



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANTONIO HENRIQUE AZEVEDO CARNEIRO**

**AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS CRÍTICOS DE UMA BARRAGEM  
DE TERRA: UM ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM JABURU I**

**FORTALEZA**

**2022**

ANTONIO HENRIQUE AZEVEDO CARNEIRO

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS CRÍTICOS DE UMA BARRAGEM DE  
TERRA: UM ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM JABURU I

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

Orientador: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.

FORTALEZA

2022

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

---

- C287a Carneiro, Antonio Henrique Azevedo.  
Avaliação dos Níveis Piezométricos Críticos de uma Barragem de Terra : um Estudo de Caso da Barragem Jaburu I / Antonio Henrique Azevedo Carneiro. – 2022.  
76 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.
1. Piezômetros. 2. Estabilidade de taludes. 3. Colmatação. 4. Filtro interno. 5. Modelagem numérica. I.  
Título.

CDD 620

---

ANTONIO HENRIQUE AZEVEDO CARNEIRO

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS CRÍTICOS DE UMA BARRAGEM DE  
TERRA: UM ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM JABURU I

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

Orientador: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.

Aprovado em: 26/01/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

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

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Mariana Vela Silveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Juarina e Hugo.

Ao meu irmão, Victor.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Juarina e Hugo, por todo o esforço que fizeram para me dar uma boa educação. Sem vocês, nada disso seria possível.

Ao meu irmão, Victor, por todo o apoio que me deu, não deixando que eu seguisse caminhos errados.

À minha namorada, Ilana, pelo companheirismo e por toda a força e incentivo que tem me dado.

Ao meu padastro, Francinaudo, e à minha madrasta, Shirliane, pelo apoio. Vocês são como segundo pai e mãe para mim.

Ao meu orientador, Professor Rosiel, pela ótima orientação ao longo deste trabalho, foi muito bom trabalhar com o senhor. Se todos os professores fossem dedicados como você, essa universidade seria muito melhor.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET), por todas as experiências vividas e pela oportunidade de conhecer tanta gente maravilhosa. Os anos que passei no PET foram os melhores da minha graduação. *Uma vez petiano sempre petiano!*

Aos meus companheiros de graduação, Jefferson, Letícia, Ivana e Karyna, pela parceria ao longo destes 5 anos, nos trabalhos em grupo, nos aperreios pré prova, nas atividades do PET, nas resenhas, em tudo. Foi sofrido, mas a gente conseguiu meu povo!!!

Aos meus amigos petianos, Jonatas, Gustavo, Larissa, Pedro Ygor, Firmeza, Joelia, Adriel, Danone, Carlos e todos os demais, com quem pude compartilhar muitos momentos juntos. Vocês contribuíram para que essa jornada fosse muito mais fácil de lidar.

Aos membros da banca avaliadora, Professor Chagas e Professora Mariana, pela disponibilidade de participar da defesa desta monografia.

Por último, mas não menos importante, o agradecimento final irá para mim mesmo, por ter perseverado quando as coisas estavam difíceis e por ter me dedicado tanto para chegar até aqui. *É só o começo!*

## RESUMO

Barragens são estruturas que tem como principal finalidade a reservação de água ou o acúmulo de rejeitos e detritos. Entretanto, por mais que estas sejam projetadas para beneficiar a população, verifica-se o oposto, em alguns casos, como em situações de ruptura. Neste contexto, tem-se que o fluxo descontrolado de água através da barragem pode ser um dos fatores que pode potencializar uma possível ruptura, por meio do deslizamento do talude de jusante do maciço. Pensando nisto, criaram-se diversos tipos de instrumentos, como os piezômetros, que tornaram possível um monitoramento do fluxo da água pela barragem. Aliado a isto, criaram-se, também, alguns tipos de filtro interno, com o intuito de controlar o fluxo de água no interior do maciço, contudo, estes podem estar sujeitos a um processo de colmatção ao longo de sua vida útil, tornando-se ineficientes, apresentando riscos para a estrutura. Por conta disto, estudos de estabilidade se tornam mais necessários para garantir a preservação da obra, entretanto, estudos frequentes podem acarretar em maiores custos operacionais para os órgãos gestores. Pensando nisto, o presente estudo propõe a metodologia dos “níveis piezométricos críticos”, na qual utiliza-se das leituras dos piezômetros instalados numa barragem de terra e de modelagens numéricas para determinar às poropressões críticas da obra, que representam um coeficiente de segurança igual ao mínimo valor recomendável, com uma maior velocidade e com menos custos operacionais, utilizando-se, como estudo de caso, a Barragem Jaburu I. Para isto, realizou-se modelagens computacionais da seção máxima da barragem, por meio do software GeoStudio 2021.4, calibrando o modelo a partir das leituras reais dos piezômetros da Barragem Jaburu I, cedidas pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, de forma que o modelo representasse resultados condizentes com os verificados nos piezômetros. Com isto, realizou-se estudos de estabilidade do talude de jusante para diferentes situações de colmatção do filtro interno da barragem, obtendo os coeficientes de segurança para cada cenário. Por meio disto, foi possível realizar a correlação entre os fatores de segurança da obra e as poropressões, obtendo equações que descrevem este comportamento, estabelecendo, assim, os níveis piezométricos críticos da barragem. A partir disto, realizou-se uma retroanálise da estabilidade da barragem, obtendo, no pior cenário, um coeficiente de segurança de 1,36, abaixo do mínimo valor recomendável para a situação de estudo, o que também foi constatado por Souza *et al.* (2005). Assim, verificou-se que a metodologia dos níveis piezométricos críticos tende a obter resultados satisfatórios.

**Palavras-chave:** piezômetros; estabilidade de taludes; colmatção; filtro interno; modelagem numérica.

## ABSTRACT

Dams are structures whose main purpose is the storage of water or accumulation of tailings and debris. However, as much as these structures are designed to benefit the population, the opposite occurs, in some cases, such as in failure situations. In this context, the uncontrolled water flow through the dam can be one of factors that can potentiate a possible failure, through the sliding of slope downstream of massif. With this in mind, different types of instruments were created, such as piezometers, which made it possible monitor the water flow through the dam. Allied to this, some types of internal filters were also created, in order to control the water flow inside the massif, however, these filters can be subject to a clogging process throughout their useful life, becoming inefficient, presenting risks to the structure. Because of this, stability studies become more necessary to ensure the dam's preservation, however, frequent studies can lead to higher operational costs to manager agencies. With this in mind, the present study proposes a methodology of "critical piezometers levels", in which the readings of piezometers installed in an earth dam and numerical modeling are used to determine the critical porepressures of the dam, which represent a coefficient of safety equal to the minimum recommended value, with a higher speed and with less operating costs, using Jaburu I Dam as a case study. For this, computational modeling of the dam's maximum section was carried out, using GeoStudio 2021.4 software, calibrating the model from the real readings of the piezometers of Jaburu I Dam, between 1999 and 2013, provided by Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, so that the model represents consistent results with those verified in the piezometers. With this, stability studies of the downstream slope were carried out for different situations of dam's internal filter clogging, obtaining the coefficient of safety of the dam for each scenario. Through this, it was possible to perform the correlation between the dam's factors of safety and the porepressures, obtaining equations that describe this behavior, thus establishing the dam's critical piezometers levels. Based on this, a retro-analysis of the dam's stability was carried out, obtaining, in the worst scenario, a factor of safety of 1.36, below the minimum recommended value for the situation under study, which was also observed by Souza *et al.* (2005). Thus, it was found that the methodology of critical piezometric levels tends to obtain satisfactory results.

**Keywords:** piezometers; slope stability; clogging; internal drain; numerical modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barragem de Cedro em Quixadá - CE .....	17
Figura 2 - Tipos de Barragem.....	18
Figura 3 - Seção típica de uma barragem de terra homogênea.....	19
Figura 4 - Dentes na fundação de uma barragem de gravidade.....	19
Figura 5 - Represa Hoover.....	20
Figura 6 - Barragem lateral direita de Itaipu .....	21
Figura 7 - Modelo de um piezômetro de tubo aberto .....	23
Figura 8 - Modelo de um piezômetro hidráulico .....	24
Figura 9 - Modelo de um piezômetro pneumático .....	25
Figura 10 - Modelo de um piezômetro de corda vibrante .....	27
Figura 11 – Ponto diferencial dentro do maciço de solo .....	31
Figura 12 – Modelo de uma barragem com filtro horizontal .....	34
Figura 13 – Modelo de uma barragem com filtro completo.....	34
Figura 14 – Modelo de um filtro com inclinação para montante .....	35
Figura 15 – Modelo de um filtro com inclinação para jusante.....	35
Figura 16 – Modelo de um filtro com inclinação “mista”.....	36
Figura 17 – Representação das tensões atuantes em um talude genérico.....	38
Figura 18 - Seção tipo da Barragem Jaburu I .....	43
Figura 19 - Ressurgência no talude de jusante .....	44
Figura 20 - Dreno de pé da barragem.....	45
Figura 21 – Detalhe de um piezômetro da barragem.....	46
Figura 22 – Modelo computacional da Barragem Jaburu I .....	47
Figura 23 – Modelo da Barragem Jaburu I discretizado por malhas do MEF.....	47
Figura 24 – Localização dos piezômetros utilizados.....	48
Figura 25 – Estabilidade para o filtro em sua configuração original (k/1).....	53
Figura 26 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 5 vezes (k/5) .....	53
Figura 27 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 10 vezes (k/10) .....	54
Figura 28 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 25 vezes (k/25) .....	54
Figura 29 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 50 vezes (k/50) .....	54
Figura 30 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 100 vezes (k/100) ...	55
Figura 31 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 200 vezes (k/200) ...	55
Figura 32 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 300 vezes (k/300) ...	55

Figura 33 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 400 vezes ( $k/400$ ) ...	56
Figura 34 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 500 vezes ( $k/500$ ) ...	56
Figura 35 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 1000 vezes ( $k/1000$ )	56
Figura 36 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 1500 vezes ( $k/1500$ )	57
Figura 37 – Correlação entre o fator de segurança e as poropressões no piezômetro PZ-23.1.3 .....	58
Figura 38 – Correlação entre o fator de segurança e as poropressões no piezômetro PZ-23.2.3 .....	59
Figura 39 – Correlação entre o fator de segurança e as poropressões no piezômetro PZ-23.3.3 .....	59
Figura 40 – Níveis piezométricos críticos da Barragem Jaburu I.....	60

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores típicos de coeficiente de permeabilidade dos solos .....	29
Quadro 2 - Coeficiente de permeabilidade para solos lateríticos segundo à literatura.....	30
Quadro 3 – Principais fatores que potencializam a instabilidade dos taludes .....	39
Quadro 4 – Métodos de análise de estabilidade de taludes .....	40
Quadro 5 – Hipóteses de análise da estabilidade de barragens .....	41
Quadro 6 – Coeficientes de segurança para estabilidade de encostas segundo a NBR 11682.	41
Quadro 7 - Ficha técnica da Barragem Jaburu I .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no estudo de fluxo da Barragem Jaburu I.....	49
Tabela 2 – Parâmetros utilizados no estudo de estabilidade da Barragem Jaburu I.....	50
Tabela 3 - Coeficientes de permeabilidade utilizados para a verificação da colmatação do sistema de drenagem interno da Barragem Jaburu I.....	51
Tabela 4 – Poropressões para um nível d’água próximo à cota máxima do reservatório .....	52
Tabela 5 – Poropressões e coeficientes de segurança para cada cenário de colmatação do filtro .....	58
Tabela 6 – Coeficientes de segurança da barragem Jaburu I.....	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Considerações iniciais .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação e problema de pesquisa .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>14</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>14</b>
<i>1.4.1</i>	<i>Geral.....</i>	<i>14</i>
<i>1.4.2</i>	<i>Específicos .....</i>	<i>14</i>
<b>1.5</b>	<b>Estrutura do trabalho .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Barragens .....</b>	<b>16</b>
<i>2.1.1</i>	<i>Contextualização .....</i>	<i>16</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Tipos de barragens existentes .....</i>	<i>17</i>
<i>2.1.2.1</i>	<i>Barragens de Terra .....</i>	<i>18</i>
<i>2.1.2.2</i>	<i>Barragens de Concreto .....</i>	<i>19</i>
<b>2.2</b>	<b>Instrumentação de Barragens .....</b>	<b>21</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Piezômetros.....</i>	<i>22</i>
<i>2.2.1.1</i>	<i>Piezômetros de Tubo Aberto .....</i>	<i>22</i>
<i>2.2.1.2</i>	<i>Piezômetros Hidráulicos .....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.1.3</i>	<i>Piezômetros Pneumáticos.....</i>	<i>25</i>
<i>2.2.1.4</i>	<i>Piezômetros de Corda Vibrante .....</i>	<i>26</i>
<b>2.3</b>	<b>Fluxo de Água .....</b>	<b>28</b>
<i>2.3.1</i>	<i>Permeabilidade .....</i>	<i>28</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Percolação.....</i>	<i>30</i>
<b>2.4</b>	<b>Sistemas de drenagem interno.....</b>	<b>32</b>
<i>2.4.1</i>	<i>Tipos de filtro.....</i>	<i>33</i>
<i>2.4.1.1</i>	<i>Filtro Horizontal .....</i>	<i>33</i>
<i>2.4.1.2</i>	<i>Filtro Completo (Vertical e Horizontal) .....</i>	<i>34</i>
<i>2.4.1.3</i>	<i>Filtro Inclinado .....</i>	<i>34</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Colmatação dos filtros.....</i>	<i>36</i>
<b>2.5</b>	<b>Estabilidade de taludes .....</b>	<b>36</b>
<i>2.5.1</i>	<i>Causas Gerais de Escorregamento .....</i>	<i>37</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Métodos de Análise.....</i>	<i>39</i>

2.5.3	<i>Hipóteses de Análise e Coeficientes de Segurança</i> .....	40
3	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	42
3.1	<b>Barragem Jaburu I</b> .....	42
3.1.1	<i>Generalidades</i> .....	42
3.1.2	<i>Anomalias na Barragem Jaburu I</i> .....	44
3.2	<b>Dados de instrumentação da barragem</b> .....	45
3.3	<b>Modelagem computacional da barragem</b> .....	46
3.4	<b>Parâmetros Geotécnicos</b> .....	48
3.4.1	<i>Processo de calibração do modelo</i> .....	48
3.4.2	<i>Parâmetros utilizados para o estudo de fluxo</i> .....	49
3.4.3	<i>Parâmetros utilizados para o estudo de estabilidade</i> .....	49
3.5	<b>Colmatação do sistema de drenagem interno</b> .....	50
3.6	<b>Determinação dos níveis piezométricos críticos</b> .....	51
3.7	<b>Retroanálise da estabilidade da barragem</b> .....	52
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	53
4.1	<b>Estudo da influência da colmatação do sistema de drenagem interno da barragem na estabilidade de taludes</b> .....	53
4.2	<b>Níveis piezométricos críticos da barragem</b> .....	57
4.3	<b>Verificação da estabilidade da barragem a partir dos dados históricos</b> .....	60
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	62
5.1	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	62
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	64
	<b>ANEXO A – DADOS DOS PIEZÔMETROS UTILIZADOS</b> .....	68

# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como intuito proporcionar ao leitor uma contextualização acerca do tema investigado, apresentando o assunto de forma delimitada, além de expor o problema de pesquisa, os objetivos e a justificativa de escolha do tema, visando, também, explicitar, ao final do tópico, a forma de estruturação do trabalho.

## 1.1 Considerações iniciais

Barragens são estruturas, que podem ser construídas de terra ou de concreto, que tem como sua principal finalidade a reservação de água ou o acúmulo de rejeitos e detritos. O uso destas estruturas proporciona diversos benefícios para à população, na forma de abastecimento de água, agricultura, recreação, geração de energia elétrica, dentre outros.

Entretanto, apesar dos diversos benefícios, a construção de barragens pode ocasionar em impactos negativos, tanto para a fauna e flora local quanto para a população, como em casos de ruptura de barragens, tendo como exemplo o rompimento da barragem do Córrego do Feijão, no município de Brumadinho – MG, no qual ocasionou a morte de, aproximadamente, 270 pessoas (FRANCO, 2020).

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021) define segurança de barragens como uma condição que tem como base manter sua integridade estrutural e operacional, de forma a minimizar acidentes e incidentes, de forma que cumpram seu objetivo, buscando, também, a preservação da vida, da saúde da propriedade e do meio ambiente. Para manter a barragem com um nível de segurança aceitável, é necessário um acompanhamento constante, por meio de inspeções em campo, garantindo que todas as anomalias detectadas sejam rapidamente resolvidas, de forma a manter a integridade da estrutura da barragem.

Para garantir uma correta gestão da segurança das barragens, é preciso conhecer as principais anomalias, de forma a realizar um acompanhamento mais aprofundado destes problemas. De acordo com Zhang, Xu e Jia (2009), as barragens de terra representam 66,2% dos casos de falhas, dentre os tipos de barragens existentes, sendo as principais falhas decorrente do galgamento, no qual a água ultrapassa a barragem por cima do maciço, do “piping”, fenômeno no qual ocorre um carreamento dos grãos do maciço de terra devido ao fluxo de água existente no interior da barragem, e do deslizamento dos taludes do maciço.

Uma das formas de acompanhamento e controle de barragens se dá por meio da instrumentação, que consiste na instalação de equipamentos no maciço, com foco no

monitoramento do comportamento da barragem. Dentre estes equipamentos, um dos mais utilizados é o piezômetro, no qual avalia as poropressões e o nível freático no interior do maciço, sendo muito importante por fornecer a posição da superfície freática e da rede de percolação na barragem e em sua fundação, sendo possível, através destas informações, a realização de estudos de estabilidade dos taludes e, também, a verificação do funcionamento do sistema de drenagem interno da barragem (SILVEIRA, 2006).

Um bom funcionamento do sistema de drenagem interno é de grande importância para o bom funcionamento da barragem, pois evita que a água percole de forma descontrolada através do maciço. Entretanto, existem casos nos quais, o sistema de drenagem da barragem, devido a erros de projeto, pode colmatar, ou seja, ficar total ou parcialmente obstruído, mudando o caminho do fluxo de água, ocasionando anomalias no talude de jusante da barragem, como ocorreu com a Barragem Jaburu I, situada no município de Tianguá-CE, na qual detectou-se zonas úmidas e ressurgências no talude de jusante, comprometendo seriamente a segurança da obra (SOUZA *et al.*, 2005).

Para manter o talude da barragem seguro, é necessário o monitoramento e acompanhamento da situação do maciço, por meio da realização de estudos de estabilidade frequentes, de forma que os resultados obtidos atendam os valores de segurança definidos pelos órgãos reguladores. Contudo, a realização frequente destes estudos pode acarretar em custos financeiros e de tempo elevados, visto que é necessário a dedicação de tempo e de mão-de-obra para a realização destes estudos.

Desta forma, percebe-se a necessidade de métodos que facilitem a estimativa do nível de estabilidade dos taludes, proporcionando uma maior velocidade na obtenção de resultados e diminuindo a necessidade de estudos em campo. Devido a isto, propõe-se a metodologia denominada “Níveis Piezométricos Críticos”, no qual, a partir das leituras piezométricas obtidas de uma barragem, determinará as leituras críticas na qual o talude do maciço pode estar com seu coeficiente de segurança abaixo do mínimo valor recomendável.

## **1.2 Motivação e problema de pesquisa**

A barragem Jaburu I é uma obra importante, situada na Serra da Ibiapaba, no interior do Ceará, a qual fornece abastecimento de água a diversos municípios da região. Por conta disso, sua preservação é, sem dúvida, de grande importância. Contudo, a barragem, desde sua construção, apresenta diversos problemas, sendo necessárias diversas intervenções ao longo

do tempo. Devido a isto, existe um estado de alerta constante no que diz respeito à barragem Jaburu I, devido ao seu alto risco associado.

Por conta disso, surge uma questão pertinente, que se torna o problema da pesquisa: “Como verificar a segurança e a estabilidade dos taludes da barragem Jaburu I de forma mais simples e rápida?”

### **1.3 Justificativa**

Por conta da necessidade de um acompanhamento mais constante da barragem, urge a necessidade de métodos mais simples e rápidos de analisar as condições de segurança da barragem, facilitando a tomada de decisão e, conseqüentemente, uma rápida intervenção, evitando problemas mais graves. Com isso, o estudo em questão busca determinar um método para proporcionar esta facilidade na gestão da segurança da barragem, aproveitando-se dos instrumentos já instalados na barragem, com uma considerável série histórica, para acompanhar a segurança da estrutura.

### **1.4 Objetivos**

Nesta seção, serão apresentados os objetivos da pesquisa, que orientarão o desenvolvimento do trabalho.

#### ***1.4.1 Geral***

Avaliar os níveis piezométricos da barragem Jaburu I, utilizando-se de estudos de estabilidade em diferentes condições de drenagem interna para determinar em quais níveis a estrutura deixa de atender os coeficientes de seguranças aceitáveis.

#### ***1.4.2 Específicos***

Para este trabalho, os objetivos específicos são:

- a) determinar a linha freática para os diversos cenários de colmatação dos filtros internos da barragem;
- b) estudar a influência da colmatação do sistema de drenagem interno na estabilidade da barragem;

- c) aplicação da metodologia para a realização de uma retroanálise da estabilidade da barragem a partir de dados históricos.

### **1.5 Estrutura do trabalho**

O trabalho em questão é dividido em 5 capítulos, sendo o primeiro de caráter introdutório, proporcionando uma contextualização do objeto de estudo, além de enfatizar a motivação e a problemática em que este está envolvido.

Já no segundo capítulo, são apresentados os principais conceitos e teorias, que são necessários para um bom entendimento do trabalho, aprofundando a temática.

No terceiro capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados para obtenção dos resultados, explanando, com detalhes, cada passo realizado no estudo.

Em sequência, no quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos através do estudo, tal como uma análise e discussão destes, visando um esclarecimento dos resultados obtidos.

Por fim, no quinto capítulo, é realizada uma conclusão acerca do estudo em geral, refletindo sobre os resultados obtidos.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Neste capítulo, será apresentada uma contextualização acerca dos principais elementos abordados neste trabalho, proporcionando uma visão holística e direcionada para um bom embasamento no que tange o objeto de estudo deste trabalho.

### **2.1 Barragens**

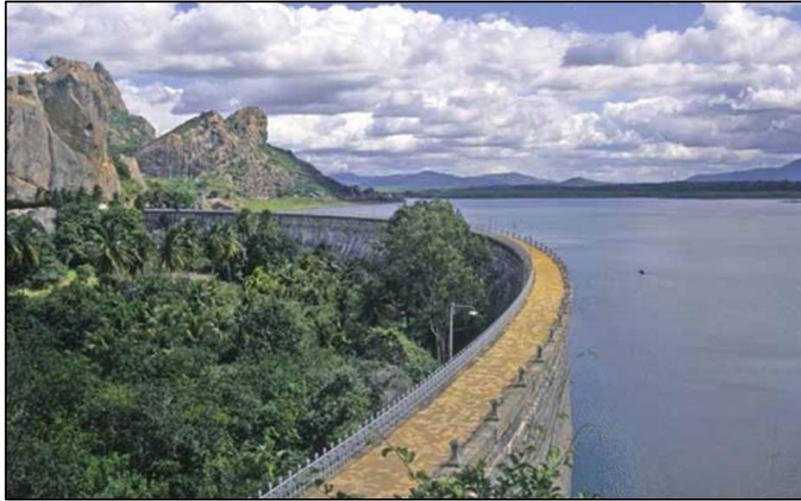
Nesta seção será apresentada uma breve contextualização das barragens, trazendo uma visão histórica, abordando, também, os principais tipos destas estruturas.

#### ***2.1.1 Contextualização***

As barragens são elementos fundamentais para o desenvolvimento da vida humana, as quais fornecem, por exemplo, abastecimento e fonte de irrigação para a população em seu entorno, sendo construídas e utilizadas desde a antiguidade, como a barragem de alvenaria Sadd-El-Kafara, situada no Egito, construída entre 2950 e 2750 A.C., além das primeiras barragens em arco, as quais foram construídas pelos romanos por volta do primeiro século depois de cristo (THOMAS, 1976).

No que diz respeito ao território brasileiro, a barragem de Apipucos, construída na cidade de Recife – PE, é a barragem brasileira mais antiga a qual se tem registro, datada, possivelmente, do final do século XVI. Contudo, foi a partir do final do século XIX que as barragens demonstraram sua grande importância e se popularizaram, devido à Grande Seca no Nordeste, que aconteceu de 1877 a 1879, a qual vitimou milhares de pessoas (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2011). A partir disso, criou-se o Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS), o qual atuou na construção das primeiras barragens brasileiras após a Grande Seca, como a barragem de Cedro, no município de Quixadá – CE, em 1906, a qual pode ser ilustrada na Figura 1.

Figura 1 - Barragem de Cedro em Quixadá - CE



Fonte: Comitê Brasileiro de Barragens (2011).

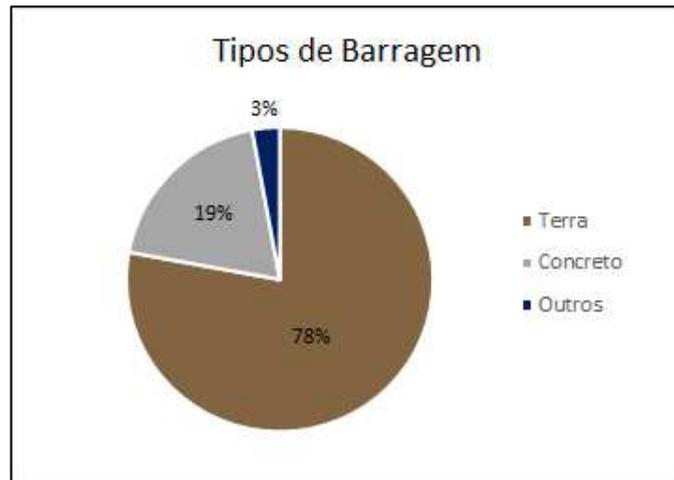
De acordo com Massad (2010), a construção das primeiras barragens brasileiras era bastante empírica, visto que a Mecânica dos Solos se estabeleceu cientificamente apenas na metade do século XX. Devido a isso, muitos dos processos utilizados na construção das barragens eram manuais, como a compactação das camadas de solo, no qual eram realizadas pelo pisoteamento de homens e de carneiros, na qual existia a “contratação da carneirada”, onde contratava-se os carneiros para realizar a compactação do maciço da barragem, diferente dos dias atuais, no qual utilizam-se compactadores mecânicos vibratórios.

Tratando-se dos dias atuais, foram contabilizadas, no ano de 2020, cerca de 58.713 barragens pela Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) presentes em diversos países ao redor do mundo, onde 1.365 destas barragens estão situadas no Brasil (ICOLD, 2020), estando grande parte destas na região do nordeste brasileiro (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2011).

### ***2.1.2 Tipos de barragens existentes***

Ao longo da história, surgiram diversos tipos de barragens, sendo estas construídas de terra e enrocamento ou de concreto, com diversos tipos de utilização possíveis. Segundo o ICOLD (2020), das 58713 barragens analisadas, aproximadamente 78% eram de terra e 19% de concreto, como pode-se verificar na Figura 2.

Figura 2 - Tipos de Barragem



Fonte: adaptado de Comitê Brasileiro de Barragens (2011).

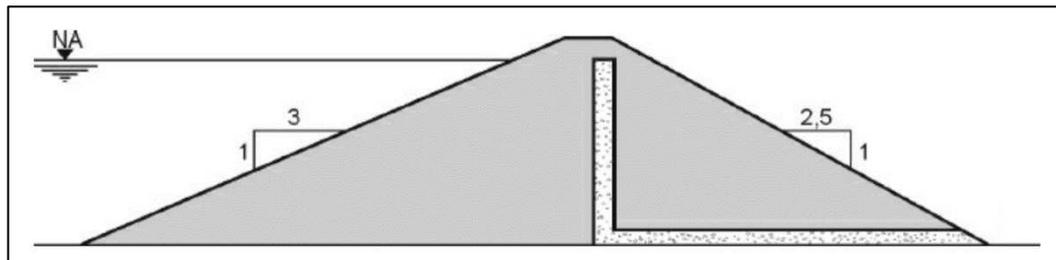
#### 2.1.2.1 Barragens de Terra

As barragens de terras podem ser construídas de duas formas: homogênea e zoneada. As barragens de terra homogênea são aquelas que contam com apenas um tipo de solo em sua composição, já as zoneadas são compostas de 2 ou mais tipos de materiais diferentes, contando com um núcleo de solo de baixa permeabilidade em sua constituição (CAPUTO, 2015).

De acordo com Blyth e Freitas (1984), devido ao fato de uma barragem de terra ter maior flexibilidade, esta pode acomodar deformações e recalques de forma mais fácil do que barragens de concreto, todavia, o maciço de terra é mais suscetível a deslizamentos de taludes, necessitando de maiores inclinações para garantir a estabilidade.

As barragens de terra homogênea são as barragens mais utilizadas no Brasil devido à disponibilidade de materiais terrosos no território brasileiro, facilitando a construção destas, além do custo do maciço compactado ser menos oneroso. Além disto, a possibilidade de sua construção sob qualquer tipo de fundação, desde uma rocha sã até um solo mole, como exemplo da construção da barragem do Rio Verde, localizada na região metropolitana de Curitiba – PR, popularizou a construção deste tipo de barragem (MASSAD, 2010). É possível observar, na figura a seguir, a seção típica de uma barragem de terra homogênea.

Figura 3 - Seção típica de uma barragem de terra homogênea



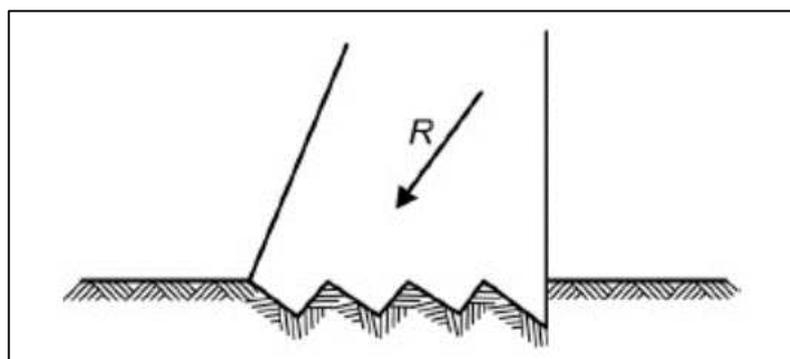
Fonte: Massad (2010).

### 2.1.2.2 Barragens de Concreto

As barragens de concreto podem ser divididas nos três principais tipos: barragem de gravidade, em arco e de contraforte. Devido ao grande peso destas barragens, existem limitações de uso devido a necessidade de fundações mais resistentes, como rochas sãs, com baixo nível de fissuração, sendo, ainda sim, muitas vezes necessário um reforço na resistência destas fundações, reduzindo sua permeabilidade (CAPUTO, 2015).

As barragens de gravidade utilizam-se, prioritariamente, de seu peso próprio para resistir ao carregamento da água do reservatório, gerando grandes esforços nas fundações. Segundo Caputo (2015), é necessária, em alguns casos, a abertura de dentes no terreno da fundação de forma a aumentar o atrito entre o terreno e a barragem, como observado na Figura 4. Em casos onde a rocha sã está a uma profundidade considerável no terreno, Chiossi (2013) comenta que é mais adequado e econômico optar por barragens de terra ao invés de barragens de concreto, evitando grandes escavações.

Figura 4 - Dentes na fundação de uma barragem de gravidade



Fonte: Caputo (2015).

Tratando-se das barragens em arco, estas são as construções mais raras no Brasil devido a sua necessidade de construção em vales rochosos de muita resistência, visto que exercem grandes esforços nas ombreiras, sendo mais comum na Europa, onde os vales são mais fechados e profundos (CHIOSSI, 2013). De acordo com Costa (2012), a estrutura de uma barragem em arco é mais esbelta, pois transmite grande parte dos esforços para o maciço rochoso, consumindo menos concreto em sua composição, sendo o tipo de barragem com menor consumo de concreto por metro quadrado de superfície represada. É possível ver, na Figura 5, a Represa Hoover, localizada nos Estados Unidos da América (EUA), uma das barragens em arco mais famosas do mundo.

Figura 5 - Represa Hoover



Fonte: Porto (2021).

No que diz respeito às barragens de contraforte, estas podem ser construídas com lajes ou com arcos múltiplos, sendo inclinadas com o apoio de contrafortes a jusante da barragem. Além disso, segundo Thomas (1976), devido à inclinação da barragem, a componente inclinada da força de reação do empuxo da água proporciona um aumento na estabilidade da estrutura. Massad (2010) alerta para a necessidade de um cuidado especial com as fundações, visto que, devido à pequena área de contato da barragem com o solo, os esforços são concentrados, sendo necessária uma fundação com bastante resistência. Um dos maiores exemplos de barragem em contraforte no Brasil é a parte lateral direita da Usina de Itaipu, ilustrada na figura a seguir.

Figura 6 - Barragem lateral direita de Itaipu



Fonte: Gaier (2021).

## 2.2 Instrumentação de Barragens

Segundo Cruz (1996), a instrumentação de uma barragem consiste na instalação de instrumentos, geralmente no maciço e na fundação, com a finalidade de realizar medições de variáveis importantes para a segurança da obra, as quais não seriam possíveis ser verificadas através de inspeções visuais. De acordo com o mesmo trabalho, apesar da instrumentação não ser a solução de todos os problemas de uma barragem, é inegável a sua importância, quando devidamente projetada, instalada e interpretada, não só para a verificação da segurança da obra, mas também para a observação das hipóteses adotadas em projeto, de forma que a obra possa se tornar mais econômica, mas dentro dos padrões de segurança necessários.

Os primeiros usos de instrumentos em barragens são datados do século XIX, as quais, inicialmente, se deram através de medições topográficas, realizadas em uma barragem em Grosbois, na França, em 1853. Após isso, no final do século XIX, iniciou-se a instalação de piezômetros em barragens na Índia, para se estudar as condições de percolação em suas fundações. Após isso, o uso de instrumentos continuou a se popularizar pelo mundo, surgindo novos tipos de instrumentos, através de modificações e adaptações, visando obter a medição de outras variáveis (SILVEIRA, 2006).

No que diz respeito ao Brasil, Silveira (2006) avalia que a instrumentação de barragens de terra ganhou impulso somente a partir de 1950, quando houve a construção de diversas usinas hidrelétricas pelo país, as quais necessitavam de estruturas maiores e que, em

grande parte, eram localizadas em locais de grande diversidade e complexidade geológica-geotécnica, exigindo projetos mais elaborados, atentando-se à garantia das condições de segurança, utilizando-se, portanto, da instrumentação para garantia destes critérios.

Atualmente, existem diversos tipos de instrumentos, com diferentes funções, que podem ser utilizados em barragens. Segundo Dunnycliff (1988), os instrumentos mais convencionais são aqueles utilizados para medição do nível d'água, de deslocamentos horizontais, de recalques, de tensões, de vazões e de poropressões, denominados "piezômetros", os quais são objeto de estudo deste trabalho.

### ***2.2.1 Piezômetros***

Os piezômetros são instrumentos amplamente utilizados para verificação das poropressões (ou pressões neutras) no solo, que consistem na pressão da água incidente no interior do maciço. Estes instrumentos são de grande importância para o monitoramento de barragens, pois, de acordo com Fell, MacGregor e Stapledon (1992), podem auxiliar em análises de estabilidade dos taludes do maciço e também na determinação de parâmetros do fluxo de água na barragem.

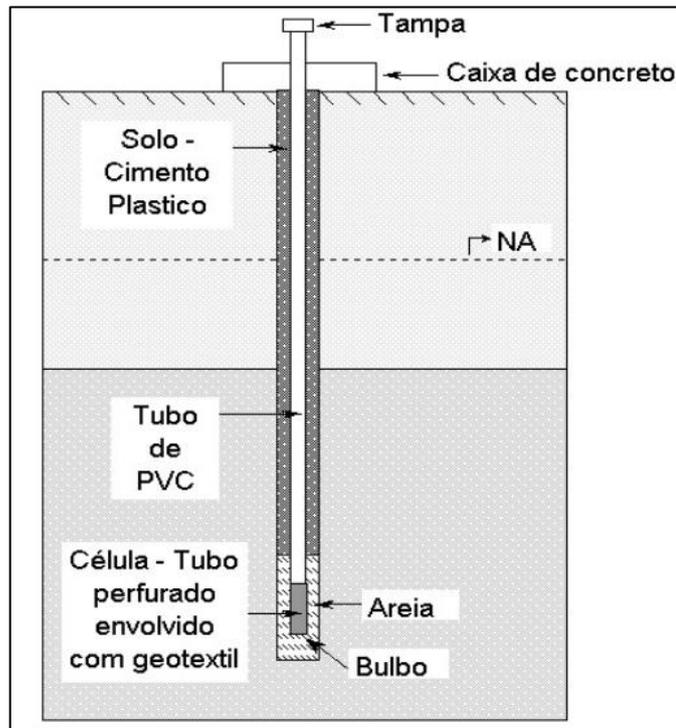
Nos dias atuais, existem vários tipos de piezômetros disponíveis no mercado, com diversas formas de funcionamento e características. De acordo com Cruz (1996), estes equipamentos podem ser mecânicos (de tubo aberto), hidráulicos, pneumáticos, elétricos, dentre outros modelos. Estes se diferenciam em sua forma de funcionamento, durabilidade, vantagens e desvantagens, dentre outros critérios, ou seja, não é possível estabelecer um tipo ideal de piezômetro para qualquer situação, visto que os projetos têm necessidades diferentes. Os principais tipos serão abordados nos subtópicos a seguir.

#### ***2.2.1.1 Piezômetros de Tubo Aberto***

De acordo com Silveira (2006), o piezômetro de tubo aberto, também conhecido como piezômetro standpipe ou piezômetro de Casagrande, é um dos instrumentos mais simples e mais confiáveis utilizados, sendo constituídos, quase sempre, de tubo PVC. Segundo a mesma obra, este piezômetro consiste no tubo em questão, com uma célula de areia, acoplado em sua extremidade, de forma que esta possa estar em contato com o fluxo de água na barragem, fazendo com que o nível d'água dentro do tubo sofra variações, as quais podem ser consideradas as cargas piezométricas no ponto em questão.

As medições deste tipo de piezômetro são realizadas no local de sua instalação por um técnico responsável, através de um instrumento com formato de trena, com um sensor elétrico na ponta, conhecido como “pio elétrico”, que emite ondas sonoras ao entrar em contato com a água dentro do tubo. Na Figura 7 é possível verificar o esquema de um piezômetro de tubo aberto.

Figura 7 - Modelo de um piezômetro de tubo aberto



Fonte: Fonseca (2003).

De acordo com Cruz (1996), desde que instalado em condições válidas, o piezômetro de tubo aberto pode ser considerado o mais confiável, além de sua facilidade de execução e de seu baixo custo de execução. Dentre suas principais vantagens, destacam-se a sensibilidade, a durabilidade, a qual pode ter uma vida útil compatível com a da barragem, confiabilidade, podendo fornecer estimativas do coeficiente de permeabilidade do solo na região em que este se encontra instalado e, também, pela possibilidade da verificação de seu desempenho por meio de ensaios de recuperação do nível d'água (SILVEIRA, 2006).

Entretanto, apesar de suas inúmeras qualidades, este tipo de piezômetro também apresenta algumas desvantagens. Cerqueira (2017) destaca que este tipo de instrumento tem algumas limitações como o seu longo tempo de resposta a variações, a necessidade da correção do tempo de resposta para uma adequada utilização dos dados em materiais de baixa

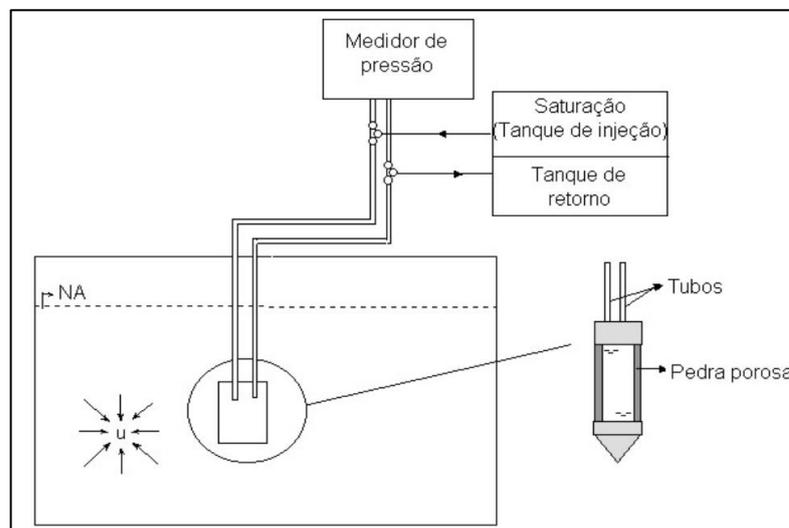
permeabilidade, a possível colmatção da célula de areia, a necessidade de medição em campo, dentre outras limitações existentes.

### 2.2.1.2 Piezômetros Hidráulicos

Os piezômetros hidráulicos, segundo Cruz (1996), são considerados por diversos engenheiros como sendo o mais indicado para medidas de poropressões, não só na fase de operação do reservatório, mas também na fase construtiva e na fase de enchimento, visto que qualquer variação nas poropressões da barragem será automaticamente registrada nos leitores externos.

Este equipamento é composto de uma pedra porosa acoplada a um corpo metálico, conectados a um painel de leitura externo através de tubos de nylon revestidos de polietileno. A pedra porosa é totalmente saturada com água destilada e desaerada, de forma que a água do sistema hidráulico não cause interferências na leitura. Fonseca (2003) enfatiza que, por mais que a desaeração seja uma premissa básica na fase de instalação dos instrumentos, é quase impossível garantir a condição de saturação do sistema ao longo de toda a vida útil do equipamento, sendo necessário realizar trabalhos de desaeração *in situ* (ORTIGÃO, 1975 apud FONSECA, 2003). É possível observar, na Figura 8, a estrutura básica de um piezômetro hidráulico.

Figura 8 - Modelo de um piezômetro hidráulico



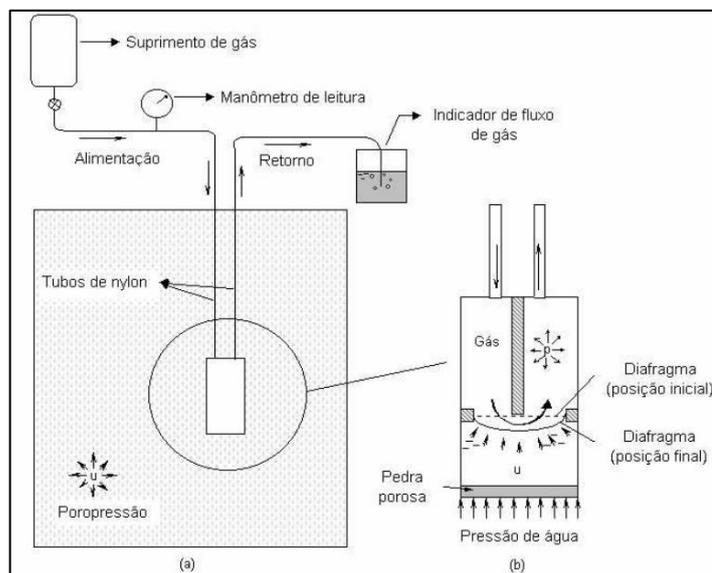
Fonte: Fonseca (2003).

Como vantagens, Cruz (1996) levanta que este tipo de piezômetro envolve uma técnica de construção simples, além de apresentar uma durabilidade alta. Além disso, permite a avaliação de poropressões negativas e, também, a avaliação do coeficiente de permeabilidade do solo. Contudo, de acordo com o mesmo autor, existem desvantagens no uso deste tipo de instrumento, como um grande tempo de leitura para solos pouco permeáveis, a necessidade de equipes de engenheiros ou técnicos com alta qualificação técnica para manutenções de desaerações do sistema, além do fato que recalques incidentes no maciço podem afetar o desempenho das medições.

### 2.2.1.3 Piezômetros Pneumáticos

Os piezômetros pneumáticos tem como premissa básica o equilíbrio entre a pressão da água no interior da barragem e a pressão conhecida de gases, como o nitrogênio e o gás carbônico. Este equipamento conta com um corpo metálico, no qual consta com um diafragma flexível e com uma pedra porosa em sua extremidade. A pressão da água incide de um lado do diafragma, enquanto a pressão dos gases do piezômetro incide do outro lado. Devido ao fato de as pressões dos gases serem conhecidas, no momento em que a pressão da água no diafragma se igualarem às pressões dos gases, obtém-se as poropressões no interior da barragem (FONSECA, 2003). Tem-se, na figura a seguir, uma melhor visualização do sistema de um piezômetro pneumático.

Figura 9 - Modelo de um piezômetro pneumático



Fonte: Fonseca (2003).

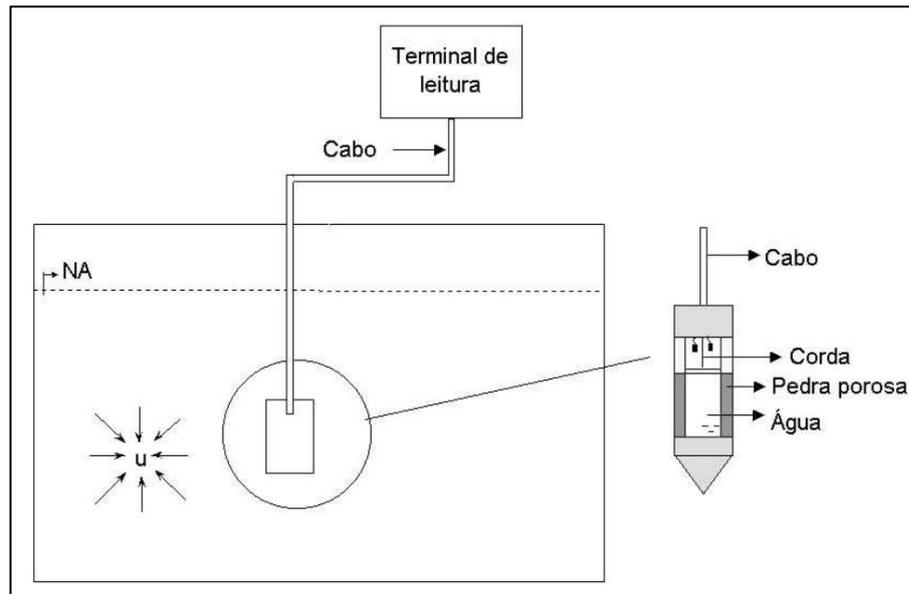
Cerqueira (2017) aponta algumas vantagens para este tipo de piezômetro, como a inexistência de defeitos por descargas atmosféricas ou interferências eletromagnéticas e tempos de resposta mais curtos. Além disso, Cruz (1996) enfatiza que a leitura centralizada, uma menor interferência na praça de construção, a não interferência dos recalques sofridos pelos instrumentos, a leitura simples e rápida e a inexistência de limitações quanto à localização do instrumento no corpo da barragem são outras vantagens relativa à modelo de instrumento. Fonseca (2003), por sua vez, aponta algumas limitações deste tipo de piezômetro, como a baixa confiabilidade na obtenção de poropressões negativas e a necessidade de recarregamento das ampolas de gás comprimido com certa periodicidade.

#### *2.2.1.4 Piezômetros de Corda Vibrante*

O piezômetro de corda vibrante é um dos mais utilizados na atualidade, chegando até a substituir os piezômetros de tubo aberto (CERQUEIRA, 2017). Este tipo de instrumento funciona através da transmissão da pressão intersticial da água através da pedra porosa para um diafragma localizado no interior do equipamento, no qual sua deformação pode ser medida através da vibração da corda localizada dentro do instrumento. A vibração da corda aciona o sistema do equipamento, enviando os dados para a central de leituras, onde a frequência de vibração é correlacionada com a poropressão no solo.

Este tipo de piezômetro pode assumir diversos formatos e posições de sua pedra porosa, de acordo com sua finalidade. Silveira (2006) enfatiza que existem diversos modelos de piezômetro de corda vibrante, os quais podem ser instalados no interior de aterros, em furos de sondagem, por cravações em solos moles e em barragens de rejeito ou, até mesmo, dentro de piezômetros de tubo aberto, com o intuito de automatizar as medições deste tipo de instrumento. Na Figura 10, apresentada a seguir, é possível verificar o esquema de um piezômetro de corda vibrante.

Figura 10 - Modelo de um piezômetro de corda vibrante



Fonte: Fonseca (2003).

De acordo com Fonseca (2003), uma das principais vantagens deste tipo de piezômetro é a velocidade no tempo de resposta das medições, mesmo em solos de baixa permeabilidade. Cerqueira (2017) complementa, ainda, que a acurácia da medida deste tipo de equipamento não depende da habilidade e experiência do operador, tendendo a apresentar resultados mais fidedignos.

No entanto, Dunnicliff (1988) enfatiza que este tipo de piezômetro também está exposto a diversas limitações, como a corrosão da corda vibrante do equipamento ao longo de sua vida útil, os erros de leitura acometidos pela alteração do valor “zero” de leitura do instrumento, sendo necessário, em alguns casos, a calibração e aferição *in situ* do valor “zero” do instrumento.

Silveira (2006) pontua, também, que estes tipos de instrumentos podem ter maior possibilidade de serem danificados devido a descargas atmosféricas, cujas as tensões induzidas nos cabos do instrumento podem provocar a queima das bobinas do transdutor, além do fato de que podem haver interferências nas medições do equipamento devido à presença de campos magnéticos provenientes de sub estações, linhas de transmissão de alta tensão, dentre outros.

## 2.3 Fluxo de Água

O solo é considerado um meio poroso, visto que, em sua composição, existem vazios nos quais podem ser preenchidos por fluidos como a água e o ar. Devido a esta porosidade, a água pode percolar através do solo, com mais ou menos dificuldade, dependendo de sua permeabilidade, que pode ser alta, para solos arenosos, ou baixa, para solos argilosos (PINTO, 2006). De acordo com Das e Sobhan (2014), o estudo do fluxo de água é importante para investigar a percolação em meios porosos, podendo-se realizar, através dessas informações, a análise de estabilidade de barragens.

### 2.3.1 Permeabilidade

A permeabilidade de um solo é a facilidade com que este permite a passagem de água entre seus vazios, podendo ser expressa numericamente pelo coeficiente de permeabilidade, no qual pôde ser observado pelo engenheiro francês Henry Darcy, através de experimentos, em meados de 1856 (CAPUTO, 2015). De acordo com Cruz (1996), é de grande importância o conhecimento da permeabilidade do solo, pois existem estruturas, como as barragens, que são construídas para realizar o barramento de água, o qual só pode acontecer com a construção de uma estrutura com materiais de baixa permeabilidade, empregando-se, também, materiais de alta permeabilidade nos filtros internos da barragem, para evitar a percolação de água para o talude de jusante.

Neste prisma, Henry Darcy, através de experimentos realizados em instrumentos conhecidos como permeâmetro, observou que diversos fatores geométricos influenciavam a vazão de água em um solo, formulando, o que se conhece, atualmente, como a Lei de Darcy, a qual pode ser descrita pela equação abaixo (MASSAD, 2010).

$$Q = k \cdot i \cdot A \tag{1}$$

Onde “Q” é a vazão da água em m/s, o “k” é o coeficiente de permeabilidade do solo em m/s, o “i” é o gradiente hidráulico, que consiste na razão entre a carga que se dissipa na percolação em relação ao comprimento no qual a carga se dissipa e o “A” é a área do permeâmetro em m<sup>2</sup>.

É possível verificar, através da Lei de Darcy, que o coeficiente de permeabilidade é diretamente proporcional à vazão de água, ou seja, quanto maior for a permeabilidade de um solo, maior será a vazão através deste.

De acordo com Pinto (2006), os coeficientes de permeabilidade podem ser obtidos de formas distintas, sendo estas através de ensaios em laboratório no permeâmetro de carga constante, que é utilizado para solos de alta permeabilidade e no permeâmetro de carga variável, que se utiliza em solos de baixa permeabilidade, ensaios em campo e através de métodos indiretos. Harr (1991) determina alguns valores típicos do coeficiente de permeabilidade, para os principais tipos de solo, que podem ser observadas no quadro a seguir.

Quadro 1 - Valores típicos de coeficiente de permeabilidade dos solos

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Coefficiente de Permeabilidade “k” (m/s)</b>
Cascalho	$1.10^{-2}$ ou maior
Areia Grossa	$1.10^{-2}$ a $1.10^{-4}$
Areia (Mistura)	$1.10^{-4}$ a $5.10^{-5}$
Areia Fina	$5.10^{-4}$ a $1.10^{-5}$
Areia Siltosa	$2.10^{-5}$ a $1.10^{-6}$
Silte	$5.10^{-6}$ a $1.10^{-7}$
Argila	$1.10^{-8}$ ou menor

Fonte: adaptado de Harr (1991).

Além disso, existe, também, em regiões tropicais, o solo laterítico, que, segundo Pinto (2006), é um tipo de solo originado em regiões de clima quente, com pluviosidade moderada ou intensa, no qual conta com uma elevada concentração de alumínio e de ferro, o qual fornece ao solo uma coloração avermelhada. Este tipo de material pode contar com coeficientes de permeabilidade distintos, de acordo com o seu tipo de agregação, sendo obtidos por diversos autores na literatura, podendo ser observado no Quadro 2.

Quadro 2 - Coeficiente de permeabilidade para solos lateríticos segundo à literatura

<b>Autor</b>	<b>Coeficiente de Permeabilidade “k” (m/s)</b>
Rodriguez <i>et al.</i> (2015)	$1,3 \cdot 10^{-5}$ a $6,7 \cdot 10^{-6}$
Miguel <i>et al.</i> (2006)	$1,5 \cdot 10^{-5}$ a $5,0 \cdot 10^{-5}$
Macambira (2002)	$2,0 \cdot 10^{-6}$ a $3,0 \cdot 10^{-10}$
Leandro <i>et al.</i> (1985) apud Massad (2016)	$1,0 \cdot 10^{-7}$ a $1,0 \cdot 10^{-10}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

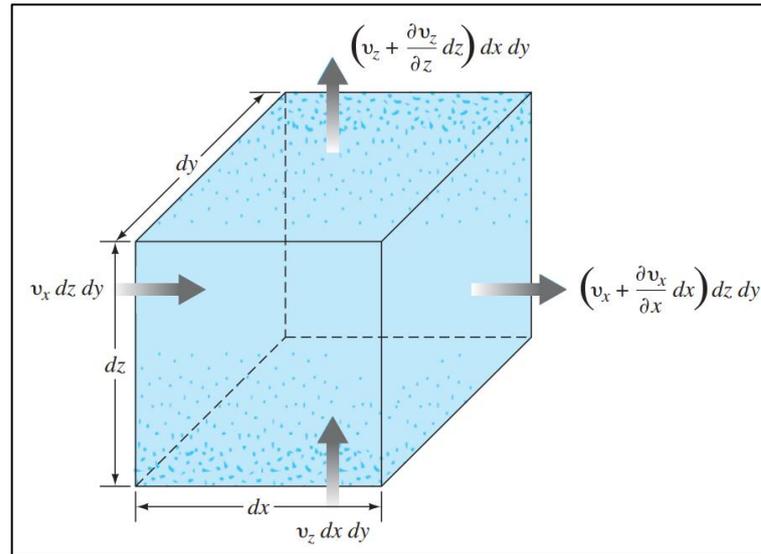
De acordo com Cedergren (1989), existem diversos fatores que influenciam na permeabilidade de um solo, como a viscosidade da água, que também é influenciada pela temperatura, pelo tamanho dos grãos, pela saturação do solo, pelo índice de vazios e pela estrutura do solo. No que diz respeito à estrutura do solo, tem-se que a disposição dos grãos pode facilitar o fluxo de água em uma direção em prol de outra, onde, nestes casos, diz-se que o solo é anisotrópico. Quando o solo apresenta a mesma facilidade de percolação, tanto na direção vertical ( $k_v$ ) quanto na horizontal ( $k_h$ ), diz-se que o solo é isotrópico.

### 2.3.2 Percolação

Segundo Das e Sobhan (2014), a percolação é o fluxo de água através de uma estrutura, que, neste caso, consistem em barragens. Diferente dos estudos realizados por Henry Darcy, onde considerou-se a percolação da água acontecendo de forma unidimensional no permeâmetro, as estruturas reais contam com um fluxo de água sendo bi ou tridimensional, que são denominadas de redes de fluxo. De acordo com o mesmo trabalho, o conceito das redes de fluxo se baseia na equação de continuidade de Laplace, a qual determina a condição de percolação de um regime permanente em um ponto específico do solo.

A equação de Laplace pode ser obtida através de algumas considerações, utilizando-se, também, de conceitos propostos por Darcy. Inicialmente, considera-se um ponto diferencial no maciço de solo, que pode ser observado na Figura 11, a seguir.

Figura 11 – Ponto diferencial dentro do maciço de solo



Fonte: Das e Sobhan (2014).

Considerando a velocidade de percolação da água sendo  $v_x$  e  $v_z$ , tem-se, que as vazões de entrada ( $Q_{ev}$  – vertical e  $Q_{eh}$  – horizontal) e de saída ( $Q_{sv}$  – vertical e  $Q_{sh}$  – horizontal) no ponto diferencial são:

$$Q_{eh} = v_x \cdot dz \cdot dy \quad (2)$$

$$Q_{sh} = \left( v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) \cdot dz \cdot dy \quad (3)$$

$$Q_{ev} = v_z \cdot dx \cdot dy \quad (4)$$

$$Q_{sv} = \left( v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right) \cdot dx \cdot dy \quad (5)$$

Dessa forma, considerando-se que não existe nenhuma alteração na massa do solo e que a água é incompressível, pode-se afirmar que a vazão de entrada no ponto diferencial deve ser igual à vazão de saída. Dessa forma, igualando as equações, tem-se:

$$\left[ \left( v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right) \cdot dx \cdot dy + \left( v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) \cdot dz \cdot dy \right] - [v_x \cdot dz \cdot dy + v_z \cdot dx \cdot dy] = 0 \quad (6)$$

Com isso, ajustando a equação acima, tem-se:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Levando em consideração que a velocidade de percolação da água é diretamente determinada pelo coeficiente de permeabilidade do solo e pelo gradiente hidráulico, tem-se:

$$v_x = k_h \cdot i_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (8)$$

$$v_z = k_v \cdot i_z = k_v \frac{\partial h}{\partial z} \quad (9)$$

Substituindo as equações 8 e 9 na equação 7, obtém-se a equação da continuidade de Laplace, observada na equação 10, a seguir.

$$k_h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_v \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (10)$$

Com a equação de Laplace, evidenciada pela formulação acima, é possível obter o fluxo de água em qualquer ponto no maciço de solos anisotrópicos. No caso de solos isotrópicos, pode-se utilizar a equação evidenciada abaixo.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (11)$$

Com posse das equações para obtenção do fluxo no maciço de solo, pode-se obter o fluxo através da estrutura. É possível realizar a resolução das equações para cada ponto, de forma analítica, no entanto, a forma mais utilizada, na realidade, é a resolução de forma numérica, utilizando-se, por exemplo, o Método dos Elementos Finitos (MEF), que é um dos principais métodos numéricos utilizados na atualidade. Alguns softwares utilizam-se deste método para obtenção da rede de fluxo, como o SEEP/W (Geostudio) da empresa Geoslope.

## 2.4 Sistemas de drenagem interno

As barragens de terra, no geral, apresentam em seu interior, um sistema de drenagem interno, composto de materiais granulares. Fell *et al.* (2005) aponta que os filtros em

barragens de terra são necessários para prevenir a erosão das partículas de solo do maciço (*piping*) e permitir a drenagem da percolação da água que incide no interior da barragem. Além disso, o sistema de drenagem interno é de grande importância para auxiliar em uma boa estabilidade da barragem, visto que pode evitar a saturação do espaldar de jusante, tornando o talude mais resistente às tensões de cisalhamento atuantes na estrutura.

Ao longo do tempo, de acordo com Massad (2010), houve uma evolução do uso do sistema de drenagem, iniciando-se, com a implementação de drenos de pé e drenos horizontais até chegar à solução proposta por Terzaghi, no qual combina-se o uso de filtros verticais com horizontais. Posteriormente, com a consolidação destes sistemas de drenagem interno, Mello (1975) propôs, também, a utilização dos filtros verticais inclinados, para jusante, para montante ou para ambos os casos, no caso de drenos mistos.

#### **2.4.1 Tipos de filtro**

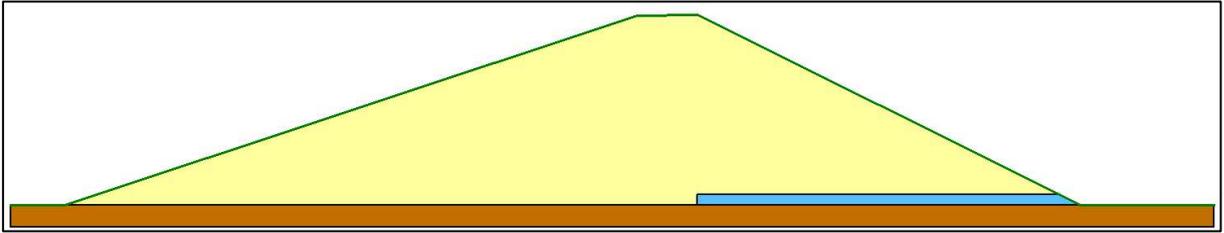
Neste subtópico serão abordados os principais tipos de filtros internos utilizados em barragens, tal como suas características.

##### **2.4.1.1 Filtro Horizontal**

O filtro horizontal é um dos mais simples empregados, o qual consiste apenas na construção de um tapete com materiais permeáveis ao longo do maciço da barragem. Cruz (1996) comenta que, embora o dreno horizontal tenha a função de dar a vazão à água que percola pelo maciço, sua função principal é garantir o controle do fluxo através da fundação da barragem, dessa forma, é perceptível a necessidade da continuidade do dreno ao longo do maciço, revestindo toda a área da fundação até, pelo menos, o nível d'água do reservatório.

Massad (2010) comenta, também, que, por mais que, teoricamente, a utilização apenas do filtro horizontal pudesse resolver o problema da percolação pela barragem, o material do solo compactado deveria ter característica isotrópica, o que não corresponde à realidade, ou seja, existiria, ainda, a possibilidade da ocorrência de *piping* no maciço. É possível observar o modelo de um filtro horizontal na Figura 12, apresentada a seguir.

Figura 12 – Modelo de uma barragem com filtro horizontal



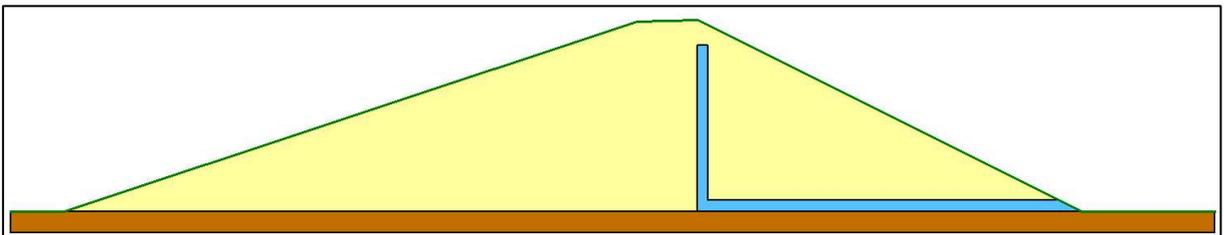
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 2.4.1.2 Filtro Completo (Vertical e Horizontal)

O filtro completo, também conhecido como filtro chaminé, consiste na união do dreno horizontal com o dreno vertical. Este tipo de sistema de drenagem interno foi proposto por Karl Terzaghi e tem maior eficiência do que os filtros horizontais, pois intercepta o fluxo de água antes que este entre em contato com o espaldar de jusante (MASSAD, 2010).

Embora exista esta eficiência do filtro completo, Cruz (1996), como recomendação de ordem prática, aconselha a construção do dreno vertical, ou inclinado, até o nível d'água máximo do reservatório, evitando surgências no talude de jusante, como observado na Barragem de Santa Branca, a qual teve a cota máxima de construção do filtro vertical menor do que a do nível d'água máximo do reservatório, apresentando surgências no espaldar de jusante, indicando que o fluxo de água pelo maciço não foi interceptado em cotas acima da extremidade do dreno. É possível observar o modelo de um filtro completo na Figura 13, apresentada abaixo.

Figura 13 – Modelo de uma barragem com filtro completo



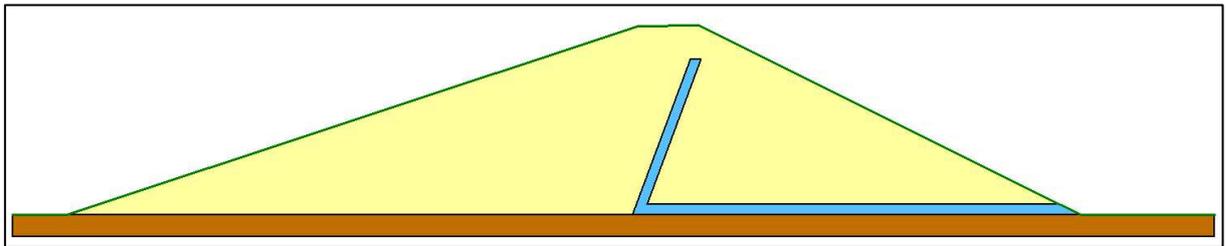
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 2.4.1.3 Filtro Inclinado

O filtro inclinado tem similaridades com o filtro completo, apresentado anteriormente, no entanto, este apresenta uma inclinação no dreno vertical, que pode ser para

jusante ou para montante. Massad (2010) comenta que a utilização de um filtro inclinado apresenta benefícios em relação ao vertical, no qual uma inclinação para montante pode propiciar uma melhora na condição da estabilidade do talude de montante quanto a uma situação de rebaixamento rápido do nível d'água. É possível observar o modelo de um com inclinação para montante na Figura 14, apresentada a seguir.

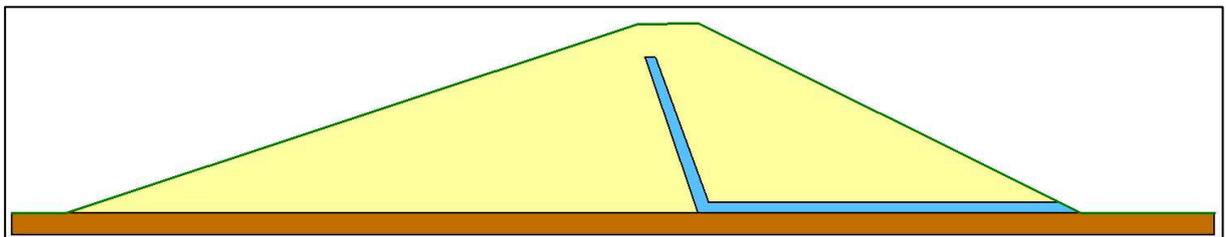
Figura 14 – Modelo de um filtro com inclinação para montante



Fonte: Elaborado pelo autor.

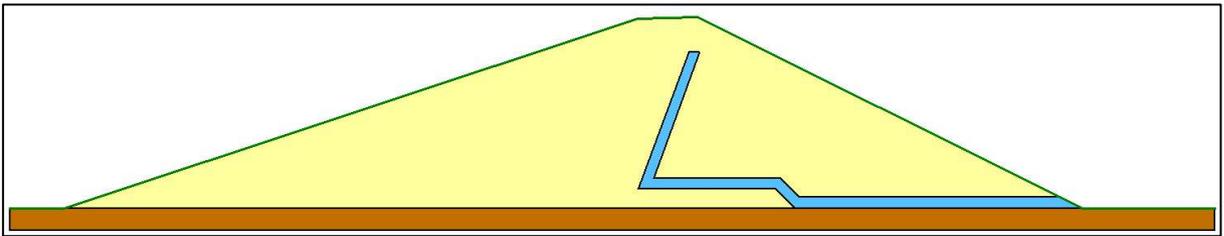
Quanto à inclinação para jusante, Massad (2010) aponta uma situação favorável quando as fundações da barragem são permeáveis, visto que aumenta o caminho de percolação de água pela barragem. Mello (1975), visando unir as qualidades dos dois tipos de dreno inclinado, propôs um filtro de inclinação “mista”, no qual o dreno apresenta inclinações tanto para montante quanto para jusante. Nas Figura 15 e Figura 16, apresentadas a seguir, é possível ver, respectivamente, um modelo de filtro com inclinação para jusante e um modelo com inclinação “mista”.

Figura 15 – Modelo de um filtro com inclinação para jusante



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Modelo de um filtro com inclinação “mista”



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 2.4.2 Colmatção dos filtros

O sistema de drenagem de uma barragem é construído para controlar a percolação de água pelo maciço, de forma que este fluxo não prejudique a estrutura. Entretanto, o filtro, pode sofrer um processo de redução da área transversal dos vazios do solo ao longo do tempo, conhecido como colmatção, o qual afeta diretamente a capacidade drenante do filtro, conforme os vazios são obstruídos (REMÍGIO, 2006). De acordo com o mesmo trabalho, a colmatção é um processo puramente físico, mas que pode acontecer devido a fenômenos físicos, químicos ou biológicos.

Segundo Palmeira e Gardoni (2000), a colmatção física pode acontecer devido à obstrução direta dos vazios a partir de outros elementos, como grãos de granulometria maior, dificultando o fluxo de água. Nogueira Júnior (1988) comenta que a colmatção química ocorre pela precipitação de materiais ferruginosos, os quais são transportados pela água que percola pelo maciço, que se acumulam ao longo do tempo, tendendo a preencher os vazios do filtro, reduzindo sua permeabilidade. Já Baveye *et al.* (1998) apresenta a colmatção biológica através da influência de microrganismos no filtro, por meio da produção de gases, acúmulo de sais insolúveis, dentre outros possíveis motivos.

### 2.5 Estabilidade de taludes

De acordo com Gerscovich (2016), talude é a denominação que se dá para qualquer tipo de superfície inclinada de um maciço de rocha ou de solo, podendo este ser natural ou artificial. Diversas estruturas utilizadas na atualidade podem apresentar, em sua composição, a existência de taludes, como as barragens, os canais trapezoidais, regiões rodoviárias, dentre outros. Devido a isto, é de grande importância o conhecimento do comportamento deste tipo de

estrutura, conhecendo os principais agentes que podem prejudicar sua estabilidade tal como os métodos de cálculos utilizados para a verificação dos coeficientes de segurança necessários.

### 2.5.1 Causas Gerais de Escorregamento

Tabalipa e Fiori (2008) descrevem o escorregamento como qualquer movimento que envolva o deslocamento de materiais terrosos ou rochosos a partir da ação da gravidade. Este fenômeno está diretamente interligado com a estabilidade de taludes visto que, caso este não esteja com coeficientes de segurança adequados, podem sofrer escorregamentos, possibilitando a ruptura total da estrutura.

De acordo com Das e Sobhan (2014), o solo apresenta uma resistência ao cisalhamento do solo, o qual pode ser evidenciado pela equação abaixo:

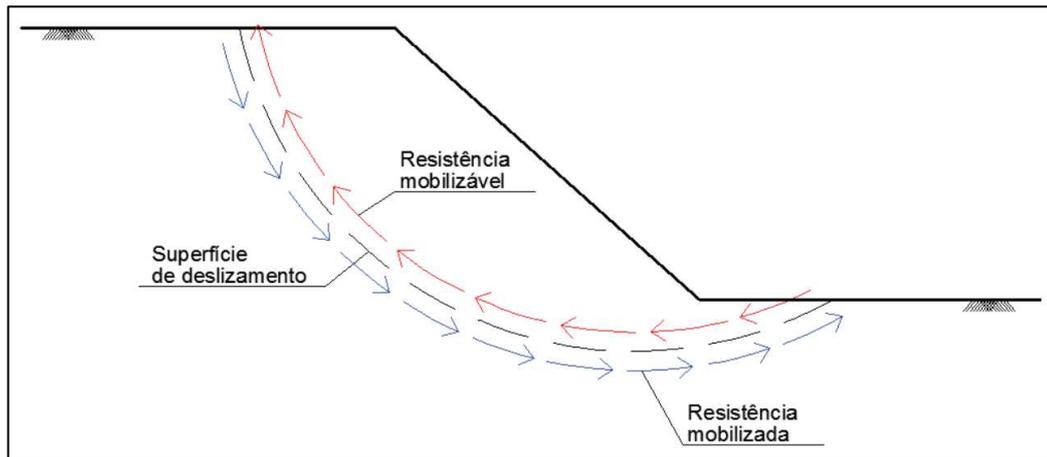
$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot tg\phi' \quad (12)$$

Onde “ $\tau_f$ ” é a resistência ao cisalhamento do solo, “ $c'$ ” é a coesão do solo, “ $\phi'$ ” é o ângulo de atrito do solo e “ $\sigma'$ ” é a tensão normal na superfície de potencial ruptura.

O solo, ao mesmo tempo em que apresenta uma resistência ao cisalhamento, também apresenta tensões cisalhantes devido ao peso a que este está submetido. Sabendo disto, tem-se, de acordo com Silva (2011), o coeficiente, ou fator, de segurança que é formado pela razão entre a soma das tensões resistentes do solo “ $\tau_{mob}$ ”, também conhecida como resistência mobilizável, e soma das tensões de cisalhamento incidentes no talude, conhecidas, também, como resistência mobilizada “ $\tau_f$ ”. A equação do fator de segurança é evidenciada a seguir, em conjunto com a representação das tensões atuantes no solo, apresentada na Figura 17.

$$FS = \frac{\sum \tau_{mob}}{\sum \tau_f} \quad (13)$$

Figura 17 – Representação das tensões atuantes em um talude genérico



Fonte: Silva (2011).

Segundo Gerscovich (2016), a instabilidade do talude acontece no momento em que as tensões cisalhantes do solo excedem a tensão resistente, ou seja, quando o fator de segurança da estrutura é menor do que 1. Existem diversos fatores que podem contribuir para a instabilidade dos taludes, tal como os motivos pontuados por Varnes (1978) e apresentados no Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 – Principais fatores que potencializam a instabilidade dos taludes

TIPO DE AÇÃO	FATORES	FENÔMENOS
<b>AUMENTO DAS TENSÕES CISALHANTES</b>	Remoção da massa lateral (ou da base)	- Erosão; - Deslizamentos; - Cortes; - Remoção de elementos na base da encosta.
	Sobrecarga	- Peso de água da chuva, neve; - Acúmulo natural de materiais; - Construção de estruturas; - Peso da vegetação; - Pressões devido à percolação da água.
	Solicitações dinâmicas	- Terremotos, ondas, erupções; - Explosões, tráfego de veículos.
	Pressões laterais	- Água presente em trincas; - Congelamento da água nas trincas; - Congelamento; - Expansão de argilas.
<b>REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO</b>	Características relativas ao material (geometria, texturas, etc)	- Características geomecânicas dos materiais; - Estados de tensões iniciais.
	Mudanças ou fatores variáveis	- Intemperismo; - Variações das poropressões; - Desintegração física de rochas granulares; - Diminuição da coesão de argilas devido ao secamento da água;
	Outros fatores	- Enfraquecimento devido a raízes de árvores; - Escavação de buracos por animais.

Fonte: adaptado de Varnes (1978).

### 2.5.2 Métodos de Análise

Devido à importância de se conhecer o comportamento dos taludes, para evitar uma provável ruptura, propôs-se, ao longo do tempo, diversas metodologias para o cálculo da estabilidade destas estruturas, aliando-se a métodos computacionais, como o pacote SLOPE/W, do software Geostudio, para obtenção do possível comportamento da estrutura e de seus coeficientes de segurança.

De acordo com Caputo (2015), os métodos de estudo de estabilidade consistem no método da análise de tensões, o qual se calculam as tensões em cada ponto da estrutura, comparando-a com a tensão resistente, e os métodos de equilíbrio limite, no qual se isolam massas arbitrarias no solo, estudando-se as condições de equilíbrio destas porções de solo, que

é o método mais utilizado na atualidade. Os principais métodos utilizados, segundo Freitas (2011), estão explicitados no quadro abaixo.

Quadro 4 – Métodos de análise de estabilidade de taludes

TIPO DE ESTUDO	PADRÃO DE RUPTURA	NOME DO MÉTODO
<b>MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE</b>	RUPTURA PLANA	Taludes Infinitos
		Instabilização por Blocos
	RUPTURA CIRCULAR	Fellenius (1936)
		Bishop (1955)
		Spencer (1967)
	RUPTURA DE QUALQUER TIPO	Janbu (1954)
		Morgenstern-Price (1965)
		Correia (1988)

Fonte: adaptado de Freitas (2011).

Dentre estes métodos, os mais conhecidos são o de Fellenius, Bishop e Morgenstern-Price, os quais se utilizam, prioritariamente, a análise pelo método sueco, o qual consiste na consideração da massa do talude na sua totalidade (método global) ou dividida em fatias (método das fatias) (CAPUTO, 2015).

De acordo com Massad (2010), o método de Fellenius considera, em seus cálculos, apenas o peso da fatia, a força normal incidente no contato com a superfície de ruptura e o cisalhamento, desconsiderando todos os demais esforços. Bishop (1955), em seu estudo, otimizou o método de Fellenius, incluindo, também, a força normal entre fatias vizinhas e a de análise. Contudo, Morgenstern e Price (1965), em seu método, proporcionaram uma robustez maior à análise das fatias, passando a considerar, também, o efeito do cisalhamento entre as fatias vizinhas, além de passar a atender as condições de equilíbrio de forças e momentos na lamela. De acordo com estudos realizados por Whitman e Bayley (1967), o método de Morgenstern-Price é o mais acurado dentre os três métodos, chegando a diferenças de valores de cerca 60% entre os resultados obtidos.

### ***2.5.3 Hipóteses de Análise e Coeficientes de Segurança***

Visando obter a máxima segurança da estrutura, no caso das barragens, são verificadas diversas hipóteses de análise da estabilidade dos taludes, verificando as possíveis situações o qual a estrutura pode ser submetida. Pensando nisto, o Corpo de Engenheiros do

Exército dos Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers), propôs formas de análise da estabilidade de barragens, e seus devidos fatores de segurança, apresentadas no quadro abaixo.

Quadro 5 – Hipóteses de análise da estabilidade de barragens

CONDIÇÃO DE ANÁLISE	FATOR DE SEGURANÇA	TALUDE ANALISADO
<b>FINAL DE CONSTRUÇÃO</b> (INCLUINDO A ETAPA DE CONSTRUÇÃO)	1,3	MONTANTE E JUSANTE
<b>REGIME DE OPERAÇÃO</b> (COTA D'ÁGUA NA CRISTA DO VERTEDOURO)	1,5	JUSANTE
<b>ESVAZIAMENTO RÁPIDO</b> (COTA D'ÁGUA NA CRISTA DO VERTEDOURO)	1,1	MONTANTE

Fonte: adaptado de U.S. Army Corps of Engineers (2003).

A NBR 11682:2009 – Estabilidade de encostas também define coeficientes de segurança mínimos de acordo com critérios baseados na segurança contra danos a vidas humanas e danos materiais e ambientais. Os coeficientes propostos pela norma estão apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Coeficientes de segurança para estabilidade de encostas segundo a NBR 11682

NÍVEL DE SEGURANÇA CONTRA DANOS A VIDAS HUMANAS NÍVEL DE SEGURANÇA CONTRA DANOS MATERIAIS E AMBIENTAIS	ALTO	MÉDIO	BAIXO
	ALTO	1,5	1,5
MÉDIO	1,5	1,4	1,3
BAIXO	1,4	1,3	1,2

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009).

Apesar dos coeficientes propostos, a NBR 11682:2009 não considera, em seus fatores de segurança, as solicitações nos taludes durante o regime de operação, as poropressões, dentre outros fatores que estão presentes na barragem, sendo, importante, também, a verificação das hipóteses propostas pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo serão definidos os materiais utilizados e os métodos que serão aplicados neste estudo.

#### **3.1 Barragem Jaburu I**

Neste tópico será apresentada a Barragem Jaburu I, utilizada como estudo de caso para este trabalho. A barragem Jaburu I é uma obra importante a qual fornece abastecimento de água a diversos municípios da região da Serra da Ibiapaba, no interior do Ceará. Por conta disso, sua preservação é, sem dúvida, de grande importância. Entretanto, esta barragem, desde sua inauguração, tem apresentado diversas anomalias. Por conta disto, existe um estado de alerta constante no que diz respeito à esta obra, devido ao seu alto risco associado.

##### **3.1.1 *Generalidades***

A Barragem Jaburu I é uma barragem de terra zoneada, situada entre os municípios de Tianguá – CE e de Ubajara – CE, com uma capacidade de acumulação de aproximadamente 138 milhões de metros cúbicos de água, a qual foi construída entre os anos de 1981 e 1983, que tem como uso principal o abastecimento humano, atendendo mais de 250.000 pessoas na região em que está instalada (SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS, 2010). É possível verificar, no Quadro 7, apresentado a seguir, a ficha técnica da barragem.

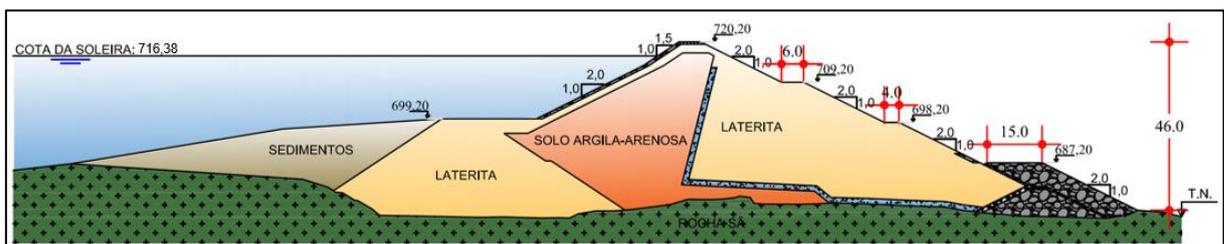
Quadro 7 - Ficha técnica da Barragem Jaburu I

CARACTERÍSTICAS	
Tipo de Barragem	Terra Zoneada
Município	Ubajara - CE
Rio Barrado	Rio Jaburu
Capacidade do Reservatório	138.127.743 m <sup>3</sup>
Vazão Regularizada	2,39 m <sup>3</sup> /s
Extensão do Coroamento	770 m
Largura do Coroamento	10 m
Cota do Coroamento	720,2 m
Altura máxima	46 m
VERTEDOURO	
Tipo do Vertedouro	Canal com soleira do tipo Low-ogee
Largura do Vertedouro	29 m
Cota da Soleira	716,38 m
TOMADA D'ÁGUA	
Tipo de Tomada d'Água	Galeria com controle a jusante
Diâmetro da Tomada d'Água	600 mm

Fonte: Secretaria de Recursos Hídricos (2010).

A barragem é constituída de dois tipos de solo, sendo composta de material argilo-arenoso na região de montante da barragem e de laterita na região a jusante. A barragem possui, ainda, um dreno “misto”, ou seja, um dreno vertical inclinado para montante e uma parcela do dreno horizontal inclinada para jusante, o qual está diretamente ligado a um dreno de pé (“rock-fill”), situado na parte inferior do talude de jusante da barragem. Os taludes tem inclinação de 1:2, exceto pelo talude de montante, no qual, a partir da cota 713,20m, toma uma inclinação de 1:1,5. Além disso, os taludes contam com proteção para erosão, onde a jusante utiliza-se grama natural e a montante conta com um enrocamento, também conhecido como “rip-rap” (SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS, 2010). É possível verificar um modelo da seção máxima da barragem na Figura 18.

Figura 18 - Seção tipo da Barragem Jaburu I



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da barragem principal, a estrutura conta com um vertedouro escavado em rocha, situado na margem direita, separada da barragem, com uma soleira vertente do tipo “low-ogee”, contando com um canal de aproximação de 29m de largura. Junto a isso, existe, também, a presença de uma tomada d’água, do tipo galeria de concreto, com uma tubulação DN-600mm, contando com 2 registros em série a jusante da barragem (SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS, 2010).

### 3.1.2 Anomalias na Barragem Jaburu I

Ao longo do tempo, desde sua construção, a Barragem Jaburu I apresentou diversas anomalias em sua estrutura. De acordo com estudos realizados por Souza *et al.* (2005), tem-se a colmatagem do sistema de drenagem interno como uma das anomalias que assolam a barragem. Segundo o mesmo estudo, a colmatagem dos filtros pode ter ocorrido pelo carregamento de finos, pela cimentação por óxido de ferro, devido à presença, em abundância, de solo laterítico na barragem, evidenciado pelo aspecto ferruginoso da água ressurgente no talude de jusante tal como o acumulo de material de aparência coloidal avermelhada nas caixas de medição de vazão instaladas ao longo da barragem, e por uma inadequação da granulometria do material drenante ou, até mesmo, uma combinação de todos os fatores supracitados. Ilustra-se, na Figura 19, um dos casos de ressurgência no talude de jusante da barragem.

Figura 19 - Ressurgência no talude de jusante



Fonte: Souza *et al.* (2005).

Devido aos problemas de percolação de água pela barragem, foram realizadas, em 2003, algumas intervenções importantes, como a ampliação do sistema de instrumentação, através da instalação de piezômetros e de outros instrumentos e, também, da construção de um dreno de pé na barragem visando uma melhoria na drenagem através do maciço e, também, aumentar a estabilidade do talude de jusante que, segundo Souza *et al.* (2005), apresentou níveis de segurança abaixo do recomendado, aproximando-se de uma possível ruptura da barragem. O dreno de pé executado na barragem, pode ser visualizado na Figura 20, apresentada a seguir.

Figura 20 - Dreno de pé da barragem



Fonte: Souza *et al.* (2005).

Ainda nos dias atuais, a barragem continua a apresentar sucessivas anomalias. De acordo com o Relatório Anual de Segurança de Barragens da ANA (2020), a Barragem Jaburu I é classificada como uma das 122 barragens mais preocupantes do Brasil, existindo apenas duas com esta classificação no estado do Ceará.

### **3.2 Dados de instrumentação da barragem**

Para a realização dos estudos, é necessária a utilização das leituras dos instrumentos instalados na barragem, para que seja possível a comparação entre o comportamento teórico e o comportamento real da linha freática e das cotas piezométricas na barragem. Visto isso, obteve-se, com a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), os dados a partir da leitura dos piezômetros entre os anos de 1999 e 2013.

Os dados recebidos são relativos aos piezômetros, do tipo Casagrande, instalados ao longo da barragem. Para o estudo em questão, selecionou-se os piezômetros PZ 23.1.3, PZ 23.2.3 e PZ 23.3.3, visto que estes se encontram na seção máxima da barragem, que é a região de estudo deste trabalho. As leituras dos piezômetros destacados são apresentadas no Anexo A. Detalhes de um piezômetro instalados no maciço podem ser observados na Figura 21.

Figura 21 – Detalhe de um piezômetro da barragem



Fonte: Elaborado pelo autor.

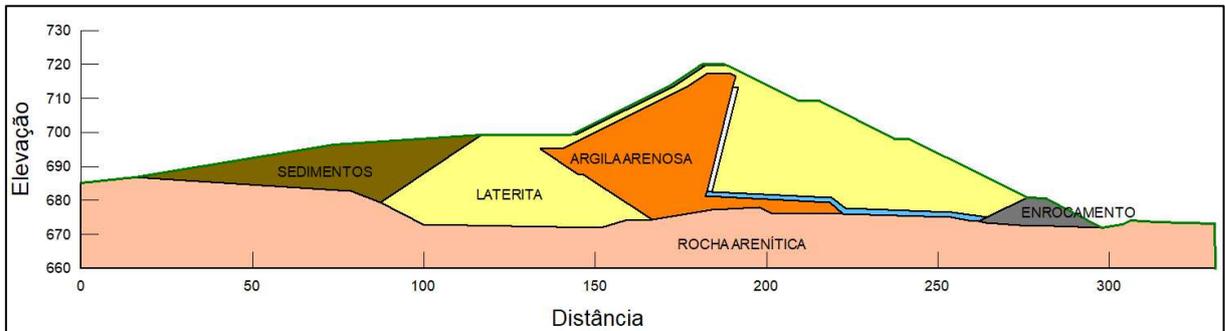
### 3.3 Modelagem computacional da barragem

Para a realização dos estudos de uma forma mais prática e confiável, é necessária a realização de modelagens computacionais, inserindo parâmetros relacionados ao comportamento da estrutura, de forma que os resultados obtidos se aproximem dos observados na prática. Para a modelagem do problema, utilizou-se os pacotes SEEP/W, para estudo de fluxo, e SLOPE/W, para estudo de estabilidade, do software GeoStudio 2021.4, da empresa Geo-Slope.

Inicialmente, modelou-se a geometria da seção transversal máxima da Barragem Jaburu I (estaca 24+10,0m), visto que existem piezômetros próximos à seção, que apresentavam um histórico de leituras piezométricas consistentes, delimitando, com isso, a

geometria da seção. Para este estudo, considerou-se a seção da barragem antes da construção do dreno de pé emergencial, conforme explicitado por Souza *et al.* (2005), para realizar a verificação da barragem na condição de projeto, antes da intervenção. Dessa forma, obteve-se a seção tipo, que pode ser observada na Figura 22.

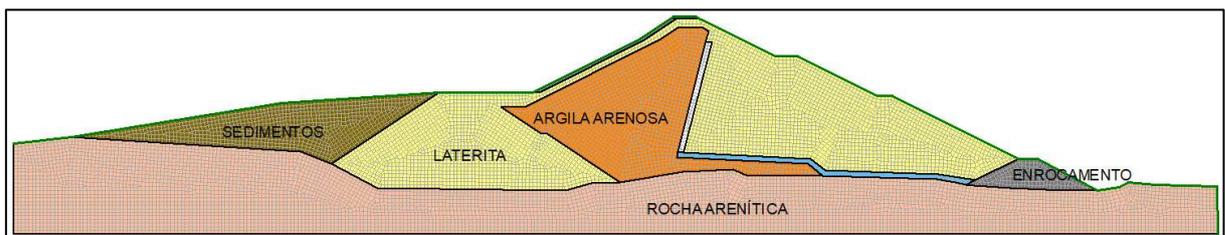
Figura 22 – Modelo computacional da Barragem Jaburu I



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os estudos de fluxo, como mencionado, utilizou-se o pacote SEEP/W do software, o qual realiza a análise da percolação da água através do maciço. O software obtém o fluxo através da resolução da equação de Laplace utilizando-se do Método dos Elementos Finitos (MEF), o qual discretiza o modelo contínuo em diversas “malhas” com formatos geométricos mais simples, interligados entre si, facilitando a resolução da equação e fornecendo resultados bem precisos em relação à realidade, dependendo das condições de contorno e os parâmetros utilizados. É possível verificar, na Figura 23, o modelo da barragem, discretizado pelas malhas do MEF.

Figura 23 – Modelo da Barragem Jaburu I discretizado por malhas do MEF



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o estudo, considerou-se o fluxo acontecendo em meio saturado, utilizando os parâmetros de permeabilidade dos materiais e, também, considerou-se a cota do nível d’água

sendo 716,38m, que consiste na cota da soleira, ou seja, a cota máxima que o reservatório deve atingir, sendo o pior cenário para o estudo de fluxo.

No que diz respeito aos estudos de estabilidade, utilizou-se o pacote SLOPE/W para as análises, verificando a barragem no regime de operação, ou seja, analisando a estabilidade do talude de jusante, utilizando-se do método de Morgenstern-Price, que consiste num dos métodos mais rigorosos e eficientes utilizado nos dias atuais, como observado anteriormente, e que pode ser aplicado a qualquer superfície de ruptura. O software calculou os coeficientes de segurança para a superfície mais crítica determinada pelo método “entrada e saída”.

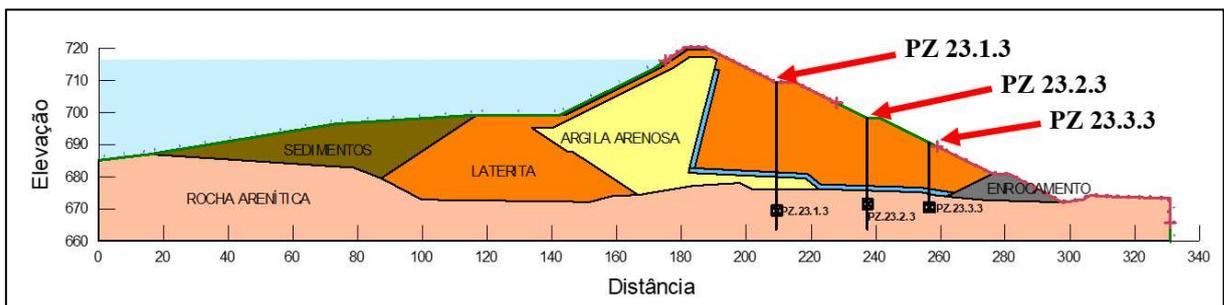
### 3.4 Parâmetros Geotécnicos

Neste capítulo serão explicitados o processo de calibração do modelo computacional e os parâmetros geotécnicos, como a permeabilidade e a resistência do solo, que foram utilizados para realização dos estudos.

#### 3.4.1 Processo de calibração do modelo

Para a obtenção de resultados satisfatórios, é necessária uma calibração dos parâmetros do modelo computacional, realizando ajustes, de forma que este se aproxime do comportamento verificado na estrutura real, por meio dos dados dos piezômetros, proporcionando uma confiabilidade maior nos resultados obtidos. Em face disto, utilizou-se os dados das leituras piezométricas para a realização de retroanálises, de forma que os resultados obtidos pelo modelo se aproximassem das leituras dos piezômetros PZ 23.1.3, PZ 23.2.3 e PZ 23.3.3, posicionados em diferentes pontos do espaldar de jusante, conforme observado na figura a seguir.

Figura 24 – Localização dos piezômetros utilizados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para definir os parâmetros utilizados, utilizou-se, como ponto de partida, os valores típicos evidenciados na literatura. A partir disto, realizou-se uma série de simulações, alterando os parâmetros, principalmente os valores do coeficiente de permeabilidade e a relação de isotropia/anisotropia dos materiais, de forma a atingir resultados de poropressões similares aos coletados pelos piezômetros. Os parâmetros finais, utilizados no modelo computacional, são apresentados nos subtópicos a seguir.

### 3.4.2 *Parâmetros utilizados para o estudo de fluxo*

No que diz respeito ao estudo de fluxo, como visto anteriormente, os principais parâmetros utilizados são o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) e a relação de isotropia ou anisotropia, definido pela razão entre os coeficientes de permeabilidade vertical ( $k_y$ ) e horizontal ( $k_x$ ). Os valores adotados para os parâmetros que serão utilizados nos estudos de fluxo, após o processo de calibração, estão explicitados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no estudo de fluxo da Barragem Jaburu I

<b>Material</b>	<b><math>k</math> (m/s)</b>	<b><math>k_y/k_x</math></b>
Laterita	$1.10^{-9}$	0,10
Argila Arenosa	$1.10^{-9}$	0,10
Filtro Vertical	$1.10^{-6}$	1,00
Filtro Horizontal	$1.10^{-6}$	1,00
Sedimentos	$1.10^{-7}$	1,00
Enrocamento	$1.10^{-3}$	1,00
Rocha Arenítica (Fundação)	$1.10^{-9}$	0,10

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4.3 *Parâmetros utilizados para o estudo de estabilidade*

Os parâmetros utilizados para o estudo de estabilidade da barragem, como explicitados anteriormente, consistem, basicamente, no peso específico dos materiais ( $\gamma$ ) e dos

parâmetros de resistência, como a coesão efetiva entre os materiais ( $c'$ ) e o ângulo de atrito (para solos saturados ( $\phi'$ ) e não saturados ( $\phi^b$ )).

No que diz respeito aos parâmetros de resistência, pesquisou-se, também, na literatura, utilizando-se, inicialmente, valores típicos de coesão ( $c'$ ) e ângulo de atrito ( $\phi'$ ), com exceção da laterita, presente em abundância no talude de jusante, o qual utilizou-se de ensaios laboratoriais para obtenção dos parâmetros. Para obtenção do peso específico dos materiais ( $\gamma$ ), utilizou-se, também, valores de referência apresentados na literatura.

Quanto ao ângulo de atrito para os solos não saturados ( $\phi^b$ ), por exigir ensaios muito específicos, foi estimado a partir do ângulo de atrito de solos saturados ( $\phi'$ ). Krahn (2004), em sua obra, sugere que o ângulo de atrito para os solos não saturados ( $\phi^b$ ) seja adotado como metade do valor do ângulo de atrito de solos saturados ( $\phi'$ ). Os valores adotados para os parâmetros utilizados nos estudos de estabilidade estão explicitados na tabela a seguir.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no estudo de estabilidade da Barragem Jaburu I

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$\phi^b$ (°)
Laterita	21	7	30	15
Argila Arenosa	21	8	24	12
Filtro Vertical	21	0	30	0
Filtro Horizontal	21	0	30	0
Sedimentos	20	5	20	0
Enrocamento	21	0	40	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.5 Colmatação do sistema de drenagem interno

Como analisado por Souza *et al.* (2005), a barragem Jaburu I apresenta um filtro interno colmatado. Por conta disto, a barragem apresenta um fluxo de água com o comportamento diferente do estimado em projeto, visto a ineficiência do filtro. Levando em consideração uma colmatação do filtro de forma gradual ao longo do tempo, realizou-se estudos de colmatação do sistema de drenagem interno da barragem, variando o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) do filtro, tornando-o mais impermeável a cada iteração. Os coeficientes de permeabilidade verificados no estudo estão apresentados na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 - Coeficientes de permeabilidade utilizados para a verificação da colmatação do sistema de drenagem interno da Barragem Jaburu I

<b>Coeficiente de Permeabilidade</b>	<b><i>k</i> (m/s)</b>
k original (k/1)	$1,00.10^{-6}$
5 vezes menor (k/5)	$2,00.10^{-7}$
10 vezes menor (k/10)	$1,00.10^{-7}$
25 vezes menor (k/25)	$4,00.10^{-8}$
50 vezes menor (k/50)	$2,00.10^{-8}$
100 vezes menor (k/100)	$1,00.10^{-8}$
200 vezes menor (k/200)	$5,00.10^{-9}$
300 vezes menor (k/300)	$3,33.10^{-9}$
400 vezes menor (k/400)	$2,50.10^{-9}$
500 vezes menor (k/500)	$2,00.10^{-9}$
1000 vezes menor (k/1000)	$1,00.10^{-9}$
1500 vezes menor (k/1500)	$6,67.10^{-10}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.6 Determinação dos níveis piezométricos críticos

Para determinação dos níveis piezométricos críticos da barragem, foram realizados estudos de estabilidade do talude de jusante do maciço, considerando a colmatação gradual do sistema de drenagem interno, como abordado anteriormente, verificando as poropressões fornecidas pelo modelo numérico no nível dos piezômetros PZ 23.1.3, PZ 23.2.3 e PZ 23.3.3 e também os coeficientes de segurança para cada cenário.

Como os estudos de estabilidade foram realizados para o regime de operação da barragem, considerou-se o coeficiente de segurança sendo, no mínimo, 1,5, como proposto pelo manual do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos e pela NBR 11682:2009. Visto isso, verificou-se no modelo numérico quais eram as poropressões em cada piezômetro quando o coeficiente de segurança fosse igual ou próximo de 1.5, obtendo, assim, os níveis piezométricos críticos da barragem.

### 3.7 Retroanálise da estabilidade da barragem

Com os níveis piezométricos da barragem definidos, foi possível realizar uma retroanálise da estabilidade do talude de jusante da barragem a partir das leituras dos piezômetros PZ 23.1.3, PZ 23.2.3 e PZ 23.3.3. Para isso, considerou-se as leituras no qual o nível d'água no reservatório fosse próximo da cota máxima do reservatório, utilizando-se da maior e da menor poropressão obtida em cada piezômetro, além do valor médio dentre as leituras. Para isso, utilizou-se os dados observados na Tabela 4, apresentada a seguir.

Tabela 4 – Poropressões para um nível d'água próximo à cota máxima do reservatório

Data da Leitura	Nível d'Água (m)	Poropressões (kPa)		
		PZ-23.1.3	PZ-23.2.3	PZ-23.3.3
17/06/2000	716,47	233,90	106,80	73,55
28/07/2000	716,36	232,33	105,23	73,65
05/08/2000	716,31	233,41	106,31	73,55
01/06/2001	716,44	231,54	104,44	71,30
08/06/2001	716,32	231,54	104,44	71,39
26/04/2002	716,39	228,70	101,60	70,32
14/07/2002	716,35	228,50	101,40	70,81
06/06/2003	716,41	228,21	101,11	72,18
13/06/2003	716,36	227,72	100,62	72,08
20/06/2003	716,41	227,62	100,52	72,08
25/06/2003	716,39	227,72	100,62	72,18
04/08/2004	716,39	226,05	98,95	70,81
26/06/2008	716,37	220,85	93,75	68,65
30/07/2009	716,52	220,46	93,36	67,86
03/09/2009	716,32	220,56	93,46	68,16
02/04/2009	716,41	220,66	93,56	68,75

Fonte: Elaborado pelo autor.

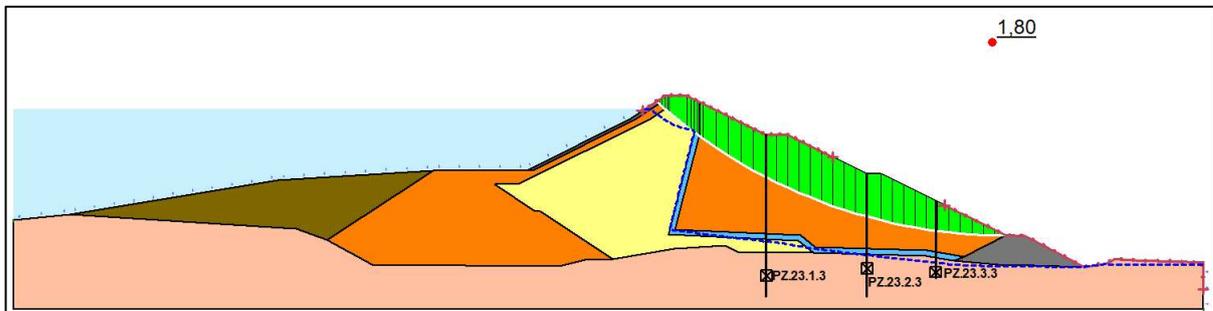
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos após aplicação dos métodos definidos para este estudo, em conjunto com discussões acerca da validade e da importância dos resultados.

### 4.1 Estudo da influência da colmatção do sistema de drenagem interno da barragem na estabilidade de taludes

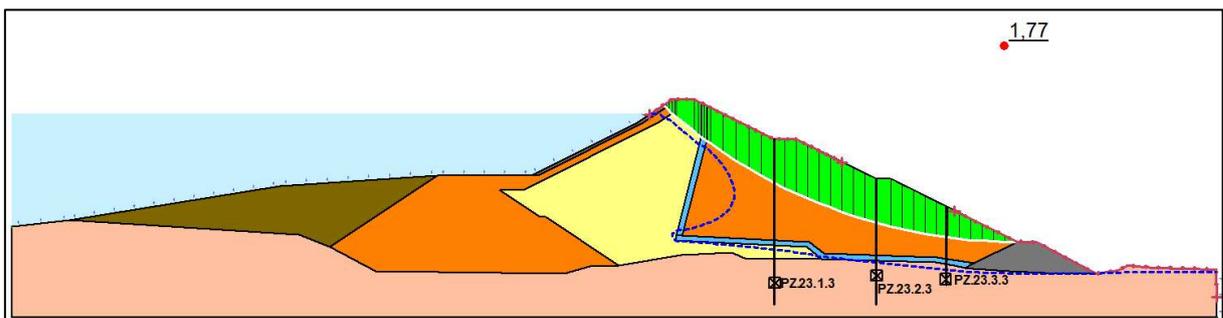
Como estipulado no capítulo de materiais e métodos, realizou-se o estudo da influência da colmatção do sistema de drenagem interno da barragem, reduzindo a permeabilidade do filtro a cada iteração. Baseado nisso, verificando os estudos de estabilidade para cada cenário, obteve-se os seguintes resultados.

Figura 25 – Estabilidade para o filtro em sua configuração original ( $k/1$ )

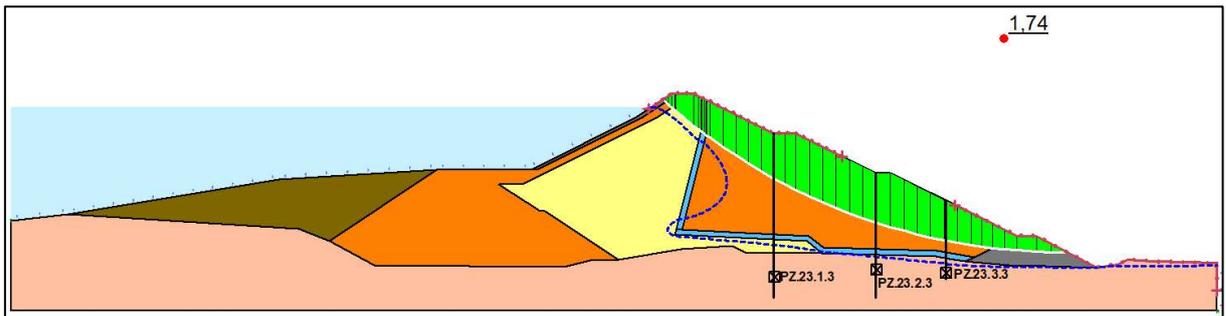


Fonte: Elaborado pelo autor.

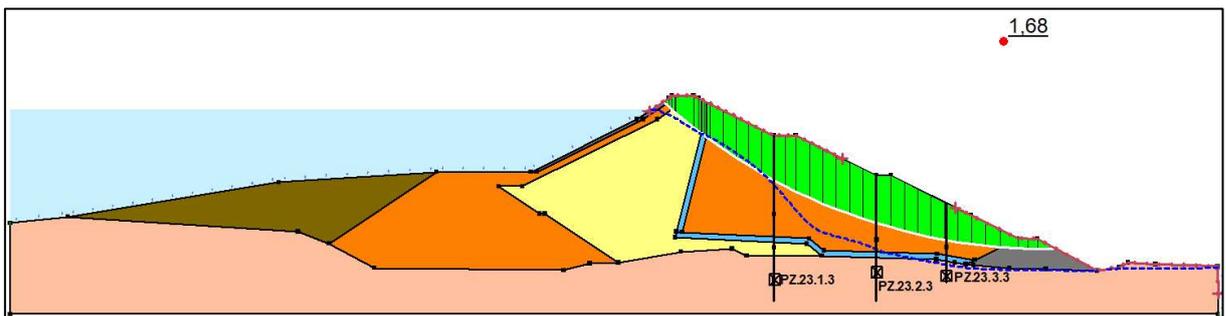
Figura 26 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 5 vezes ( $k/5$ )



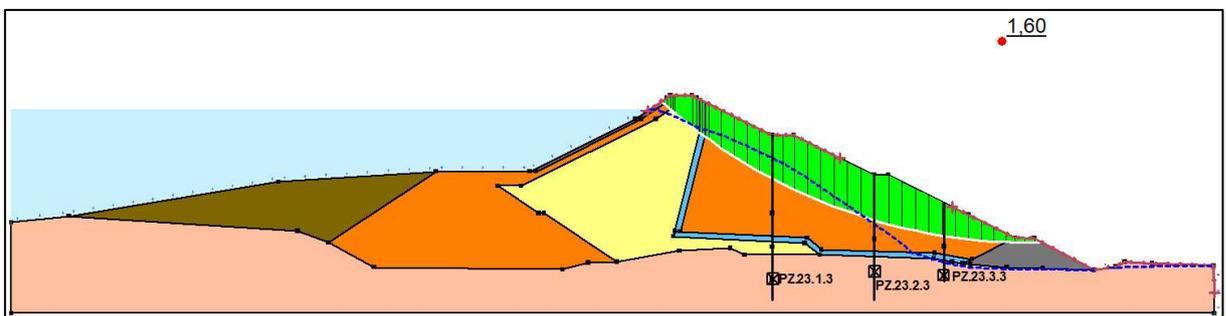
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 10 vezes ( $k/10$ )

Fonte: Elaborado pelo autor.

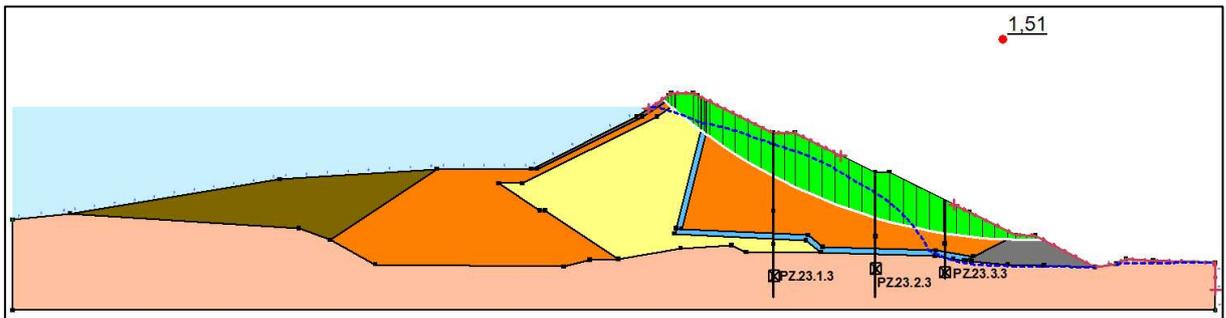
Figura 28 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 25 vezes ( $k/25$ )

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 50 vezes ( $k/50$ )

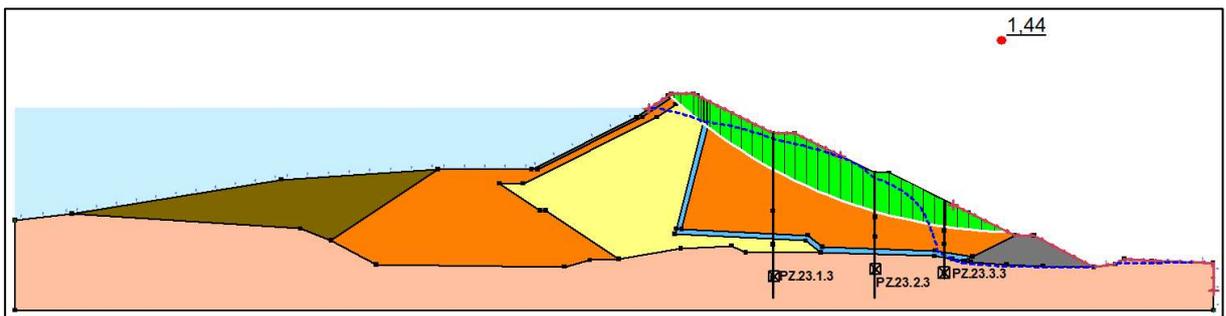
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 100 vezes ( $k/100$ )



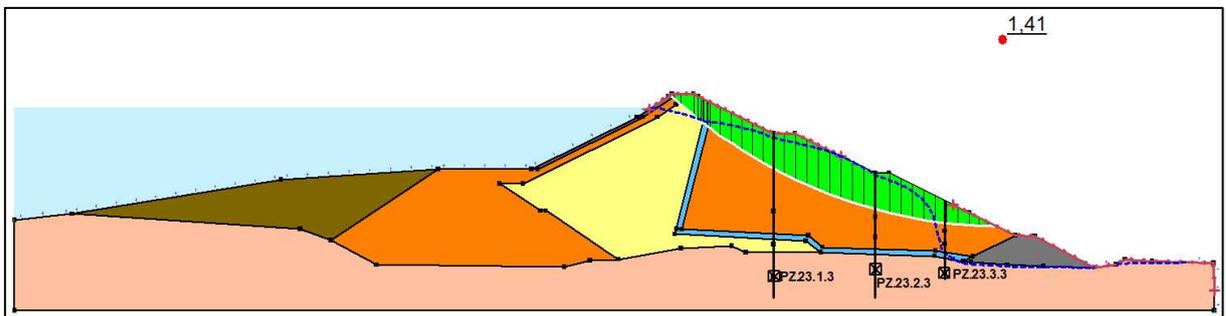
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 200 vezes ( $k/200$ )

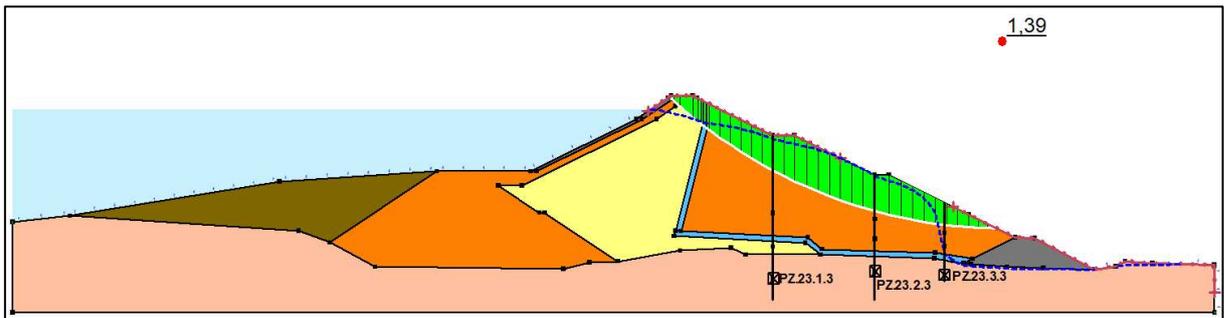


Fonte: Elaborado pelo autor.

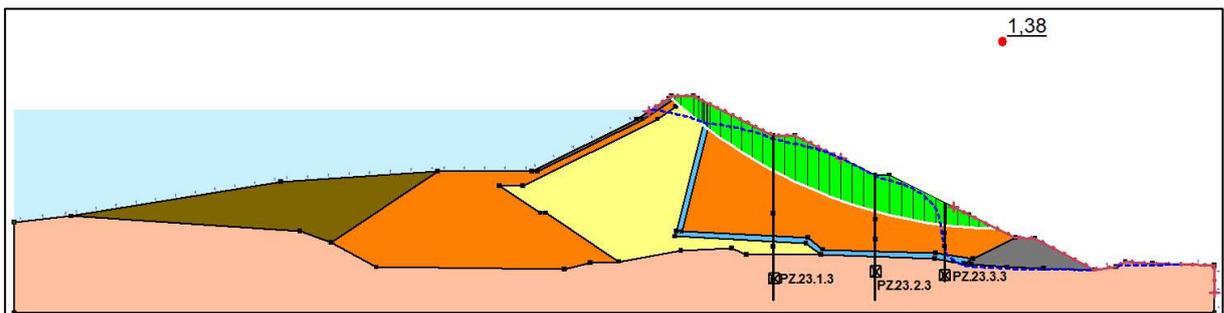
Figura 32 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 300 vezes ( $k/300$ )



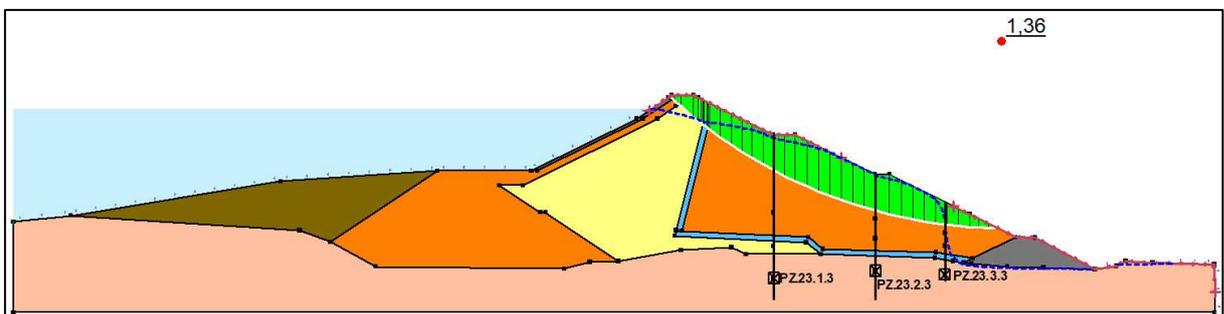
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 400 vezes ( $k/400$ )

Fonte: Elaborado pelo autor.

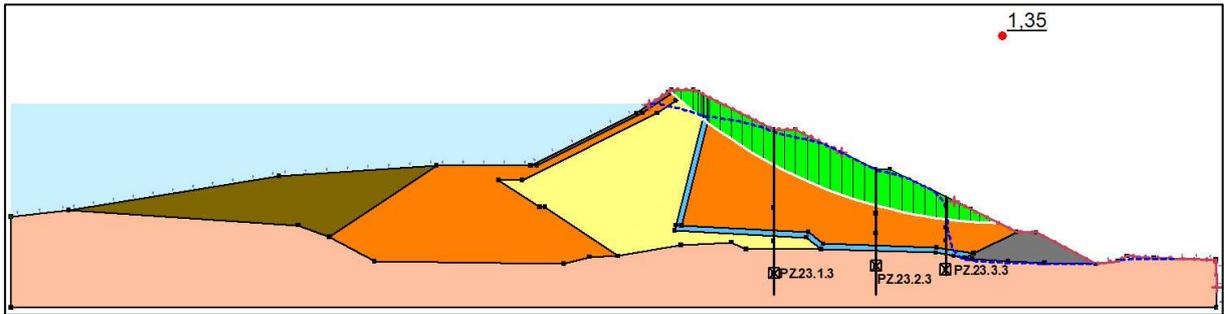
Figura 34 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 500 vezes ( $k/500$ )

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 1000 vezes ( $k/1000$ )

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 – Estabilidade para o filtro com permeabilidade reduzida em 1500 vezes ( $k/1500$ )



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com as simulações de colmatação do sistema de drenagem interno, verificou-se que, com a colmatação do filtro ao longo do tempo, existe uma mudança no fluxo de água através do maciço da barragem, o que contribuiu, fortemente, para uma redução da estabilidade da estrutura, evidenciado pela redução no coeficiente de segurança da estrutura, a qual apresentou um fator de 1,80, verificado na condição original do filtro ( $k/1$ ), para 1,35, na condição de colmatação com redução de 1500 vezes a permeabilidade do dreno ( $k/1500$ ).

Com a redução dos coeficientes de segurança ao longo das iterações, verificou-se que a estrutura atinge um coeficiente de segurança próximo ao mínimo admissível no cenário em que há uma redução de 100 vezes da permeabilidade original do dreno ( $k/100$ ), levando em consideração a condição do reservatório com o nível d'água na cota máxima.

#### 4.2 Níveis piezométricos críticos da barragem

Para cada cenário de colmatação do filtro da barragem, apresentado no subtópico anterior, obteve-se as poropressões em cada piezômetro, tal como os coeficientes de estabilidade de taludes para cada cenário. Estes resultados podem ser observados na Tabela 5.

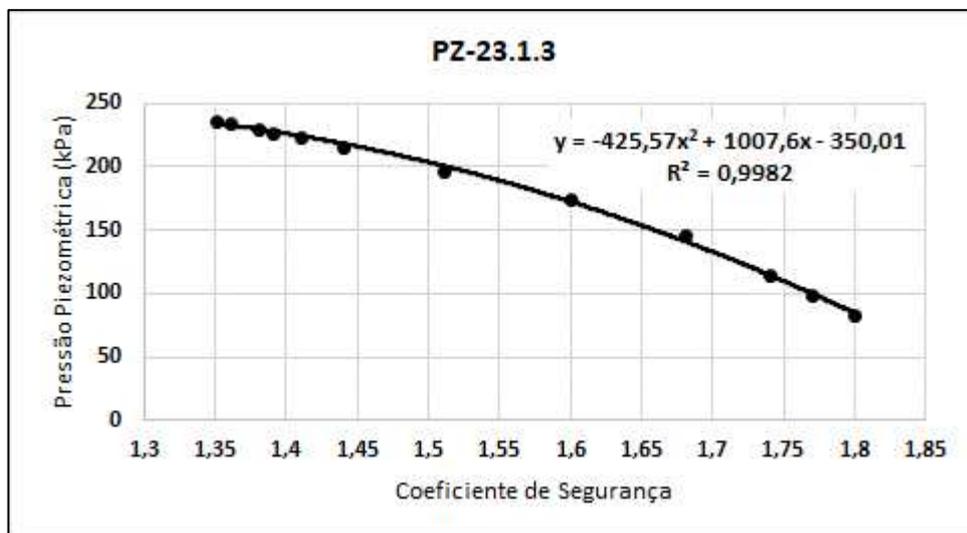
Tabela 5 – Poropressões e coeficientes de segurança para cada cenário de colmatação do filtro

Iteração	Cenário	K do filtro (m/s)	Poropressões (kPa)			Fator de Segurança
			PZ-23.1.3	PZ-23.2.3	PZ-23.3.3	
1	K/1	$1,00 \cdot 10^6$	82,7	24,8	24,1	1,80
2	K/5	$2,00 \cdot 10^7$	99,1	35,9	29	1,77
3	K/10	$1,00 \cdot 10^7$	115,3	46,8	33,9	1,74
4	K/25	$4,00 \cdot 10^8$	146,91	68,47	43,54	1,68
5	K/50	$2,00 \cdot 10^8$	174,18	87,68	52,28	1,60
<b>6</b>	<b>K/100</b>	<b><math>1,00 \cdot 10^8</math></b>	<b>197,37</b>	<b>105,56</b>	<b>60,66</b>	<b>1,51</b>
7	K/200	$5,00 \cdot 10^9$	216,38	119,88	67,73	1,44
8	K/300	$3,33 \cdot 10^9$	223,48	125,99	70,95	1,41
9	K/400	$2,50 \cdot 10^9$	227,34	129,49	72,89	1,39
10	K/500	$2,00 \cdot 10^9$	229,81	131,8	74,22	1,38
11	K/1000	$1,00 \cdot 10^9$	235,1	136,99	77,43	1,36
12	K/1500	$6,67 \cdot 10^{10}$	236,97	138,93	78,74	1,35

Fonte: Elaborado pelo autor.

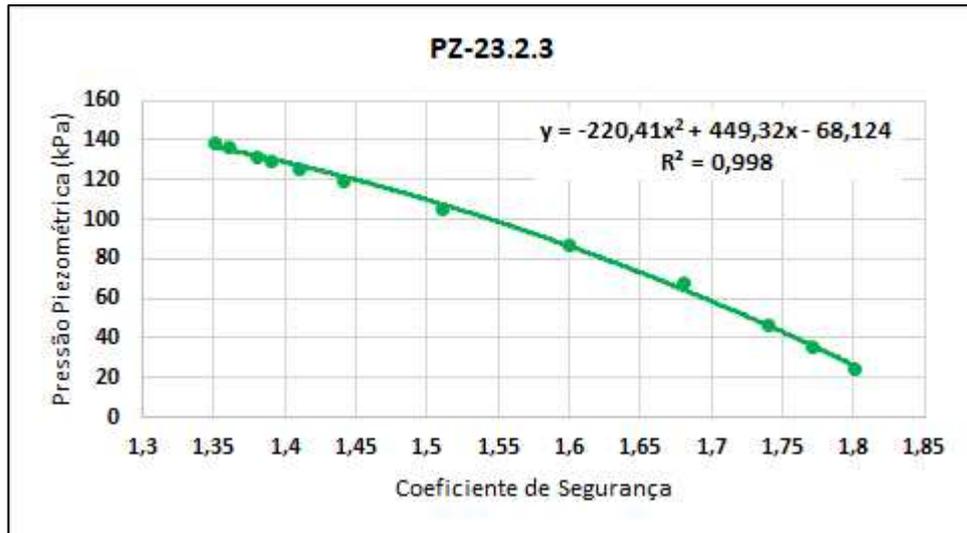
Como observado, o cenário que mais se aproxima do fator de segurança limite é aquele no qual se tem uma redução em 100 vezes do coeficiente de permeabilidade do filtro, onde obteve-se um fator de segurança 1,51. Verificando-se a correlação entre o fator de segurança e as poropressões, individualmente, para cada piezômetro, obteve-se os resultados a seguir.

Figura 37 – Correlação entre o fator de segurança e as poropressões no piezômetro PZ-23.1.3



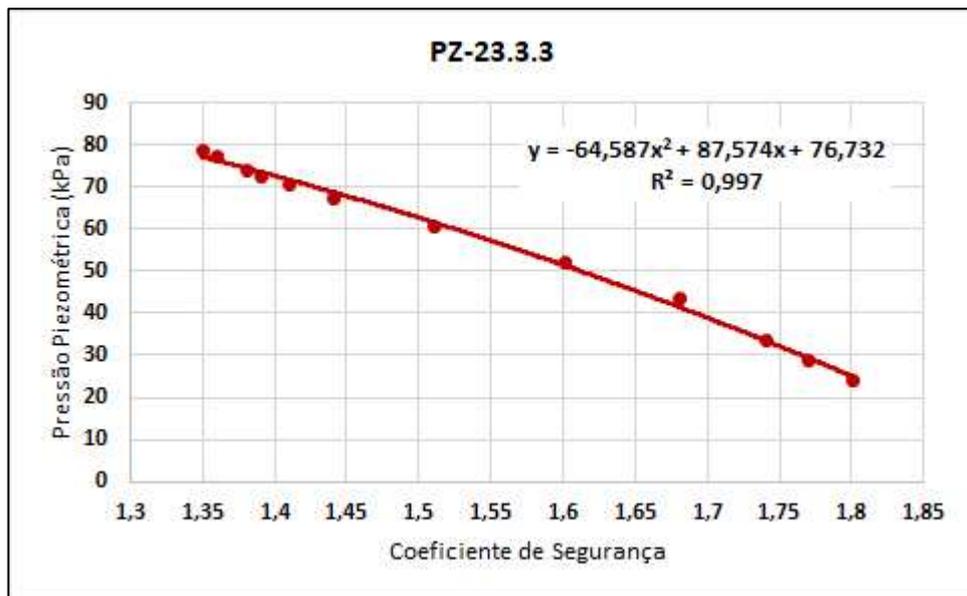
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 – Correlação entre o fator de segurança e as poropressões no piezômetro PZ-23.2.3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 – Correlação entre o fator de segurança e as poropressões no piezômetro PZ-23.3.3

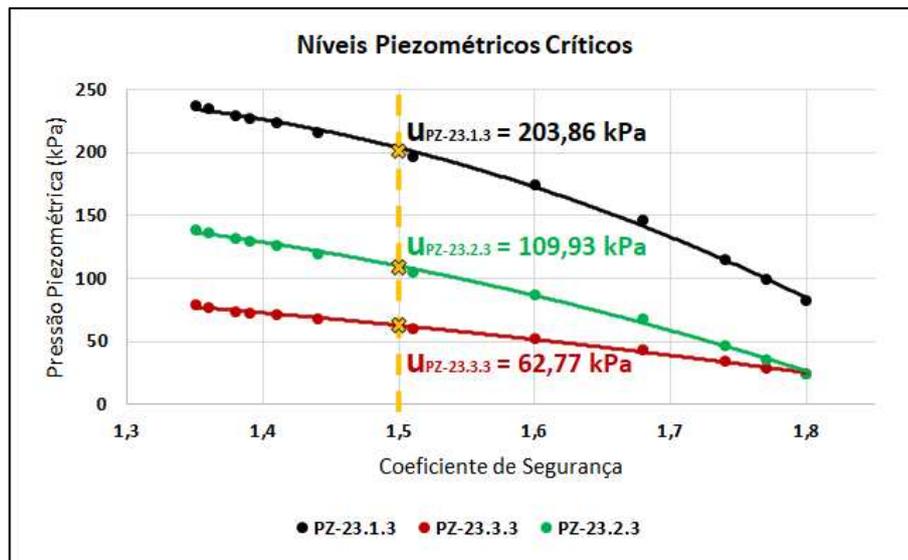


Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificando as correlações entre as poropressões e os coeficientes de segurança de cada piezômetro, é possível afirmar que estes fenômenos são claramente correlacionados, o que pode ser evidenciado pela variável “R<sup>2</sup>”, no qual quanto mais próximo de 1, mais as variáveis são correlacionadas. No caso dos resultados obtidos, em todos os piezômetros obteve-se um “R<sup>2</sup>” maior do que 0,99, ou seja, são bem correlacionados.

Além disso, para cada piezômetro, obteve-se uma equação que descreve o comportamento das variáveis. A partir destas equações, é possível determinar exatamente quais as poropressões para cada valor de coeficiente de segurança para a estabilidade do talude de jusante. Levando em consideração o coeficiente de segurança crítico sendo 1,5, para este tipo de análise, tal como estipulado pela NBR 11682:2009 e pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, obteve-se os níveis piezométricos críticos da barragem, que podem ser evidenciados na Figura 40.

Figura 40 – Níveis piezométricos críticos da Barragem Jaburu I



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3 Verificação da estabilidade da barragem a partir dos dados históricos

Com a definição dos níveis piezométricos críticos da barragem, foi possível determinar a condição de estabilidade da barragem a partir do histórico das leituras dos piezômetros. Os resultados obtidos são evidenciados na Tabela 6, a seguir.

Tabela 6 – Coeficientes de segurança da barragem Jaburu I

Valor Utilizado	PZ-23.1.3		PZ-23.2.3		PZ-23.3.3	
	Poropressão (kPa)	FS	Poropressão (kPa)	FS	Poropressão (kPa)	FS
<b>Mínimo</b>	220,46	1,43	93,36	1,57	67,86	1,45
<b>Médio</b>	227,49	1,39	100,39	1,54	71,08	1,42
<b>Máximo</b>	233,90	1,36	106,80	1,51	73,65	1,39

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como observado na Tabela 6, os piezômetros PZ-23.1.3 e PZ-23.3.3, chegaram a apresentar coeficientes de segurança 1,36 e 1,39, respectivamente, ou seja, abaixo do mínimo recomendado. Já o piezômetro PZ-23.1.3 apresentou coeficientes de segurança satisfatórios, mas com valores próximos do mínimo admissível.

Levando em consideração o pior cenário, a favor da segurança, tem-se que a barragem chegou a atingir um coeficiente de segurança de 1,36, ou seja, abaixo do mínimo valor recomendável, como verificado, também, no estudo de Souza *et al.* (2005), o que justifica a intervenção realizada por meio da construção do grande corpo de enrocamento na região de jusante da barragem, visto que isto pode ter aumentado a estabilidade da estrutura.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo compreendeu a verificação da influência da colmatção do sistema de drenagem interno de uma barragem na estabilidade da estrutura, utilizando a Barragem Jaburu I como estudo de caso, determinando, a partir disto, os níveis piezométricos críticos no qual a barragem deixa de atender os coeficientes de segurança mínimos estipulados.

No que diz respeito à influência da colmatção dos filtros da barragem, verificou-se que uma redução nos coeficientes de permeabilidade do sistema de drenagem interno acarreta em uma mudança do comportamento do fluxo de água através do maciço, ocasionando maiores poropressões na estrutura, além de diminuir os coeficientes de segurança de estabilidade do espaldar de jusante da barragem.

Além disso, pôde-se observar que a determinação dos níveis piezométricos críticos de uma barragem pode auxiliar na análise da estabilidade da estrutura, sendo uma ferramenta preciosa para uma verificação do comportamento da estrutura com uma frequência maior, sem a necessidade de realizar constantes estudos em campo, evitando custos operacionais para os órgãos gestores.

A partir disso, foi possível realizar uma retroanálise da estabilidade da Barragem Jaburu I a partir dos dados históricos dos piezômetros, verificando-se que a barragem apresentou coeficientes de segurança abaixo do mínimo valor recomendável, o que pôde justificar a intervenção realizada na estrutura, por meio da implementação do corpo de enrocamento à jusante da barragem.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se listar alguns pontos, como os evidenciados a seguir:

- a) determinar os níveis piezométricos da barragem também para o regime transiente, garantindo que seja possível verificar as condições de estabilidade da estrutura para os mais variados níveis d'água do reservatório;
- b) realizar os estudos, também, com base em parâmetros obtidos em laboratório, para garantir uma confiabilidade ainda maior ao modelo computacional de estudo;

- c) verificar os níveis piezométricos para as demais seções transversais da barragem, para garantir que toda a estrutura satisfaça os coeficientes de segurança mínimo estipulados.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Relatório Anual de Barragens 2020**. Brasília: SNISB, 2021. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2020/rsb-2020.pdf>>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009
- BAVEYE, P.; VANDEVIVERE, P.; HOYLE, B. L.; DELEO, P. C.; LOZADA, D. S. Environmental Impact and Mechanisms of the Biological Clogging of Saturated Soils and Aquifer Materials. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 28, n. 2, p. 123–191, abr. 1998.
- BISHOP, A. W. The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. **Géotechnique**, v. 5, n. 1, p. 7–17, mar. 1955.
- BLYTH, F. G. H.; FREITAS, M. H. de. **A Geology for Engineers**. 7 ed. Oxford: Elsevier, 1984.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: mecânica das rochas, fundações e obras de terra. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CEDERGREN, H. R. **Seepage, Drainage, and Flow Nets**. 3 ed. Sacramento: John Wiley & Sons, 1989.
- CERQUEIRA, H. **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- CHIOSSI, N. **Geologia de Engenharia**. 3 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013.
- COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI**: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. 1 ed. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.
- COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH). **Plano de Operação de Manutenção do Sistema de Água Bruta do Estado do Ceará - POM**. COGERH, Fortaleza. 2008.
- COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012.
- CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras**: Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 1996.
- DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 8 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- DUNNICLIFF, J. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. 1 ed.

Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1988.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D. **Geotechnical Engineering of Embankment Dams**. 1 ed. Rotterdam: A. A. Balkema, 1992.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. **Geotechnical Engineering of Dams**. 1 ed. Rotterdam: A. A. Balkema, 2005.

FONSECA, A. da R. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – Estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

FRANCO, L. ‘Estamos presos naquele dia’: 1 ano após rompimento de barragem de Brumadinho, os impactos duradouros da tragédia. **BBC News Brasil**, 2020. Disponível em <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-51228582>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

FREITAS, M. A. C. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Morgenstern-Price e Correia**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2011.

GAIER, R. V. Itaipu inicia manobra para ajudar Paraguai a escoar grãos pelo rio Paraná. **Isto é Dinheiro**, 2021. Disponível em <<https://www.istoedinheiro.com.br/itaipu-inicia-manobra-para/>>. Acesso em: 13 out. 2021.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

HARR, M. E. **Groundwater and Seepage**. 2 ed. New York: Dover Publications, 1991.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). World Register – General Synthesis. **ICOLD**, 2020. Disponível em: [https://www.icold-cigb.org/article/GB/world\\_register/general\\_synthesis/general-synthesis](https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/general-synthesis). Acesso em: 11 out. 2021.

KRAHN, J. **Stability Modeling with SLOPE/W – An Engineering Methodology**. 1 ed. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd, 2004.

MASSAD, F. **Obras de Terra: curso básico de geotecnia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

MASSAD, F. **Mecânica dos Solos Experimental**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

MACAMBIRA, I. Q. **Comportamento Hidráulico de Alguns Solos Lateríticos para Uso como Barreira Impermeável**. 2002. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MELLO, V. F. B de. Some lessons from unsuspected, real and fictitious problems in Earth dam engineering in Brazil. **Sixth Regional Conference for Africa on SOIL MECHANICS & FOUNDATION ENGINEERING**, Durban, v. 2, n. 1, p. 285-304, set. 1975.

MIGUEL, M. G.; ALBUQUERQUE, P. J. da R.; BENATTI, J. C. B.; MARQUE, R.; CARVALHO, D. de. Estudo da condutividade hidráulica do solo laterítico de Campinas/SP. **XIII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Curitiba, v. 1, n. 1, p. 261-266, 2006.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. **Géotechnique**, v. 15, n. 1, p. 79–93, mar. 1965.

NOGUEIRA JÚNIOR, J. **Possibilidades de colmatção química dos filtros e drenos da barragem de Porto Primavera (SP) por compostos de ferro**. 1988. Dissertação (Mestrado em Geologia Geral e de Aplicação) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. Geotextiles in Filtration: a state of the art review and remaining challenges. **International Symposium on Geosynthetics - GeoEng 2000**, Melbourne, p. 85-110, 2000.

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

PORTO, G. Represa Hoover. **InfoEscola**, 2021. Disponível em <<https://www.infoescola.com/energia/represa-hoover/>>. Acesso em: 13 out. 2021.

REMÍGIO, A. F. N. **Estudo da Colmatção Biológica de Sistemas Filtro-Drenantes Sintéticos de Obras de Disposição de Resíduos Domésticos Urbanos sob Condições Anaeróbias**. 2006. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2006.

RODRIGUEZ, T. T.; WEISS, L. A.; TEIXEIRA, R. S.; BRANCO, C. J. M. da C. Permeabilidade de Solo Laterítico por Diferentes Métodos. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 36, n. 2, p. 17–32, 17 out. 2015.

SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS (SRH). **Relatório da execução dos serviços de recuperação da Barragem Jaburu I – Tomo 1**. Fortaleza, 2010.

SILVA, J. P. M. da. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2011.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

SOUSA, L. N. **Avaliação do comportamento da fundação da barragem em rocha arenítica: Estudo de caso da Barragem Jaburu I**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

SOUZA, V. A. D. de; CASTRO, M. A. H. de; FONTENELLE, A. S.; OLIVEIRA, Y. C. Obras de Recuperação e Intervenções de Segurança Efetuadas na Fundação e Aterro Compactado da Barragem Jaburu I. **XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens**, abril de 2009.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. Influência da Vegetação na Estabilidade de Taludes na Bacia do Rio Ligeiro (PR). **Geociências**, v. 27, n. 3, p. 387–399, 2008.

THOMAS, H. H. **The engineering of large dams**. 1 ed. London: John Wiley & Sons, 1976.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, **Engineering and Design - Slope Stability**. Manual N° 1110-2-1902, Washington, 2003.

VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes. **Landslides: Analysis and Control - Transportation Research Board Special Report**, v. 176, n. 1, p. 11–33, 1978.

WHITMAN, R. V.; BAILEY, W. A. Use of Computers for Slope Stability Analysis. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 93, n. 4, p. 475–498, jul. 1967.

ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. Analysis of earth dam failures: A database approach. **Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards**, v. 3, n. 3, p. 184–189, 11 set. 2009.

## ANEXO A – DADOS DOS PIEZÔMETROS UTILIZADOS

Data da Leitura	Cota do Nível d'água (m)	PZ.23.1.3			PZ.23.2.3			PZ.23.3.3		
		Cota (m)	709,20		Cota (m)	698,20		Cota (m)	690,60	
		Prof. (m)	40,00		Prof. (m)	27,04		Prof. (m)	20,18	
		Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)
26/05/1999	715,03	16,47	692,73	230,76	16,47	681,73	103,66	12,38	678,22	76,49
27/05/1999	715,04	16,38	692,82	231,64	16,38	681,82	104,54	12,63	677,97	74,04
28/05/1999	715,04	16,36	692,84	231,84	16,36	681,84	104,74	12,98	677,62	70,61
29/05/1999	715,07	16,35	692,85	231,94	16,35	681,85	104,84	12,95	677,65	70,90
30/05/1999	715,1	16,36	692,84	231,84	16,36	681,84	104,74	12,93	677,67	71,10
31/05/1999	715,1	16,36	692,84	231,84	16,36	681,84	104,74	12,95	677,65	70,90
01/06/1999	715,14	16,27	692,93	232,72	16,27	681,93	105,62	12,97	677,63	70,71
02/06/1999	715,14	16,29	692,91	232,52	16,29	681,91	105,43	12,80	677,80	72,38
03/06/1999	715,15	16,34	692,86	232,03	16,34	681,86	104,93	12,81	677,79	72,28
04/06/1999	715,15	16,35	692,85	231,94	16,35	681,85	104,84	12,74	677,86	72,96
05/06/1999	715,16	16,24	692,96	233,01	16,24	681,96	105,92	12,67	677,93	73,65
06/06/1999	715,16	16,26	692,94	232,82	16,26	681,94	105,72	12,70	677,90	73,36
07/06/1999	715,16	16,29	692,91	232,52	16,29	681,91	105,43	12,70	677,90	73,36
08/06/1999	715,17	16,31	692,89	232,33	16,31	681,89	105,23	12,70	677,90	73,36
09/06/1999	715,17	16,18	693,02	233,60	16,18	682,02	106,50	12,70	677,90	73,36
10/06/1999	715,18	16,18	693,02	233,60	16,18	682,02	106,50	12,69	677,91	73,45
11/06/1999	715,2	16,21	692,99	233,31	16,21	681,99	106,21	12,70	677,90	73,36
12/06/1999	715,2	16,19	693,01	233,50	16,19	682,01	106,41	12,74	677,86	72,96
13/06/1999	715,98	16,20	693,00	233,41	16,20	682,00	106,31	12,71	677,89	73,26
14/06/1999	715,92	16,17	693,03	233,70	16,17	682,03	106,60	12,76	677,84	72,77
10/07/1999	715,89	16,08	693,12	234,58	16,08	682,12	107,48	12,56	678,04	74,73
28/08/1999	715,78	16,14	693,06	234,00	16,14	682,06	106,90	12,61	677,99	74,24
04/09/1999	715,71	16,12	693,08	234,19	16,12	682,08	107,09	12,66	677,94	73,75
11/09/1999	715,64	16,04	693,16	234,98	16,04	682,16	107,88	12,64	677,96	73,94
18/09/1999	715,57	16,05	693,15	234,88	16,05	682,15	107,78	12,63	677,97	74,04
25/09/1999	715,5	16,04	693,16	234,98	16,04	682,16	107,88	12,60	678,00	74,34
02/10/1999	715,43	16,08	693,12	234,58	16,08	682,12	107,48	12,63	677,97	74,04
09/10/1999	715,36	16,10	693,10	234,39	16,10	682,10	107,29	12,65	677,95	73,85
16/10/1999	715,2	16,03	693,17	235,07	16,03	682,17	107,98	12,60	678,00	74,34
23/10/1999	715,11	16,00	693,20	235,37	16,00	682,20	108,27	12,50	678,10	75,32
30/10/1999	715,09	16,04	693,16	234,98	16,04	682,16	107,88	12,49	678,11	75,42
13/11/1999	715,04	16,03	693,17	235,07	16,03	682,17	107,98	12,49	678,11	75,42
20/11/1999	714,96	16,04	693,16	234,98	16,04	682,16	107,88	12,51	678,09	75,22
27/11/1999	714,88	16,02	693,18	235,17	16,02	682,18	108,07	12,49	678,11	75,42
04/12/1999	714,82	16,00	693,20	235,37	16,00	682,20	108,27	12,47	678,13	75,61
11/12/1999	714,83	15,99	693,21	235,47	15,99	682,21	108,37	12,46	678,14	75,71
18/12/1999	714,87	15,99	693,21	235,47	15,99	682,21	108,37	12,44	678,16	75,91
25/12/1999	714,94	15,97	693,23	235,66	15,97	682,23	108,56	12,43	678,17	76,00
01/01/2000	714,98	15,95	693,25	235,86	15,95	682,25	108,76	12,44	678,16	75,91
08/01/2000	714,94	15,98	693,22	235,56	15,98	682,22	108,47	12,44	678,16	75,91
15/01/2000	714,9	16,00	693,20	235,37	16,00	682,20	108,27	12,55	678,05	74,83
22/01/2000	714,98	16,09	693,11	234,49	16,09	682,11	107,39	12,00	678,60	80,22
29/01/2000	715,09	16,18	693,02	233,60	16,18	682,02	106,50		690,60	
05/02/2000	715,28	16,12	693,08	234,19	16,12	682,08	107,09	12,64	677,96	73,94
12/02/2000	715,53	16,09	693,11	234,49	16,09	682,11	107,39	12,62	677,98	74,14

Data da Leitura	Cota do Nível d'água (m)	PZ.23.1.3			PZ.23.2.3			PZ.23.3.3		
		Cota (m)	709,20		Cota (m)	698,20		Cota (m)	690,60	
		Prof. (m)	40,00		Prof. (m)	27,04		Prof. (m)	20,18	
		Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)
19/02/2000	715,66	16,03	693,17	235,07	16,03	682,17	107,98	12,60	678,00	74,34
26/02/2000	715,81	16,07	693,13	234,68	16,07	682,13	107,58	12,61	677,99	74,24
04/03/2000	716,62	16,07	693,13	234,68	16,07	682,13	107,58	12,62	677,98	74,14
11/03/2000	716,57	16,08	693,12	234,58	16,08	682,12	107,48	12,59	678,01	74,44
18/03/2000	716,55	16,07	693,13	234,68	16,07	682,13	107,58	12,56	678,04	74,73
13/05/2000	716,54	16,08	693,12	234,58	16,08	682,12	107,48	12,61	677,99	74,24
20/05/2000	716,51	16,09	693,11	234,49	16,09	682,11	107,39	12,63	677,97	74,04
27/05/2000	716,53	16,10	693,10	234,39	16,10	682,10	107,29	12,64	677,96	73,94
02/06/2000	716,49	16,11	693,09	234,29	16,11	682,09	107,19	12,66	677,94	73,75
09/06/2000	716,46	16,13	693,07	234,09	16,13	682,07	106,99	12,67	677,93	73,65
17/06/2000	716,47	16,15	693,05	233,90	16,15	682,05	106,80	12,68	677,92	73,55
28/07/2000	716,36	16,31	692,89	232,33	16,31	681,89	105,23	12,67	677,93	73,65
05/08/2000	716,31	16,20	693,00	233,41	16,20	682,00	106,31	12,68	677,92	73,55
12/08/2000	715,02	16,20	693,00	233,41	16,20	682,00	106,31	12,69	677,91	73,45
19/08/2000	714,98	16,20	693,00	233,41	16,20	682,00	106,31	12,70	677,90	73,36
26/08/2000	714,92	16,20	693,00	233,41	16,20	682,00	106,31	12,71	677,89	73,26
22/12/2000	714,88	16,47	692,73	230,76	16,47	681,73	103,66	13,08	677,52	69,63
29/12/2000	714,85	16,45	692,75	230,95	16,45	681,75	103,86	13,09	677,51	69,53
05/01/2001	714,81	16,42	692,78	231,25	16,42	681,78	104,15	13,10	677,50	69,43
12/01/2001	714,77	16,44	692,76	231,05	16,44	681,76	103,95	13,09	677,51	69,53
19/01/2001	714,75	16,46	692,74	230,86	16,46	681,74	103,76	13,08	677,52	69,63
26/01/2001	714,74	16,48	692,72	230,66	16,48	681,72	103,56	13,07	677,53	69,73
02/02/2001	714,77	16,50	692,70	230,46	16,50	681,70	103,37	13,09	677,51	69,53
09/02/2001	714,85	16,52	692,68	230,27	16,52	681,68	103,17	13,11	677,49	69,34
16/02/2001	714,84	16,51	692,69	230,37	16,51	681,69	103,27	13,10	677,50	69,43
23/02/2001	715,11	16,50	692,70	230,46	16,50	681,70	103,37	13,09	677,51	69,53
02/03/2001	716,68	16,50	692,70	230,46	16,50	681,70	103,37	13,09	677,51	69,53
09/03/2001	716,67	16,50	692,70	230,46	16,50	681,70	103,37	13,09	677,51	69,53
16/03/2001	716,63	16,50	692,70	230,46	16,50	681,70	103,37	13,09	677,51	69,53
28/04/2001	716,59	16,39	692,81	231,54	16,39	681,81	104,44	12,93	677,67	71,10
04/05/2001	716,54	16,39	692,81	231,54	16,39	681,81	104,44	12,96	677,64	70,81
11/05/2001	716,5	16,39	692,81	231,54	16,39	681,81	104,44	12,98	677,62	70,61
18/05/2001	716,5	16,39	692,81	231,54	16,39	681,81	104,44	12,90	677,70	71,39
25/05/2001	716,49	16,39	692,81	231,54	16,39	681,81	104,44	12,91	677,69	71,30
01/06/2001	716,44	16,39	692,81	231,54	16,39	681,81	104,44	12,91	677,69	71,30
08/06/2001	716,32	16,39	692,81	231,54	16,39	681,81	104,44	12,90	677,70	71,39
15/06/2001	716,27	16,39	692,81	231,54	16,39	681,81	104,44	12,89	677,71	71,49
22/06/2001	716,21	16,39	692,81	231,54	16,39	681,81	104,44	12,89	677,71	71,49
06/07/2001	716,13	16,40	692,80	231,45	16,40	681,80	104,35	12,90	677,70	71,39
13/07/2001	715,97	16,41	692,79	231,35	16,41	681,79	104,25	12,91	677,69	71,30
20/07/2001	715,69	16,42	692,78	231,25	16,42	681,78	104,15	12,92	677,68	71,20
27/07/2001	715,63	16,43	692,77	231,15	16,43	681,77	104,05	12,93	677,67	71,10
17/08/2001	715,56	16,37	692,83	231,74	16,37	681,83	104,64	12,73	677,87	73,06
14/09/2001	715,33	16,40	692,80	231,45	16,40	681,80	104,35	12,60	678,00	74,34
21/09/2001	715,23	16,42	692,78	231,25	16,42	681,78	104,15	12,65	677,95	73,85
28/09/2001	715,16	16,43	692,77	231,15	16,43	681,77	104,05	12,70	677,90	73,36
12/10/2001	715,07	16,50	692,70	230,46	16,50	681,70	103,37	12,84	677,76	71,98
26/10/2001	715	16,61	692,59	229,39	16,61	681,59	102,29	12,98	677,62	70,61

Data da Leitura	Cota do Nível d'água (m)	PZ.23.1.3			PZ.23.2.3			PZ.23.3.3		
		Cota (m)	709,20		Cota (m)	698,20		Cota (m)	690,60	
		Prof. (m)	40,00		Prof. (m)	27,04		Prof. (m)	20,18	
		Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)
02/11/2001	714,91	16,68	692,52	228,70	16,68	681,52	101,60	13,10	677,50	69,43
09/11/2001	714,83	16,67	692,53	228,80	16,67	681,53	101,70	13,08	677,52	69,63
16/11/2001	714,76	16,66	692,54	228,90	16,66	681,54	101,80	13,06	677,54	69,83
23/11/2001	714,68	16,68	692,52	228,70	16,68	681,52	101,60	13,07	677,53	69,73
30/11/2001	714,6	16,70	692,50	228,50	16,70	681,50	101,40	13,08	677,52	69,63
07/12/2001	714,76	16,72	692,48	228,31	16,72	681,48	101,21	13,09	677,51	69,53
14/12/2001	714,68	16,74	692,46	228,11	16,74	681,46	101,01	13,10	677,50	69,43
21/12/2001	714,6	16,75	692,45	228,01	16,75	681,45	100,91	13,11	677,49	69,34
19/04/2002	716,28	16,70	692,50	228,50	16,70	681,50	101,40	13,05	677,55	69,92
26/04/2002	716,39	16,68	692,52	228,70	16,68	681,52	101,60	13,01	677,59	70,32
03/05/2002	716,51	16,66	692,54	228,90	16,66	681,54	101,80	12,97	677,63	70,71
10/05/2002	716,57	16,70	692,50	228,50	16,70	681,50	101,40	12,99	677,61	70,51
17/05/2002	716,54	16,74	692,46	228,11	16,74	681,46	101,01	13,00	677,60	70,41
24/05/2002	716,49	16,74	692,46	228,11	16,74	681,46	101,01	13,00	677,60	70,41
31/05/2002	716,49	16,74	692,46	228,11	16,74	681,46	101,01	13,00	677,60	70,41
07/06/2002	716,46	16,74	692,46	228,11	16,74	681,46	101,01	13,00	677,60	70,41
14/07/2002	716,35	16,70	692,50	228,50	16,70	681,50	101,40	12,96	677,64	70,81
04/10/2002	715,47	16,80	692,40	227,52	16,80	681,40	100,42	13,06	677,54	69,83
11/10/2002	715,37	16,80	692,40	227,52	16,80	681,40	100,42	13,05	677,55	69,92
18/10/2002	715,25	16,80	692,40	227,52	16,80	681,40	100,42	13,04	677,56	70,02
25/10/2002	715,15	16,80	692,40	227,52	16,80	681,40	100,42	13,02	677,58	70,22
01/11/2002	715,07	16,80	692,40	227,52	16,80	681,40	100,42	13,00	677,60	70,41
08/11/2002	714,99	16,79	692,41	227,62	16,79	681,41	100,52	12,99	677,61	70,51
15/11/2002	714,91	16,78	692,42	227,72	16,78	681,42	100,62	12,98	677,62	70,61
22/11/2002	714,81	16,77	692,43	227,82	16,77	681,43	100,72	12,97	677,63	70,71
29/11/2002	714,73	16,77	692,43	227,82	16,77	681,43	100,72	12,96	677,64	70,81
06/12/2002	714,65	16,77	692,43	227,82	16,77	681,43	100,72	12,95	677,65	70,90
13/12/2002	714,58	16,77	692,43	227,82	16,77	681,43	100,72	12,94	677,66	71,00
20/12/2002	714,52	16,77	692,43	227,82	16,77	681,43	100,72	12,91	677,69	71,30
27/12/2002	714,45	16,77	692,43	227,82	16,77	681,43	100,72	12,88	677,72	71,59
03/01/2003	714,35	16,76	692,44	227,91	16,76	681,44	100,82	12,86	677,74	71,79
10/01/2003	714,29	16,75	692,45	228,01	16,75	681,45	100,91	12,84	677,76	71,98
17/01/2003	714,21	16,74	692,46	228,11	16,74	681,46	101,01	12,82	677,78	72,18
24/01/2003	714,17	16,73	692,47	228,21	16,73	681,47	101,11	12,85	677,75	71,89
06/06/2003	716,41	16,73	692,47	228,21	16,73	681,47	101,11	12,82	677,78	72,18
13/06/2003	716,36	16,78	692,42	227,72	16,78	681,42	100,62	12,83	677,77	72,08
20/06/2003	716,41	16,79	692,41	227,62	16,79	681,41	100,52	12,83	677,77	72,08
25/06/2003	716,39	16,78	692,42	227,72	16,78	681,42	100,62	12,82	677,78	72,18
02/07/2003	716,33	16,78	692,42	227,72	16,78	681,42	100,62	12,81	677,79	72,28
09/07/2003	716,23	16,79	692,41	227,62	16,79	681,41	100,52	12,81	677,79	72,28
05/11/2003	714,94	16,95	692,25	226,05	16,95	681,25	98,95	13,04	677,56	70,02
12/11/2003	714,86	16,97	692,23	225,86	16,97	681,23	98,76	13,04	677,56	70,02
19/11/2003	714,78	16,98	692,22	225,76	16,98	681,22	98,66	13,04	677,56	70,02
26/11/2003	714,69	16,98	692,22	225,76	16,98	681,22	98,66	13,05	677,55	69,92
03/12/2003	714,61	16,99	692,21	225,66	16,99	681,21	98,56	13,05	677,55	69,92
10/12/2003	714,53	17,00	692,20	225,56	17,00	681,20	98,46	13,05	677,55	69,92
17/12/2003	714,46	17,04	692,16	225,17	17,04	681,16	98,07	13,08	677,52	69,63
24/12/2003	714,39	17,05	692,15	225,07	17,05	681,15	97,97	13,10	677,50	69,43

Data da Leitura	Cota do Nível d'água (m)	PZ.23.1.3			PZ.23.2.3			PZ.23.3.3		
		Cota (m)	709,20		Cota (m)	698,20		Cota (m)	690,60	
		Prof. (m)	40,00		Prof. (m)	27,04		Prof. (m)	20,18	
		Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)
31/12/2003	714,33	17,06	692,14	224,97	17,06	681,14	97,87	13,10	677,50	69,43
07/01/2004	714,28	17,07	692,13	224,87	17,07	681,13	97,78	13,11	677,49	69,34
14/01/2004	714,23	17,06	692,14	224,97	17,06	681,14	97,87	13,11	677,49	69,34
21/01/2004	714,31	17,05	692,15	225,07	17,05	681,15	97,97	13,11	677,49	69,34
28/01/2004	714,61	17,03	692,17	225,27	17,03	681,17	98,17	13,05	677,55	69,92
04/02/2004	715,25	16,99	692,21	225,66	16,99	681,21	98,56	13,00	677,60	70,41
03/03/2004	716,64	16,97	692,23	225,86	16,97	681,23	98,76	13,01	677,59	70,32
04/03/2004	716,55	16,97	692,23	225,86	16,97	681,23	98,76	13,00	677,60	70,41
10/03/2004	716,71	16,97	692,23	225,86	16,97	681,23	98,76	13,00	677,60	70,41
10/03/2004	716,71	16,97	692,23	225,86	16,97	681,23	98,76	13,00	677,60	70,41
17/03/2004	716,62	16,97	692,23	225,86	16,97	681,23	98,76	12,99	677,61	70,51
17/03/2004	716,62	16,97	692,23	225,86	16,97	681,23	98,76	12,99	677,61	70,51
24/03/2004	716,59	16,95	692,25	226,05	16,95	681,25	98,95	12,99	677,61	70,51
24/03/2004	716,59	16,95	692,25	226,05	16,95	681,25	98,95	12,99	677,61	70,51
31/03/2004	716,57	16,93	692,27	226,25	16,93	681,27	99,15	12,98	677,62	70,61
31/03/2004	716,57	16,93	692,27	226,25	16,93	681,27	99,15	12,98	677,62	70,61
03/04/2004	716,6	16,97	692,23	225,86	16,97	681,23	98,76	13,01	677,59	70,32
03/04/2004	716,6	16,97	692,23	225,86	16,97	681,23	98,76	13,01	677,59	70,32
26/05/2004	716,55	16,93	692,27	226,25	16,93	681,27	99,15	13,02	677,58	70,22
09/06/2004	716,51	16,96	692,24	225,95	16,96	681,24	98,85	13,05	677,55	69,92
23/06/2004	716,51	15,96	693,24	235,76	15,96	682,24	108,66	13,03	677,57	70,12
07/07/2004	716,49	16,94	692,26	226,15	16,94	681,26	99,05	13,00	677,60	70,41
21/07/2004	716,54	16,94	692,26	226,15	16,94	681,26	99,05	12,98	677,62	70,61
04/08/2004	716,39	16,95	692,25	226,05	16,95	681,25	98,95	12,96	677,64	70,81
18/08/2004	716,29	16,98	692,22	225,76	16,98	681,22	98,66	12,98	677,62	70,61
01/09/2004	716,15	17,00	692,20	225,56	17,00	681,20	98,46	13,01	677,59	70,32
29/09/2004	715,7	17,16	692,04	223,99	17,16	681,04	96,89	13,15	677,45	68,94
13/10/2004	715,54	17,14	692,06	224,19	17,14	681,06	97,09	13,08	677,52	69,63
10/11/2004	715,24	17,27	691,93	222,91	17,27	680,93	95,81	13,25	677,35	67,96
01/12/2004	715	17,20	692,00	223,60	17,20	681,00	96,50	13,22	677,38	68,26
22/12/2004	714,81	17,21	691,99	223,50	17,21	680,99	96,40	13,17	677,43	68,75
09/02/2005	714,56	17,30	691,90	222,62	17,30	680,90	95,52	13,23	677,37	68,16
17/02/2005	714,54	17,26	691,94	223,01	17,26	680,94	95,91	13,20	677,40	68,45
13/03/2005	714,5	17,33	691,87	222,32	17,33	680,87	95,23	13,26	677,34	67,86
17/03/2005	714,51	17,39	691,81	221,74	17,39	680,81	94,64	13,32	677,28	67,28
31/03/2005	714,99	17,40	691,80	221,64	17,40	680,80	94,54	13,32	677,28	67,28
14/04/2005	715,42	17,37	691,83	221,93	17,37	680,83	94,83	13,29	677,31	67,57
28/04/2005	715,7	17,39	691,81	221,74	17,39	680,81	94,64	13,31	677,29	67,37
12/05/2005	715,86	17,36	691,84	222,03	17,36	680,84	94,93	13,28	677,32	67,67
26/05/2005	715,97	17,37	691,83	221,93	17,37	680,83	94,83	13,27	677,33	67,77
09/06/2005	716,07	17,37	691,83	221,93	17,37	680,83	94,83	13,28	677,32	67,67
23/06/2005	716,05	17,36	691,84	222,03	17,36	680,84	94,93	13,29	677,31	67,57
30/06/2005	715,98	17,33	691,87	222,32	17,33	680,87	95,23	13,25	677,35	67,96
21/07/2005	715,79	17,37	691,83	221,93	17,37	680,83	94,83	13,27	677,33	67,77
04/08/2005	715,65	17,37	691,83	221,93	17,37	680,83	94,83	13,25	677,35	67,96
25/08/2005	715,5	17,38	691,82	221,83	17,38	680,82	94,74	13,26	677,34	67,86
08/09/2005	715,37	17,40	691,80	221,64	17,40	680,80	94,54	13,26	677,34	67,86
22/09/2005	715,23	17,40	691,80	221,64	17,40	680,80	94,54	13,26	677,34	67,86

Data da Leitura	Cota do Nível d'água (m)	PZ.23.1.3			PZ.23.2.3			PZ.23.3.3		
		Cota (m)	709,20		Cota (m)	698,20		Cota (m)	690,60	
		Prof. (m)	40,00		Prof. (m)	27,04		Prof. (m)	20,18	
		Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)
06/10/2005	715,07	17,38	691,82	221,83	17,38	680,82	94,74	13,24	677,36	68,06
20/10/2005	714,88	17,41	691,79	221,54	17,41	680,79	94,44	13,26	677,34	67,86
03/11/2005	714,68	17,38	691,82	221,83	17,38	680,82	94,74	13,24	677,36	68,06
17/11/2005	714,48	17,42	691,78	221,44	17,42	680,78	94,34	13,28	677,32	67,67
01/12/2005	714,27	17,42	691,78	221,44	17,42	680,78	94,34	13,27	677,33	67,77
15/12/2005	714,11	17,47	691,73	220,95	17,47	680,73	93,85	13,28	677,32	67,67
29/12/2005	713,96	17,49	691,71	220,76	17,49	680,71	93,66	13,28	677,32	67,67
12/01/2006	713,82	17,47	691,73	220,95	17,47	680,73	93,85	13,28	677,32	67,67
25/01/2006	713,67	17,45	691,75	221,15	17,45	680,75	94,05	13,28	677,32	67,67
09/02/2006	713,49	17,51	691,69	220,56	17,51	680,69	93,46	13,32	677,28	67,28
23/02/2006	713,44	17,52	691,68	220,46	17,52	680,68	93,36	13,31	677,29	67,37
09/03/2006	713,56	17,47	691,73	220,95	17,47	680,73	93,85	13,28	677,32	67,67
23/03/2006	713,59	17,49	691,71	220,76	17,49	680,71	93,66	13,30	677,30	67,47
06/04/2006	713,96	17,51	691,69	220,56	17,51	680,69	93,46	13,32	677,28	67,28
03/05/2006	714,87	17,46	691,74	221,05	17,46	680,74	93,95	13,25	677,35	67,96
18/05/2006	715,57	17,44	691,76	221,25	17,44	680,76	94,15	13,24	677,36	68,06
01/06/2006	715,72	17,41	691,79	221,54	17,41	680,79	94,44	13,22	677,38	68,26
15/06/2006	715,8	17,44	691,76	221,25	17,44	680,76	94,15	13,24	677,36	68,06
28/06/2006	715,78	17,44	691,76	221,25	17,44	680,76	94,15	13,25	677,35	67,96
13/07/2006	715,78	17,45	691,75	221,15	17,45	680,75	94,05	13,26	677,34	67,86
27/07/2006	715,69	17,45	691,75	221,15	17,45	680,75	94,05	13,27	677,33	67,77
10/08/2006	715,59	17,44	691,76	221,25	17,44	680,76	94,15	13,25	677,35	67,96
24/08/2006	715,49	17,45	691,75	221,15	17,45	680,75	94,05	13,26	677,34	67,86
07/09/2006	715,39	17,45	691,75	221,15	17,45	680,75	94,05	13,25	677,35	67,96
21/09/2006	715,24	17,46	691,74	221,05	17,46	680,74	93,95	13,27	677,33	67,77
05/10/2006	715,07	17,46	691,74	221,05	17,46	680,74	93,95	13,24	677,36	68,06
19/10/2006	714,88	17,48	691,72	220,85	17,48	680,72	93,75	13,26	677,34	67,86
02/11/2006	714,7	17,48	691,72	220,85	17,48	680,72	93,75	13,27	677,33	67,77
16/11/2006	714,51	17,46	691,74	221,05	17,46	680,74	93,95	13,26	677,34	67,86
30/11/2006	714,3	17,51	691,69	220,56	17,51	680,69	93,46	13,28	677,32	67,67
14/12/2006	714,11	17,52	691,68	220,46	17,52	680,68	93,36	13,28	677,32	67,67
28/12/2006	713,94	17,53	691,67	220,36	17,53	680,67	93,26	13,28	677,32	67,67
11/01/2007	713,78	17,50	691,70	220,66	17,50	680,70	93,56	13,28	677,32	67,67
25/01/2007	713,61	17,56	691,64	220,07	17,56	680,64	92,97	13,32	677,28	67,28
08/02/2007	713,48	17,55	691,65	220,17	17,55	680,65	93,07	13,29	677,31	67,57
22/02/2007	713,67	17,57	691,63	219,97	17,57	680,63	92,87	13,29	677,31	67,57
08/03/2007	713,84	17,52	691,68	220,46	17,52	680,68	93,36	13,27	677,33	67,77
22/03/2007	713,97	17,55	691,65	220,17	17,55	680,65	93,07	13,29	677,31	67,57
05/04/2007	714,08	17,57	691,63	219,97	17,57	680,63	92,87	13,30	677,30	67,47
19/04/2007	714,52	17,51	691,69	220,56	17,51	680,69	93,46	13,26	677,34	67,86
03/05/2007	715,1	17,48	691,72	220,85	17,48	680,72	93,75	13,22	677,38	68,26
17/05/2007	715,22	17,49	691,71	220,76	17,49	680,71	93,66	13,22	677,38	68,26
31/05/2007	715,21	17,54	691,66	220,27	17,54	680,66	93,17	13,27	677,33	67,77
14/06/2007	715,26	17,57	691,63	219,97	17,57	680,63	92,87	13,31	677,29	67,37
28/06/2007	715,22	17,53	691,67	220,36	17,53	680,67	93,26	13,27	677,33	67,77
12/07/2007	715,13	17,53	691,67	220,36	17,53	680,67	93,26	13,29	677,31	67,57
16/07/2007	715,1	17,51	691,69	220,56	17,51	680,69	93,46	13,24	677,36	68,06
26/07/2007	715,04	17,54	691,66	220,27	17,54	680,66	93,17	13,27	677,33	67,77

Data da Leitura	Cota do Nível d'água (m)	PZ.23.1.3			PZ.23.2.3			PZ.23.3.3		
		Cota (m)	709,20		Cota (m)	698,20		Cota (m)	690,60	
		Prof. (m)	40,00		Prof. (m)	27,04		Prof. (m)	20,18	
		Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)
09/08/2007	714,88	17,52	691,68	220,46	17,52	680,68	93,36	13,28	677,32	67,67
23/08/2007	714,71	17,54	691,66	220,27	17,54	680,66	93,17	13,29	677,31	67,57
06/09/2007	714,55	17,54	691,66	220,27	17,54	680,66	93,17	13,28	677,32	67,67
20/09/2007	714,35	17,52	691,68	220,46	17,52	680,68	93,36	13,27	677,33	67,77
04/10/2007	714,17	17,59	691,61	219,77	17,59	680,61	92,68	13,28	677,32	67,67
18/10/2007	713,98	17,58	691,62	219,87	17,58	680,62	92,77	13,29	677,31	67,57
01/11/2007	713,78	17,58	691,62	219,87	17,58	680,62	92,77	13,30	677,30	67,47
15/11/2007	713,58	17,59	691,61	219,77	17,59	680,61	92,68	13,32	677,28	67,28
29/11/2007	713,36	17,58	691,62	219,87	17,58	680,62	92,77	13,31	677,29	67,37
13/12/2007	713,18	17,62	691,58	219,48	17,62	680,58	92,38	13,35	677,25	66,98
27/12/2007	713,03	17,62	691,58	219,48	17,62	680,58	92,38	13,35	677,25	66,98
10/01/2008	712,88	17,65	691,55	219,19	17,65	680,55	92,09	13,36	677,24	66,88
24/01/2008	712,74	17,62	691,58	219,48	17,62	680,58	92,38	13,34	677,26	67,08
07/02/2008	712,76	17,66	691,54	219,09	17,66	680,54	91,99	13,26	677,34	67,86
20/03/2008	712,9	17,62	691,58	219,48	17,62	680,58	92,38	13,29	677,31	67,57
01/04/2008	713,61	17,50	691,70	220,66	17,50	680,70	93,56	13,15	677,45	68,94
17/04/2008	715,11	17,54	691,66	220,27	17,54	680,66	93,17	13,22	677,38	68,26
01/05/2008	716,07	17,53	691,67	220,36	17,53	680,67	93,26	13,20	677,40	68,45
15/05/2008	716,61	17,50	691,70	220,66	17,50	680,70	93,56	13,22	677,38	68,26
28/05/2008	716,5	17,46	691,74	221,05	17,46	680,74	93,95	13,17	677,43	68,75
12/06/2008	716,48	17,51	691,69	220,56	17,51	680,69	93,46	13,19	677,41	68,55
26/06/2008	716,37	17,48	691,72	220,85	17,48	680,72	93,75	13,18	677,42	68,65
10/07/2008	716,24	17,45	691,75	221,15	17,45	680,75	94,05	13,17	677,43	68,75
24/07/2008	716,03	17,47	691,73	220,95	17,47	680,73	93,85	13,16	677,44	68,85
07/08/2008	715,84	17,47	691,73	220,95	17,47	680,73	93,85	13,19	677,41	68,55
21/08/2008	715,76	17,47	691,73	220,95	17,47	680,73	93,85	13,19	677,41	68,55
25/09/2008	715,45	17,53	691,67	220,36	17,53	680,67	93,26	13,21	677,39	68,35
14/10/2008	715,24	17,52	691,68	220,46	17,52	680,68	93,36	13,23	677,37	68,16
30/10/2008	715,01	17,50	691,70	220,66	17,50	680,70	93,56	13,23	677,37	68,16
13/11/2008	714,8	17,55	691,65	220,17	17,55	680,65	93,07	13,25	677,35	67,96
26/11/2008	714,62	17,55	691,65	220,17	17,55	680,65	93,07	13,27	677,33	67,77
11/12/2008	714,42	17,56	691,64	220,07	17,56	680,64	92,97	13,25	677,35	67,96
24/12/2008	714,23	17,58	691,62	219,87	17,58	680,62	92,77	13,27	677,33	67,77
08/01/2009	714,05	17,58	691,62	219,87	17,58	680,62	92,77	13,27	677,33	67,77
22/01/2009	713,95	17,59	691,61	219,77	17,59	680,61	92,68	13,28	677,32	67,67
04/02/2009	714,08	17,55	691,65	220,17	17,55	680,65	93,07	13,28	677,32	67,67
19/02/2009	714,16	17,58	691,62	219,87	17,58	680,62	92,77	13,26	677,34	67,86
05/03/2009	714,72	17,58	691,62	219,87	17,58	680,62	92,77	13,25	677,35	67,96
19/03/2009	715,63	17,51	691,69	220,56	17,51	680,69	93,46	13,20	677,40	68,45
02/04/2009	716,41	17,50	691,70	220,66	17,50	680,70	93,56	13,17	677,43	68,75
16/04/2009	716,91	17,43	691,77	221,34	17,43	680,77	94,25	13,12	677,48	69,24
07/05/2009	717,09	17,24	691,96	223,21	17,24	680,96	96,11	12,95	677,65	70,90
21/05/2009	716,69	17,36	691,84	222,03	17,36	680,84	94,93	13,10	677,50	69,43
03/06/2009	716,72	17,46	691,74	221,05	17,46	680,74	93,95	13,17	677,43	68,75
17/06/2009	716,66	17,47	691,73	220,95	17,47	680,73	93,85	13,21	677,39	68,35
17/06/2009	716,66	17,49	691,71	220,76	17,49	680,71	93,66	13,25	677,35	67,96
30/07/2009	716,52	17,52	691,68	220,46	17,52	680,68	93,36	13,26	677,34	67,86
03/09/2009	716,32	17,51	691,69	220,56	17,51	680,69	93,46	13,23	677,37	68,16

Data da Leitura	Cota do Nível d'água (m)	PZ.23.1.3			PZ.23.2.3			PZ.23.3.3		
		Cota (m)	709,20		Cota (m)	698,20		Cota (m)	690,60	
		Prof. (m)	40,00		Prof. (m)	27,04		Prof. (m)	20,18	
		Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)
17/09/2009	716,16	17,49	691,71	220,76	17,49	680,71	93,66	13,13	677,47	69,14
01/10/2009	715,96	17,55	691,65	220,17	17,55	680,65	93,07	13,27	677,33	67,77
15/10/2009	715,74	17,55	691,65	220,17	17,55	680,65	93,07	13,16	677,44	68,85
29/10/2009	715,56	17,52	691,68	220,46	17,52	680,68	93,36	13,25	677,35	67,96
12/11/2009	715,42	17,53	691,67	220,36	17,53	680,67	93,26	13,24	677,36	68,06
26/11/2009	715,3	17,54	691,66	220,27	17,54	680,66	93,17	13,25	677,35	67,96
10/12/2009	715,15	17,55	691,65	220,17	17,55	680,65	93,07	13,24	677,36	68,06
24/12/2009	715,04	17,58	691,62	219,87	17,58	680,62	92,77	13,26	677,34	67,86
07/01/2010	714,97	17,56	691,64	220,07	17,56	680,64	92,97	13,25	677,35	67,96
21/01/2010	714,96	17,62	691,58	219,48	17,62	680,58	92,38	13,20	677,40	68,45
21/01/2010	714,96	17,64	691,56	219,28	17,64	680,56	92,19	13,32	677,28	67,28
04/02/2010	714,93	17,62	691,58	219,48	17,62	680,58	92,38	13,20	677,40	68,45
18/02/2010	714,88	17,60	691,60	219,68	17,60	680,60	92,58	13,30	677,30	67,47
04/03/2010	714,75	17,67	691,53	218,99	17,67	680,53	91,89	13,32	677,28	67,28
18/03/2010	714,57	17,67	691,53	218,99	17,67	680,53	91,89	13,32	677,28	67,28
05/08/2010	715,05	17,63	691,57	219,38	17,63	680,57	92,28	13,31	677,29	67,37
19/08/2010	714,86	17,65	691,55	219,19	17,65	680,55	92,09	13,31	677,29	67,37
02/09/2010	714,68	17,58	691,62	219,87	17,58	680,62	92,77	13,24	677,36	68,06
30/09/2010	714,26	17,59	691,61	219,77	17,59	680,61	92,68	13,26	677,34	67,86
14/10/2010	714,05	17,61	691,59	219,58	17,61	680,59	92,48	13,27	677,33	67,77
28/10/2010	713,93	17,63	691,57	219,38	17,63	680,57	92,28	13,28	677,32	67,67
11/11/2010	713,74	17,65	691,55	219,19	17,65	680,55	92,09	13,28	677,32	67,67
13/01/2011	713,28	17,62	691,58	219,48	17,62	680,58	92,38	13,35	677,25	66,98
27/01/2011	713,61	17,62	691,58	219,48	17,62	680,58	92,38	15,21	675,39	48,74
10/02/2011	713,78	17,62	691,58	219,48	17,62	680,58	92,38	13,20	677,40	68,45
24/03/2011	714,76	17,56	691,64	220,07	17,56	680,64	92,97	13,12	677,48	69,24
25/08/2011	716,3	17,51	691,69	220,56	17,51	680,69	93,46	13,04	677,56	70,02
08/09/2011	716,15	17,50	691,70	220,66	17,50	680,70	93,56	13,15	677,45	68,94
22/09/2011	715,98	17,51	691,69	220,56	17,51	680,69	93,46	13,15	677,45	68,94
09/10/2011	715,76	17,56	691,64	220,07	17,56	680,64	92,97	13,18	677,42	68,65
27/07/2012	713,65	15,70	693,50	238,31	17,70	680,50	91,60	13,34	677,26	67,08
10/08/2012	713,46	15,80	693,40	237,33	17,74	680,46	91,21	13,34	677,26	67,08
24/08/2012	713,29	15,87	693,33	236,64	17,75	680,45	91,11	13,34	677,26	67,08
06/09/2012	713,09	15,96	693,24	235,76	17,75	680,45	91,11	13,34	677,26	67,08
21/09/2012	712,85	18,00	691,20	215,75	12,67	685,53	140,93	11,30	679,30	87,09
05/10/2012	712,61	18,04	691,16	215,36	12,72	685,48	140,44	11,30	679,30	87,09
19/10/2012	712,31	18,14	691,06	214,38	12,78	685,42	139,85	11,33	679,27	86,79
01/11/2012	712,08	16,34	692,86	232,03	17,78	680,42	90,81	13,36	677,24	66,88
19/11/2012	711,78	16,53	692,67	230,17	17,78	680,42	90,81	13,36	677,24	66,88
30/11/2012	711,6	16,60	692,60	229,48	17,78	680,42	90,81	13,36	677,24	66,88
14/12/2012	711,36	16,68	692,52	228,70	17,75	680,45	91,11	13,31	677,29	67,37
28/12/2012	711,13	16,78	692,42	227,72	17,80	680,40	90,62	13,32	677,28	67,28
11/01/2013	710,97	16,85	692,35	227,03	17,78	680,42	90,81	13,32	677,28	67,28
25/01/2013	710,77	16,94	692,26	226,15	17,78	680,42	90,81	13,31	677,29	67,37
08/02/2013	710,53	17,05	692,15	225,07	17,78	680,42	90,81	13,31	677,29	67,37
22/02/2013	710,47	17,10	692,10	224,58	17,80	680,40	90,62	13,29	677,31	67,57
08/03/2013	710,23	17,20	692,00	223,60	17,82	680,38	90,42	13,30	677,30	67,47
22/03/2013	710,03	17,26	691,94	223,01	17,80	680,40	90,62	13,30	677,30	67,47

Data da Leitura	Cota do Nível d'água (m)	PZ.23.1.3			PZ.23.2.3			PZ.23.3.3		
		Cota (m)	709,20		Cota (m)	698,20		Cota (m)	690,60	
		Prof. (m)	40,00		Prof. (m)	27,04		Prof. (m)	20,18	
		Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)	Leitura (m)	Cota Piez. (m)	Pressão (kPa)
05/04/2013	709,88	17,33	691,87	222,32	17,82	680,38	90,42	13,31	677,29	67,37
19/04/2013	709,71	17,40	691,80	221,64	17,82	680,38	90,42	13,31	677,29	67,37
03/05/2013	709,74	17,36	691,84	222,03	17,70	680,50	91,60	13,18	677,42	68,65
17/05/2013	709,81	17,36	691,84	222,03	17,70	680,50	91,60	13,10	677,50	69,43
31/05/2013	709,99	17,26	691,94	223,01	17,60	680,60	92,58	12,90	677,70	71,39
04/07/2013	709,82	17,30	691,90	222,62	17,60	680,60	92,58	12,90	677,70	71,39
12/07/2013	709,73	17,31	691,89	222,52	17,60	680,60	92,58	12,90	677,70	71,39
26/07/2013	709,64	17,37	691,83	221,93	17,61	680,59	92,48	12,94	677,66	71,00
09/08/2013	709,45	17,44	691,76	221,25	17,61	680,59	92,48	12,94	677,66	71,00
23/08/2013	709,2	17,56	691,64	220,07	17,64	680,56	92,19	12,96	677,64	70,81
06/09/2013	708,96	17,67	691,53	218,99	17,70	680,50	91,60	13,00	677,60	70,41
20/09/2013	708,71	17,80	691,40	217,72	17,73	680,47	91,30	13,07	677,53	69,73
07/10/2013	708,35	18,00	691,20	215,75	17,80	680,40	90,62	13,14	677,46	69,04
18/10/2013	708,18	18,09	691,11	214,87	17,82	680,38	90,42	13,18	677,42	68,65