos com peso específico dos grãos reduzido, isto pode indicar a presença de matéria orgânica ou minerais alterados, o que afetaria negativamente a resistência e a durabilidade do material.

Por definição, o peso específico seco ( $\gamma_d$ ) representa o peso por unidade de volume do solo seco, sem a presença de água, mas considerando-se o volume úmido, de acordo com a aferição realizada na coleta de amostra.

Já o peso específico natural ( $\gamma_n$ ) representa o peso por unidade de volume do solo em seu estado natural, com a umidade presente e o peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ) representa o peso por unidade de volume do solo completamente saturado por água.

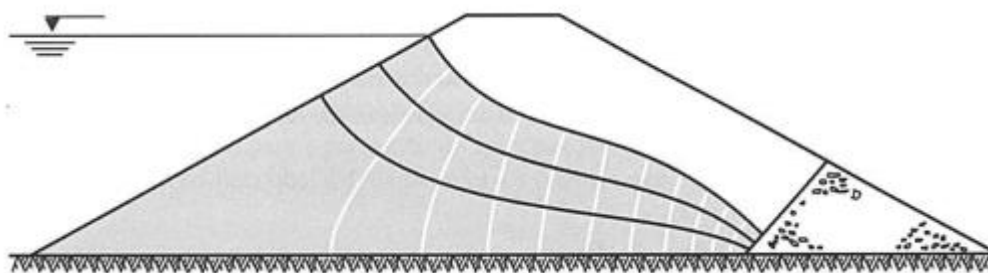
A variação do peso específico do solo pode afetar significativamente seus parâmetros de resistência. Em barragens de terra, temos que um solo com menor peso específico seco terá maior porosidade e menor resistência ao cisalhamento, o que pode comprometer a estabilidade da barragem. Para que se obtenha um peso específico seco adequado, é necessário que o solo utilizado em barragem passe por processos de compactação, visando atingir a sua densidade máxima e garantindo a segurança e bom desempenho da estrutura da barragem.

## 2.9 Redes de fluxo

As redes de fluxo são ferramentas analíticas que possuem finalidade de analisar o fluxo de água subterrânea em problemas de engenharia geotécnica, permitindo determinar a vazão percolada, calcular a pressão da água nos poros (pressão neutra) e, conseqüentemente, a tensão efetiva em cada ponto do maciço de solo. Além disso, as redes de fluxo são utilizadas para avaliar o risco de acidentes decorrentes de quick condition (anulação da resistência do solo) e para adotar medidas de prevenção contra piping (erosão interna) e levantamento hidráulico. As redes de fluxo são aplicadas em diversas áreas da engenharia, como na verificação da possibilidade de erosão subterrânea, instrumentação e cálculo da vazão de percolação.

De acordo com Das (2011) Uma rede de fluxo consiste em uma série de linhas equipotenciais e linhas de fluxo ortogonais, como as observadas na Figura 18, representando um sistema de fluxo de água subterrânea bidimensional. As linhas de fluxo sinalizam o trajeto que a água faz, enquanto as linhas equipotenciais ligam pontos com o mesmo potencial hidráulico. Em meios homogêneos e isotrópicos, a distribuição da carga hidráulica é determinada apenas pelas condições de contorno, sendo a qualidade da rede de fluxo independente da condutividade hidráulica do ambiente.

Figura 18 - Rede de fluxo pelo interior de barragens de terra.



Fonte: Pinto (2013).

No contexto de barragens, as redes de fluxo desempenham um papel crucial na análise da percolação de água através da fundação permeável. A construção de boas redes de fluxo garante um projeto seguro e econômico de estruturas expostas aos danos causados pela água.

Modelos de laboratório, combinados com o uso de softwares, possibilitam o estudo da percolação, permeabilidade e piping em barragens, através da visualização da rede de fluxo no corpo do modelo, é possível compreender o funcionamento da barragem e a importância de estudos sobre percolação e ensaios de laboratório no projeto de barragens, a utilização de filtros é uma medida de prevenção importante contra os problemas decorrentes do fluxo de água através do solo.

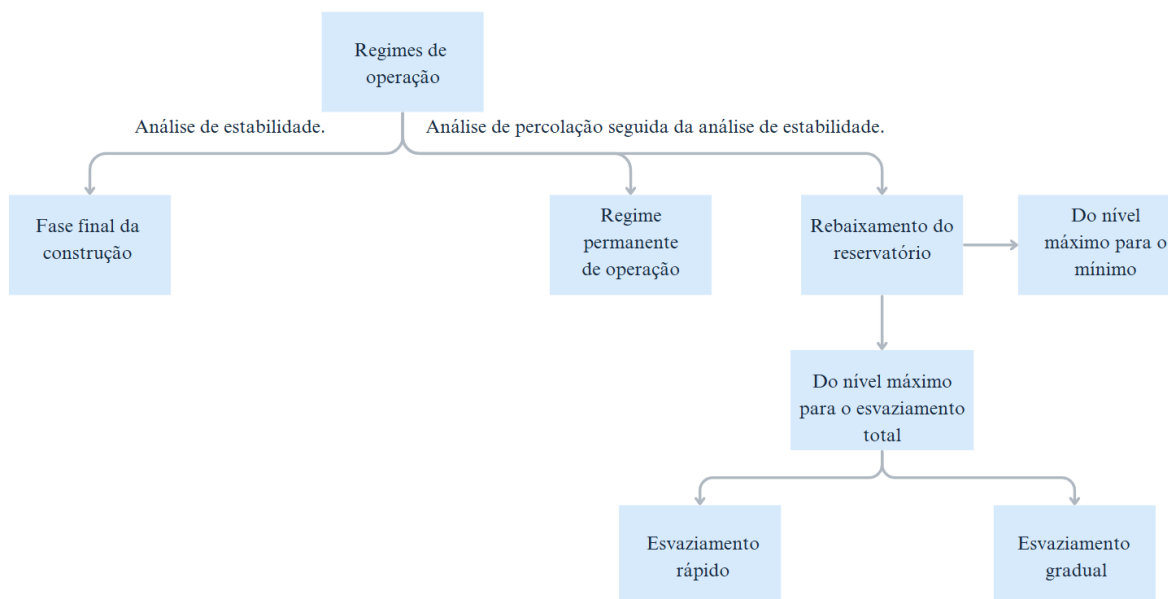
A rede de fluxo é uma abordagem simplificada para calcular a carga hidráulica em problemas de fluxo de fluidos, como em solos, sendo baseada em equações diferenciais que descrevem o comportamento do fluxo. Enquanto soluções por software utilizam métodos numéricos para resolver essas equações de forma precisa, a rede de fluxo oferece uma aproximação "analítica" do problema, representando graficamente as linhas equipotenciais e de fluxo para estimar a distribuição da carga hidráulica de maneira mais acessível, porém com simplificações que limitam sua aplicação a casos ideais.

## 2.10 Estabilidade de taludes

No Brasil, a fiscalização das barragens nacionais é regulamentada pela Lei nº 14.066/2020, que representa uma atualização da Lei nº 12.334/2010. Essa legislação, conhecida como a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), tem como objetivo principal estabelecer padrões de segurança de barragens para promover a prevenção e a redução da probabilidade de acidentes e desastres e suas consequências, regulamentando as medidas de segurança a serem adotadas durante todas as fases de planejamento, projeto, construção, enchimento e vertimento inicial, operação, desativação, descaracterização e usos futuros da barragem (Brasil, 2010, 2020).

Para o Ministério da Integração Nacional (Brasil, 2002), é necessário garantir a estabilidade dos taludes de montante e jusante da barragem, assim como das ombreiras, em todas as situações, incluindo os níveis máximos e normais de água no reservatório, além de todas as condições operacionais. Nesses estudos as análises foram realizadas conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19 – Organograma de análise do modelo estrutural.



Fonte: Dos autores (2024).

Segundo Marangon (2004), durante e após o primeiro enchimento do reservatório, bem como durante e após a construção, a barragem é solicitada por um número crescente de cargas ao longo do tempo. Por causa disso, é fundamental verificar se o fator de segurança está dentro do limite para a situação atual. As três situações mais importantes para uma barragem são a conclusão da construção, o fluxo constante do reservatório cheio e o esvaziamento rápido do reservatório.

### 2.10.1 Estabilidade dos taludes durante o período de construção

Durante a construção, a presença de pressão positiva significativa dos poros dentro da massa de solo devido à sobrecarga da altura do aterro pode comprometer a sua estabilidade. Deve-se avaliar o comportamento do material frente a essa sobrecarga e se ele opera drenado (com o excesso de pressão totalmente aliviado) ou não drenado (com o excesso de pressão remanescente após a construção). Essa previsão de movimento é importante para conduzir uma

análise de estabilidade que representa consistentemente o movimento que ocorre no campo. O tipo de comportamento depende do tempo de construção do aterro e das propriedades dos materiais utilizados.

“A análise de tensão efetiva usa o parâmetro de poropressão  $B$  (não drenado) para estimar a sobrepressão para o comportamento não drenado. Este parâmetro é determinado por meio do Ensaio de Consolidação Não Drenado<sup>6</sup>” (Casagrande e Hirschfeld, 1960). Consiste no processo de utilizar uma amostra cilíndrica de solo em uma célula de compressão triaxial. A amostra é confinada por uma pressão lateral constante enquanto a carga axial é aplicada gradualmente. Este teste é uma variação do ensaio triaxial observado na Figura 20, diferenciando-se que durante o ensaio não é permitida a drenagem de água da amostra, o que significa que a poropressão gerada pela aplicação da carga não é aliviada.

No caso específico de uma barragem, o parâmetro  $B$  é determinado para solo não saturado (estado do solo antes do reaterro da barragem), obtido através da relação entre a variação de poropressão ( $u$ ) e a variação de tensão efetiva ( $\sigma'$ ), ou seja,  $B = \Delta u / \Delta \sigma'$ . O valor de  $B$  pode ser usado para determinar a pressão intersticial da água ( $u$ ) em cada ponto do aterro. A partir desta poropressão, pode-se determinar a tensão efetiva, a partir da qual se pode calcular a resistência ao cisalhamento ( $\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi'$ ) e estimar o fator de segurança para uma dada superfície de ruptura.

Figura 20 – Ensaio triaxial



Fonte: Dos autores (2024).

---

<sup>6</sup> Ou Ensaio Adensado Não Drenado

Para fundações, a pressão intersticial é a tensão causada pelo nível de água encontrado durante a construção e a aplicação de  $\Delta h$  (alteração da altura da água), ou seja,  $H$ .

### 2.10.2 Estabilidade de regime permanente de operação

Ao realizar uma análise de estabilidade em estado permanente de operação, é importante enfatizar que o talude mais importante é o talude a jusante. Isso ocorre porque o talude de montante está exposto à pressão da água do reservatório, o que tem efeito favorável na estabilidade do talude.

Segundo Sandroni (2012), os desmoronamentos que acontecem no talude inferior de barragens de terra com o reservatório cheio são acidentes de grande gravidade. Esses deslizamentos apresentam uma tendência de degeneração, isto é, após o deslizamento, a parte remanescente da massa de terra tende a se tornar ainda mais instável, levando a um ciclo contínuo até que ocorra um desastre.

É essencial considerar as tensões efetivas em uma análise de estabilidade em estado estacionário. Isso significa que os parâmetros força coesiva efetiva ( $c'$ ) e ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) são usados e apenas a poropressão gerada de acordo com a rede de fluxo é considerada.

### 2.10.3 Rebaixamento rápido do reservatório

O reservatório da barragem desempenha um papel auxiliador na estabilidade do maciço, exercendo forças de empuxo opostas aos taludes de montante. No entanto, existem situações operacionais ou emergenciais que podem levar a uma rápida redução do nível da água. Nessas circunstâncias, a análise das poropressões no maciço pode ser abordada de duas maneiras, levando em consideração a velocidade de queda da água e a permeabilidade do solo da barragem.

Na primeira abordagem, a análise considera um regime de fluxo permanente, no qual a dissipação da poropressão não ocorre devido à rápida redução do nível da água. Nesse caso, de acordo com a Eletrobras (2003), as pressões neutras dependem apenas da geometria do problema e dos coeficientes de permeabilidade dos materiais. As variações no estado de tensões não afetam as poropressões presentes no maciço, permitindo que as análises sejam realizadas com base em tensões efetivas e pressões neutras obtidas por meio de redes de fluxo convencionais.

Para a Eletrobras (2003), na segunda estratégia, a diminuição do nível da água provoca a diminuição das tensões principais, o aumento da tensão desviadora e a aparição de um fluxo temporário de água. Neste cenário, as flutuações das pressões neutras são levadas em conta em resposta às alterações no estado de tensão, e as análises devem ser conduzidas com base em tensões efetivas obtidas através de ensaios drenados (CD) ou ensaios adensados não drenados (CU), com a medição das poropressões.

Dessa forma, de acordo com Gerscovich (2016), a estabilidade dos taludes é medida por meio do fator de segurança associado a uma determinada configuração de carga. Este fator de segurança, aplicado a uma superfície de ruptura específica, é definido como a soma da resistência ao cisalhamento da superfície e as tensões cisalhantes provocadas pelo carregamento, como evidenciado na Equação 1.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

Onde:

$\tau_f$  (kPa) é a tensão resistente de cisalhamento.

$\tau_{mob}$  (kPa) é a tensão mobilizada de cisalhamento.

Portanto, para garantir a estabilidade, é necessário que o  $FS > 1,0$ ; um  $FS < 1,0$  não possui significado físico, pois indica que o talude já se encontra em estado de ruptura. No entanto, dependendo do tipo, impacto e tamanho da obra, bem como da fase de análise em questão, podem ser estabelecidos fatores de segurança mínimos acima de 1 para assegurar a estabilidade.

O Quadro 7, proposto pelo Ministério da Integração Nacional (Brasil, 2002), estabelece os valores mínimos de fator de segurança geralmente considerados aceitáveis para os cálculos de estabilidade dos taludes. Contudo, em determinadas circunstâncias, valores inferiores podem ser justificadamente admissíveis, desde que sejam respaldados por um desempenho satisfatório com base em medidas de movimentação ou análises mais avançadas. Ao determinar os fatores de segurança adequados para os taludes, é crucial levar em consideração a confiabilidade dos dados utilizados nas análises de estabilidade, a adequação e as limitações das técnicas analíticas adotadas, as deformações toleráveis e as possíveis consequências de uma eventual ruptura.

Quadro 7 - Coeficientes mínimos de segurança.

<b>CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO</b>	<b>COEFICIENTES MÍNIMOS DE SEGURANÇA</b>	<b>TALUDE</b>
Percolação permanente com o reservatório na cota máxima normal	1,5	Jusante
Esvaziamento rápido	de 1,2 a 1,3	Montante
Término de construção antes do enchimento do reservatório	de 1,25 a 1,3	Jusante e montante

Fonte: Ministério da Integração Nacional (2002).

Segundo Pimenta e Rezende (2018), a análise de segurança de taludes envolve o uso de dois grupos principais de métodos: métodos determinísticos e métodos probabilísticos. Os métodos determinísticos são baseados na determinação de um fator de segurança constante ao longo da superfície de ruptura, enquanto os métodos probabilísticos se baseiam na avaliação da probabilidade de ocorrência de uma ruptura.

Além das diretrizes estabelecidas pelo Ministério da Integração Nacional, outros autores também propõem valores mínimos a serem adotados nas análises de estabilidade, como por exemplo, Cruz (2004), sugerindo que os fatores de segurança devem atingir os valores mínimos descritos no Quadro 8 para garantir a estabilidade dos taludes por equilíbrio limite, levando em consideração diferentes condições de carregamento.

Quadro 8 - Coeficientes de segurança mínimos para diferentes condições de solicitação.

<b>CONDIÇÃO DE SOLICITAÇÃO</b>	<b>TALUDE</b>	<b>FATOR DE SEGURANÇA MÍNIMO</b>	
		<b>SEÇÃO HOMOGÊNEA</b>	<b>SEÇÃO TERRA-ENROCAMENTO</b>
Final de construção	Montante	1,3	1,2
	Jusante	1,3	1,2
Regime permanente de operação	Montante	1,5	1,3
	Jusante	1,5	1,3
Rebaixamento de reservatório			
NA máx. - NA min	Montante	1,1	1,0
NA máx. - Vertedouro	Montante	1,0	1,0
Qualquer condição para verificação da estabilidade para resistência residual	Montante	1,2	-
	Montante	1,2	-

Fonte: Dos autores, adaptado de Cruz (2004).

Dentre os métodos determinísticos, destaca-se a análise de Equilíbrio Limite devido à sua simplicidade e eficiência. Essa abordagem considera, por hipótese, que o solo se rompe sem deformação prévia, não ocorrem rupturas progressivas e que o critério de Mohr-Coulomb é válido em toda a superfície de ruptura (Gerscovich, 2016). Além disso, assume-se que o fator de segurança é uniforme ao longo dessa superfície e que as equações de equilíbrio estático são aplicáveis, considerando então que o maciço de solo está sujeito a uma ruptura generalizada.

Os métodos determinísticos podem ser classificados em três grupos principais: método das cunhas, método do círculo de atrito e método das fatias, sendo este último o mais comumente utilizado. Diversos métodos foram desenvolvidos com base na análise de fatias, incluindo os métodos de Fellenius (1936), Bishop (1955), Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967) e Janbu (1973). Esses métodos oferecem abordagens distintas para a análise de taludes, fazendo com que a escolha do método mais adequado dependa das características do solo, da geometria do talude e dos objetivos específicos da análise.

#### 2.10.4 Softwares de análise

Nesta seção, serão explorados os softwares e o método utilizado nas análises realizadas.

##### 2.10.4.1 Software para análise de estabilidade de taludes

Softwares de análise de estabilidade de taludes são cruciais para avaliar a estabilidade de taludes complexos em rocha ou solo, empregando a teoria do equilíbrio limite e proporcionando a flexibilidade de empregar diversos métodos de análise. Essas avaliações de estabilidade realizadas via software envolvem três fases distintas. Na primeira fase, as forças entre as fatias são tidas como inexistentes e o fator de segurança de equilíbrio é determinado, normalmente empregando o método de Fellenius. Os desfechos dessa primeira etapa são empregados como aproximações para dar início ao segundo estágio, onde se dá a resolução não linear das equações de risco. Nesta fase, as forças de cisalhamento entre lamelas são estabelecidas como nula.

Geralmente, necessita-se de 4 a 6 iterações para assegurar a convergência dos momentos e fatores de equilíbrio de força nas equações de segurança. O método simplificado de Bishop é empregado para determinar a solução da equação de momento, enquanto a solução da equação de equilíbrio de força é obtida pelo método simplificado de Janbu, sem a necessidade de correções empíricas. O estágio 3 é essencial para métodos que levam em conta as forças entre cortes, oferecendo um entendimento aprofundado da conexão entre o momento e o equilíbrio da força, além dos fatores de segurança para uma função específica da força entre cortes.

No entanto, as análises determinísticas da estabilidade apresentam limitações, uma vez que não levam em conta a variabilidade dos parâmetros de entrada. Nesse sentido, os softwares oferecem a possibilidade de realizar análises probabilísticas utilizando o método Morgenstern-Price. Determinam, ainda, uma ou mais superfícies de escorregamento críticas com base nos valores médios dos parâmetros de entrada, utilizando os métodos de equilíbrio limite e tensão por elementos finitos. Em seguida, a análise probabilística é realizada nessas superfícies críticas, levando em consideração a variabilidade dos parâmetros de entrada.

A análise de Morgenstern-Price é uma abordagem mais simplificada e determinística em comparação com a análise probabilística de Monte Carlo, sendo amplamente utilizada na prática de engenharia geotécnica, principalmente em situações em que a incerteza não é considerada uma preocupação significativa ou quando há uma quantidade limitada de dados disponíveis para análise probabilística. O número de simulações de Monte Carlo depende da quantidade de parâmetros de entrada e da probabilidade esperada de falha. Em geral, à medida que aumenta o número de variáveis de entrada ou a probabilidade esperada de falha diminui, mais tentativas são necessárias. É comum realizar milhares de amostragens para alcançar um nível aceitável de confiança em uma análise de estabilidade de taludes usando esse método.

“Em suas análises a variabilidade dos parâmetros de entrada, como os parâmetros do material, condições de poropressão da água, a magnitude das cargas pontuais e os coeficientes sísmicos, pode ser considerada” (Geo-Slope, 2023).

#### 2.10.4.2 Software para análise de percolação

Este tipo de software analisa o fluxo de águas subterrâneas em materiais porosos. Geralmente utilizam o método dos elementos finitos para modelar o movimento da água no solo e na fundação, conforme explica Ribeiro (2015). A formulação rigorosa das relações saturadas/insaturadas do software permite a análise até mesmo dos problemas de fluxo mais complexos, como infiltração em solos secos ou através de barragens de rejeitos complexos. A integração entre os softwares de percolação e de análise de estabilidade de taludes permite o estudo de qualquer talude, seja natural ou artificial, sujeito a alterações transitórias na poropressão.

#### 2.10.4.3 Método de Morgenstern-Price

Para Gerscovich (2016), este é um processo classificado como rigoroso, sendo o mais amplo em termos de área de aplicação. Dito de outra forma, leva em conta superfícies de falha definidas por qualquer função, não se limitando apenas a áreas circulares. Isso permite uma maior variedade nas superfícies examinadas. Para mitigar a influência excessiva da

hiperelasticidade presente no problema, o método pressupõe que a inclinação da força resultante varie de acordo com uma função  $f(x)$ , conforme a equação 2.

$$T = \lambda * f(x) * E \quad (2)$$

Onde:

$T$  é a força tangencial entre as fatias.

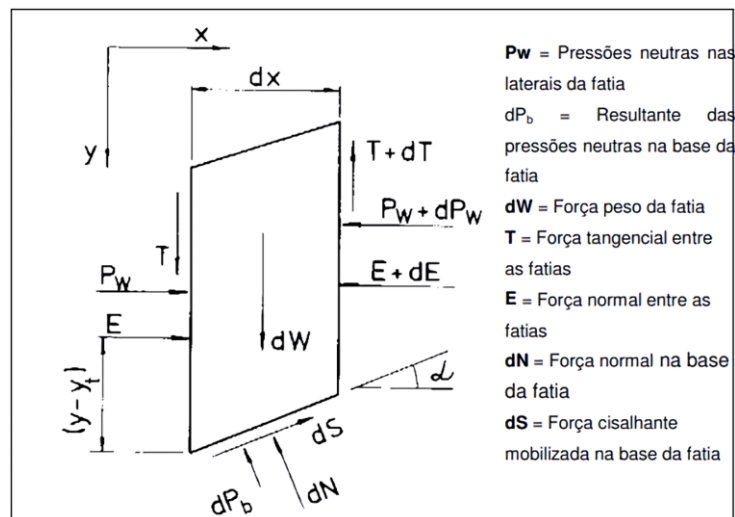
$E$  é a força normal entre as fatias

$f(x)$  é a função associada a inclinação da força resultante.

$\lambda$  é fator de escala de  $f(x)$ .

A função  $f(x)$  pode ser selecionada de maneira arbitrária, sendo que dentre as opções mais empregadas estão as funções arco seno, arco seno incompleto e trapezoidal; o parâmetro  $\lambda$  é empregado como um valor numérico que se relaciona com a escala da função escolhida (Gerscovich, 2016). O diagrama de esforços considerado para cada fatia neste método, pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 – Esforços considerados na fatia do método de Morgenstern-Price

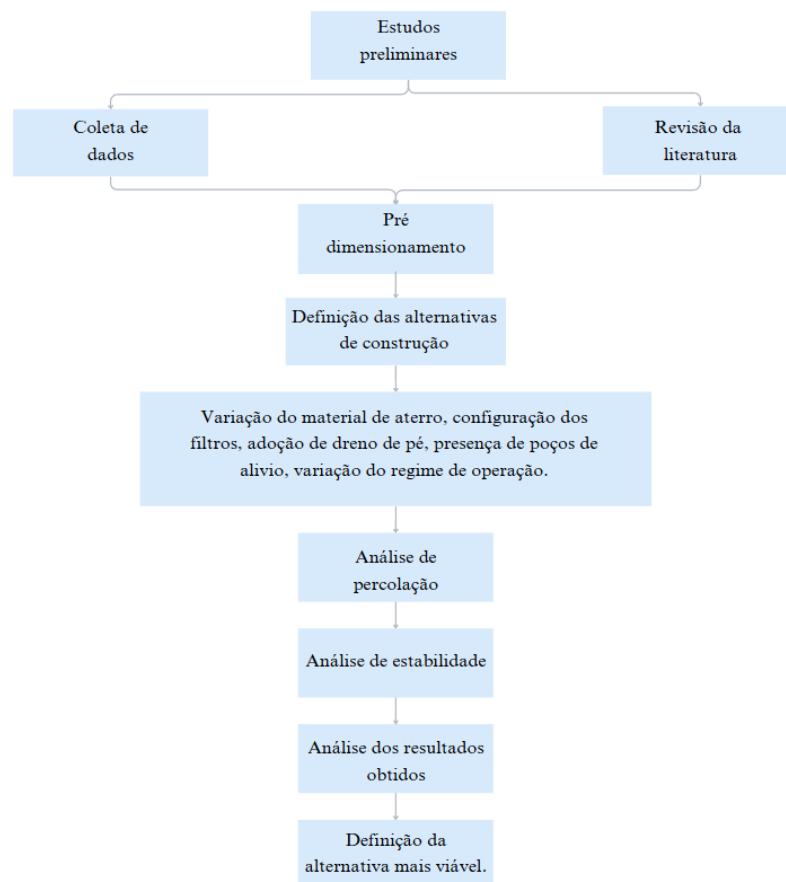


Fonte: Chowdhury (1978) apud Tonus (2009).

### 3 METODOLOGIA

Neste t3pico, apresenta-se o processo que permitiu a an3lise dos componentes da barragem, conforme o objetivo proposto. Como etapa preliminar, realizaram-se visitas ao local de constru33o, coletas de dados e revis3o de literatura. Essa fase inicial permitiu que, em uma etapa seguinte, fossem definidas as alternativas de constru33o a serem comparadas. Ap3s um pr3-dimensionamento e a determina33o da geometria da estrutura, conheceram-se os solos e os materiais presentes na regi3o do munic3pio, observando as suas propriedades relevantes para a sequ3ncia do estudo e foram determinadas as combina33es bem como o dimensionamento de elementos de drenagem interna a serem analisados. Tamb3m foram definidas nesta segunda etapa os recursos e procedimentos necess3rios para o estudo, sendo este a modelagem da barragem utilizando *softwares* espec3ficos. Tal sequ3ncia possibilitou a an3lise da percola33o em diferentes condi33es de drenagem interna e da estabilidade dos taludes nos cen3rios de fim de constru33o, regime permanente de opera33o e poss3veis casos de varia33es do reservat3rio. A metodologia descrita est3 representada na Figura 22 e detalhada nos t3picos seguintes.

Figura 22 - Etapas da metodologia.

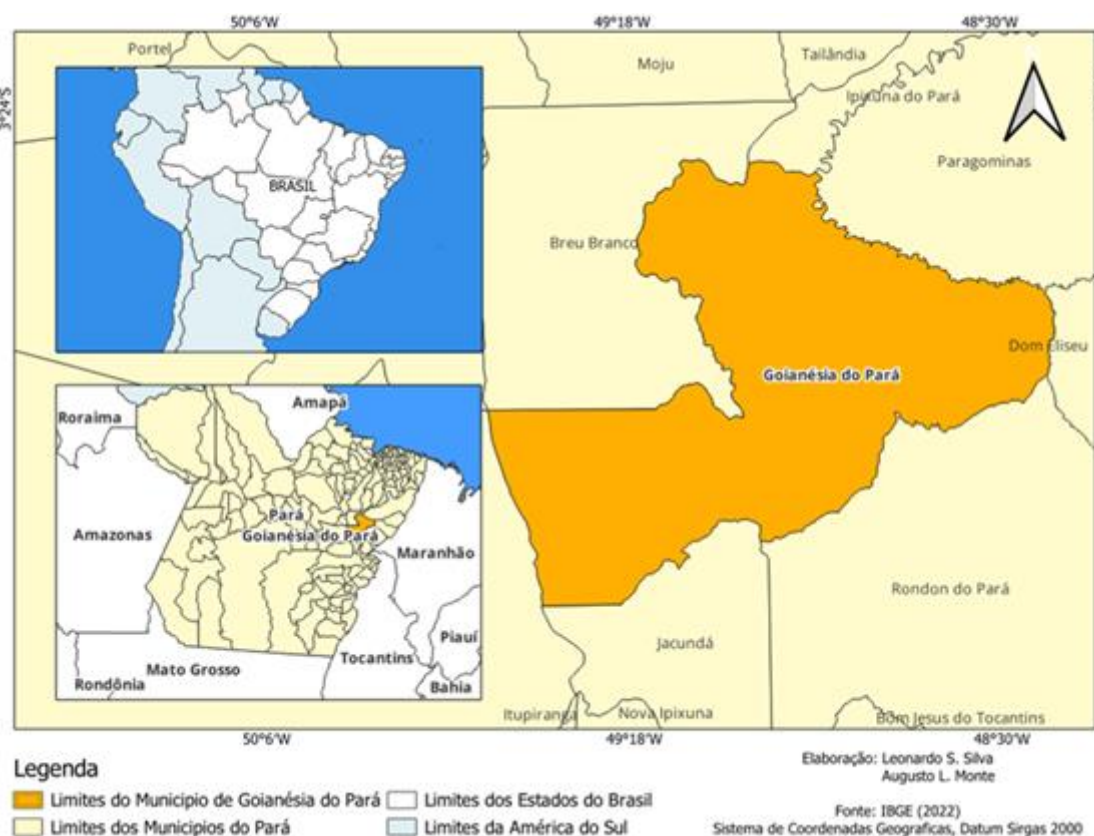


Fonte: Dos autores (2024).

### 3.1 Caracterização do local de estudo

O município de Goianésia do Pará (Figura 23), situado às margens da rodovia PA 150, foi criado em um forte período de expansão da região, principalmente em razão da construção da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, município vizinho e localizado na PA 263. Pertence à Mesorregião do Sudeste Paraense e à Microrregião de Paragominas estando a 292 km de Belém, capital do Estado do Pará. Apresenta latitude  $03^{\circ} 50' 33''$  sul e a uma longitude  $49^{\circ} 05' 49''$  oeste, estando a uma altitude de 103 metros. Possui uma área territorial de 7.023,948 km<sup>2</sup> e população estimada de 41.678 habitantes, segundo o censo do IBGE (2021).

Figura 23 - Localização do Município.



Fonte: Dos Autores (2024)

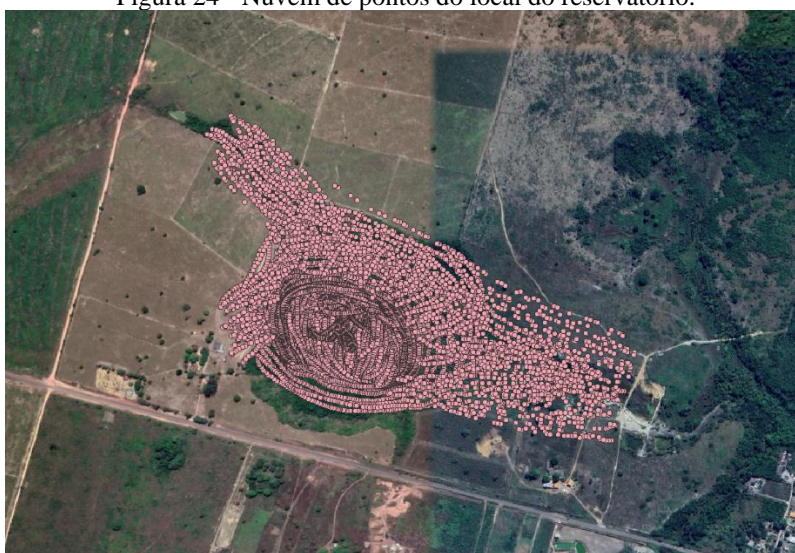
O clima local, de acordo com a classificação Köppen é inserido na categoria tropical chuvoso, de subtipo Am, e apresenta peculiaridades de clima com a estação seca e precipitação média mensal inferior a 60mm, possuindo temperatura média anual de 26,35° C. Já a pedologia do município é caracterizada por solos Latossolo-Amarelo, Podzólico Vermelho-Amarelo, concrecionário laterítico e gleissolo pouco úmido nas áreas aluviais. Por fim, a vegetação é

representada pela floresta densa de platôs, floresta densa de terraço e pela floresta densa de planície aluvial.

### 3.2 Dados do projeto

Constatada a necessidade do barramento no local, a escolha da área a ser represada foi realizada utilizando um *software* de geoprocessamento que traçou uma nuvem de pontos a partir de imagens de satélite obtidas com auxílio de um software de análise geoespacial (Figura 24) a fim de se conhecer morfologicamente a região e determinar a área que poderia ser alagada. O objetivo foi verificar se o volume hídrico reservado seria capaz de suprir a necessidade local e as características iniciais do barramento a ser construído. Por fim, calcularam-se as dimensões e volume do reservatório a ser analisado.

Figura 24 - Nuvem de pontos do local do reservatório.



Fonte: Dos autores (2024).

### 3.3 Pré-dimensionamento

O pré-dimensionamento de uma barragem é a etapa inicial do projeto, onde se estabelecem as dimensões e características gerais da estrutura, visando atender aos requisitos de segurança, funcionalidade e viabilidade econômica. A seguir, discutem-se as variáveis envolvidas.

#### 3.3.1 Volume de Água Armazenada

A quantidade de água a ser armazenada é determinada com base nas demandas a serem supridas. Os volumes parciais entre as curvas de elevação da área de captação são calculados

usando uma equação que modela o volume como se fossem troncos de cone invertido. Essa abordagem permite estimar por meio da Equação 3, de forma eficaz, o volume de água a ser retido (SOARES et al., 2019).

$$V_n = \frac{S_{n-1} + S_n}{2} * h \quad (3)$$

Onde:

$V_n$  é o volume útil armazenado, m<sup>3</sup>;

$S_n$  é a área da curva de nível máximo: 24 612,02 m<sup>2</sup>;

$S_{n-1}$  é a área da curva de nível mínimo: 14 408,05 m<sup>2</sup>;

$h$  é a diferença de cota entre duas curvas de nível: 2,50 m.

Deste modo, o uso da Equação 3 com os valores obtidos por meio do geoprocessamento, obteve-se um volume ( $V_n$ ) de 48 775,08 m<sup>3</sup>.

### 3.3.2 Altura do Barramento

Para com Soares et al., (2019), a altura da barragem é determinada com base no volume total de água a ser retido, dessa forma utilizando a equação 4 foi determinada a altura máxima da estrutura. O projeto não só leva em conta a elevação durante períodos de chuvas fortes, mas também uma margem de segurança entre o nível máximo de água e a crista da barragem (borda livre). De acordo com Gaioto (2003), mesmo os barramentos pequenos devem ter uma borda livre de pelo menos 0,50 metro; este foi o valor adotado para o presente caso.

$$H = h_n + h_e + f \quad (4)$$

Onde:

$H$  é a altura máxima da barragem, m;

$h_n$  é altura da lâmina de água normal: 4,50 m;

$h_e$  é a altura da lâmina de água no extravasor: 0,50 m;

$f$  é a altura da folga: 0,50 m.

A aplicação da Equação 4 resultou em uma altura ( $H$ ) de 5,50 m para a barragem.

### 3.3.3 Determinação da Largura da Crista

Para a determinação de sua largura, leva-se em consideração a altura total da barragem, altura máxima que o maciço atinge em seu estado final de construção e a necessidade de uma margem de segurança para evitar que a altura real fique abaixo do projetado. De acordo com Soares et al., (2019), A largura da crista de uma barragem deve sempre ser maior que 3 m e em casos em que haja a necessidade de trânsito de veículos, é exigido que sua largura seja, no mínimo, igual a 6 m. O cálculo da crista é realizado pela Equação 5 (SOARES et al., 2019).

$$C_r = \frac{H}{5} - 3 \quad (5)$$

Onde:

$C_r$  é a largura da crista, m;

$H$  é a altura máxima da barragem: 5,50 m.

A aplicação da Equação 5 resultou em uma largura de crista ( $C_r$ ) igual a 1,90 m. Entretanto, em razão dos valores mínimos citados, adotou-se a largura da crista como 3,00 m.

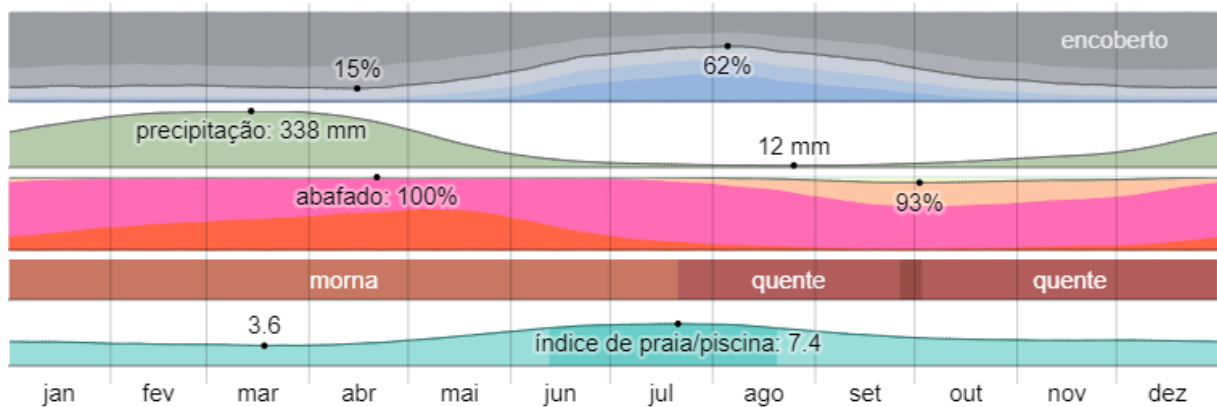
### 3.3.4 Cálculo do vertedouro

Para garantir o dimensionamento seguro do vertedouro, que atuará como uma válvula de segurança em casos de enchentes, realizou-se o cálculo da vazão que ele pode suportar para uma chuva contínua de 24 horas. As variáveis consideradas no cálculo são a área de captação da bacia hidrográfica, a precipitação e o coeficiente de deflúvio.

Segundo Cintra et al. (2013), a bacia hidrográfica do Araguaia-Tocantins apresenta uma grande área de captação, drenando uma área de 759.000 km<sup>2</sup>, dos quais 340.000 km<sup>2</sup> correspondem ao rio Tocantins, 377.000 km<sup>2</sup> ao rio Araguaia (seu principal afluente) e 42.000 km<sup>2</sup> ao rio Itacaiúnas (o maior contribuinte de seu curso inferior).

Quanto à precipitação, considerando a ausência de dados no local de estudo adotou-se o máximo valor encontrado na localidade mais próxima, o município de Tucuruí, os valores são ilustrados na Figura 25.

Figura 25 – Precipitação anual do município vizinho, Tucuruí.



WeatherSpark (2024).

O coeficiente de escoamento superficial, também conhecido como *runoff* ou deflúvio, é a razão entre o volume total de escoamento superficial no evento e o volume total precipitado. Mas existem tabelas com valores definidos de acordo com as características de uso do solo na literatura. De acordo com ASCE (1969 citado por Tucci, 1993), considerando a condição de cobertura: gama solo arenoso com inclinação de 7%, um caso desfavorável ao encontrado no local de estudo, pode-se adotar o coeficiente de 0,2.

Deste modo, a vazão ( $Q$ ) correspondente à precipitação considerada foi calculada por meio da Equação 6 (ABREU, 2015), resultando em 0,6 m<sup>3</sup>/s.

$$Q = \frac{s * p * r}{86400} \quad (6)$$

Onde:

$Q$  é a vazão;

$s$  é a área da bacia hidráulica 0,767 Km<sup>2</sup>;

$p$  é a precipitação máxima de 24 horas: 338 mm;

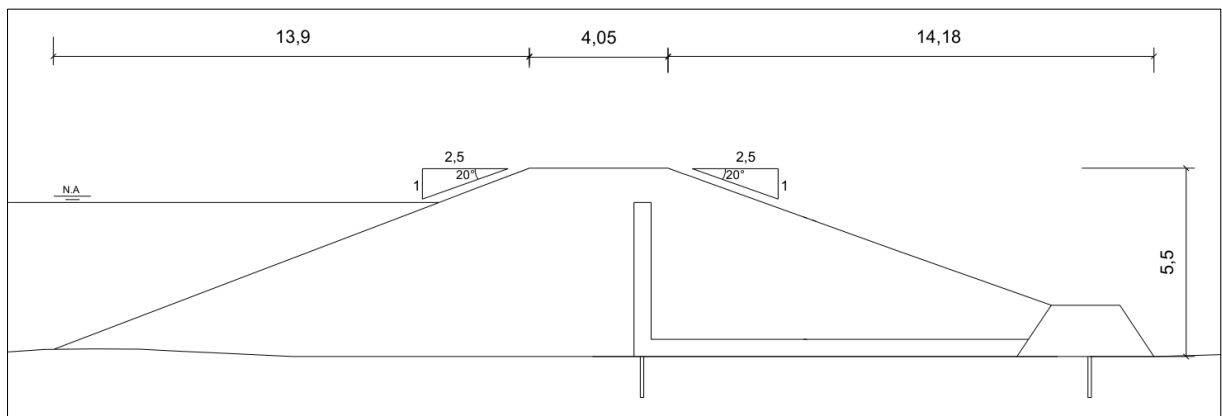
$r$  é o coeficiente de deflúvio 0,20.

Obtendo-se o valor de vazão de 0,6 m<sup>3</sup>/s correspondente a precipitação de 24 horas, esse valor pode ser utilizado para estudos posteriores afim da adoção de um sistema de vertedouro.

### 3.4 Geometria

A altura do aterro compactado determinada por meio da equação 04 é de 5,5 metros. Para Brasil (2010), esse valor classifica a estrutura como uma barragem pequena apresentando uma altura inferior a 15 metros. Possui uma crista com largura superior a 3 metros, uma vez que não foi considerado necessidade de trânsito de veículos pelo maciço. As dimensões mencionadas constam na Figura 26.

Figura 26 - Seção transversal do barramento.

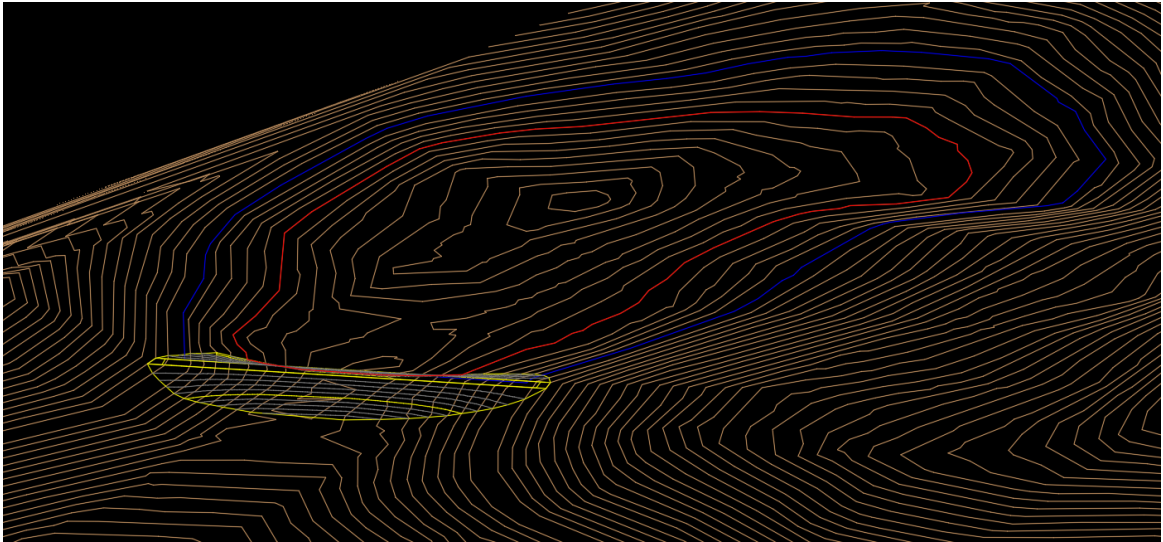


Fonte: Dos autores (2024).

A projeção horizontal do talude de montante foi de 13,9 metros, sendo o de jusante de 14,18 metros. Ambos possuem proporção próximas de 2,5:1, com crista de 4,05 metros, totalizando 32,13 metros, e um comprimento total de 81,04 metros.

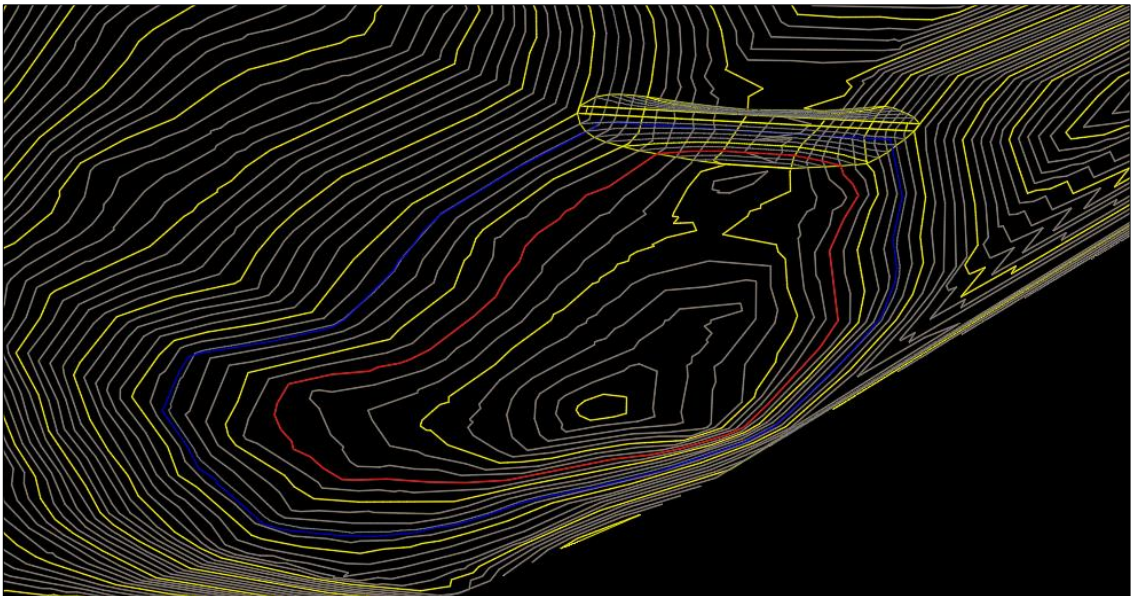
Nas Figuras 27 e 28, as linhas vermelhas representam a cota mínima do reservatório, indicando o nível mais baixo que a água pode atingir sem comprometer a operação do sistema; já as linhas azuis correspondem à cota máxima, que é o limite superior para evitar transbordamentos e garantir a segurança da estrutura.

Figura 27 – Representação tridimensional do terreno, vista 01.



Fonte: Dos autores (2024).

Figura 28 - Representação tridimensional do terreno, vista 02.



Fonte: Dos autores (2024).

### 3.5 Propriedade dos materiais

Considerando a ausência de uma caracterização mais detalhada do solo local, utilizaram-se laudos de sondagem SPT de dois furos localizados na região, nas proximidades da área de estudo, para a definição dos parâmetros físicos do solo no barramento. A posição em que os tipos de solo foram determinados bem como do local de implementação da barragem estão demonstrados nas Figuras 29 a Figura 31.

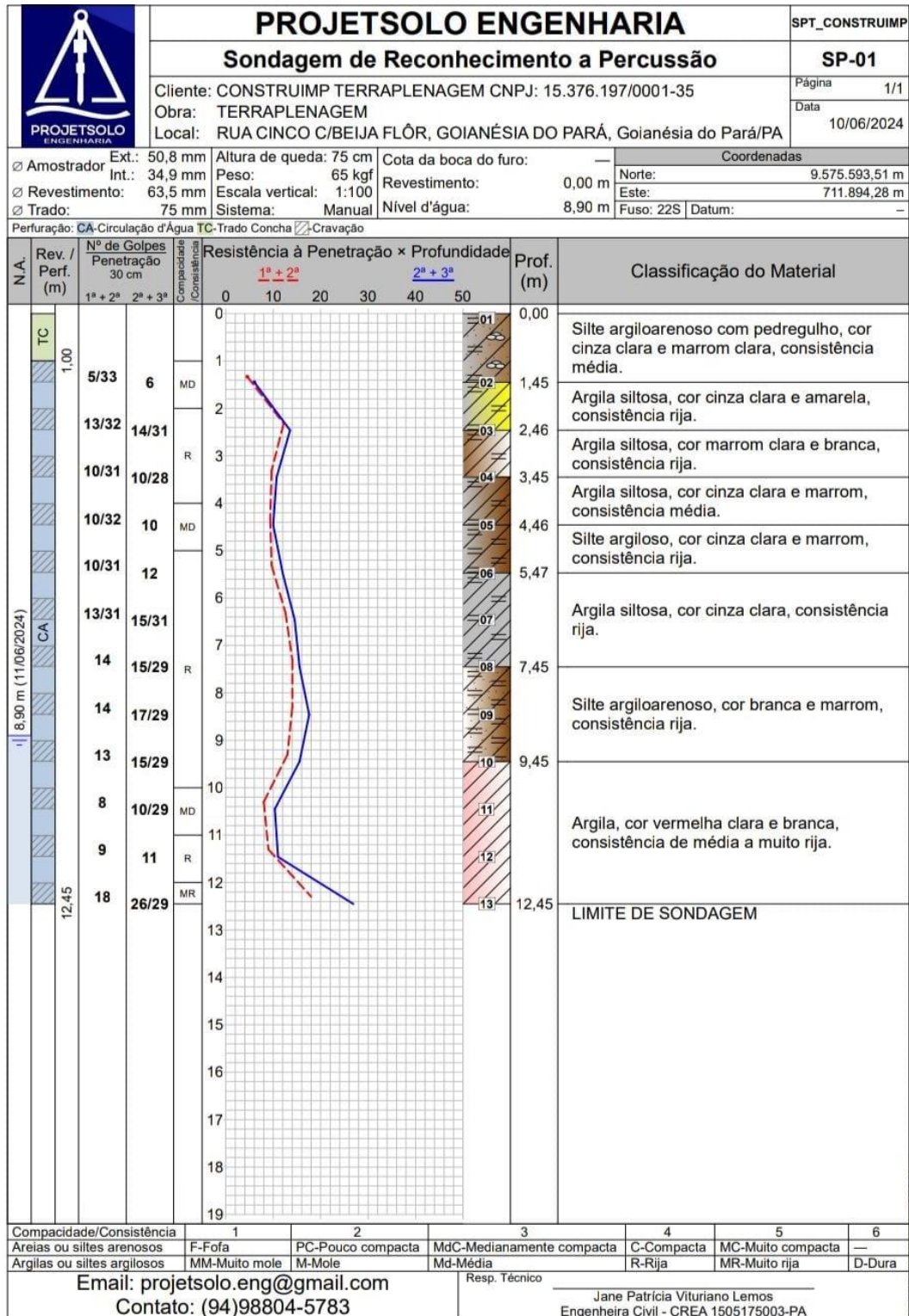
Figura 29 – Localização dos furos de sondagem e do barramento.



Fonte: Dos autores, adaptado de GoogleEarth (2024)

O furo de sondagem 01 (Figura 30) indica uma predominância de argilas e siltes, com valores consistentes de SPT que variam de 10 a 26, a partir de dois metros de profundidade.

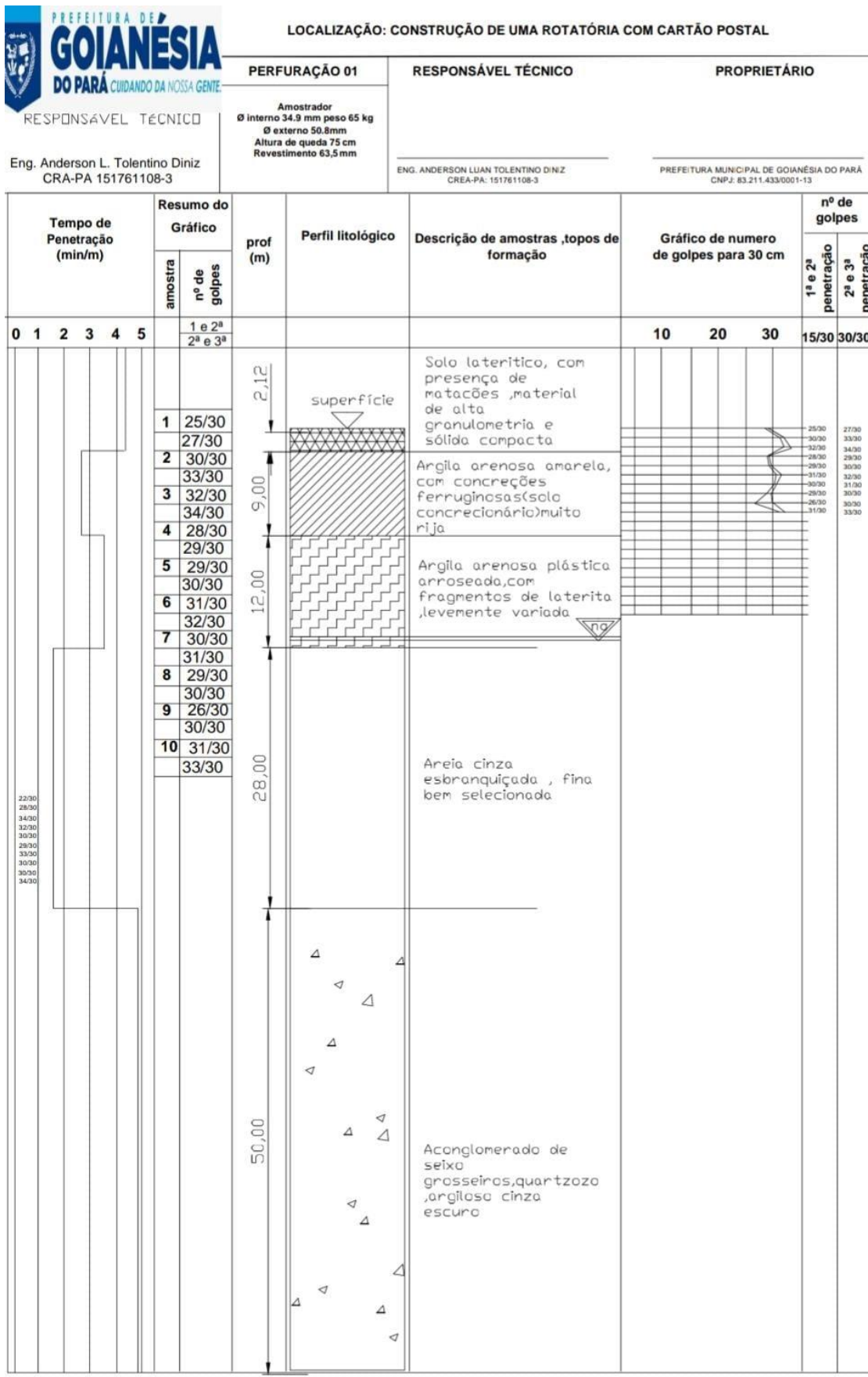
Figura 30 – Laudo de sondagem 01.



Fonte: PROJETSULO ENGENHARIA (2024)

Já o furo de sondagem 02 (Figura 31) demonstrou a presença de argila, em conformidade com o 01, além da presença de areia e solo laterítico, no entanto, nesse, os valores de SPT foram bem superiores, apresentando valor médio de 30.

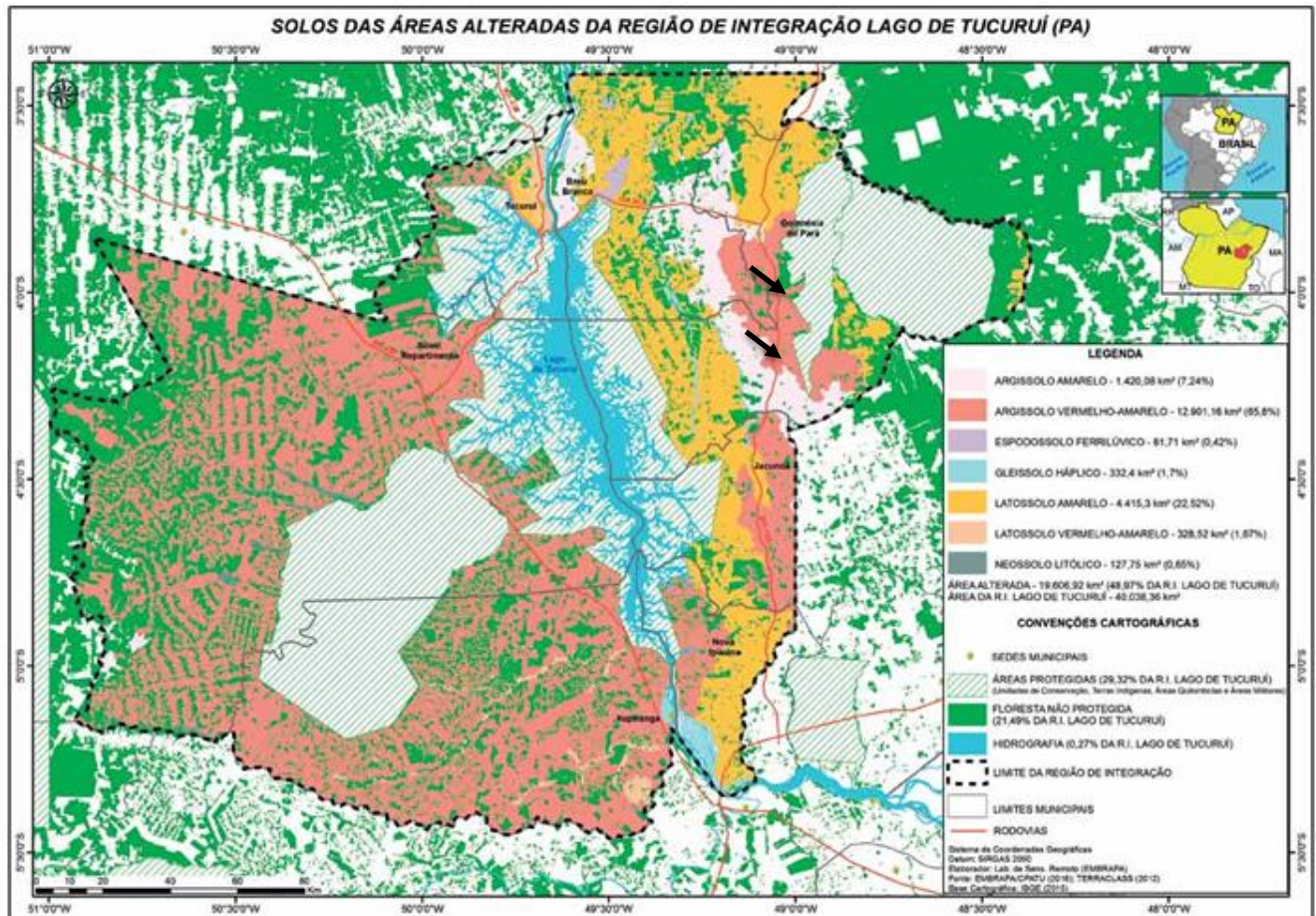
Figura 31 – Laudo de sondagem 02.



Fonte: Prefeitura de Goianésia do Pará (2024).

A partir dessa análise, os resultados obtidos foram confrontados com o mapa pedológico da região (Figura 32), em que a posição dos furos de sondagem, localizados nas setas em preto, apresentam predominância de argissolo vermelho-amarelo.

Figura 32 – Mapa pedológico da região de integração do lago de Tucuruí.



Fonte: EMBRAPA (2016).

Considerando satisfatória a proximidade dos valores encontrados, o material encontrado nos furos de sondagem foram considerados para a análise, levando em consideração o material menos favorável à segurança a partir da combinação dos dados encontrados.

Para a definição das propriedades dos solos, foi realizada a correlação com o valor de  $N_{SPT}$  pelo método experimentado por Joppert, Jr. (2007). A correlação permitiu a adoção de valores para propriedades dos materiais em um estudo preliminar, de forma especial quando não há a possibilidade de estudos mais aprofundados. Esses valores estão descritos no Quadro 9.

Quadro 9 - Propriedade de resistência física dos solos encontrados.

<b>Material</b>	$N_{SPT}$	<b>Peso específico aparente (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ângulo de atrito (°)</b>	<b>Coesão (kPa)</b>
<b>Argila arenosa</b>	28	20	25	65
<b>Argila siltosa</b>	14	19	24	30
<b>Silte argiloarenoso</b>	12	20	26	20

Fonte: Dos autores (2024).

Os três solos apresentados no Quadro 9 foram utilizados nos modelos. Os valores de resistência estimados foram reduzidos em 20%, dadas as incertezas inerentes ao procedimento adotado.

Os dados contidos no Quadro 10 a seguir, representam os parâmetros de entrada utilizados na análise de percolação dos diferentes tipos de solo presentes no barramento.

Quadro 10 – Propriedade de permeabilidade dos solos encontrados.

<b>Material</b>	<b>Coefficiente de permeabilidade saturado (<math>k_x</math>)<sup>7</sup> (m/s)</b>	<b>Coefficiente de compressibilidade volumétrica (<math>m_v</math>) (kPa)</b>	<b>Teor de umidade residual em volume (<math>\theta_r</math>) (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Teor de umidade em volume (<math>\theta_s</math>) (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Argila arenosa</b>	$3 \times 10^{-7}$	$1,08 \times 10^{-3}$	0,04	0,4
<b>Argila siltosa</b>	$2 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	0,04	0,4
<b>Silte argiloarenoso</b>	$3 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-8}$	0,04	0,4
<b>Filtro</b>	$1 \times 10^{-5}$	$1,21 \times 10^{-4}$	0,04	0,4
<b>Argila siltosa (fundação)</b>	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	0,04	0,4

Fonte: ELETRONORTE (1989); PINTO (2013); TEIXEIRA (2021).

De acordo com Cruz (2004), a adoção da hipótese de isotropia na percolação ao dimensionar o barramento reflete a suposição de que a compactação do solo ocorreu de forma homogênea. Esta estratégia leva em conta tanto as condições de umidade, que favorecem uma distribuição porosa mais eficaz, quanto as condições de seca, que podem intensificar a resistência ao fluxo horizontal.

<sup>7</sup> Coeficiente de permeabilidade saturado ( $K_x$ ) é uma propriedade fundamental que indica a capacidade de um solo ou rocha de permitir o fluxo de água em condições de saturação total, (Santos et al.,2016).

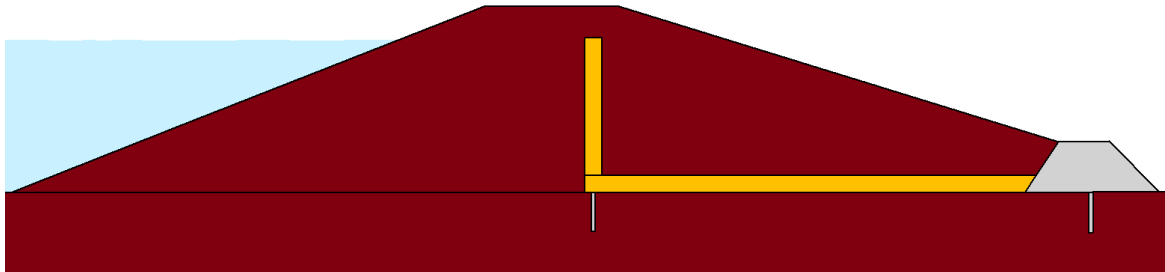
Embora essa simplificação não capture integralmente as variações reais do solo, ela oferece uma base inicial sólida para a avaliação da estabilidade do barramento, permitindo um entendimento preliminar dos comportamentos hidráulicos envolvidos.

### 3.6 Criação do modelo

Tendo assim determinado os dados de entrada como definição da geometria da barragem e as propriedades do solo, por meio dos métodos e análises já citados anteriormente, deu-se início à modelagem da estrutura do barramento. Para seleção do modelo construtivo levou-se em consideração o mais adequado para representar o comportamento do material. Em seguida, desenvolveu-se uma análise comparativa da eficiência de diferentes dispositivos de drenagem, utilizando simulações numéricas para avaliar a vazão e o gradiente hidráulico de saída em diversos cenários de configuração do elemento.

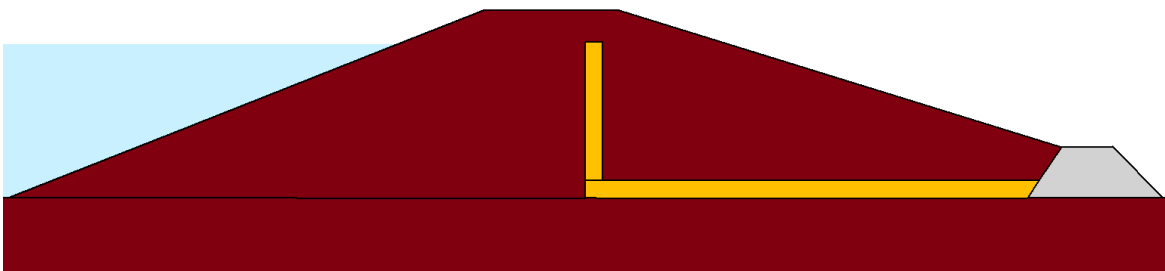
As configurações analisadas incluem: barramento com filtro horizontal, vertical, dreno de pé e poços de alívio (Figura 33) barramento com filtro horizontal, vertical e dreno de pé (Figura 34); barramento com filtro horizontal e vertical e poços de alívio (Figura 35); e barramento com dreno de pé (Figura 36).

Figura 33 – Barramento com filtro horizontal, vertical, dreno de pé e poços de alívio.



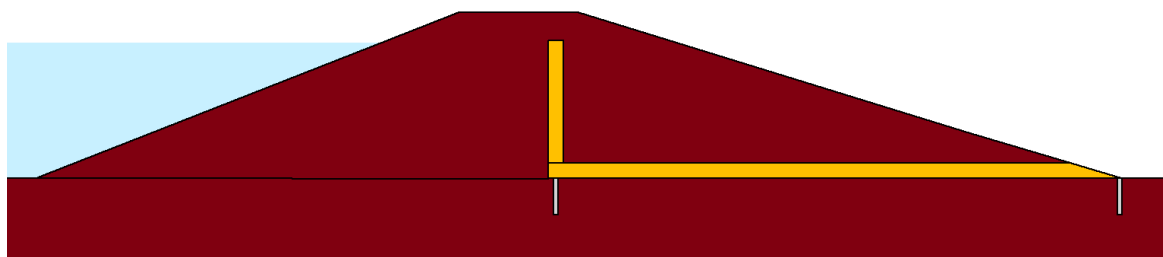
Fonte: Dos autores (2024).

Figura 34 – Barramento com filtro horizontal, vertical e dreno de pé.



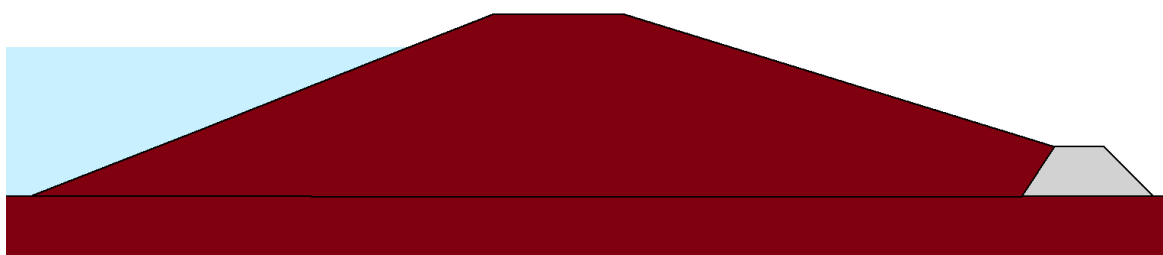
Fonte: Dos autores (2024).

Figura 35 – Barramento com filtro horizontal, vertical e poços de alívio.



Fonte: Dos autores (2024).

Figura 36 – Barramento com dreno de pé.



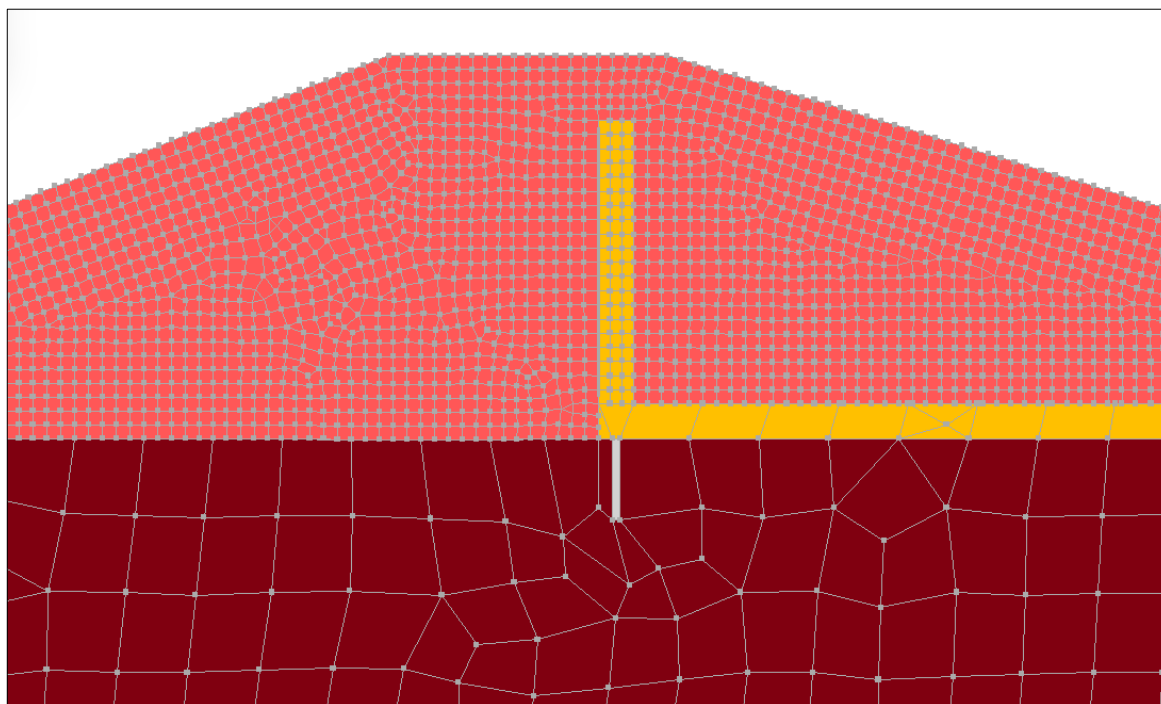
Fonte: Dos autores (2024).

Os resultados das simulações demonstram que a configuração do sistema de drenagem impacta significativamente o controle do nível de água e a pressão hidrostática na barragem, as configurações que incluem filtros horizontais e verticais, junto com drenos de pé, mostraram-se mais eficazes na redução do gradiente hidráulico e no controle da linha piezométrica interna.

### 3.7 Definição da malha

A malha foi definida em diferentes níveis de refinamento, variando o número de nós. A análise incluiu uma malha com elementos maiores, para uma visão geral da estabilidade, e uma malha refinada, para uma análise detalhada, especialmente nas zonas de interesse, como interfaces entre os dispositivos de drenagem e a massa da barragem demonstrado na Figura 37. Para cada configuração da barragem, foram realizadas simulações que consideraram as condições de contorno, definindo níveis de água, pressões e fluxos de entrada e saída, além da aplicação de diferentes cenários, como o período de construção da barragem, término da construção, período de plena operação e esvaziamento esperado e emergencial do reservatório.

Figura 37 - Malhas de tamanho variado.



Fonte: Dos autores (2024).

### 3.8 Variação dos elementos

A análise da influência da variação dos parâmetros geotécnicos na estabilidade da barragem é de grande importância e estará diretamente relacionada ao seu custo e segurança. De acordo com Fell et al. (2015), a espessura mínima dos dispositivos de drenagem deve ser levada em consideração por motivos construtivos. As dimensões mínimas utilizadas nos testes para o barramento, para analisar seu comportamento nos diferentes cenários foram indicadas no Quadro 11 (página 74).

A determinação das dimensões mínimas desses dispositivos é crucial para assegurar que a drenagem seja eficiente e adequada às condições específicas do local. Segundo Cruz (2004), as dimensões devem ser projetadas de forma a evitar obstruções e garantir uma vazão adequada, minimizando o risco de acúmulo de pressão hidrostática nos solos adjacentes. Essa pressão excessiva passível de ocorrer pode levar à saturação e, conseqüentemente, à instabilidade do barramento.

### 3.9 Dimensionamento da drenagem interna

A drenagem interna do barramento é um dos elementos responsáveis por controlar a percolação na barragem desde sua implantação ao estado de funcionamento total (Ersoy e Haselsteiner, 2019).

De acordo com Eletrobras (2003), a espessura mínima dos dispositivos de drenagem deve ser levada em consideração por motivos construtivos. Os valores recomendados constam no Quadro 11, destacando o quão fundamental é considerar diversos aspectos relacionados às dimensões dos dispositivos de drenagem, como a largura da base dos drenos de pé, que garante a eficiência do sistema, o diâmetro dos poços de alívio, evitando problemas de sobrecarga de tensões internas e a espessura dos filtros, tanto verticais quanto horizontais, que deve ser estabelecida em um valor mínimo que assegure uma drenagem eficaz e previna a colmatção. Para o trabalho, verificaram-se diferentes valores obedecendo aos mínimos estabelecidos.

Quadro 11 – Valores mínimos de dispositivos de drenagem.

<b>ELEMENTO DE DRENAGEM</b>	<b>VALORES DE DIMENSÃO MÍNIMA (m)</b>
Drenos de pé	Largura da Base menor 1,5 Largura da Base maior 4,0
Poços de alívio	Diâmetro de 0,10
Filtros verticais	Espessura de 0,50
Filtros horizontal	Espessura de 0,50

Fonte: Eletrobras (2003).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico, apresentam-se os principais resultados encontrados a partir da análise de percolação em diferentes pontos da barragem e a partir da análise de estabilidade dos taludes.

### 4.1 Análise de estabilidade.








A drenagem interna e as propriedades físicas do solo são fundamentais para a estabilidade e segurança das barragens. A drenagem eficaz previne infiltrações prejudiciais, alivia pressões hidrostáticas e minimiza o risco de erosão, enquanto as propriedades do solo, como peso específico, coesão e ângulo de atrito, determinam a resistência e o comportamento do solo sob carga. Juntas, essas características influenciam diretamente os fatores de segurança das estruturas. Para avaliar essas interações, foram simuladas diferentes combinações de solo em cenários variados de drenagem interna, permitindo uma análise comparativa dos impactos na estabilidade da barragem.

Os modelos com solo de argila arenosa e areia siltosa geralmente mostraram um fator de segurança mais alto. Em todos os casos, a avaliação de estabilidade durante a operação teve fatores de segurança acima de 4,50. O uso de uma estrutura com os elementos filtro vertical e horizontal, ambos com espessura de 0,50 m, além de poços de alívio, seria o mais eficaz em todos os casos.

Contudo, para Pinto (2006), em tais situações, o uso de uma estrutura apenas com drenagem de pé, sem considerar a presença de filtros internos, já asseguraria níveis de segurança muito além dos desejados. É crucial enfatizar que esses valores elevados se devem principalmente à dimensão do componente analisado. Embora apenas a existência do dreno de pé indique condições de segurança desejadas, a combinação de drenos verticais e horizontais é uma prática sugerida para assegurar a eficácia na drenagem interna das barragens, além de proporcionar um aumento na estabilidade.

Considerando a disposição dos elementos, a partir das três variações de materiais disponíveis, os fatores de segurança, estavam diretamente ligadas as condições de operação em que atuavam, no modelo de barramento homogêneo sem a disposição de filtros internos, apenas dreno de pé, por exemplo, obteve os menores valores de fator de segurança em todos os casos, 4,38 (Quadro 12), 4,96 (Quadro 13) e 3,59 (Quadro 14).

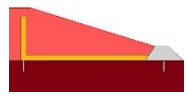

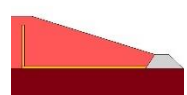
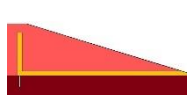
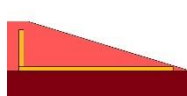
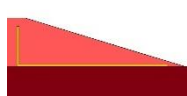
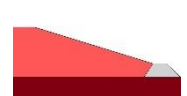
Quadro 12 - Fatores de segurança para os modelos considerando material argila siltosa como estrutura do barramento e da fundação

VARIACÃO	FATOR DE SEGURANÇA				
	Após o final de construção	Durante a operação	Rebaixamento do Reservatório do nível máximo para o mínimo	Rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo	
				Esvaziamento emergencial em um período de 5 horas	Esvaziamento gradual em um período de 5 dias
	3,05	4,57	3,03	2,59	2,64
	3,05	4,52	3,00	2,57	2,62
	3,05	4,5	2,99	2,56	2,61
	3,05	4,57	2,98	2,18	2,57
	3,05	4,48	2,92	2,13	2,52
	3,05	4,44	2,90	2,12	2,50
	3,05	4,38	2,91	2,50	2,54

Fonte: Dos autores (2024)

Em todas as variações observadas no Quadro 12, os fatores de segurança obtidos configuram valores significativamente satisfatórios quando comparados ao mínimo estabelecido para garantia da sua estabilidade. Ao se observar o modelo que apresenta todos os instrumentos de drenagem interna utilizados para essa análise, o menor valor de FS foi observado ao experimentar o esvaziamento emergencial em um período de 5 horas com valor de 2,12, e o maior FS foi encontrado durante o período de operação (4,57).

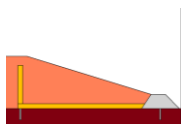
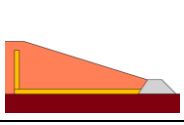
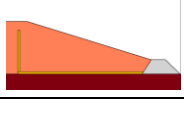
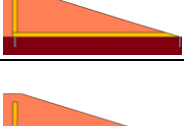

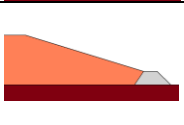
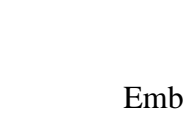
Quadro 13 - Fatores de segurança para os modelos considerando material argila arenosa como estrutura do barramento e argila siltosa como material da fundação.

VARIACÃO	FATOR DE SEGURANÇA				
	Após o final de construção	Durante a operação	Rebaixamento do Reservatório do nível máximo para o mínimo	Rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo	
				Esvaziamento emergencial em um período de 5 horas	Esvaziamento gradual em um período de 5 dias
	3,62	5,14	3,48	2,74	2,90
	3,62	5,07	3,21	2,35	2,52
	3,62	5,05	3,18	2,34	2,50
	3,62	5,14	3,45	2,45	2,85
	3,52	4,79	3,28	2,98	2,98
	3,62	5,07	3,39	2,42	2,81
	3,62	4,96	3,35	2,64	2,79

Fonte: Dos autores (2024)

No Quadro 13 exibem-se os valores mais elevados de fator de segurança, sob a condição de operação, levando em conta as diferentes variações testadas, com valor máximo de 5,14 e mínimo de 2,34.

Quadro 14 - Fatores de segurança para os modelos considerando material silte argiloarenoso como estrutura do barramento e argila siltosa como material da fundação.

VARIACÃO	FATOR DE SEGURANÇA				
	Após o final de construção	Durante a operação	Rebaixamento do Reservatório do nível máximo para o mínimo	Rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo	
				Esvaziamento emergencial em um período de 5 horas	Esvaziamento gradual em um período de 5 dias
	2,66	3,74	2,42	1,94	2,28
	2,66	3,71	2,39	1,85	2,06
	2,66	3,68	2,37	1,83	2,05
	2,66	3,79	2,46	1,98	2,33
	2,66	3,66	2,39	1,82	2,04
	2,66	3,63	2,34	1,81	2,03
	2,66	3,59	2,33	1,87	2,20

Fonte: Dos autores (2024)

Embora no Quadro 14 tenham sido mostrados valores de fator de segurança acima do mínimo definido pela ABNT NBR 11682:2009 e ABNT NBR 13028:2024, em comparação aos outros casos analisados foi o que apresentou os valores menos satisfatórios. Na condição de operação o valor máximo encontrado foi de 1,81, valor abaixo do mínimo encontrado nas outras duas variações de solo, 2,12 (Quadro 13) e 2,34 (Quadro 14).

Para a análise da poropressão e carga total dos modelos, simplificou-se a adotar a estrutura com o material argila arenosa contendo filtros horizontal e vertical além do dreno de pé, por apresentar resultados mais satisfatórios quanto ao fator de segurança relacionado a sua

estabilidade. Conforme estipulado pela norma ABNT NBR 11682 e ABNT NBR 13028, o mínimo aceitável para o fator de segurança em situações como esta é de 1,5. Os quadros 13, 14 e 15 apresentam os valores obtidos para as condições de Regime Permanente de Operação, Rebaixamento rápido do reservatório do nível máximo para o mínimo, rebaixamento rápido do reservatório do nível máximo para o esvaziamento total em um período de 5 horas e rebaixamento rápido do reservatório do nível máximo para o esvaziamento total em um período de 5 dias.

De acordo com Gerscovich (2016), a alteração abrupta da poropressão, particularmente em solos coesivos como a argila siltosa, é uma questão de grande preocupação. Solos saturados, como os presentes em regiões argilosas, costumam exibir comportamento não drenante sob circunstâncias de carregamento acelerado. Nessas circunstâncias, a água não tem tempo adequado para escoar dos espaços vazios do solo, levando a um acúmulo de poropressão. Essa circunstância é delicada, pois pode resultar na redução da resistência ao cisalhamento, aumentando o perigo de instabilidades. A poropressão diminui abruptamente, resultando em um aumento da tensão efetiva. Esse fenômeno pode levar a uma resposta não linear do solo, onde a resistência ao cisalhamento pode ser temporariamente reduzida, aumentando o risco de instabilidades, escorregamentos ou liquefação.

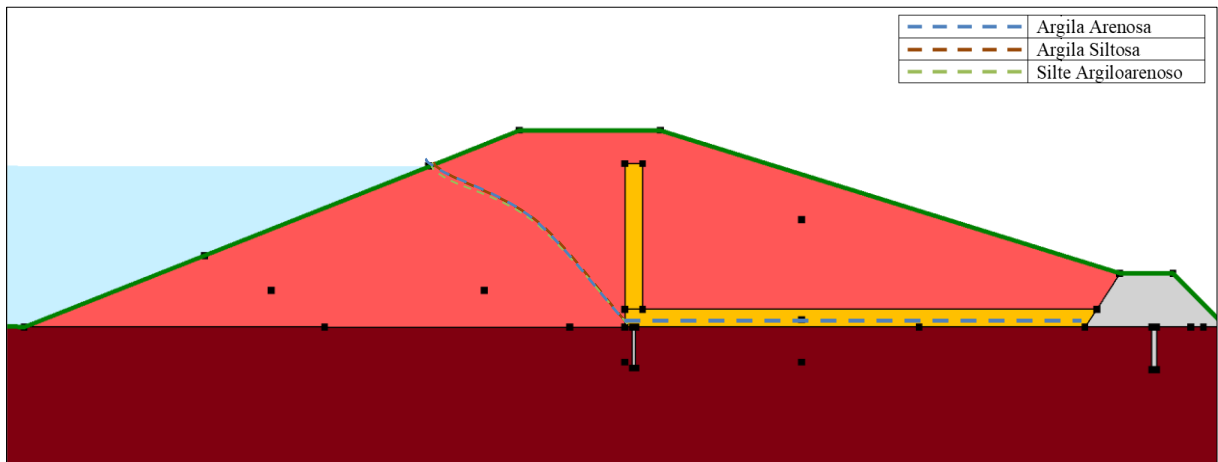
A poropressão negativa na parte superior da estrutura após a localização do filtro, em todos os casos, além de o valor diminuir à medida que os elementos de drenagem estão dispostos demonstra que a pressão de água estabelecida pelo reservatório está sendo bem direcionada.

#### **4.2 Análise de percolação.**

A permeabilidade dos diferentes materiais constituintes da barragem (corpo, dreno, fundação) se apresenta como fator muito relevante para determinar a quantidade de água que percola. O cuidado na escolha das características do material utilizado está diretamente ligado à trajetória que esse tende a seguir; portanto, um dreno bem projetado e construído é fundamental para controlar a percolação.

Durante a análise composta por três diferentes tipos de solo, observou-se que a linha piezométrica apresentava padrões semelhantes em todos os casos do regime de operação (Figura 38).

Figura 38 – Comportamento da linha piezométrica considerando o regime permanente de operação.

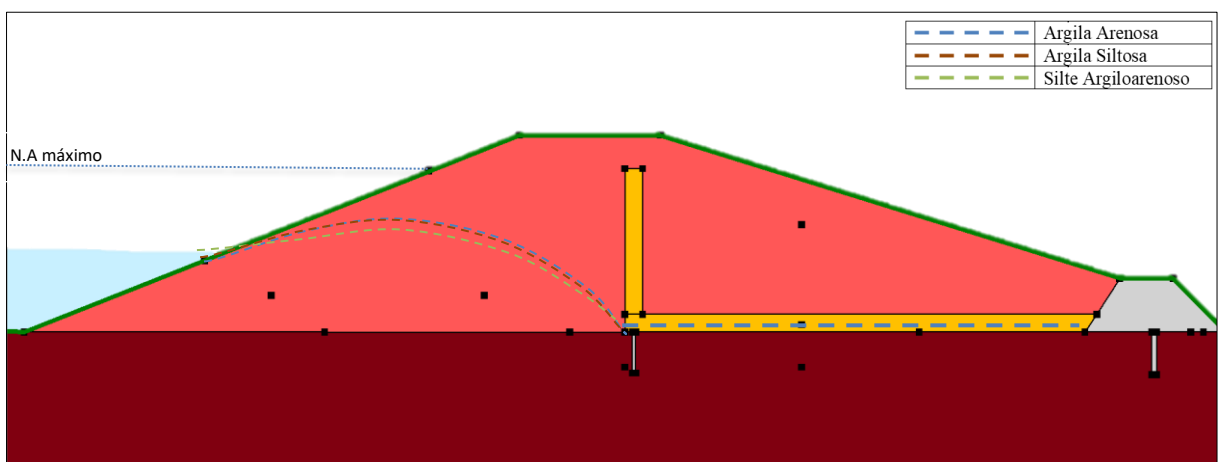


Fonte: Dos autores (2024)

Essa uniformidade na linha piezométrica sugere que, apesar das variações nas propriedades físicas e hidráulicas dos solos, fatores como a geometria do barramento e as condições de carregamento exercem uma influência predominante sobre o comportamento hidráulico da estrutura.

Durante o esvaziamento do reservatório, a linha piezométrica experimenta uma queda gradual à medida que o nível da água diminui (Figura 39), refletindo a transição do reservatório máximo para o mínimo, essa variação na linha piezométrica é influenciada pelas características dos solos que compõem o barramento.

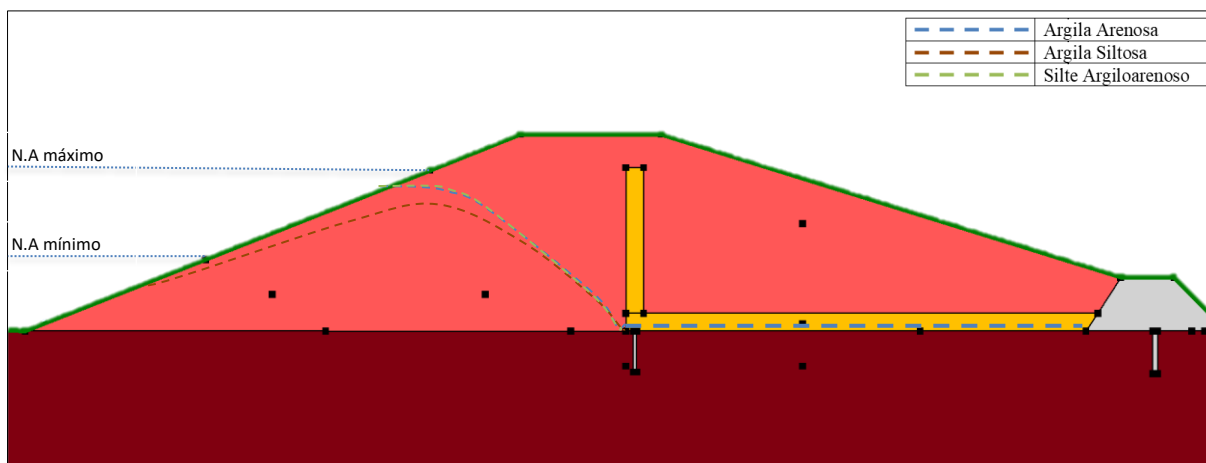
Figura 39 – Comportamento da linha piezométrica considerando o rebaixamento do reservatório do nível máximo para o mínimo.



Fonte: Dos autores (2024)

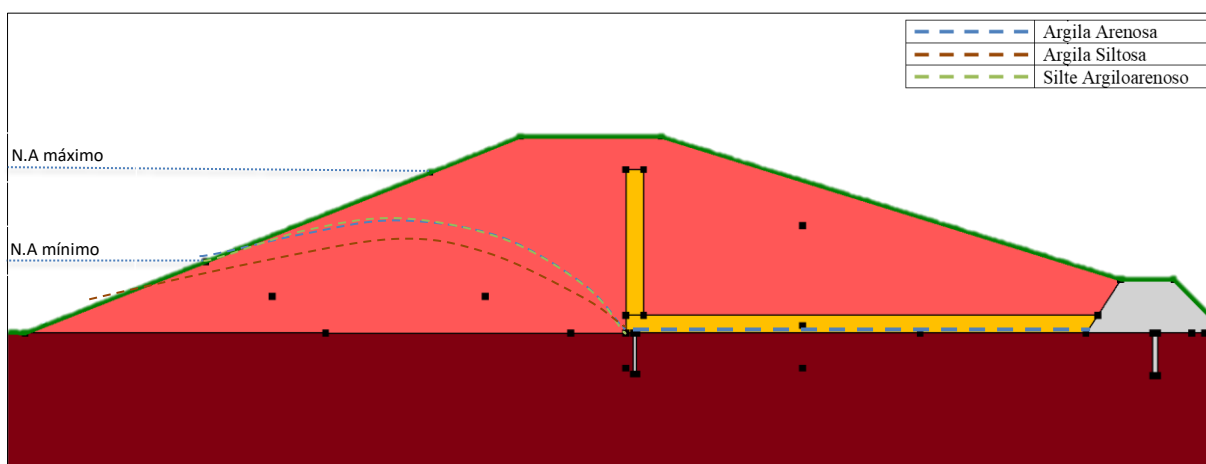
Inicialmente, a linha piezométrica pode apresentar uma descida acentuada, mas com o tempo, essa queda se estabiliza, indicando um novo estado de equilíbrio.

Figura 40 – Comportamento da linha piezométrica considerando o rebaixamento total do nível do reservatório em uma duração de 5 horas.



Fonte: Dos autores (2024)

Figura 41 – Comportamento da linha piezométrica considerando o rebaixamento total do nível do reservatório em uma duração de 5 dias.



Fonte: Dos autores (2024)

As Figuras 38, 39, 40 e 41 ilustram as linhas piezométricas que indicam a direção da percolação de montante para jusante, como esperado. Além disso, nota-se que a linha de percolação, que penetra no maciço é interceptada pelo conjunto de filtros em todos os casos. Isso evidencia sua relevância em termos de segurança, pois eles interrompem o fluxo de água, tornando-se o caminho principal que a água percorre.

Conforme ilustrado nas Figuras, observa-se que a poropressão tende a diminuir ao longo da barragem. A dissipação da carga hidráulica durante o esvaziamento do barramento provoca uma diminuição da poropressão nos materiais saturados adjacentes.

Ao comparar o valor da pressão neutra com as linhas de percolação, nota-se uma diminuição rápida à medida que se aproxima do filtro vertical. Isso corrobora a teoria de que o

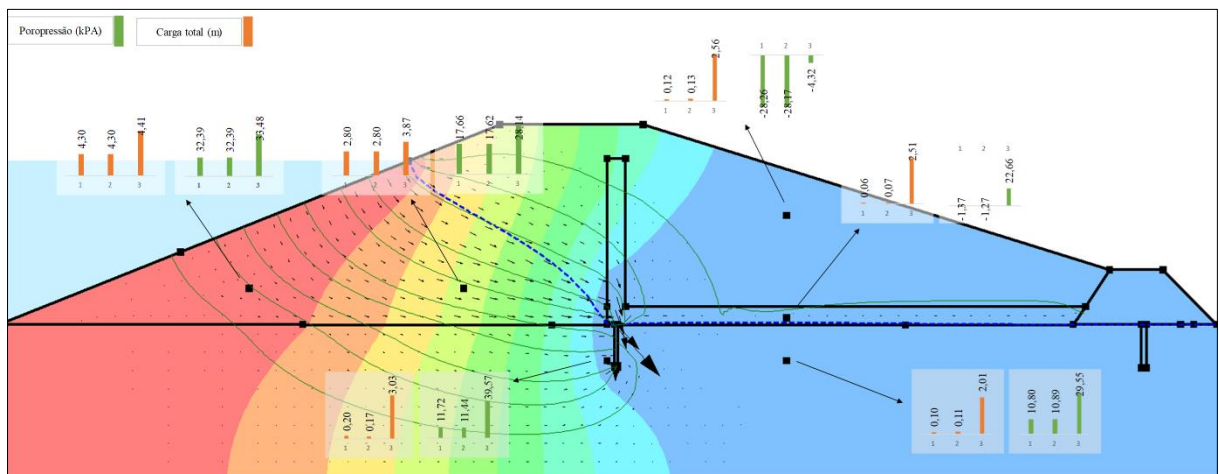
sistema de drenagem interna regula o fluxo de água pelo maciço, impedindo que a linha de água atravesse o talude a jusante, aumentando a probabilidade de instabilidade.

Para todos os casos, utilizando as dimensões mínimas para os filtros, as linhas de fluxo na barragem demonstraram que o sistema de drenagem interna teve importância satisfatória, uma vez que a água que corre pelo maciço de montante é direcionada pelos filtros até o dreno localizado no pé do talude de jusante. A diminuição da carga total a jusante da barragem demonstra que a água está sendo em grande quantidade direcionada aos filtros.

A análise das respostas de poropressão e carga total em diferentes tipos de solo adiante (Figuras de número 42 a 55), revela variações significativas no nível do reservatório e suas implicações para a estabilidade do talude, ao realizar comparações entre os diferentes tipos de solo pode ser observado que características específicas de cada solo influenciam a sua dinâmica de tensões internas. Com base nesses valores encontrados nas análises, é possível identificar e destacar situações que poderiam potencialmente comprometer a integridade da estrutura de acordo com cada solo testado, possibilitando a escolha o material que resultará em uma maior segurança e eficiência para o barramento.

Nessas análises a seguir (Figuras de número 42 a 55), as colunas na vertical de cor laranja, intituladas de carga total, referem-se à energia por unidade de massa de um fluido em movimento. Já as colunas de cor verde intituladas de poropressão indicam valores de pressão que o fluido exerce nos vazios dos solos.

Figura 42 - Comportamento das tensões internas no solo argila arenosa no regime de operação.



Fonte: Dos autores (2024).

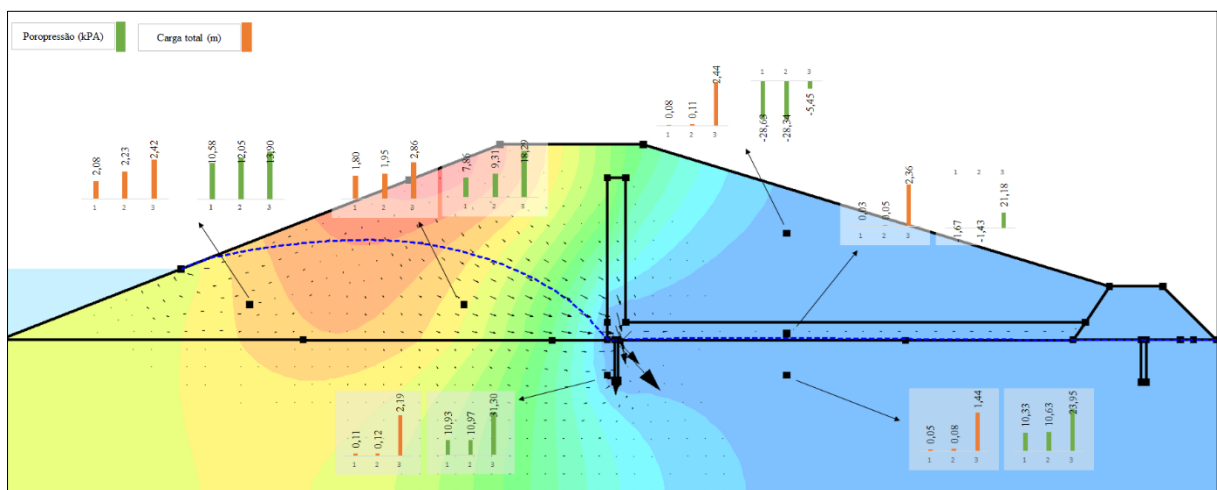
Para esses casos, as colunas numeradas de 1 a 3 estão relacionadas a variação dos elementos de drenagem interna analisados, sendo, filtro vertical mais horizontal e dreno de pé,

filtro horizontal mais vertical, e sem a presença de filtro de drenagem, apenas dreno de pé, respectivamente.

Durante o período de operação normal, o nível de água no reservatório se estabiliza, resultando em uma carga hidrostática constante sobre o talude. A pressão hidrostática aumenta com a profundidade, no entanto, em condições específicas, como solo saturado ou chuvas intensas, essa pressão pode comprometer a estabilidade do talude ao reduzir a coesão entre as partículas do solo.

No caso da Figura 43, o nível de água é mantido em nível reduzido, o que ajuda a preservar alguma carga hidráulica no solo contribuindo para a segurança estrutural. Esse cenário pode ser benéfico para a estabilidade do talude, pois evita uma descompressão excessiva.

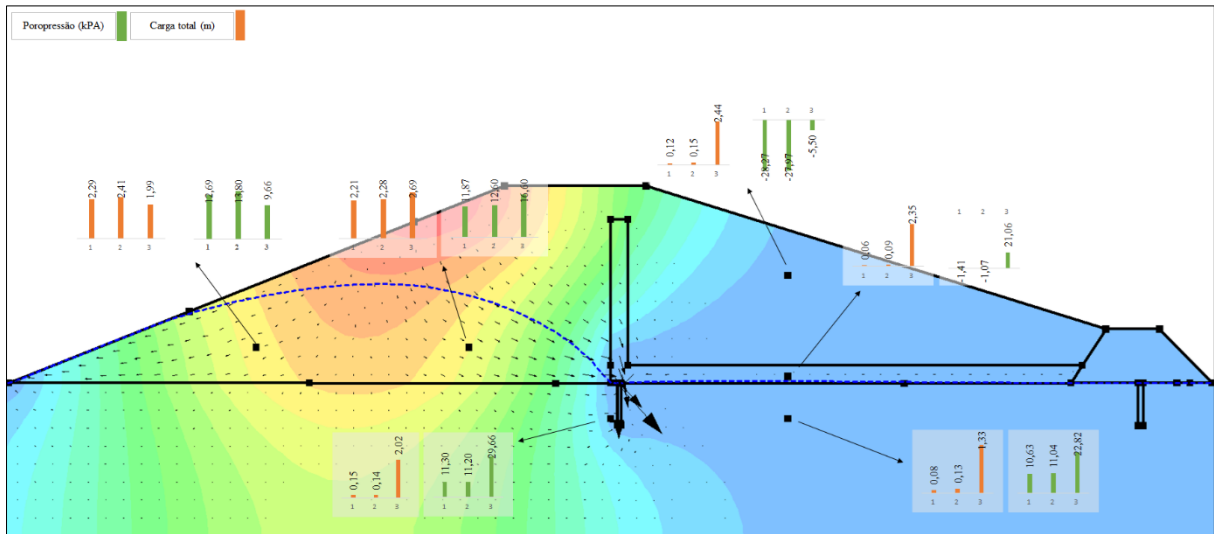
Figura 43 – Comportamento das tensões internas no solo argila arenosa no decorrer de 5 dias na condição de rebaixamento do reservatório do nível máximo para o nível mínimo.



Fonte: Dos autores (2024).

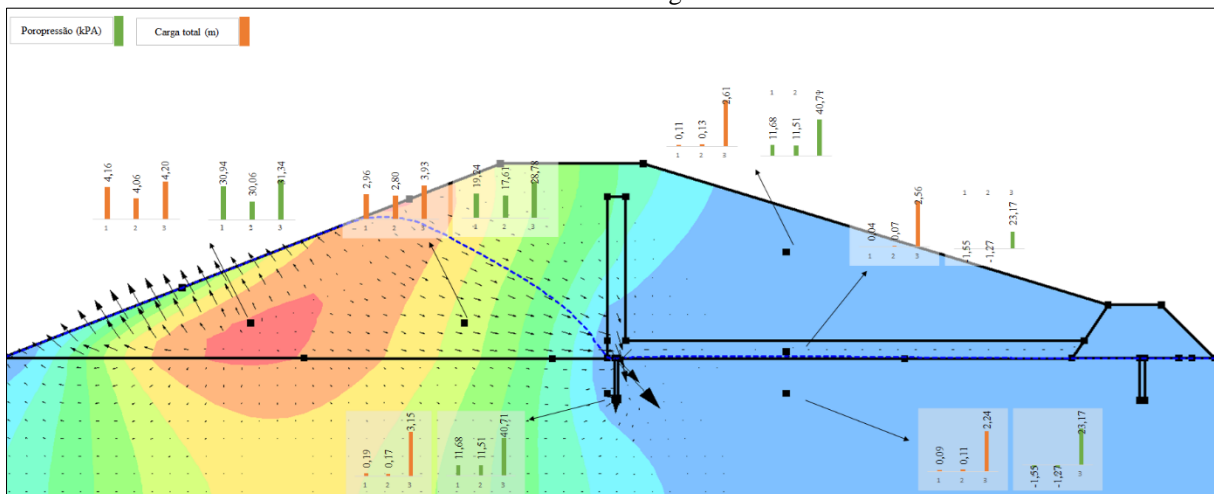
O cenário apresentado na Figura 44 que ilustra o esvaziamento gradual, possibilita uma redução progressiva da carga total sobre o talude. Nesse processo, a percolação e a dissipação das pressões intersticiais ocorrem de forma mais lenta, o que favorece uma adaptação mais eficaz do solo às variações nas tensões.

Figura 44 - Comportamento das tensões internas no solo argila arenosa no decorrer de 5 dias na condição de esvaziamento.



Fonte: Dos autores (2024).

Figura 45 - Comportamento das tensões internas no solo argila arenosa no decorrer de 5 horas na condição de esvaziamento emergencial.

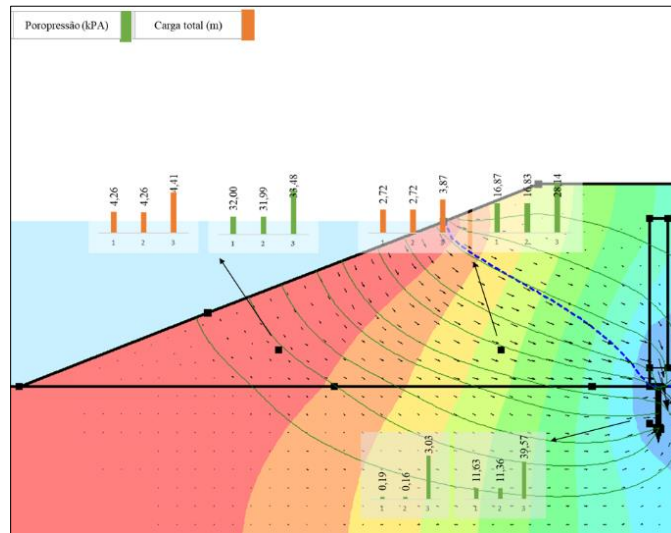


Fonte: Dos autores (2024).

Um esvaziamento rápido causa uma redução abrupta da pressão hidrostática, resultando em tensões de cisalhamento que podem levar à instabilidade do talude e podendo ocasionar rupturas ou deslizamentos, uma vez que existe uma súbita mudança no peso da água no reservatório, que contribuía para a estabilidade do talude e é retirada subitamente.

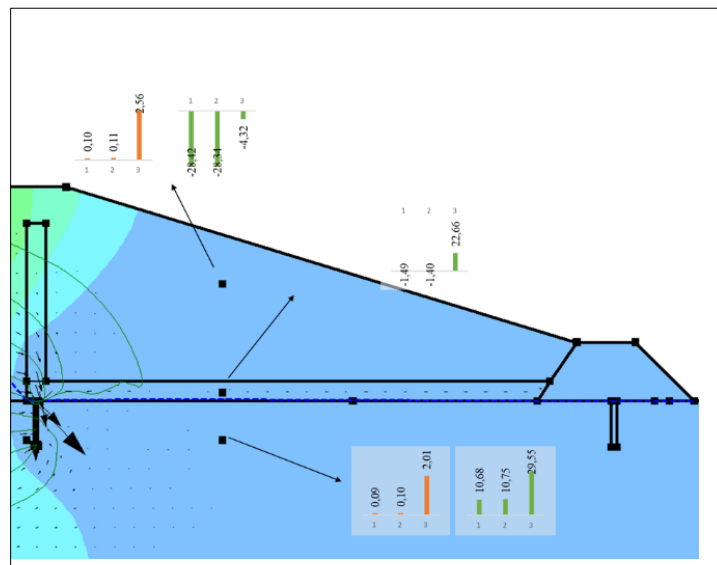
Nos modelos com regime de operação de esvaziamento, a orientação do fluxo para os filtros indica que este ainda se apresenta como um trajeto preferido, destacando a relevância de verificar a permeabilidade dos materiais utilizados. Em todas as situações, a ausência de linhas de fluxo a jusante da barragem (Figura 47) sugere que os elementos de drenagem estão funcionando corretamente.

Figura 46 – Comportamento das linhas de fluxo a montante.



Fonte: Dos autores (2024).

Figura 47 – Direcionamento das linhas de fluxo para os filtros.



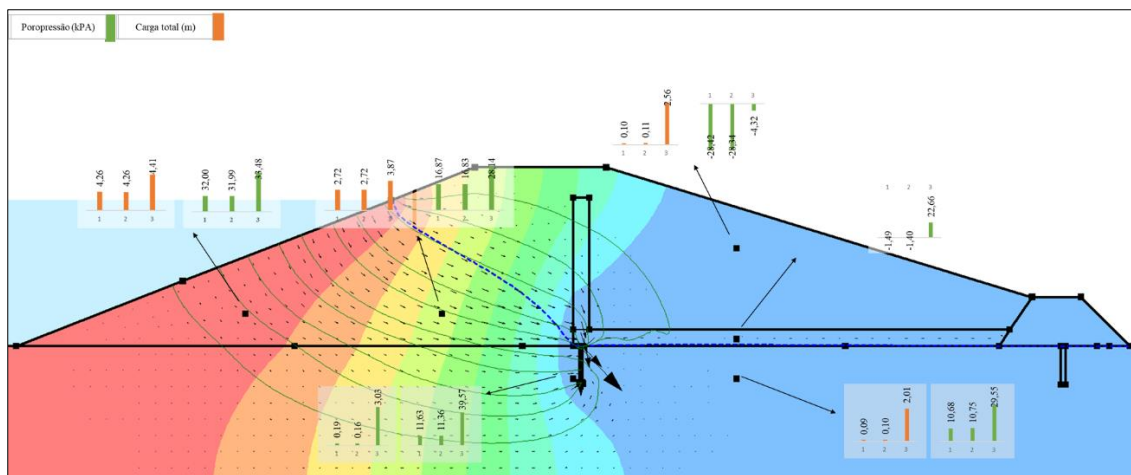
Fonte: Dos autores (2024).

Conforme a água se move em direção ao filtro, o gradiente hidráulico tende a se elevar devido ao aumento da carga hidráulica e às mudanças na trajetória do fluxo de água, a área de escoamento, embora influencie a vazão, não é diretamente responsável por alterar o gradiente hidráulico, esse aumento do gradiente ocorre principalmente em função da diferença de pressão e do caminho que a água precisa percorrer. A quantidade de água que passa pelo filtro aumenta conforme o gradiente hidráulico se eleva considerando que a taxa de fluxo é diretamente

relacionada ao gradiente hidráulico, conforme estabelecido pela Lei de Darcy<sup>8</sup>. O filtro, nesse sentido, possui grande importância ao oferecer uma rota com menor resistência para a água, diminuindo o gradiente hidráulico na área crítica da barragem, prevenindo a erosão interna.

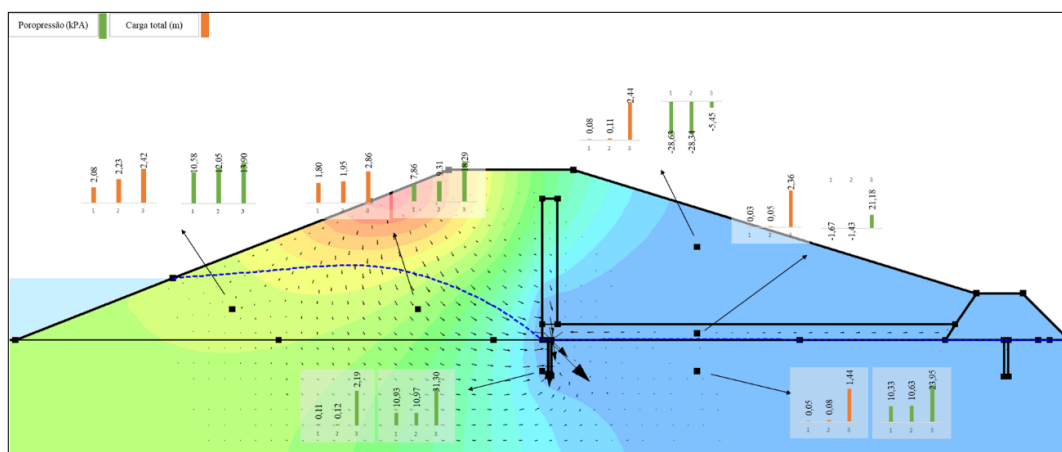
As análises das Figuras 48, 49, 50 indicam que, em função das características do material, a carga total exercida sobre o barramento apresenta uma dissipação reduzida. Isso se deve à alta capacidade de retenção de água da argila siltosa, diferente do espriamento da carga total visualizados nas Figuras 43 e 44 (pagina 86).

Figura 48 - Comportamento das tensões internas no solo argila siltosa no regime de operação.



Fonte: Dos autores (2024).

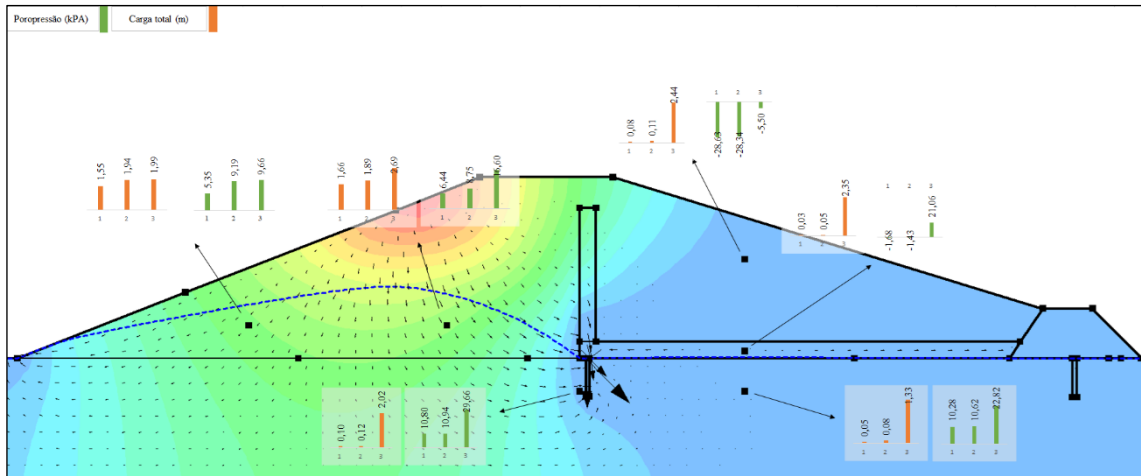
Figura 49 - Comportamento das tensões internas no solo argila siltosa no decorrer de 5 dias na condição de rebaixamento do reservatório do nível máximo para o nível mínimo.



Fonte: Dos autores (2024).

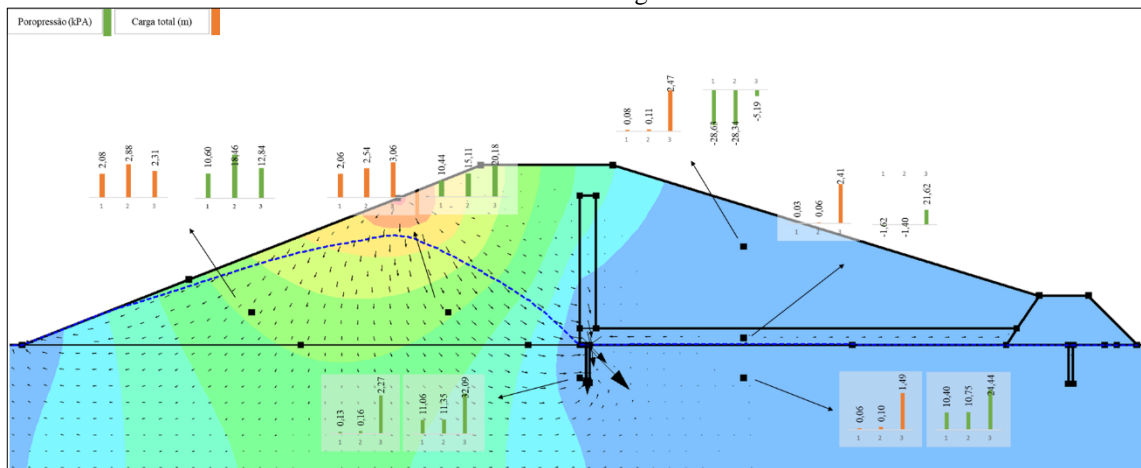
<sup>8</sup> equação constitutiva fenomenológica derivada que descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso.

Figura 50 - Comportamento das tensões internas no solo argila siltosa no decorrer de 5 dias na condição de esvaziamento.



Fonte: Dos autores (2024).

Figura 51 - Comportamento das tensões internas no solo argila siltosa no decorrer de 5 horas na condição de esvaziamento emergencial.



Fonte: Dos autores (2024).

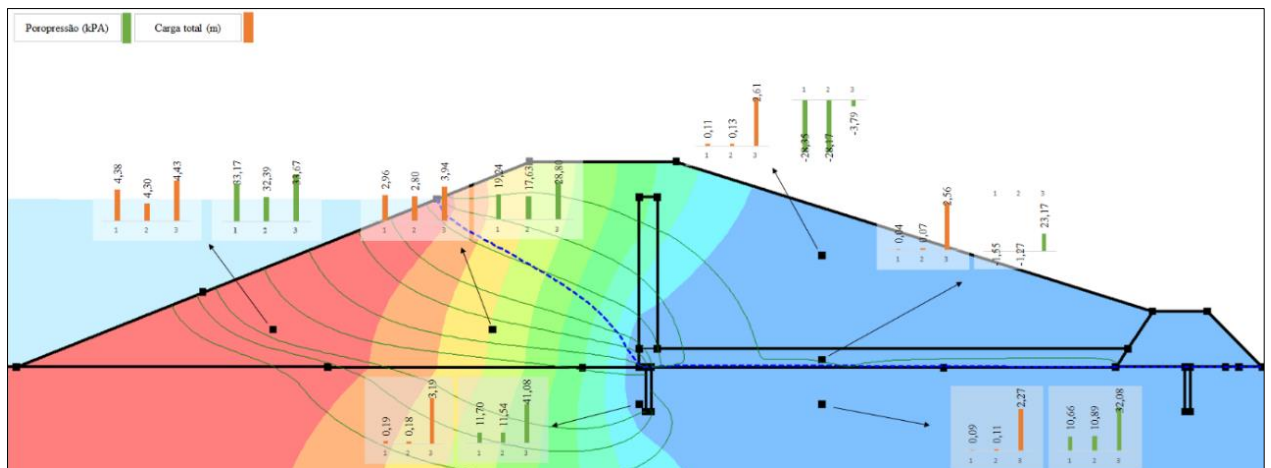
O comportamento do solo de argila siltosa em resposta à variação do nível do reservatório resulta em mudanças na linha piezométrica que são influenciadas por suas propriedades físicas e condutividade hidráulica. Durante eventos de esvaziamento do reservatório, como os que ocorrem em um intervalo de 5 horas, observa-se uma alteração clara nas tensões de poropressão e na carga total. Essas variações são mais pronunciadas em comparação com outros materiais, evidenciando a resposta lenta da argila siltosa às mudanças rápidas no nível da água.

A partir deste ponto, observa-se a influência das características do solo sobre os resultados obtidos, as características intrínsecas do solo, como a granulometria, a plasticidade

e a densidade, influenciam diretamente na permeabilidade, na compressibilidade e na resistência do maciço, afetando assim a segurança e a vida útil da barragem.

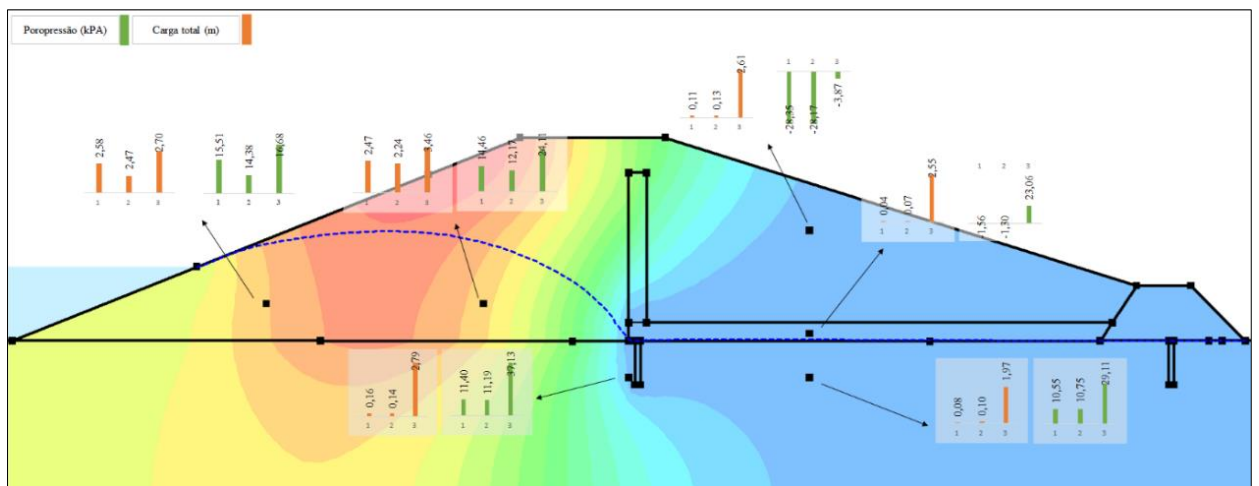
A análise da linha piezométrica em solos de silte argiloarenoso, conforme ilustrado nas Figuras 52, 53 e 54 indica que as variações no nível do reservatório provocam respostas rápidas e significativas em comparação às observadas em solos de argila siltosa, conforme apresentado nas Figuras 50 e 51.

Figura 52 - Comportamento das tensões internas no solo silte argiloarenoso no regime de operação.



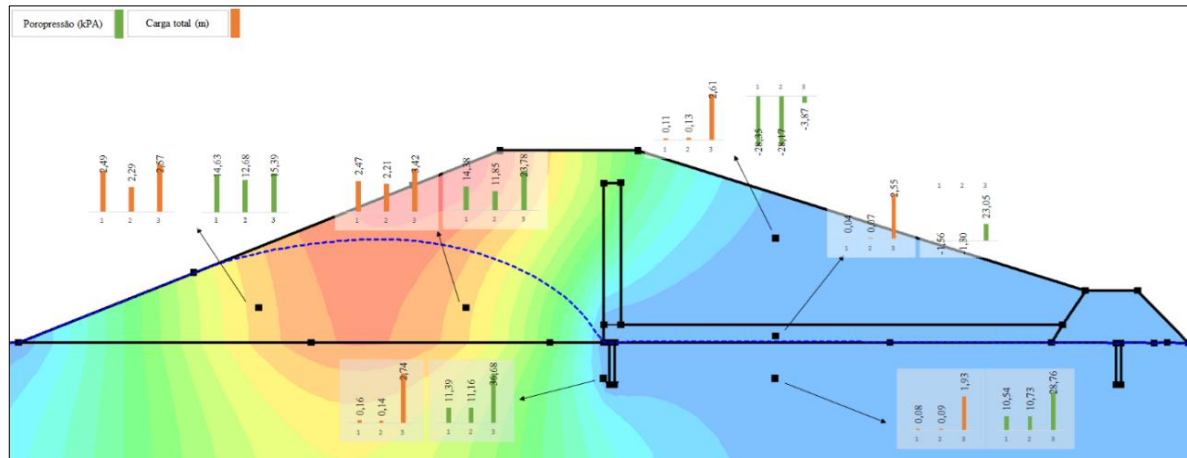
Fonte: Dos autores (2024).

Figura 53 - Comportamento das tensões internas no solo silte argiloarenoso no decorrer de 5 dias na condição de rebaixamento do reservatório do nível máximo para o nível mínimo.



Fonte: Dos autores (2024).

Figura 54 - Comportamento das tensões internas no solo silte argiloarenoso no decorrer de 5 dias na condição de esvaziamento

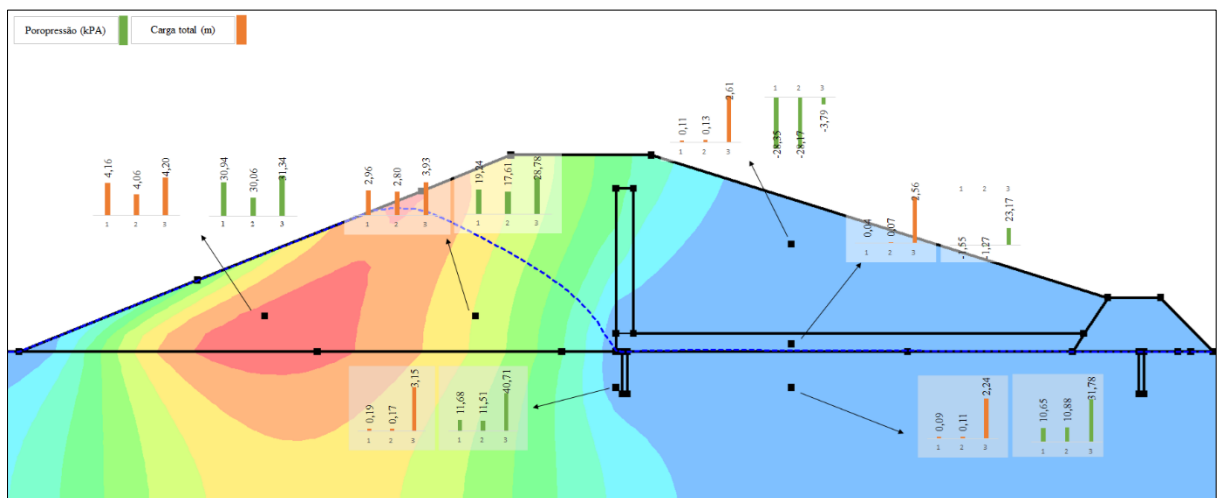


Fonte: Dos autores (2024).

As propriedades intrínsecas do silte argiloarenoso, aliadas à sua condutividade hidráulica superior, permitem que a linha piezométrica se ajuste rapidamente às mudanças. As reduções obtidas nos valores de poropressão e na carga hidráulica total foram claramente observadas durante o evento de drenagem de emergência com duração de 5 horas, destacando a capacidade deste solo de responder eficazmente às mudanças nas condições do reservatório.

A diminuição de valores também é observada quando se analisa a carga total nos pontos na Figura 55. À medida que o fluxo hidráulico a montante é direcionado aos filtros, o lado a jusante dele indica uma queda significativa nos valores obtidos de carga total, demonstrando uma maior ausência do líquido.

Figura 55 - Comportamento das tensões internas no solo silte argiloarenoso no decorrer de 5 horas na condição de esvaziamento emergencial.

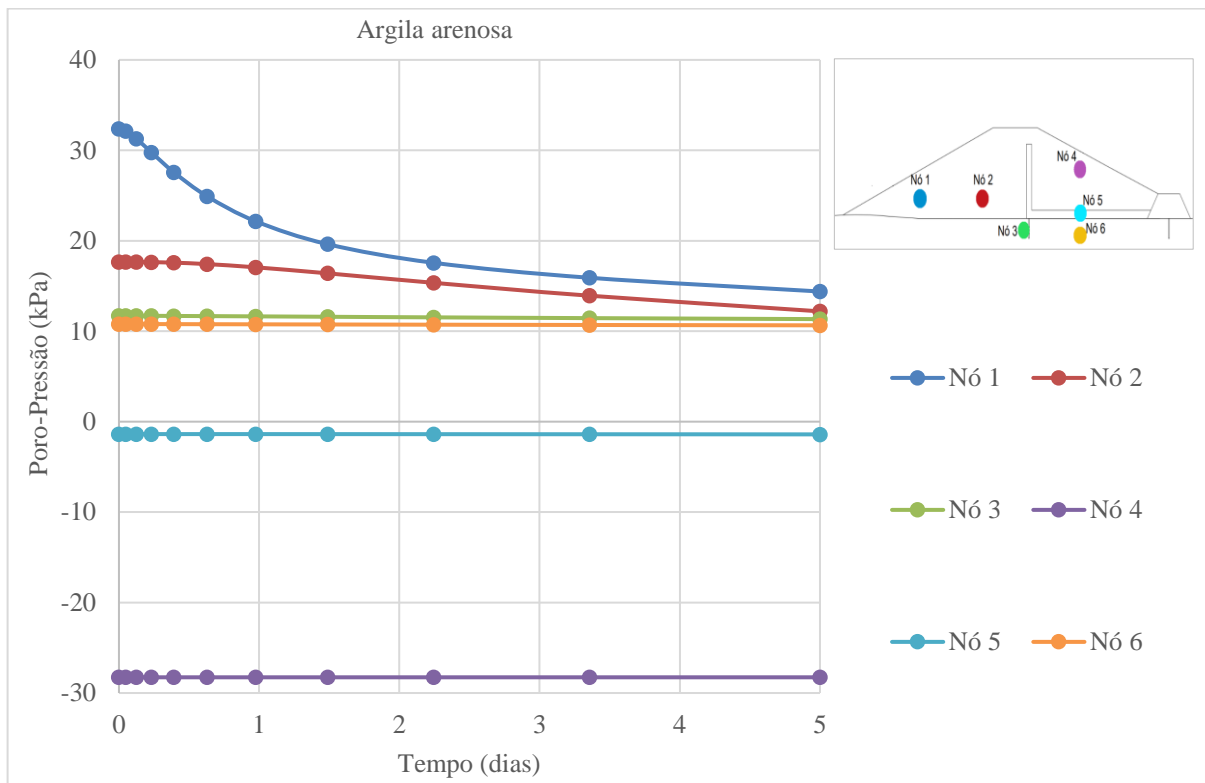


Fonte: Dos autores (2024).

A variação da poropressão interna acontece de forma gradual, influenciada pelas propriedades do material argila arenosa, sua condutividade hidráulica e o tempo de esvaziamento regular.

Conforme ilustrado na Figura 56, inicialmente, observa-se uma flutuação nas pressões internas no nó 1, ponto de análise mais próximo ao reservatório, que se ajustam ao longo do tempo até atingir um valor estável.

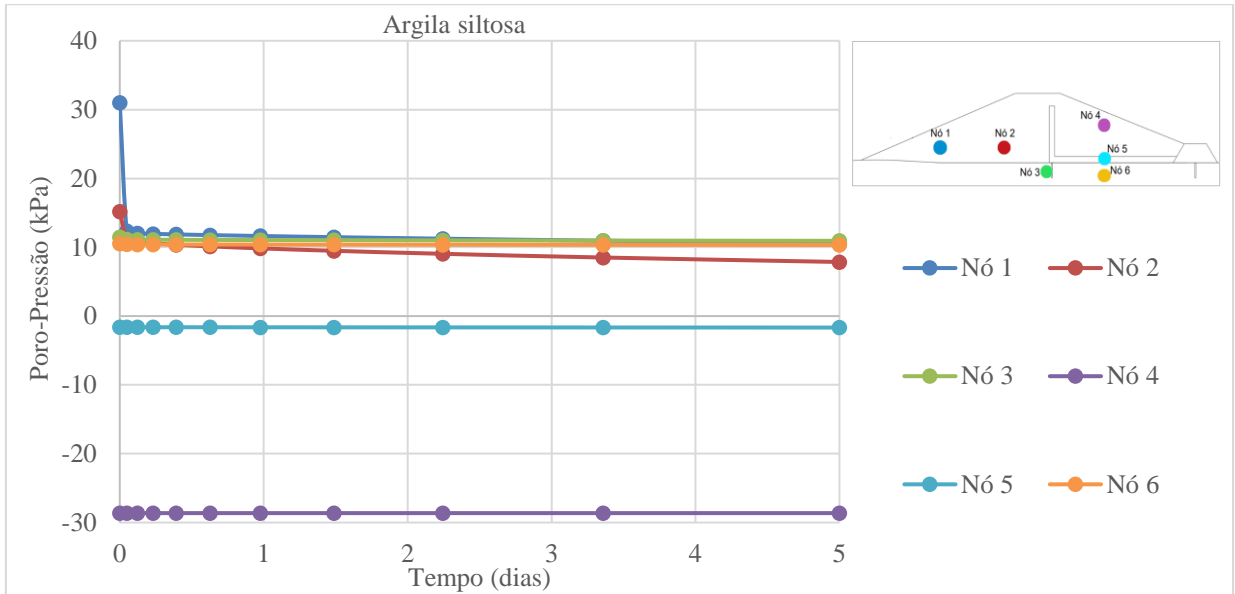
Figura 56 – Comportamento da poropressão considerando o solo argila arenosa no decorrer de 5 dias na condição de rebaixamento do reservatório do nível máximo para o nível mínimo.



Fonte: Dos autores (2024).

Mesmo que haja um intervalo de tempo considerável para que essa variação se manifeste, a alteração da poropressão interna ocorre de maneira abrupta, sendo influenciada pelas características do material argila siltosa e sua condutividade hidráulica.

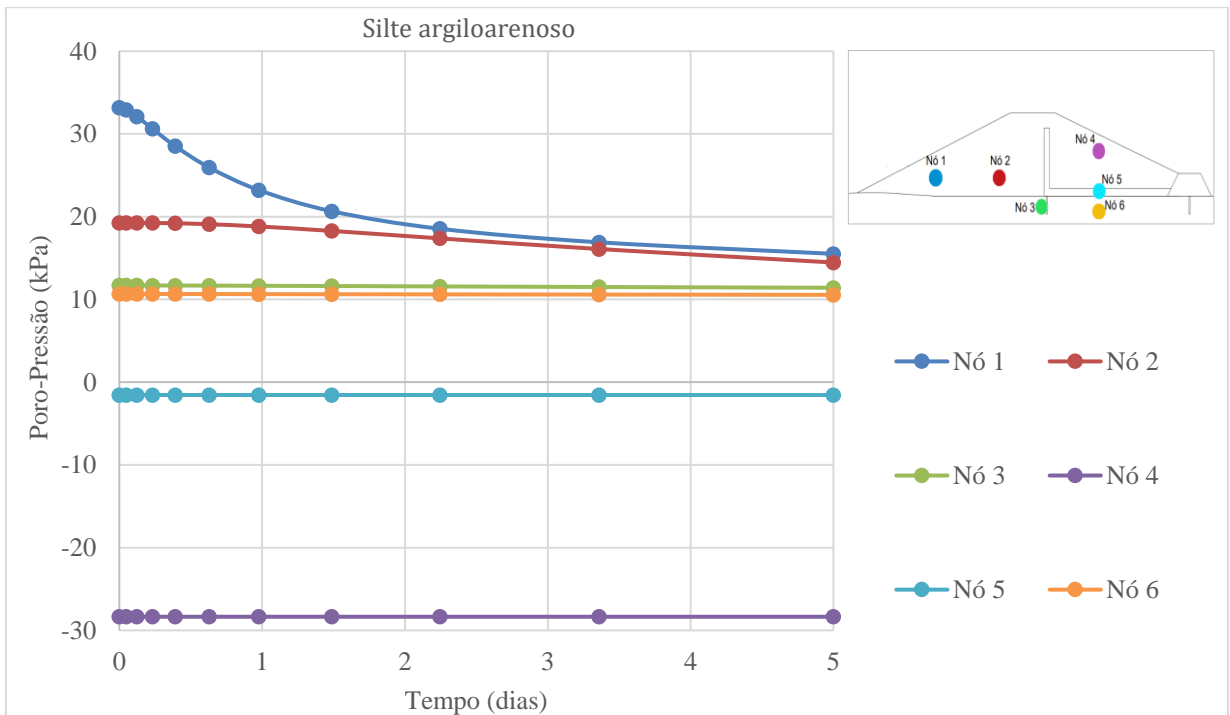
Figura 57 – Comportamento da poropressão considerando o solo argila siltosa no decorrer de 5 dias na condição de rebaixamento do reservatório do nível máximo para o nível mínimo



Fonte: Dos autores (2024).

O esvaziamento rápido do reservatório provoca uma queda abrupta da poropressão, perceptível no Nó 1, conforme mostrado na Figura 58; a água nos vazios do solo não se desloca rapidamente

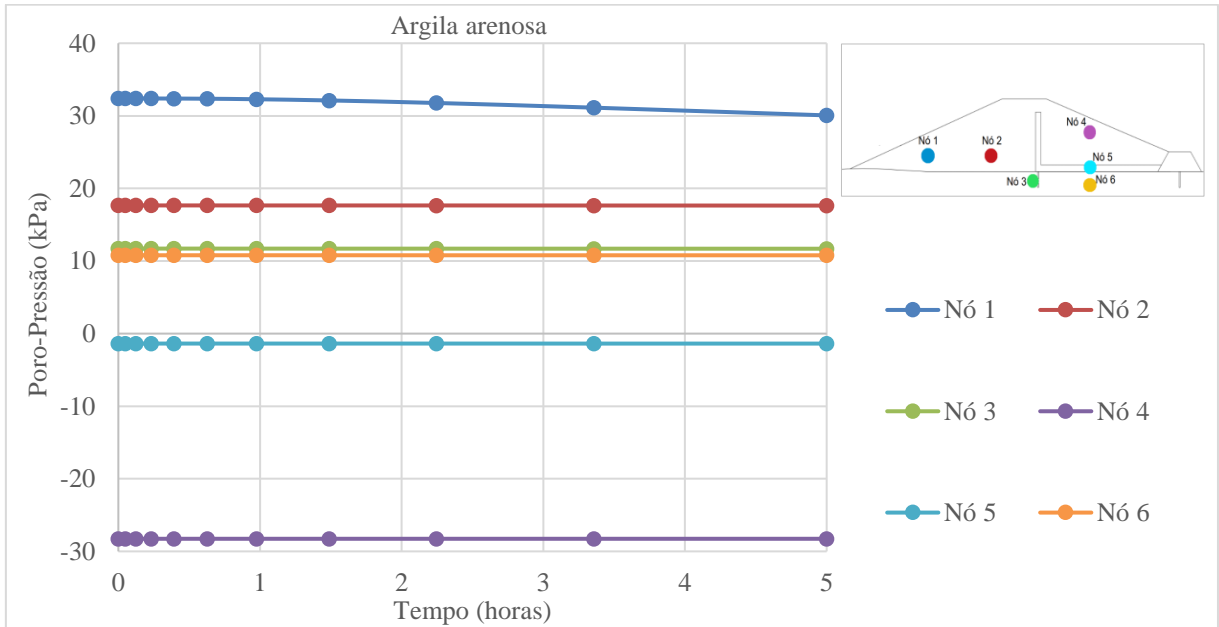
Figura 58 – Comportamento da poropressão considerando o solo silte argiloarenoso no decorrer de 5 dias na condição de rebaixamento do reservatório do nível máximo para o nível mínimo.



Fonte: Dos autores (2024).

Após essa queda, a poropressão se estabiliza à medida que um novo equilíbrio hidrostático é alcançado, com a água fluindo lentamente pelos vazios do solo.

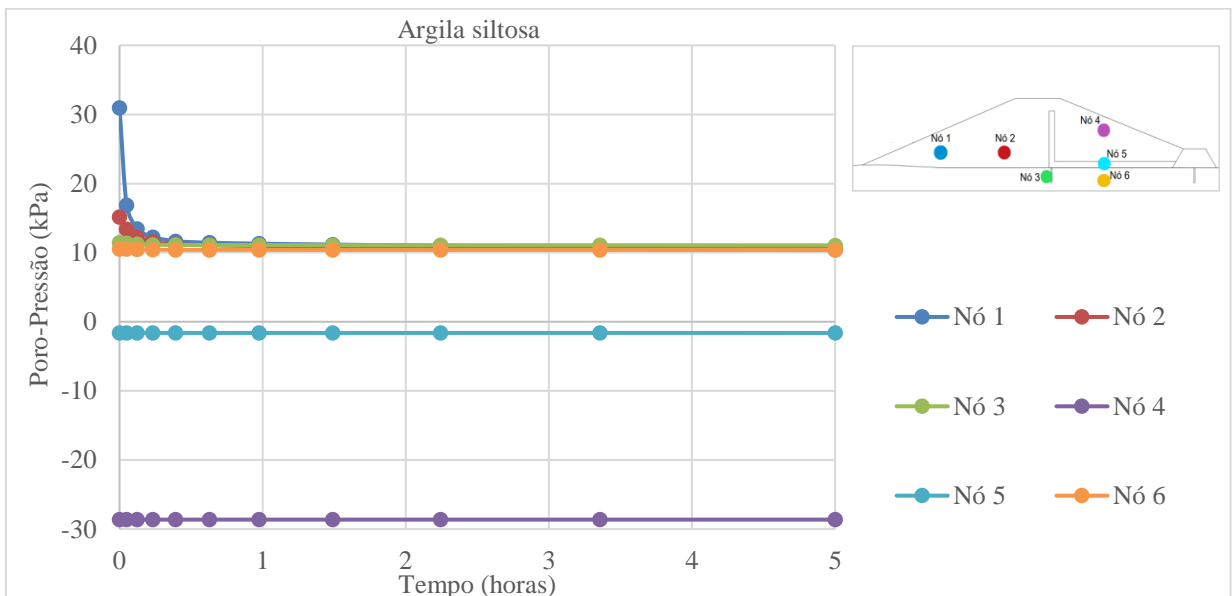
Figura 59 - Comportamento da poropressão considerando o solo argila arenosa na condição de rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo em uma duração de 5 horas.



Fonte: Dos autores (2024).

A resposta do material apresentada na Figura 59 é lenta em relação aos eventos que ocorrem em um intervalo de 5 horas, enquanto variações mais significativas são observadas em períodos mais prolongados.

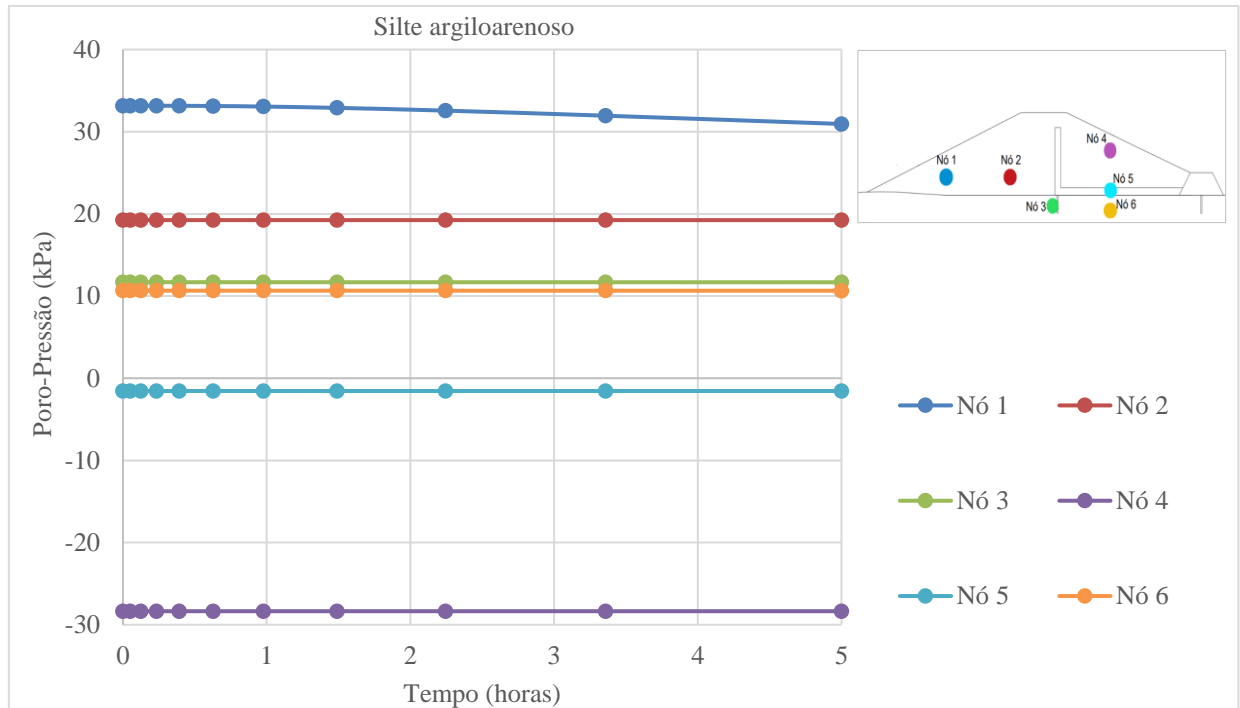
Figura 60 - Comportamento da poropressão considerando o solo argila siltosa na condição de rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo em uma duração de 5 horas.



Fonte: Dos autores (2024).

O solo de argila siltosa apresenta uma resposta ágil da poropressão quando submetido ao evento de esvaziamento do reservatório ao longo de um período de 5 horas, essa rápida adaptação é atribuída à sua condutividade hidráulica e às propriedades intrínsecas do material.

Figura 61 - Comportamento da poropressão considerando o solo silte argilarenoso na condição de rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo em uma duração de 5 horas.

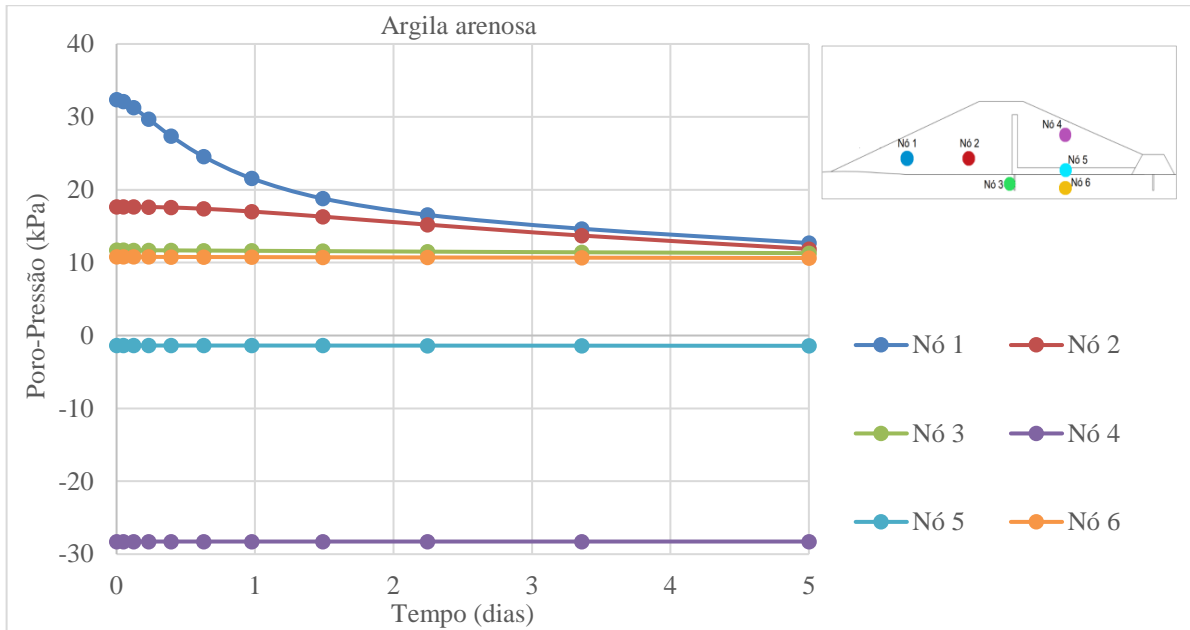


Fonte: Dos autores (2024).

No contexto da análise da poropressão no nó 1 da Figura 61, observa-se que a resposta do material é relativamente baixa em comparação às variações rápidas do reservatório. Essa resposta pode ser atribuída às propriedades específicas do material, que afetam sua condutividade hidráulica e, conseqüentemente, a dinâmica da poropressão.

De acordo com as Figuras 62, 63 e 64, o ponto de maior destaque foi identificado no material de Argila siltosa, onde a variação de poropressão apresentou-se mais acentuada em um curto intervalo de tempo durante todas as análises de rebaixamento. Em contrapartida, para os outros dois tipos de solo, a diminuição da poropressão ocorreu de maneira mais gradual, sem apresentar oscilações bruscas.

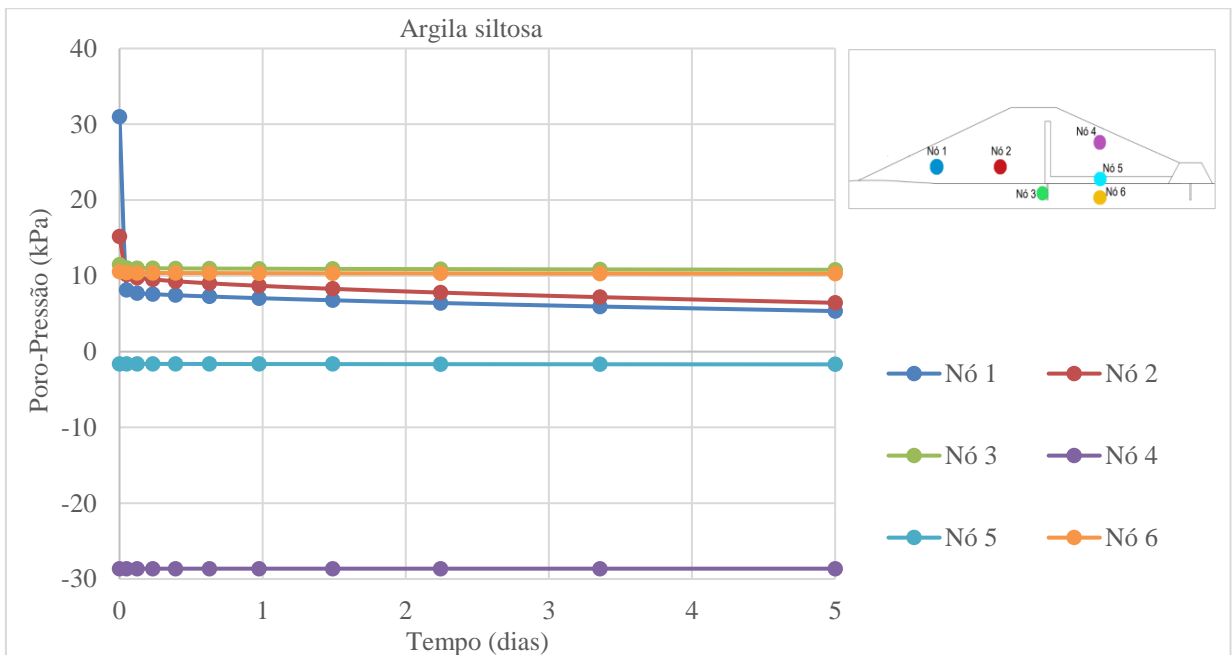
Figura 62 - Comportamento da poropressão considerando o solo argila arenosa na condição rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo em uma duração de 5 dias



Fonte: Dos autores (2024).

Devido às características do material e à sua condutividade hidráulica, a poropressão interna apresenta uma variação gradual ao longo do tempo. Esse processo não é instantâneo; ao contrário, ocorre de maneira contínua até que um valor de equilíbrio seja alcançado

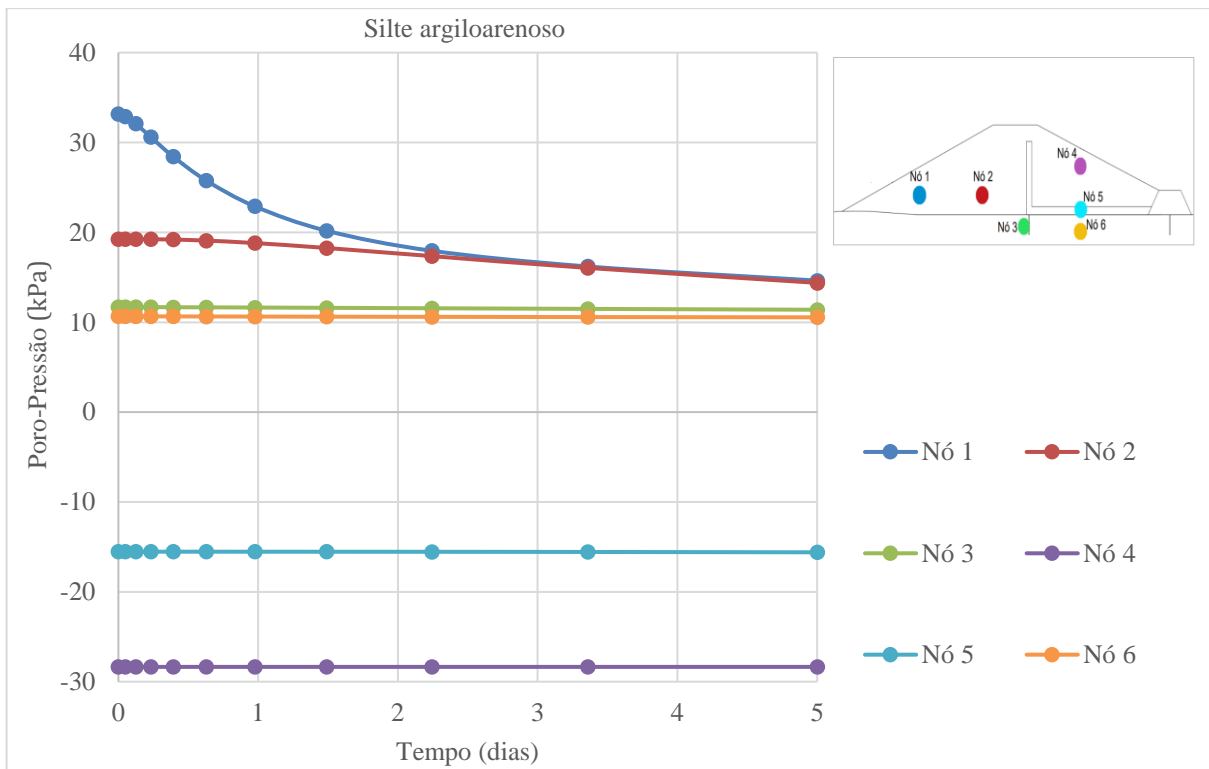
Figura 63 - Comportamento da poropressão considerando o solo argila siltosa na condição rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo em uma duração de 5 dias



Fonte: Dos autores (2024).

O solo de argila siltosa apresenta uma resposta rápida da poropressão nos períodos iniciais de um intervalo de 5 dias, refletindo sua capacidade de adaptação às mudanças nas condições hidráulicas. No entanto, essa resposta inicial rapidamente se estabiliza, mantendo-se constante ao longo do restante do período.

Figura 64 - Comportamento da poropressão considerando o solo silte argiloarenoso na condição rebaixamento total do reservatório a partir do nível máximo em uma duração de 5 dias.



Fonte: Dos autores (2024).

Segundo Novak *et al.*(2007), a comparação entre o método mais econômico, que emprega somente dreno de pé, e o mais tradicional, que incorpora componentes de drenagem interna, evidencia uma dualidade entre custo e segurança. O sistema de dreno de pé, apesar de ser economicamente benéfico, possui um fator de segurança que pode ser visto como insuficiente em circunstâncias de carga máxima ou condições climáticas desfavoráveis. Isso pode resultar em custos ocultos a longo prazo, como reparos e manutenção corretiva, além de potenciais riscos à segurança (Brasil, 2002).

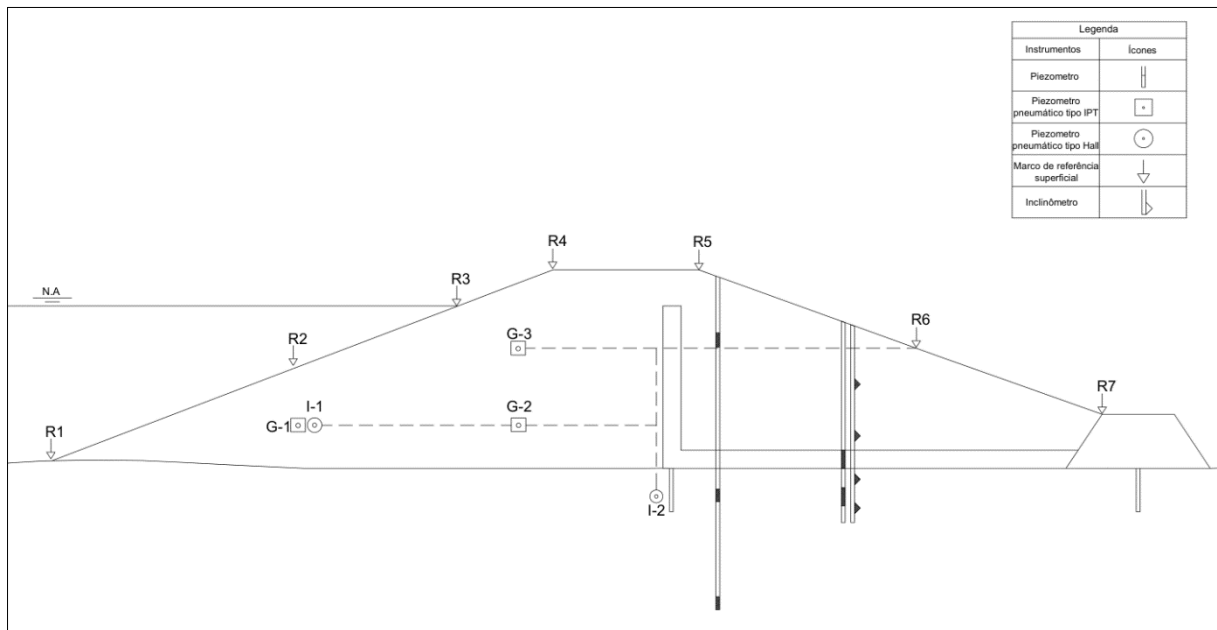
Em contrapartida, para Mendonça (2012), o modelo mais tradicional, que incorpora filtros e canais de drenagem, não apenas garante um alto grau de segurança, mas também reduz a demanda por futuras intervenções. Esta primeira despesa em segurança pode ser justificada pela diminuição do perigo de desastres e pela salvaguarda do investimento realizado na infraestrutura da barragem.

### 4.3 Considerações acerca da instrumentação

Para a implementação dos dispositivos de monitoramento dos parâmetros físicos do barramento, foram selecionados locais estratégicos onde a instalação de piezômetros e outros instrumentos é fundamental para a eficácia do sistema, esses locais incluem o corpo da barragem, a fundação e as áreas de drenagem.

Essa abordagem permite a medição da pressão da água interna, possibilitando a detecção precoce de quaisquer anomalias que possam comprometer a segurança da estrutura. Além disso, os dados obtidos apoiam a tomada de decisões relacionadas à operação e manutenção da barragem, com a existência de um sistema de monitoramento bem-posicionado, é possível obter medições mais precisas, identificar problemas em estágios iniciais e otimizar os processos de manutenção, garantindo assim a integridade e a segurança da barragem, (Leite et al. 2024). Sua representação é apresentada na Figura 65.

Figura 65 - Localização dos instrumentos utilizados.



Fonte: Dos autores (2024)

Como evidenciado pelos diagramas das Figuras 38, 39, 40 e 41, das páginas 81 e 82, os filtros desempenharam importância significativa ao coletar as águas que percolam pelo maciço e as conduzir para um ponto de descarga, evitando a saturação do solo e aumentos de pressão que possam comprometer a estabilidade da estrutura.

Quanto à eficiência desses filtros, é importante observar a inclinação da linha piezométrica na região do filtro. Além disto, a queda nos valores de poropressão e carga total à

medida que se aproxima do filtro indica que está interceptando o fluxo de água de forma eficaz. A realização de leituras piezométricas periódicas permite acompanhar a evolução do sistema de drenagem e detectar possíveis alterações no regime de fluxo.

Associado ao instrumento anterior, a utilização de dreno de pé, ao remover a água da zona crítica, como observado a partir das análises, contribuiu para reduzir a pressão interna no solo, aumentando a sua resistência ao cisalhamento e diminuindo o risco de ruptura. Isso significa que o sistema de drenagem foi projetado de forma correta e está cumprindo sua função, contribuindo para aumentar a vida útil da estrutura.

Após analisar os resultados de estudos piezométricos, ficou ainda mais claro, também, o papel crucial dos poços de alívio na segurança e estabilidade da barragem, diminuindo as pressões neutras no solo de fundação e no corpo da barragem, regulando o fluxo de água e reduzindo o perigo de erosão interna e instabilidade. Assim, ao diminuir as pressões neutras, os poços auxiliam no aumento da resistência do solo ao cisalhamento, o que torna a barragem mais segura.

Ao diminuir as pressões neutras, os poços reduzem a possibilidade de erosão interna, piping e outros tipos de falhas que podem colocar em risco a segurança da barragem. Além disso, os poços de alívio prolongam a vida útil da barragem ao regular o fluxo de água e diminuir o risco de erosão interna.

A instalação de inclinômetros e medidores de recalque em barragens envolve a análise de vários fatores técnicos e geológicos, que não estão diretamente ligados às análises conduzidas neste estudo. A sua adoção neste caso está ligada à sua relevância para o monitoramento do elemento. Ao considerar a implementação desses dispositivos, é necessário levar em conta outros fatores além dos que foram abordados aqui.

## 5 CONCLUSÃO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso Determinar a opção que oferece as condições de segurança mais apropriadas com base em critérios de estabilidade de taludes e poropressão entre variados arranjos para um barramento de irrigação. Os fatores de segurança e os níveis de controle obtidos mostraram-se adequados, conforme as análises realizadas para cada seção da barragem e para as diversas condições de carregamento consideradas. Para tal, foram empregados modelos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF), que possibilitaram a determinação das poropressões internas do maciço, a previsão de elevações na linha freática e a definição de níveis de controle para situações de atenção, alerta e emergência.

No que se refere à avaliação da estabilidade dos taludes durante a operação normal do reservatório, (percolação estável), embora esta não represente a situação de carregamento mais crítica, é um cenário que prevalece por um extenso período ao longo da vida útil da barragem. Essa condição pode, eventualmente, resultar na ruptura do maciço, em decorrência dos esforços induzidos pelo reservatório. Os resultados indicaram que o dique apresentou fatores de segurança elevados para a estabilidade do talude de montante, além de valores adequados para o talude de jusante, com um fator de segurança mínimo de 3,73. Este valor é superior ao critério de projeto e ao limite estabelecido pela ABNT NBR 13028:2024, definindo o FS de 1,5 em seu parâmetro de comparação mais rigoroso.

Adicionalmente, é relevante destacar que, na condição de carregamento associada ao rebaixamento rápido do reservatório, observa-se uma combinação complexa de tensões que caracteriza a condição crítica para o talude de montante. Esse comportamento foi consistente em todas as seções analisadas, especialmente quando comparado à condição de operação normal ou em situações sísmicas. Nesta condição, o fator de segurança mínimo registrado foi de 3,08, também superior ao valor exigido de 1,3.

A construção da barragem proporcionará significativos benefícios à economia do município de Goianésia do Pará, representando um diferencial importante para o cultivo da soja. As dimensões da barragem em estudo foram as seguintes: altura total de 5,5 metros, nível normal de 4,5 metros e nível máximo de 5 metros. Os taludes de montante e jusante apresentam inclinações semelhantes, com aproximadamente 2,5;1 (H:V). A projeção horizontal do talude de montante é de 13,9 metros, enquanto a do talude de jusante é de 14,18 metros, com uma crista central de 4,05 metros, totalizando uma extensão horizontal de 64,25 metros e uma largura total de 81,04 metros.

## 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros envolvendo estudos para concepção de um barramento de terra, indica-se:

- Realizar ensaios de campo e de laboratório no solo local para determinar suas características físicas e de percolação, assegurando que o projeto da barragem seja adequado às condições do solo.
- Testar diferentes geometrias de barramento para maximizar a eficiência da barragem, considerando fatores como estabilidade, volume de armazenamento e custos de construção.
- Realizar uma avaliação detalhada do impacto ambiental da barragem, com foco na fauna, flora e recursos hídricos.
- Desenvolver um modelo de gestão integrada que considere a operação da barragem, o sistema de irrigação e as demandas agrícolas.
- Realizar estudos de caso de barragens semelhantes em outras regiões, identificando lições aprendidas e melhores práticas que possam ser aplicadas ao projeto em questão.
- Elaborar um mapa detalhado das legislações e documentos necessários para empreendedores que buscam implementar este tipo de empreendimento, facilitando o processo de licenciamento e garantindo a conformidade legal.
- Estudo hidrológico para o dimensionamento do sistema de vertedouro.

## REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 11682:2009 - **Estabilidade de encostas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

ABNT. NBR 13028:2024 - **Mineração** - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água – Requisitos. 4. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.

ABREU, J. R. **Dimensionamento e acompanhamento executivo de uma barragem de terra para irrigação** – um estudo de caso. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

AFFONSO, Hugo Manoel Marcato. **Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.abge.org.br/img/biblioteca/24\\_Affonso\\_2005\\_.pdf](https://www.abge.org.br/img/biblioteca/24_Affonso_2005_.pdf)>. Acesso em: 8 de julho de 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Diretrizes Para Elaboração de Projetos de Barragens**. - Brasília: ANA, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Resolução ANM n° 95, de 7 de fevereiro de 2022. **Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 fev. 2022.

ANA. **Manual de estudos de disponibilidade hídrica para aproveitamentos hidrelétricos**: Manual do usuário. Agência Nacional de Águas, Brasília: ANA, SOF, 2010. 71p.

ANA. **Manual de políticas e práticas de segurança de barragens**: manual para a ANA e entidades fiscalizadoras. Agência Nacional de Águas, Brasília: 2014.

ASCE. **Design and construction of sanitary and storm sewers**. Manuals and Reports of Engineering Practice N° 37. New York. 1969.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. Câmara Setorial de Irrigação. **Atualização de área irrigada no Brasil**, Abimaq, 2019.

BISHOP, A. W. "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes." *Geotechnique*, v. 5, n. 1, p. 7-17, 1955.

BRASIL. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. 2. ed. Brasília: ANA, 2021. 130p. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/a874e62f27544c6a986da1702a911c6b>. Acesso em: 10 de novembro de 2024.

BRASIL. **LEI N° 14.066**. 2020. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/114066.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114066.htm)>. Acesso em: 17 de dezembro de 2024.

BRASIL. **LEI Nº L12334**. 2010. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm)>. Acesso em: 17 de dezembro de 2024.

BRASIL. **LEI Nº L12334**. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm)>. Acesso em: 17 de dezembro de 2024.

BRASIL. Ministério de Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília, 2002.

BRASIL. **Aproveitamento hidrelétrico de Belo Monte**. Relatório de Impacto Ambiental. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://philip.inpa.gov.br/publ\\_livres/dossie/bm/DocsOf/RIMA-09/Rima\\_AHE%20Belo%20Monte.pdf](https://philip.inpa.gov.br/publ_livres/dossie/bm/DocsOf/RIMA-09/Rima_AHE%20Belo%20Monte.pdf)>. acesso em 15 de janeiro de 2025.

BUAINAIN, A. M.; SOUZA FILHO, H. M. **Política agrícola no Brasil: evolução e principais instrumentos**. Gestão agroindustrial, v. 2, 2001.

BURKE, M.; JORDE, K.; BUFFINGTON, J. M. **Application of a hierarchical framework for assessing environmental impacts of dam operation: Changes in streamflow, bed mobility and recruitment of riparian trees in a western North American river**. Journal of Environmental Management, 2009. 90, p. S224S236.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

Carvalho, D. F.; Silva, L. D. B., 2006. **Hidrologia**. UFRRJ, Rio de Janeiro.

CARVALHO, D., 2011, **Barragens: uma introdução para graduandos**. Disponível em: <[http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem\\_terra\\_1.pdf](http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem_terra_1.pdf)> Acesso em: 20 de dezembro de 2024.

CARVALHO, J. A. **Dimensionamento de pequenas barragens para irrigação**. Lavras: Ed. UFLA, 2008.

CARVALHO, R. G. **As bacias hidrográficas enquanto unidades de planejamento e zoneamento ambiental no Brasil**. Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente, n. 36, volume especial, p. 26-43, 2014.

CARVALHO, Thiago M. **Técnicas de medição de vazão por métodos convencionais e não convencionais**: Revista Brasileira de Geografia Física, v.1 n.1 p73-84, 2008.

CASAGRANDE, A & HIRSCHFELD, R.C. (1960), “**Stress-deformation and Strength Characteristics of a Clay Compacted to a Constant Dry Unit Weight**”. Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, Boulder.

CHIOSSI, Nivaldo. **Geologia de Engenharia**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 421 p.

CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W. (1988) **Applied hydrology**. New York. McGraw- Hill, 570 p.

CHOWDHURY, R. N. **Slope Analysis**. Amsterdam: Elsevier, 1978. 423 p.

CIGB. **As Barragens e a Água do Mundo**: um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo. Tradução de Texto Faz Comunicação S/S Ltda. Paraná: NPR, 2008.

CINTRA, I. H. A. et al. **A pesca no reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, Amazônia, Brasil**. Actapesca, v. 1, n. 1, p. 57-78, 2013.

COMISSÃO DE AUSCULTAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS. **Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil**. II SIMPOSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS, 1996, Belo Horizonte. Volume 1. p.1-3

COOPER, Miguel. **Arquitetura e propriedades físicas do solo**. USP. 2016

COSTA, Jezabel Machado. **O uso de jogos no ensino de Frações**: uma estratégia para melhorar a participação dos alunos. 41f. Monografia (Especialização) – Curso de Especialização em Ensino de Matemática no Ensino Médio: Matemática na Prática, Universidade Federal do Pampa, Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2023.

COSTA, Walter Duarte; **Geologia de barragens**. - São Paulo: Oficina de textos, 2012.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras, Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto**. Oficina de Textos, São Paulo, 2004.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DOS, C. Município brasileiro do estado do Pará. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Goian%C3%A9sia\\_do\\_Par%C3%A1](https://pt.wikipedia.org/wiki/Goian%C3%A9sia_do_Par%C3%A1)>. Acesso em: 4 de dezembro de 2024.

ELETRONORTE (BRASIL). **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas S. A., 2003.

ELETRONORTE. **Usina Hidrelétrica Tucuruí**: memória técnica. Brasília, 1989.

ERSOY, B.; HASELSTEINER, R. (2018). **The seepage analysis of the embankment dams of flood retention basin in Poland**. In: Proceedings do 26th International Commission on Large Dams Congress, Austria. pp. 1635-1646.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FANG, Xing & THOMPSON, David & CLEVELAND, Theodore & PRADHAN, Pratistha. (2007). **Variations of Time of Concentration Estimates Using NRCS Velocity Method**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-asce - J IRRIG DRAIN ENG-ASCE. 133.

FELL, A.; MACGREGOR, P. J.; WANG, H. F.; CHENG, Y. R. **Geotechnical engineering for dams**. 2015.

FELLENIOUS, W., “**Calculation of the Stability of Earth Dams**.”, 2 nd International Congress on Large Darns, International Commission on Large Dams, Washington, DC, 445-459, 1936.

FLIZIKOWSKI, L. C.; PELEGRINO, E. C. F.; MAIA, A. G. **Análise comparativa entre equações de tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Arroio dos Pereiras**. In: Semana de estudos da engenharia ambiental, 6, 2008. Irati.

FONSECA, Alessandra Da Rocha. (2003) **Auscultação por Instrumentação de Barragens de Terra e Enrocamento para a Geração de Energia Elétrica** - Estudo de Caso das Barragens da UHE São Simão. Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia Civil com ênfase em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, 158 p.

FREIRE, L.; LIMA, J.; SILVA, E. **Belo Monte: fatos e impactos envolvidos na implantação da usina hidrelétrica na região Amazônica Paraense**. Sociedade & natureza, v. 30, n. 3, p. 18–41, 1 jan. 2019.

GAIOTO, N. (2003). **Introdução ao Projeto de Barragens de Terra e Enrocamento**. EESC – USP. São Carlos, SP. 126p.

GEORIO. **Manual Técnico de Encostas**. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro. 2ª Edição, Rio de Janeiro, 2000.

GHOSTUDIO 2D. Disponível em: <<https://www.seequent.com/pt-br/produtos-e-solucoes/geostudio-2d/>>. Acesso em: 27 agosto de 2024.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Estabilidade de taludes: 2ª edição com exercícios resolvidos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 191 p.

GUSMÃO FILHO, J. **Desempenho de Obras Geotécnicas**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Goianésia do Pará**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/goianesia-do-para/panorama>>. Acesso em: 4 de dezembro de 2024.

JANBU, N. "**Stability analysis of slope**." In: Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes. London: Institution of Civil Engineers, 1973.

JOPPERT JR, Ivan. **Fundações e Contensões de Edifícios** – São Paulo: Pini ISBN 978-85-7266-177-5, 2007. 221p.

Laboratório de Geotecnia - UFBA. Disponível em: <<https://geotecnia.ufba.br/?vai=Extens%E3o/Instrumenta%E7%E3o/Inclinometro>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2024.

LEÃO, F.R. **Dimensionamento de uma pequena barragem de terra para produção de energia hidrelétrica e irrigação em uma propriedade rural**. 2012. 110f. Monografia para obtenção do título de Bacharel – Engenharia agrícola, Universidade Estadual de Goiás, Goiás, 2012.

LEITE, Hosana Emilia Sarmiento Costa; CUSTO, Lícia Mouta da Costa; GUIMARÃES, Leonardo José Nascimento; FERREIRA, Silvio Romero de Melo; SANTOS JÚNIOR, Olavo Francisco. **Aspectos sobre Instrumentação e Monitoramento de Barragens**. XX Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica. 2024.

LENGLER C.; STAMM, C. **Bacia hidrográfica como unidade de planejamento**: uma questão conceitual ou legal. Informe Gepec, Toledo, v. 16, n° 1, p. 60-75, 2012.

LUIZ, J.; FERREIRA, A. **Classificação das Barragens**. PUC Goiás. Disponível em: <[https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/puc\\_barragens\\_02\\_classificacao\\_2013-2.pdf](https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/puc_barragens_02_classificacao_2013-2.pdf)>. Acesso em: 17 de dezembro de 2024.

MACHADO, William Gladstone de Freitas. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-31032008154124/publico/DissertacaoWillianGladstoneMachado.pdf>>. Acesso em: 17 de outubro de 2024.

MARANGON, M. **Barragens de terra e enrocamento. Apostila da disciplina Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**. Juiz de Fora: UFJF, 2004.

MASSAD, Façal. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2 ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2010.

MENDONÇA, M. B. de, 2012, “**Notas de aula da disciplina Obras de Terra**”. UFRJ/Escola Politécnica, Rio de Janeiro

MOHSEIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 841p. 1986.

MOLITERNO, A. **Caderno de estruturas em alvenaria e concreto simples**, São Paulo: Edgard Blücher, 1995.

MORGENSTERN, N.; PRICE, V. E. "The analysis of the stability of general slip surfaces." *Geotechnique*, v. 15, n. 1, p. 79-93, 1965.

NOVAK P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., Narayanan. **Hydraulic Structures**. 4 ed., Taylor & Francis, Oxon, 2007.

PAVLOVIC, S. B., and MOGLEN, G. E. (2008). **Discretization issues in travel time calculation**. *Journal of Hydrologic Engineering* 13(2), pp. 71–79.

PIMENTA, Anderson Augusto Guerin; REZENDE, Lorena. **Análise de Estabilidade de Taludes: Métodos Determinísticos e Probabilísticos**. [S.l.]: Novas Edições Acadêmicas, 2018.

PINTO, A.C.C. **Contribuições para o estudo de descomissionamento de barragens**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

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

POFF, N. L.; HART, D. D. **How Dams Vary and Why It Matters for the Emerging Science of Dam Removal**. *BioScience*, August, 2002. Vol. 52, n° 8, p. 659-668.

RIBEIRO, Charles Roger. **Análise de Estabilidade Global de Barragens de Terra e Enrocamento Estudo de Caso: PCH Xavantina-SC**. Trabalho de Conclusão de Curso.

RICHTER, B.D., Postel, S., Revenga, C., Scudder, T., Lehner, B., Churchill, A., Chow, M. 2010. **Lost in development's shadow: The downstream human consequences of dams**. *Water Alternatives* 3(2): 14-42.

SANDRONI, S. "**Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento**". Curso de Mestrado da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.

SANTOS, L. C.; **Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2019.

SANTOS, S. et al. **Coefficient of permeability for fluid in saturated means (Ks): estimate by flow columns and variable matrix potential**. *AMBIÊNCIA*, v. 12, n. 2, p. 599–613, 2016.

SCHREIBER, G. P., **Usinas Hidrelétricas**, ENGEVIX S.A., ed. Edgard Blücher Ltda., Brasil, 1977.

SETTI, Arnaldo Augusto; ANEEL; ANA. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos... 2. ed.** [S.l.]: ANEEL: ANA, 2001. 327 p., il. Disponível em: <https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/14274>. Acesso em: 17 de dezembro de 2024.

SILVA, Ana. **Os Impactos Ambientais e Sociais da construção da Barragem de Oiticica – Jucurutu/RN**. Disponível em: <https://anais.eneds.org.br/index.php/eneds/article/download/481/439>. Acesso em: 29 de agosto de 2024.

SILVEIRA, J. F. (2006). **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos.

SOARES, M. et al. [s.l: s.n.]. Disponível em: [https://www.atenas.edu.br/uniatenas/assets/files/spic/monography/GUIA\\_PARA\\_DIMENSIONAMENTO\\_DE\\_BARRAGENS\\_DE\\_TERRA\\_DE\\_PEQUENO\\_PORTE.pdf](https://www.atenas.edu.br/uniatenas/assets/files/spic/monography/GUIA_PARA_DIMENSIONAMENTO_DE_BARRAGENS_DE_TERRA_DE_PEQUENO_PORTE.pdf). Acesso em: 17 de dezembro de 2024.

SOUZA, Z. de, FUCHS, R. D., SANTOS, A. H. M. (1983). **Centrais Hidro e Termelétricas**. São Paulo: E. Blücher: Centrais Elétricas Brasileiras S/A - ELETROBRÁS: Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

SPENCER, E. "A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Interslice Forces." *Geotechnique*, v. 17, n. 1, p. 11-26, 1967.

STEVAUX, J. C.; MARTINS, D. P.; MEURER, M. **Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil**. *Geomorphology*, Volume 113, Issues 3–4, 15 December 2009, p. 230238.

TEIXEIRA, B. C.; MOURA, L. A.; et al. **Estimativa da Umidade Volumétrica Saturada de Solos Brasileiros para Manejo Sustentável de Água na Agricultura**. 2021.

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de Taludes**: Avaliação dos Métodos de Equilíbrio Limite Aplicados a uma Encosta Coluvionar e Residual da Serra do Mar Paranaense, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia**: Ciência e Aplicação, 3<sup>a</sup> ed. Porto Alegre, 2004.

TUCCI, Carlos E. M. 1993 **Fundamentos do escoamento não-permanente**. In TUCCI, Carlos E. M. (org). *Hidrologia: Ciência e aplicação*. Porto Alegre. Ed. da Universidade UFRGS.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **instrumentation of Embankment Dams and Levees. Engineer Manual**. Washington, 2004.

V. M. F. ALMEIDA-VAL; CHIPARI-GOMES, A. R.; LOPES, N. P. **Metabolic and Physiological adjustments to low oxygen and high temperature in fishes of the Amazon**. ResearchGate, p. 443–500, 2006.

VOROSMARTY, C. J.; SHARMA, K. P.; FEKETE, B. M.; COPELAND, A. H.; HOLDEN, J.; MARBLE J.; LOUGH J. A. **The Storage and Aging of Continental Runoff in Large Reservoir Systems of the World**. *Ambio*, Vol. 26, n<sup>o</sup> 4, p. 210219, June, 1997.