



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO**

**ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE PERCOLAÇÃO EM MODELO REDUZIDO DA  
BARRAGEM DE TERRA DA MARGEM ESQUERDA DE ITAIPU**

**CÁNDY GISELA DÍAZ CONCEPCIÓN**

Foz do Iguaçu  
2024



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO**

**ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE PERCOLAÇÃO EM MODELO REDUZIDO DA  
BARRAGEM DE TERRA DA MARGEM ESQUERDA DE ITAIPU**

**CÁNDY GISELA DÍAZ CONCEPCIÓN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Ms<sup>o</sup>. Julio Cesar Bizarreta Ortega

Foz do Iguaçu  
2024

CÁNDY GISELA DÍAZ CONCEPCIÓN

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE PERCOLAÇÃO EM MODELO REDUZIDO DA  
BARRAGEM DE TERRA DA MARGEM ESQUERDA DE ITAIPU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. (Titulação) (Nome do orientador)  
UNILA

---

Prof. (Titulação) (Nome do Professor)  
(Sigla da Instituição)

---

Prof. (Titulação) (Nome do Professor)  
(Sigla da Instituição)

Foz do Iguaçu, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

## TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor (a): \_\_\_\_\_

Curso: \_\_\_\_\_

### Tipo de Documento

(.....) graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	( X ) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....) _____

Título do trabalho acadêmico: \_\_\_\_\_

Nome do orientador (a): \_\_\_\_\_

Data da Defesa: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

### Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Assinatura do Responsável

Dedico este trabalho a minha família que sempre levo no meu coração.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Floriza e Lucas, pelo amor, paciência, incentivo e por acreditarem sempre que eu seria capaz de perseguir meus sonhos. Aos meus irmãos Waldir e Thalía pelo companheirismo e pela cumplicidade em todos os momentos compartilhados. Ao meu irmão Levi (in memoriam), por ser o anjo que iluminou nossas vidas. Ao meu tio Wilfredo pelo carinho e por cada conselho sábio que me guiou.

Ao meu orientador Júlio Ortega, pela orientação, paciência e disponibilidade ao longo do período deste trabalho.

Aos engenheiros Rodrigo de Lima Rodrigues, Bruno Arenhardt, Josiele Patias, à geóloga Debora de Oliveira Fernandes, e à gerente Alexandra Silva; por tudo o apoio e a ajuda ao viabilizar o desenvolvimento desta pesquisa em parceria com Itaipu Parquetec e Itaipu Binacional.

Aos meus professores da faculdade de Engenharia Civil de Infraestrutura pelas exigências e ensinamentos compartilhados.

Aos meus colegas e amigos da faculdade, pelo auxílio constante no laboratório e pelas experiências compartilhadas ao longo desses anos.

A todos aqueles que colaboraram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

*Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque ele se tornará uma máquina utilizável (...) deve aprender a compreender as motivações dos outros, suas quimeras e suas angústias para determinar seu lugar exato no mundo.*

**Albert Einstein**

## RESUMO

As barragens de terra são as mais comuns no Brasil, sendo amplamente empregadas no armazenamento de água, na disposição de rejeitos de mineração e em outras finalidades. No entanto, acidentes registrados na última década evidenciaram fragilidades significativas na segurança dessas estruturas, especialmente no que se refere a problemas associados à percolação, como o piping, a erosão interna e a surgência a jusante. Estudos sobre o fluxo de água em barragens de terra são majoritariamente realizados por meio de simulações numéricas computacionais, devido à sua praticidade na modelagem de fenômenos físicos complexos. A calibração e validação desses modelos pode ser feita a partir de dados de instrumentação em campo ou por modelagem experimental. Nesse contexto, os ensaios em modelos físicos reduzidos podem ser uma alternativa didática e eficiente, em função da ausência ou limitação de dados de campo. A barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu, localizada no rio Paraná, na fronteira entre Brasil e Paraguai, é composta por diversas estruturas, entre elas a Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME), formada por um maciço compactado de argila sobre fundações de argila, saprólito e basalto. Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento do fluxo de percolação, em regime permanente, num modelo físico reduzido da seção 135+50 da BTME. A metodologia foi dividida em duas etapas. Na primeira, realizou-se a caracterização geotécnica das amostras de solo (argila e saprólito) coletadas na BTME, por meio de ensaios conduzidos no Laboratório de Mecânica dos Solos da UNILA. Na segunda etapa, foi construído um modelo reduzido da seção 135+50 da BTME, em escala 1:68, utilizando o tanque de permeabilidade do laboratório. Aplicou-se um corante no solo para visualização das linhas de fluxo e identificação da linha freática nessa seção transversal. Os resultados mostraram que o fluxo de água na fundação ocorre predominantemente na direção horizontal, ao longo da interface entre as camadas de saprólito e argila. A análise das cargas piezométricas demonstrou forte correlação entre os valores de poropressão obtidos no modelo físico e os gerados por simulações numéricas computacionais. Concluiu-se que o modelo físico reduzido, com solos finos (argilas e siltes), é uma ferramenta viável para compreender o comportamento do fluxo de percolação na seção estudada da BTME. Assim, modelos desse tipo apresentam potencial para aplicação em outros estudos de percolação em barragens de terra com diferentes condições de contorno.

**Palavras-chave:** estudo experimental; percolação; barragens de terra; modelo computacional; modelo físico reduzido; linha de fluxo; ITAIPU

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Características de uma barragem de terra .....	17
<b>Figura 2</b> - Carga hidráulica num ponto A sendo a velocidade desprezível .....	18
<b>Figura 3</b> - Exemplos de redes de fluxo bidimensionais em barragens de terra .....	21
<b>Figura 4</b> - Processo do piping no aterro .....	22
<b>Figura 5</b> – Modelo do permeâmetro de carga constante .....	23
<b>Figura 6</b> - Composição da Barragem de Itaipu .....	25
<b>Figura 7</b> – Modelo reduzido a base de areia .....	27
<b>Figura 8</b> – Modelo reduzido de uma barragem homogênea .....	28
<b>Figura 9</b> – Malha da seção 135+50 .....	29
<b>Figura 10</b> – Fluxo através da seção 135+50 .....	29
<b>Figura 11</b> - Superfície freática na seção na estaca 135 + 50.....	29
<b>Figura 12</b> – Fluxograma de atividades .....	30
<b>Figura 13</b> – Seção 135+50 segundo o projeto executivo da BTME.....	31
<b>Figura 14</b> – Características da seção típica 135+50 .....	31
<b>Figura 15</b> - Área de coleta na região do Canal da Piracema BTME - Itaipu .....	32
<b>Figura 16</b> - Locais da coleta nos taludes de corte da área do Canal da Piracema...	33
<b>Figura 17</b> – Camadas de solo observadas no talude .....	33
<b>Figura 18</b> - Fotografias da coleta de amostras de solo deformadas.....	34
<b>Figura 19</b> - Amostra da camada de argila.....	35
<b>Figura 20</b> - Amostra deformada de solo saprólito .....	35
<b>Figura 21</b> – Preparação das amostras de solos .....	36
<b>Figura 22</b> – Faixa de peneira utilizadas no ensaio .....	37
<b>Figura 23</b> – Ensaio de Limite de Plasticidade do solo de saprólito .....	37
<b>Figura 24</b> - Ensaio de Limite de Plasticidade do solo de argila .....	38
<b>Figura 25</b> – Ensaio de Limite de Liquidez da amostra de saprólito .....	38
<b>Figura 26</b> - Ensaio de Limite de Liquidez da amostra de argila .....	38
<b>Figura 27</b> – Ensaio de compactação do solo de saprólito .....	39
<b>Figura 28</b> – Ensaio de determinação da densidade real dos grãos da argila .....	40
<b>Figura 29</b> – Moldagem do corpo de prova mediante compactação manual .....	41
<b>Figura 30</b> – Montagem do corpo de prova na câmara triaxial .....	41
<b>Figura 31</b> – Moldagem do corpo de prova de saprólito por compactação manual ...	42
<b>Figura 32</b> – Montagem do corpo de prova do solo de saprólito.....	43
<b>Figura 33</b> – Simulação computacional considerando a anisotropia da permeabilidade do solo de fundação .....	44
<b>Figura 34</b> - Dimensões utilizadas no modelo físico reduzido.....	45
<b>Figura 35</b> – Seção 135+50 utilizada no modelo físico reduzido .....	45
<b>Figura 36</b> – Tanque de vidro .....	46
<b>Figura 37</b> – Adaptação do tanque de permeabilidade para solos finos .....	46
<b>Figura 38</b> – Marcação da geometria no vidro .....	47
<b>Figura 39</b> – Processo de compactação da camada de saprólito na fundação .....	47
<b>Figura 40</b> – Processo de compactação da camada de argila na fundação .....	48
<b>Figura 41</b> – Procedimento de compactação e modelagem do maciço .....	49
<b>Figura 42</b> – Composição granulométrica do solo de argila.....	51
<b>Figura 43</b> – Composição granulométrica do solo de saprólito .....	53
<b>Figura 44</b> - Limite de liquidez do solo de argila .....	54
<b>Figura 45</b> – Limite de liquidez do solo saprólito.....	56
<b>Figura 46</b> – Curva de compactação do saprólito .....	57
<b>Figura 47</b> – Condições de fluxo no modelo físico da seção 135+50 .....	59
<b>Figura 48</b> – Aplicação de corante para obter a linha freática.....	59

<b>Figura 49</b> – Observações nas condições de fluo na região de jusante .....	60
<b>Figura 50</b> – Linhas de fluxo nos modelos físico a) e computacional b) .....	60
<b>Figura 51</b> – Leituras piezométricas no modelo físico.....	61
<b>Figura 52</b> – Pontos dos piezômetros equivalentes na seção em escala real .....	62
<b>Figura 53</b> – Poropressões simuladas na seção 135+50.....	63
<b>Figura 54</b> – Gráfico das poropressões nos modelos .....	64
<b>Figura 55</b> – Correlação dos valores do modelo físico e computacional.....	64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Valores de permeabilidade segundo o tipo de solo .....	23
--	----

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Solo do maciço compactado da BTME .....	26
<b>Quadro 2</b> – Solos de fundação da BTME .....	26
<b>Quadro 3</b> - Principais características geométricas da seção 135+50 .....	31
<b>Quadro 4</b> - Dados iniciais do corpo de prova do solo de argila .....	41
<b>Quadro 5</b> - Dados iniciais do corpo de prova do solo de saprólito .....	43
<b>Quadro 6</b> – Parâmetros e quantidades de material utilizados no modelo .....	49
<b>Quadro 7</b> – Ensaio de granulometria por peneiramento mecânico.....	50
<b>Quadro 8</b> – Ensaio de sedimentação .....	50
<b>Quadro 9</b> – Ensaio de granulometria por peneiramento mecânico.....	52
<b>Quadro 10</b> – Ensaio de sedimentação .....	52
<b>Quadro 11</b> – Limite de Plasticidade do solo de argila .....	54
<b>Quadro 12</b> – Limite de Liquidez do solo de argila.....	54
<b>Quadro 13</b> – Índice de Plasticidade da argila .....	55
<b>Quadro 14</b> – Limite de Plasticidade do solo de saprólito .....	55
<b>Quadro 15</b> – Limite de Liquidez do solo de saprólito.....	56
<b>Quadro 16</b> – Índice de plasticidade do saprólito.....	56
<b>Quadro 17</b> – Densidade real dos grãos de argila .....	57
<b>Quadro 18</b> – Ensaio da condutividade hidráulica do solo de argila .....	58
<b>Quadro 19</b> – Ensaio da condutividade hidráulica do solo de saprólito .....	58
<b>Quadro 20</b> – Cargas hidráulicas e poropressões nos pontos dos piezômetros.....	62
<b>Quadro 21</b> – Valores das Poropressões nos modelos.....	63

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivos .....	15
1.2	Estrutura do trabalho.....	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
2.1	Características gerais de barragens de terra .....	17
2.2	Caracterização hidráulica dos solos.....	18
2.3	Fluxo bidimensional em regime permanente .....	19
2.4	Fluxo em barragens de terra.....	20
2.5	Problemas de percolação .....	21
2.6	Determinação do coeficiente de permeabilidade .....	22
2.7	Fatores que influenciam a permeabilidade do solo .....	23
2.8	Instrumentação em barragens de terra .....	24
2.9	Barragem de terra da margem esquerda de Itaipu .....	25
2.10	Modelos físicos reduzidos.....	26
2.11	Modelos numéricos.....	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
3.1	Levantamento de dados geométricos da seção da estaca 135+50 .....	31
3.2	Coleta das amostras de solo deformadas.....	32
3.3	Preparação das amostras .....	36
3.4	Ensaio de granulometria .....	36
3.5	Ensaio de limite de liquidez e limite de plasticidade.....	37
3.6	Ensaio de compactação.....	39
3.7	Determinação da densidade real dos grãos (Gs).....	40
3.8	Ensaio de Permeabilidade .....	40
3.8.1	Medição da condutividade hidráulica do solo de argila .....	40
3.8.2	Medição da condutividade hidráulica do solo de saprólito .....	42
3.9	Hipóteses para a análise de fluxo bidimensional .....	44
3.10	Características geométricas adaptadas ao modelo físico .....	45
3.11	Construção do modelo reduzido .....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>50</b>
4.1	Composição granulométrica do solo.....	50
4.2	Determinação dos índices de consistência .....	53
4.3	Densidade real dos grãos de argila.....	57
4.4	Curva de compactação do solo de saprólito .....	57
4.5	Determinação da condutividade hidráulica do solo de argila .....	58
4.6	Determinação da condutividade hidráulica do solo de saprólito .....	58
4.7	Análise do fluxo na seção 135+50 .....	59
4.8	Análise das cargas piezométricas e poropressões .....	61
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>66</b>



## 1 INTRODUÇÃO

As barragens de terra são obras de engenharia amplamente utilizadas no Brasil e no mundo para fins diversos, como abastecimento de água, geração de energia, irrigação, regularização de vazões, controle de cheias e disposição de rejeitos de mineração. Apesar dos inúmeros benefícios proporcionados, essas estruturas podem representar riscos significativos à sociedade e ao meio ambiente quando não são devidamente projetadas, construídas ou mantidas (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024).

Na última década, acidentes como os das barragens de rejeitos em Mariana (MG), em 2015, e Brumadinho (MG), em 2019 (Rocha, 2021), evidenciaram a gravidade das consequências de falhas nessas estruturas, resultando em tragédias ambientais e humanitárias de grande escala. Além disso, Segundo o Relatório de Segurança de Barragens (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024), no Brasil foram registrados 25 acidentes e 25 incidentes com barragens no ano 2023; em 68% dos casos as ocorrências foram em barragens de terra ou terra-enrocamento sendo as chuvas intensas a causa principal mencionada. Também, o relatório aponta como mecanismos de falha associados às anomalias: piping/erosão regressiva, surgência a jusante, erosão contato maciço-estrutura e galgamento.

Diante desse cenário a preocupação constante com a estabilidade hidráulica de barragens de terra, impulsiona o desenvolvimento de estudos com base em modelos analíticos, experimentais, gráficos e numéricos. Segundo Usace (2010), os modelos numéricos têm sido amplamente utilizados na prática devido à disponibilidade de softwares capazes de resolver equações diferenciais por métodos numéricos, permitindo a simulação do fluxo de percolação em meios porosos com maior precisão.

Entretanto, uma das principais dificuldades associadas à modelagem computacional é o acesso a dados de instrumentação em quantidade e qualidade suficientes para garantir a confiabilidade das simulações. Nesse contexto, modelos físicos reduzidos, como os realizados em tanques de permeabilidade, surgem como alternativas eficazes para representar seções homogêneas ou zonadas de barragens (Unas, 2010). De acordo com Correia et al. (2019), esses modelos permitem a observação de fenômenos hidráulicos em escala reduzida, de forma mais controlada, possibilitando a obtenção de resultados detalhados e rápidos sobre o comportamento do fluxo.

A Usina Hidrelétrica de Itaipu, localizada no rio Paraná, na fronteira entre Brasil e Paraguai, é composta por diferentes estruturas, entre elas a Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME), formada por um maciço compactado de solo argiloso, com fundação constituída por três camadas principais: argila, saprólito e basalto (Itaipu Binacional, 2009).

Estudos anteriores com simulações computacionais de fluxo na BTME, como os realizados por Thá (2007) e Rodrigues (2017), indicaram que a maior parte da percolação ocorre pela fundação da barragem, sendo o fluxo através do maciço compactado consideravelmente menor. Esse comportamento evidencia que o sistema de filtros internos permanece predominantemente seco ao longo de sua extensão.

Nesse sentido, a seção 135+50 da BTME se mostra relevante para análise porque nas simulações de fluxo apresentou uma elevação da linha freática em condições de escoamento permanente. Esse comportamento pode estar relacionado à menor espessura da camada de solo na fundação, o que facilita a passagem da água pelo maciço compactado (Rodrigues, 2017). Além disso, essa seção tem sido bastante explorada em estudos, por ser considerada representativa de boa parte da barragem.

Com base nisso, o presente trabalho desenvolveu um modelo físico em escala reduzida da seção 135+50 da BTME, utilizando o tanque de permeabilidade, com o objetivo de visualizar o fenômeno de percolação, incluindo as linhas de fluxo, a linha freática e as cotas piezométricas. Essa abordagem permite avaliar o potencial do modelo físico como ferramenta de análise, por se tratar de uma seção previamente modelada numericamente e com dados de instrumentação disponíveis, o que pode favorecer sua validação.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento do fluxo de percolação em regime permanente, por meio de um modelo físico em escala reduzida da seção 135+50 da Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu, construído em laboratório. Dessa forma os objetivos específicos são:

- Realizar o levantamento de informações da geometria e os parâmetros geotécnicos pertinentes à modelagem física da seção escolhida.
- Obter os parâmetros geotécnicos de caracterização e permeabilidade das amostras de solo deformadas.

- Construir o modelo reduzido da seção transversal escolhida no tanque de permeabilidade.
- Analisar o comportamento do fluxo no modelo reduzido da seção 135+50 de barragem de terra de Itaipu em regime permanente do reservatório.
- Avaliar a compatibilidade das linhas de fluxo no modelo físico reduzido e no modelo computacional.
- Comparar e correlacionar as poropressões da seção 135+50 do modelo físico e do modelo computacional

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta brevemente o tema, contextualiza o problema, justifica a importância do estudo e expõe os objetivos gerais e específicos da pesquisa. O Capítulo 2 reúne o referencial teórico, abordando temas como: aspectos gerais das barragens de terra, caracterização hidráulica dos solos, fluxo bidimensional em regime permanente, problemas relacionados à percolação, determinação e fatores que influenciam o coeficiente de permeabilidade do solo, instrumentação em barragens, a Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu, além de modelos físicos reduzidos e modelos numéricos.

O Capítulo 3 descreve os materiais e a metodologia utilizados, detalhando os ensaios realizados e a construção do modelo físico em escala reduzida. No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos tanto nos ensaios com os solos quanto nas análises do modelo. Por fim, o Capítulo 5 traz as principais conclusões do trabalho, com base nos dados obtidos e nas observações feitas ao longo da pesquisa.

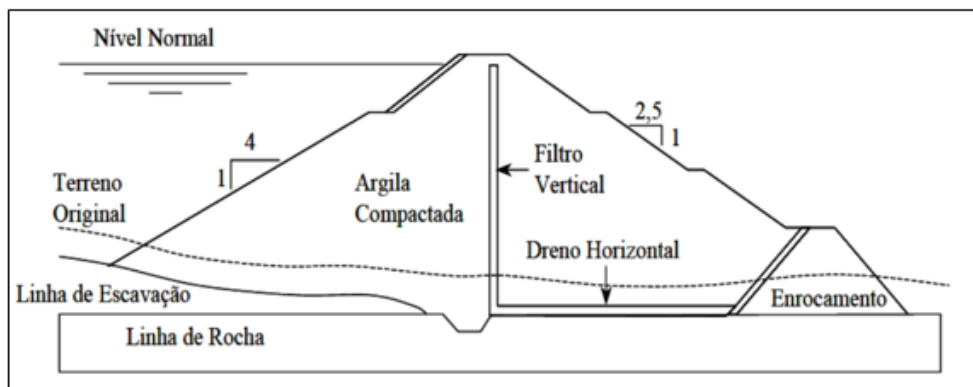
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Características gerais de barragens de terra

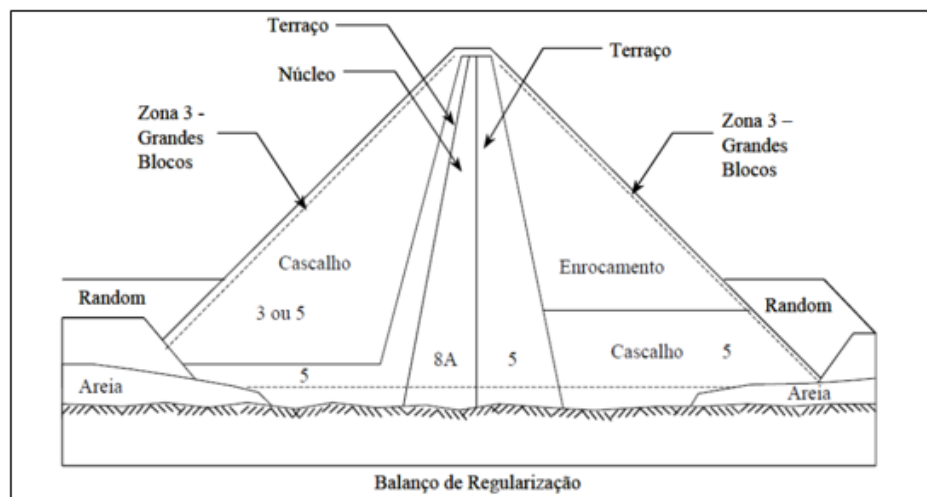
Uma barragem é uma estrutura em um curso de água, permanente ou temporário, para fins de contenção ou acumulação de água, de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos. (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024)

Segundo Marangon (2004), as barragens de terra possuem os seguintes elementos básicos: talude jusante, talude montante, crista, maciço, base e fundação. Além disso, dependendo da disponibilidade dos materiais de construção as barragens de terra podem ser classificadas como: barragens de seção homogênea (figura 1a), barragens zoneadas (figura 1b) e barragens de aterro hidráulico (Nelio Gioto, 1982).

**Figura 1** – Características de uma barragem de terra



(a) barragem de terra homogênea



(b) barragem de terra zoneada

Fonte: Assis (2003)

## 2.2 Caracterização hidráulica dos solos

O solo é um material conformado pela interconexão de partículas provenientes da degradação da rocha, a partir de processos físicos, químicos e biológicos. Sua constituição pode ser considerada como um sistema trifásico que inclui grãos sólidos, água e ar, assim, o solo é um meio poroso (Das, 2019).

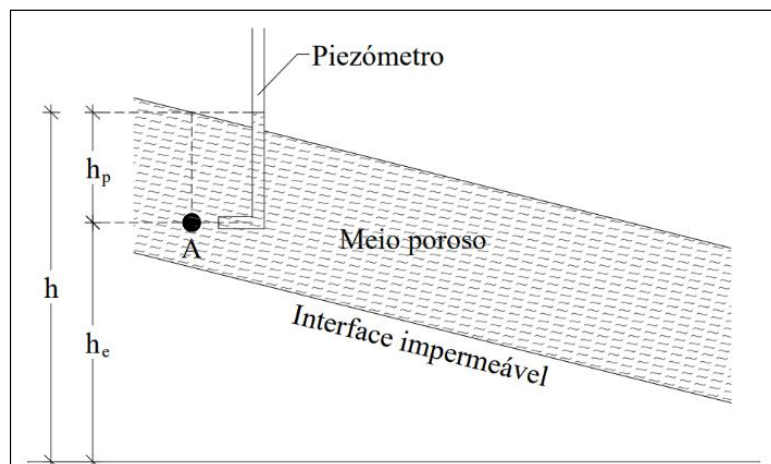
Respeito ao escoamento em regime permanente de um fluido incompressível e não viscoso como a água, a carga hidráulica total num dado ponto,  $h$ , é calculada pela soma de três componentes: a altura geométrica,  $h_e$ , a altura piezométrica,  $h_p$ , e a altura cinética,  $h_v$ .

$$h = h_e + h_p + h_v \quad (1)$$

Sendo:  $h_v = \frac{v^2}{2g}$  e  $h_p = \frac{u}{\gamma_w}$ , onde  $u$  representa a pressão neutra ou poropressão,  $v$  é a velocidade de escoamento e  $g$  é a aceleração da gravidade. Essa equação (1) é a conhecida Equação de Bernoulli.

O fenômeno da percolação nos solos se caracteriza pelo movimento da água a velocidades muito baixas, assim a parcela cinética pode ser desprezada (Unas, 2010), como se mostra na figura 2. Logo a carga total em um ponto pode ser obtida por meio da equação (2):

**Figura 2** - Carga hidráulica num ponto A sendo a velocidade desprezível



Fonte: Unas (2010)

A soma da cota geométrica ( $z$ ) com a altura piezométrica ( $h_p$ ) recebe também o nome de cota piezométrica:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z \quad (2)$$

Assim, a perda de carga hidráulica,  $\Delta h$ , corresponde à diferença entre os

níveis da água relativos aos pontos considerados, essa diferença de carga total entre dois pontos é responsável por gerar e manter o escoamento de água através do solo. A perda de carga é devida ao consumo de energia para vencer o atrito viscoso entre o fluido e os grãos sólidos do solo. Esta dificuldade imposta ao movimento da água é medida através da sua permeabilidade (Oliveira, 2014)

A perda de carga hidráulica pode ser expressa de forma adimensional pelo gradiente hidráulico na equação (3):

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (3)$$

i: gradiente hidráulico;

$\Delta h$ : diferença de carga total entre dois pontos;

L: distância entre os dois pontos.

A Lei de Darcy indica que a quantidade de água que passa pelo solo depende do gradiente hidráulico, da permeabilidade do material e da área transversal ocupada, conforme mostrado na equação 4 (Massad, 2010). Assim é possível obter a velocidade da percolação do fluido com a Equação 4 e 5:

$$Q = kiA \quad (4)$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

Onde A é a área da secção transversal da amostra, k o coeficiente de permeabilidade do solo em condições saturadas, i o gradiente hidráulico. Segundo Mohamed N. Salem (2019) ao analisar a percolação no solo, a propriedade mais importante é a condutividade hidráulica (K) pois esta reflete a capacidade do solo de transportar água tanto em condições saturadas quanto não saturadas.

### 2.3 Fluxo bidimensional em regime permanente

A água se movimenta no interior dos solos pelos espaços entre as partículas, impulsionada pela gravidade. O fluxo livre ocorre quando os vazios estão quase totalmente preenchidos e a tensão superficial é superada, permitindo que a água escoe por pequenos canais. A superfície que separa a água retida por capilaridade da água livre é chamada de superfície freática ou nível freático, sendo este definido como o ponto onde a pressão da água é igual à atmosférica, ou seja, onde a pressão manométrica é nula (Massad, 2010).

O fluxo é denominado bidimensional quando as partículas de água seguem trajetórias curvas contidas em planos paralelos e é governado pela Equação (6) (Unas, 2010):

$$\frac{dV}{1+e} \cdot \left( e \cdot \frac{\partial}{\partial t} S + S \cdot \frac{\partial}{\partial t} e \right) = \left( k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dV \quad (6)$$

A equação (6) é a denominada equação básica para escoamentos laminares bidimensionais em meios porosos, onde  $e$  é o índice de vazios,  $S$ , o grau de saturação,  $k_x$  e  $k_z$  a permeabilidade segundo a direção  $x$  e  $z$  respectivamente.

De acordo com Unas (2010), as equações diferenciais relacionadas à percolação em meios porosos só podem ser resolvidas se as condições de contorno forem corretamente definidas.

A partir da Equação 6, pode-se realizar certas simplificações como:

- O fluxo é estacionário, o solo saturado  $\rightarrow S = 100\%$
- Os efeitos da capilaridade podem se desprezar;
- O índice de vazios se mantém constante, durante o fluxo não ocorre nem compressão nem expansão;
- O solo é homogêneo;
- É válida a lei de Darcy.
- Isotropia na permeabilidade nas direções  $x$  e  $z$ ,  $k_x=k_z$

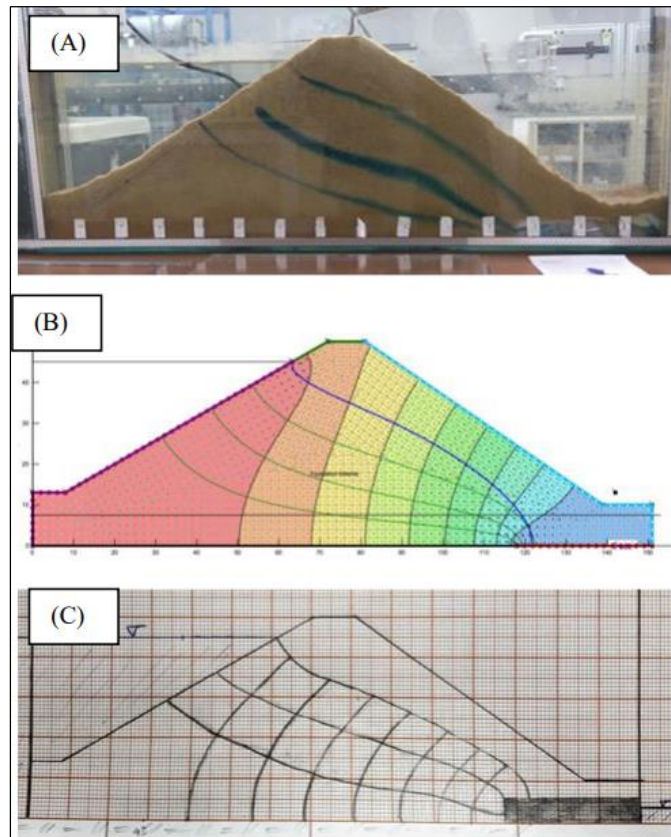
Logo a equação (6) pode ser reduzida à equação (7), conhecida como equação de Laplace para espaços bidimensionais. Ela representa a variação do gradiente hidráulico nas direções  $x$  e  $z$ , cuja soma deverá ser igual a zero.

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

## 2.4 Fluxo em barragens de terra

Uma das teorias de percolação que descreve o movimento da água em meios porosos considera que esse deslocamento ocorre ao longo de linhas de fluxo. Em meios isotrópicos, essas linhas de fluxo são perpendicularmente cruzadas por linhas equipotenciais, formando, em conjunto, uma rede de fluxo (Pinto, 2000). As soluções para problemas de fluxo podem ser obtidas por meio de diferentes abordagens, como métodos analíticos, físicos, gráficos ou numéricos. Um exemplo ilustrativo pode ser observado na figura 3.

**Figura 3** - Exemplos de redes de fluxo bidimensionais em barragens de terra



(A) Modelo físico, (B) modelo computacional (C) modelo gráfico.

Fonte: Oliveira, *et al.* (2018)

## 2.5 Problemas de percolação

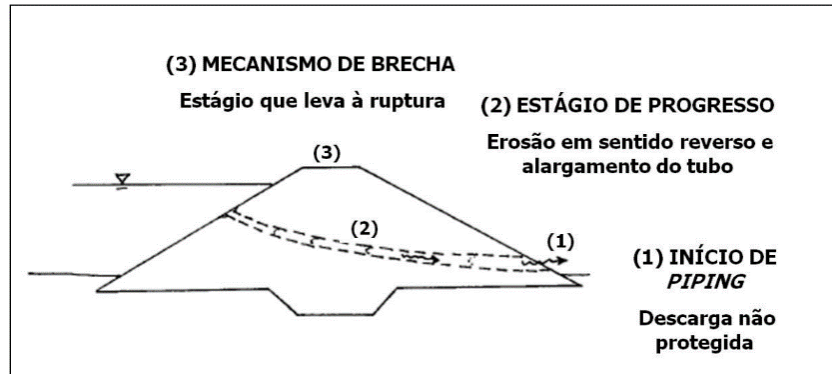
Em barragens de terra, o fenômeno da percolação está diretamente relacionado a problemas de erosão interna, como o piping. Segundo Ladeira (2007), esse processo, também conhecido como entubamento, ocorre por meio de erosão regressiva que se propaga no sentido de jusante para montante, formando um canal interno no maciço e promovendo o arraste de partículas do solo.

Além disso, de acordo com Ladeira (2007), alguns fatores fundamentais para a prevenção do piping incluem: o adequado grau de compactação do solo, a correta distribuição granulométrica nas zonas de transição onde há contato entre materiais com diferentes tamanhos de partículas, e o monitoramento adequado dos parâmetros geotécnicos e hidráulicos.

Terzaghi e Peck (1948) mencionam que o fenômeno de erosão interna regressiva (piping) pode ocorrer de maneira contínua e progressiva. Os autores explicam que sob um elevado gradiente, a água flui através do corpo da barragem ou

de sua fundação com uma força de percolação que acaba por carrear os grãos, desencadeando um estágio que pode levar ao rompimento da estrutura (ver figura 4).

**Figura 4** - Processo do piping no aterro



Fonte: Modificado de Foster, Fell, Spannagle (2000)

O fluxo de água através do maciço da barragem de terra exerce forças devido ao atrito entre a água e as partículas do solo. A força de percolação é descrita pela expressão da equação 8 e se considera que a sua dissipação é uniforme em todo o volume de solo (Araújo, 2013).

$$j = \frac{\Delta h A \gamma_w}{L A} = i \gamma_w \quad (8)$$

$j$ : força de percolação atuante (kN/m<sup>3</sup>),  
 $\Delta h$ : diferença de carga hidráulica,  
 $\gamma_w$ : peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>)  
 $L$ : comprimento total percolado pela água (m)  
 $A$ : área da seção transversal (m<sup>2</sup>).

## 2.6 Determinação do coeficiente de permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade pode ser determinado em ensaios de laboratório mediante equipamentos como o permeâmetro. Segundo Pinto (2000), os valores típicos de coeficiente de permeabilidade  $k$  para os diferentes tipos de solos são mostrados na tabela 1.

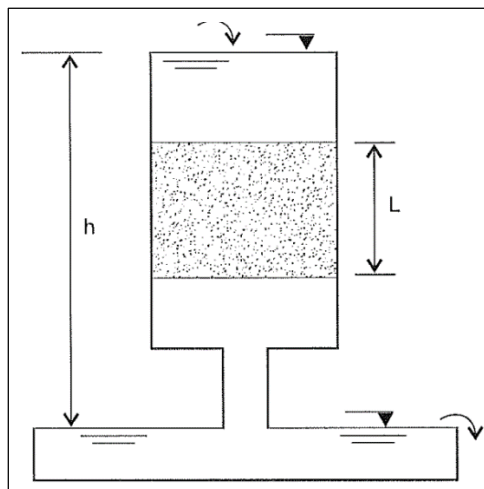
**Tabela 1-** Valores de permeabilidade segundo o tipo de solo

SOLOS SEDIMENTARES	VALORES DE k (m/s)
Argilas	$< 10^{-9}$
Siltes	$10^{-6}$ a $10^{-9}$
Areias argilosas	$10^{-7}$
Areias finas	$10^{-5}$
Areias médias	$10^{-4}$
Areias grossas	$10^{-3}$

Fonte: Pinto (2000)

O mesmo autor descreve o permeâmetro de carga constante, figura 5, como um modelo similar ao utilizado por Darcy, dessa forma, mantida uma carga  $h$  durante um certo tempo, a água percolada é coletada e medido seu volume. Conhecidas a vazões de entrada e saída e as características geométricas, o coeficiente de permeabilidade pode ser calculado diretamente pela Lei de Darcy (equação 9).

$$k = \frac{Q}{iA} \quad (9)$$

**Figura 5** – Modelo do permeâmetro de carga constante

Fonte: Pinto (2000)

## 2.7 Fatores que influenciam a permeabilidade do solo

Segundo Montes (2003), a granulometria é fundamental ao analisar a permeabilidade do solo, pois solos com partículas menores possuem menos poros, o que aumenta a resistência ao fluxo e diminui a permeabilidade. Também o autor menciona que a forma e a textura das partículas afetam o fluxo, assim as partículas mais irregulares e rugosas criam trajetórias de fluxo mais tortuosas reduzindo a permeabilidade.

Além disso, a estrutura do solo, especialmente em solos finos, pode variar entre estados floculados ou dispersos, o que também influencia. Logo, o índice de vazios, ou seja, o tamanho e a disposição dos poros, assim como o grau de saturação influenciam na permeabilidade, já que as bolhas de ar podem bloquear o fluxo de água (Montes, 2003).

Por outro lado, a permeabilidade do solo está diretamente relacionada ao tipo de escoamento. Quando o fluxo é laminar, ou seja, ocorre de forma ordenada e com baixa velocidade a permeabilidade tende a ser constante, e a Lei de Darcy é válida. No entanto, em situações onde o fluxo se torna turbulento, essa lei deixa de ser aplicável, pois o movimento da água passa a ser desorganizado, o que pode alterar a taxa de escoamento e, conseqüentemente, a permeabilidade aparente do meio (Pinto, 2000).

## **2.8 Instrumentação em barragens de terra**

A instrumentação em barragens de terra tem como um de seus principais objetivos acompanhar o desempenho da estrutura e verificar sua segurança diante de eventuais anomalias. Além disso, atua como um sistema de alerta, permitindo a identificação antecipada de problemas e viabilizando ações preventivas para evitar acidentes (Cruz, 1996).

A verificação da segurança de barragens, tanto em campo quanto em laboratório, é feita por meio de diferentes técnicas de monitoramento e análise. Entre as principais, destacam-se os métodos observacionais, o uso de instrumentação geotécnica e os levantamentos geodésicos. Essas técnicas permitem acompanhar o comportamento da estrutura ao longo do tempo, detectar possíveis anomalias e auxiliar na tomada de decisões preventivas (Silveira, 2006).

Os principais instrumentos empregados para o monitoramento de barragens podem ser: piezômetros, medidores de vazão, medidores de nível da água, marcos de referência e deslocamento, células de pressão, dispositivos de drenagem, Extensômetros e Eletrônicos.

O piezômetro é um dos instrumentos mais eficazes e confiáveis quando se trata do monitoramento de poropressões em barragens de terra. Sua robustez e precisão o tornam fundamental para a avaliação do comportamento hidráulico dessas estruturas ao longo do tempo Coelho (2017).

## 2.9 Barragem de terra da margem esquerda de Itaipu

A barragem de Itaipu é um exemplo de barragem mista em relação a seu traçado longitudinal. Sua composição abarca trechos com diferentes tipos de materiais e barragens, na figura 6 pode-se observar a distribuição ao longo do comprimento.

**Figura 6 - Composição da Barragem de Itaipu**



Fonte: Site - [www.itaipu.gov.br/energia/barragem](http://www.itaipu.gov.br/energia/barragem)

A Barragem de Terra da Margem Esquerda é composta por uma estrutura principal com 1.989,33 metros de comprimento e uma estrutura de transição com 305 metros, totalizando 2.293,33 metros. Para otimizar o projeto, a barragem foi dividida em dois trechos: o Trecho I, com altura inferior a 10 metros, e o Trecho II, com altura entre 10 e 30 metros (Itaipu Binacional, 2009).

As características e índices físicos dos solos do maciço compactado e da fundação da BTME indicados nos relatórios de Itaipu (IECO e ELC, 1992) e (IECO e ELC, 1977) são mostrados nos quadros 1 e 2.

**Quadro 1** –Solo do maciço compactado da BTME

<b>Maciço compactado</b>	
Material principal	Argila
Fração de argila ( %<2 $\mu$ )	79
Densidade dos sólidos ( $\delta$ )	2,82
LL (%)	59
IP (%)	33
Umidade ótima (%)	29,3
Peso esp. seco ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,47
Peso esp. saturado ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,94
Índice de vazios	0,90
Porosidade (%)	47,4
Coef. De permeabilidade vertical kv (cm/s)	$1,3 \times 10^{-7}$
Coef. De permeabilidade vertical kh (cm/s)	$3,4 \times 10^{-7}$

Fonte: IECO e ELC (1992)

**Quadro 2** –Solos de fundação da BTME

<b>Fundação</b>		
Tipo de solo	Argila	Saprólito
Fração de argila ( %<2 $\mu$ )	68	42
Densidade dos sólidos ( $\delta$ )	2,95	3,03
LL (%)	63	73
IP (%)	38	27
Umidade natural (%)	28	46
Peso esp. aparente natural ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,23	1,22
Peso esp. do solo saturado ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,82	1,84
Índice de vazios	1,489	1,621
Porosidade (%)	59,8	68,8
Coef. De permeabilidade k (cm/s)	$4,4 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-3}$

Fonte: IECO e ELC (1992)

## 2.10 Modelos físicos reduzidos

A modelagem física geralmente exige uma análise e um planeamento cuidadoso de forma a obter uma eficácia adequada. É importante garantir a reprodução, o mais semelhante possível, dos principais fenômenos intervenientes para que seja se consiga estabelecer leis aplicáveis a casos reais (Franca, 2002).

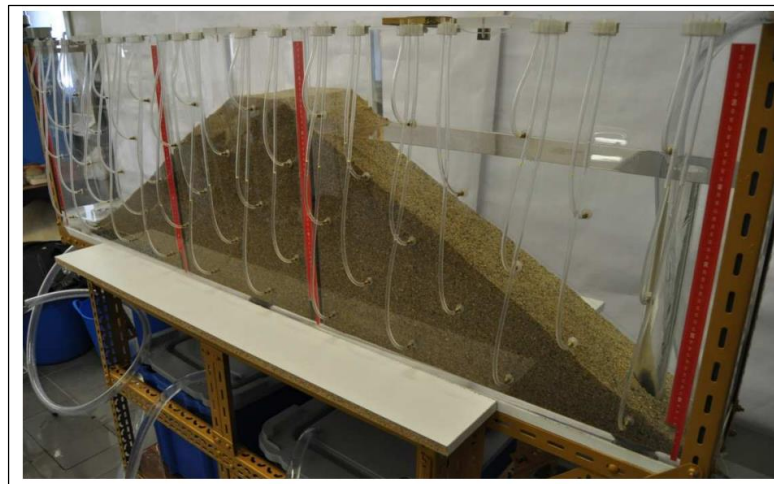
Conforme Melo (2011), os modelos físicos reduzidos sempre desempenham um papel significativo pois os dados experimentais permitem verificar a capacidade preditiva dos modelos numéricos, onde também os modelos analíticos são muito complexos.

Segundo Çengel e Cimbala (2006), a análise dimensional é baseado nas condições de similitude fundamentais (geométrica, cinemática e dinâmica) e tem três objetivos principais:

- Gerar parâmetros adimensionais, que contribuam no desenho de experimentos (físico e/ou numérico)
- Obter leis de escalamento de modo a prever o desempenho do protótipo.
- Prever as tendências na relação entre parâmetros.

Em estudos de percolação em barragens de terra, é comum a utilização de modelos físicos reduzidos construídos com areia, como ilustrado na figura 7. A escolha desse material granular se deve à sua alta permeabilidade, que permite uma visualização rápida e clara das linhas de fluxo quando se utilizam corantes.

**Figura 7** – Modelo reduzido a base de areia



Fonte: Unas (2010)

No entanto, trabalhos atuais também utilizam material de solos diferentes na modelagem. Um exemplo relevante é o estudo de Albuquerque (2022), intitulado "Análise de Carreamento em Modelo Experimental de Barragem de Terra", que utilizou um modelo reduzido composto por um maciço de solos finos (argila-silte) e filtros de areia, conforme ilustrado na figura 8. O experimento foi conduzido ao longo de 60 dias, com o reservatório mantido em cota constante. Durante esse período, foi identificada a ocorrência de carreamento de partículas através do filtro granular, observada por meio de uma caixa de inspeção instalada na saída do fluxo.

**Figura 8** – Modelo reduzido de uma barragem homogênea



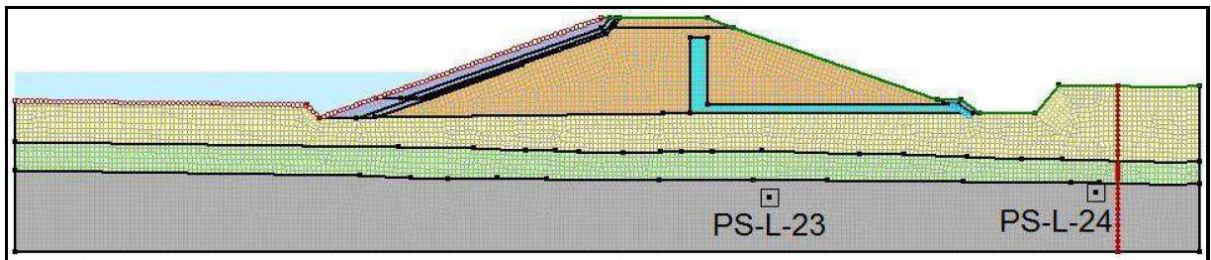
Fonte: Albuquerque (2022)

### 2.11 Modelos numéricos

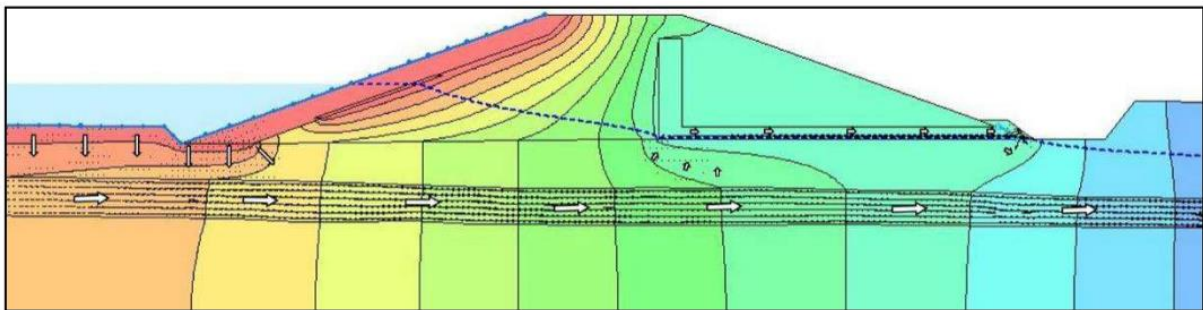
As soluções das equações diferenciais de fluxo, considerando as devidas simplificações, podem ser obtidas por meio de métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF fornece uma solução numérica para um problema de valor de contorno inicial, e sua ideia básica consiste em discretizar a região contínua de solução em um conjunto de elementos finitos conectados entre si, formando uma malha (XU et al., 2022).

Atualmente, existem diversas opções de programas de modelagem computacional na análise de fluxo em barragens. Entre eles, o SEEP/W (GEO-SLOPE, 2001) é um software que permite analisar o fluxo de águas subterrâneas em meios porosos, sejam eles confinados ou não. A modelagem é realizada utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) para simulações de fluxo tanto em estado estacionário quanto transiente, considerando solos saturados e insaturados.

No caso específico de barragens de terra, as simulações em duas dimensões (2D) feitas com esse tipo de software permitem identificar e visualizar o caminho que a água percorre dentro da estrutura. Entre os principais resultados gerados se tem a linha freática e os contornos de pressão total e pressão neutra (poropressão). No caso da BTME, as análises de fluxo permanente realizadas na seção 135+50 utilizam a geometria com malha como se ilustra na figura 9.

**Figura 9** – Malha da seção 135+50

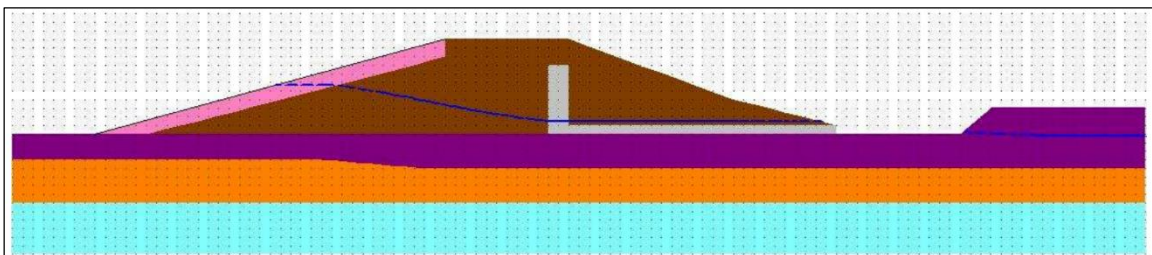
Fonte: Rodrigues (2017)

**Figura 10** – Fluxo através da seção 135+50

Fonte: Rodrigues (2017)

Na Figura 10, a simulação realizada por Rodrigues (2017) evidencia uma elevação da linha freática, que se conecta ao tapete drenante horizontal. Além disso, é possível observar a trajetória das linhas de fluxo e a presença de maior velocidade do escoamento representada por vetores (setas) mais longos especialmente na camada de saprólito, devido à sua maior permeabilidade.

Também (Thá, 2007) no seu trabalho apresenta os resultados da simulação de fluxo permanente nesta seção indicando a linha freática, figura 11.

**Figura 11** - Superfície freática na seção na estaca 135 + 50

Fonte: Thá (2007)

Na figura 11, observa-se que a linha freática atravessa o filtro, de acordo com Thá (2007), a ocorrência desse problema no SEEP pode estar relacionada a grandes diferenças de permeabilidade entre materiais, como a argila compactada e a areia.

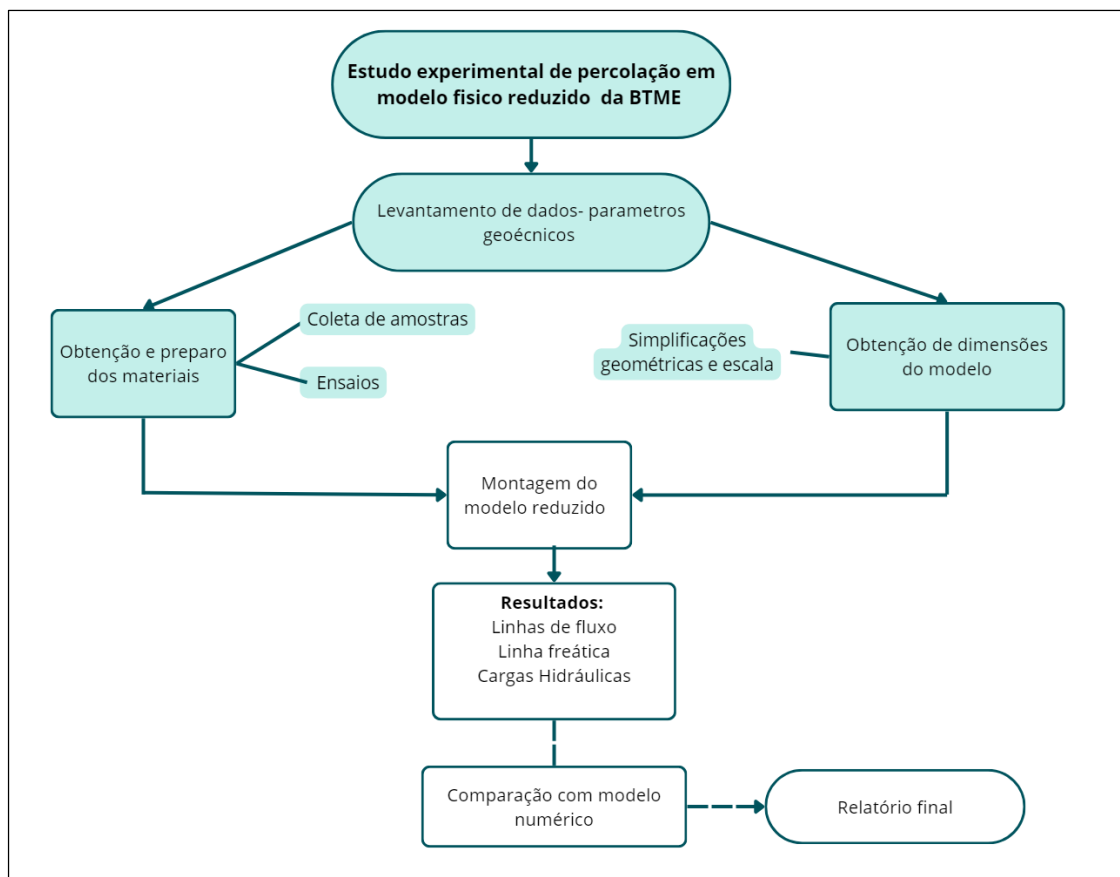
### 3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho serão consideradas 5 etapas fundamentais:

- I. Obtenção dos dados técnico/construtivos da barragem de terra.
- II. Escolha dos materiais e equipamentos a serem utilizados;
- III. Ensaio característicos dos materiais e análise dimensional geométrico;
- IV. Construção do modelo reduzido no laboratório;
- V. Análise dos resultados

Um fluxograma do trabalho é indicado na figura 12.

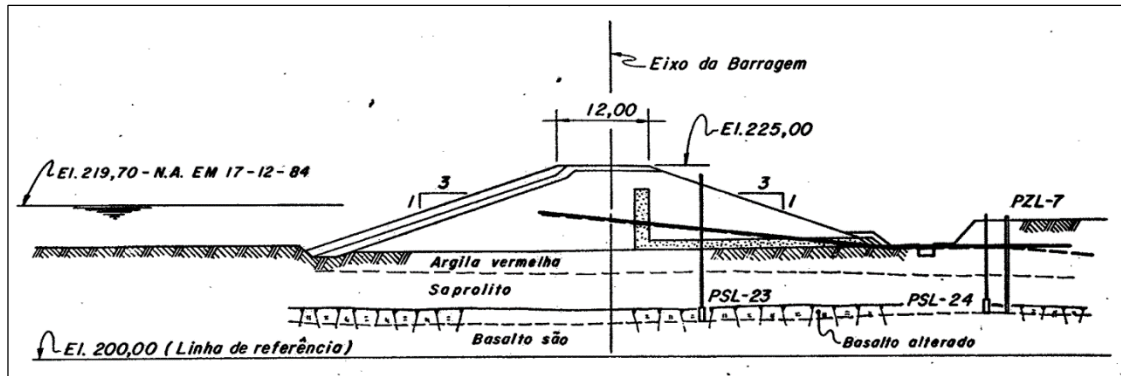
**Figura 12** – Fluxograma de atividades



### 3.1 Levantamento de dados geométricos da seção da estaca 135+50

As características geométricas conforme projeto executivo da BTME são indicadas na figura 13.

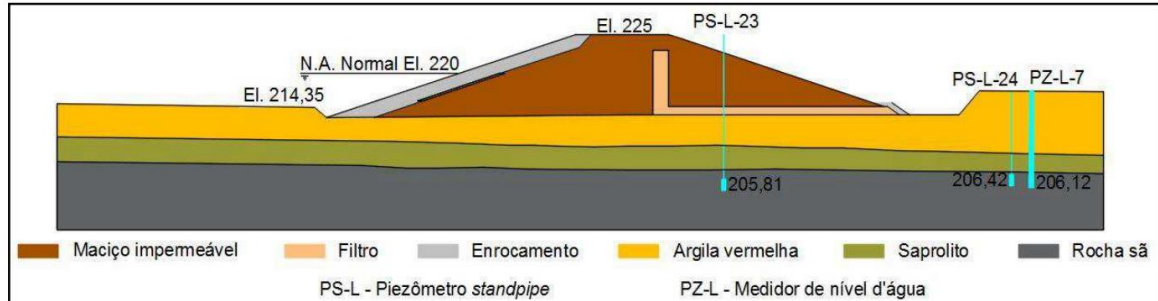
**Figura 13** – Seção 135+50 segundo o projeto executivo da BTME



Fonte: IECO e ELC (1988)

A adaptação do modelo físico reduzido foi realizada em base à geometria ilustrada na figura 14 e com as dimensões conforme o quadro 3.

**Figura 14** – Características da seção típica 135+50



Fonte: Rodrigues (2017)

**Quadro 3** - Principais características geométricas da seção 135+50

Característica	Medida
Altura do maciço compactado (m)	10,5
Espessura de argila na fundação (m)	4,0
Espessura de saprolito na fundação (m)	3,0
Pé do talude de montante (m)	214,35

Fonte: adaptado de Rodrigues (2017)

As simulações computacionais também utilizaram a geometria da seção apresentada na figura 14, que foi desenhada no AutoCAD e posteriormente importada para o software SEEP/W. As condições de contorno foram definidas com base na cota normal do reservatório (220 m), enquanto o nível d'água a jusante foi fixado próximo à superfície do terreno. Para os parâmetros de entrada, foram considerados os dados apresentados nos quadros 1, 2 e 3.

### 3.2 Coleta das amostras de solo deformadas

A coleta de amostras deformadas foi conduzida nas proximidades da BTME, no talude do Canal da Piracema, figura 15 e 16, onde é possível coletar amostras de diferentes horizontes com material representativo da fundação da barragem e também, devido à proximidade da área de empréstimo, representativo do material do maciço compactado.

**Figura 15** - Área de coleta na região do Canal da Piracema BTME - Itaipu



Fonte: Google Earth

**Figura 16** - Locais da coleta nos taludes de corte da área do Canal da Piracema



De acordo com o mapeamento de solos residuais nos taludes, realizado por Patias; Fernandes; Rodrigues (2024), identificou-se um perfil com presença de quatro camadas constituídas do topo para a base por solo orgânico, argila vermelha, saprólito e rocha alterada. Na figura 17 se observa um dos taludes expostos com as duas camadas de solo (argila e saprólito) de interesse para o presente trabalho.

**Figura 17** – Camadas de solo observadas no talude



Para a extração das amostras foram utilizadas pás e enxadas. A princípio foram removidos em torno de 5 a 10 cm de material orgânico superficial. As amostras foram colocadas em sacos plásticos para seu traslado e acondicionamento no Laboratório de Mecânica de solos da UNILA (figura 18).

**Figura 18** - Fotografias da coleta de amostras de solo deformadas



### 3.1.1 Amostra de solo de argila

Com as observações visuais e de tacto se percebeu um solo úmido com presença de finos, bastante coesa e com coloração predominantemente vermelha. Na figura 19 se mostra a área de escavação e a análise visual.

**Figura 19** - Amostra da camada de argila



O material foi armazenado em 3 sacos plásticos, sendo:

- Saco plástico 1 (15 kg) – Material de 5 a 15 cm de profundidade.
- Saco plástico 2 (10 kg) – Material de 5 a 15 cm de profundidade.
- Saco plástico 3 (26 kg) – Material de 5 a 20 cm de profundidade.

### 3.1.2 Amostra de solo de saprólito

A escavação neste solo foi bastante difícil a comparação da camada de argila e a amostra deformada apresentou uma considerável resistência ao fracionamento manual (figura 20).

**Figura 20** - Amostra deformada de solo saprólito



O material foi armazenado em 2 sacos plásticos:

- Saco plástico 1 (11 kg) – Material de 5 a 10 cm de profundidade.
- Saco plástico 2 (16 kg) – Material de 10 a 20 cm de profundidade.

### 3.3 Preparação das amostras

A preparação das amostras de solos foi realizada seguindo as recomendações da NBR 6457/2016 e aplicou-se o método com secagem prévia ao ar. Posteriormente, as amostras foram destorroadas no almofariz com ajuda do pilão, mas com o devido cuidado para não quebrar os grãos, figura 21.

**Figura 21** – Preparação das amostras de solos



### 3.4 Ensaio de granulometria

A composição granulométrica dos solos foi determinada por um ensaio conjunto de peneiramento mecânico e sedimentação, seguindo as recomendações da NBR 7181/2018 e do Manual de laboratorios de suelos en ingeniería (Bowles, 1980). Para este ensaio, foram utilizados 500g da amostra de cada solo. O material foi lavado na peneira #200 e o material retido foi colocado na estufa até obter a constância do peso, logo foi realizado o peneiramento na série mostrada na figura 22.

**Figura 22** – Faixa de peneira utilizadas no ensaio



### 3.5 Ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade

Para os ensaios foram seguidos os procedimentos da NBR 6459/2017 e NBR 7180/2016. As amostras utilizadas foram do material passante na peneira com abertura de 0,42mm, totalizando 150g de cada tipo de solo.

Na determinação do Limite de Plasticidade foi utilizada uma placa de vidro para moldar um cilindro de 3mm de diâmetro e 100mm de comprimento até começar a fraturar, figuras 23 e 24.

**Figura 23** – Ensaio de Limite de Plasticidade do solo de saprólito



**Figura 24 - Ensaio de Limite de Plasticidade do solo de argila**



No caso do Limite de Liquidez, para obter o gráfico foram considerados os dados de 5 pontos conforme o ensaio no aparelho de Casagrande, figuras 25 e 26.

**Figura 25 – Ensaio de Limite de Liquidez da amostra de saprólito**



**Figura 26 - Ensaio de Limite de Liquidez da amostra de argila**



### 3.6 Ensaio de compactação

Neste ensaio foi adotada a metodologia descrita na NBR 7182/2016 solos: ensaio de compactação. O processo foi executado apenas para amostra do solo de saprólito, pois a diferença do solo argiloso não se tinha dados de compactação de relatórios anteriores. Assim, com uma amostra de solo passante na peneira de 4mm foi realizado o ensaio de compactação Proctor normal para 4 corpos de prova, com reaproveitamento do solo (figura 27).

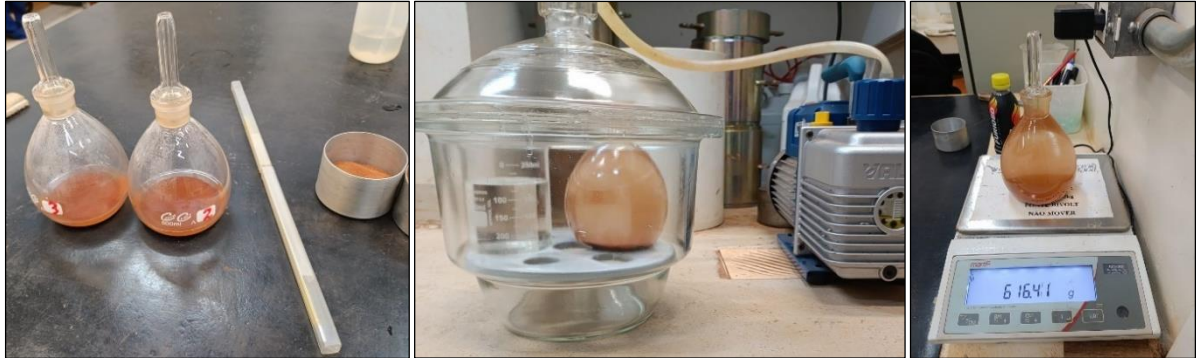
**Figura 27** – Ensaio de compactação do solo de saprólito



### 3.7 Determinação da densidade real dos grãos (Gs)

Foi aplicado o método do picnômetro conforme com as recomendações das normas: DNER – ME 093/64 e da NBR 6457 – ABNT – “Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização”. O procedimento é mostrado na figura 28.

**Figura 28** – Ensaio de determinação da densidade real dos grãos da argila



### 3.8 Ensaio de Permeabilidade

Neste trabalho foi utilizado o Método A - Carga Constante da ASTM D5084 ((Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter), que é indicado para a medição da condutividade hidráulica de materiais porosos saturados, empregando um permeâmetro de parede flexível.

#### 3.8.1 Medição da condutividade hidráulica do solo de argila

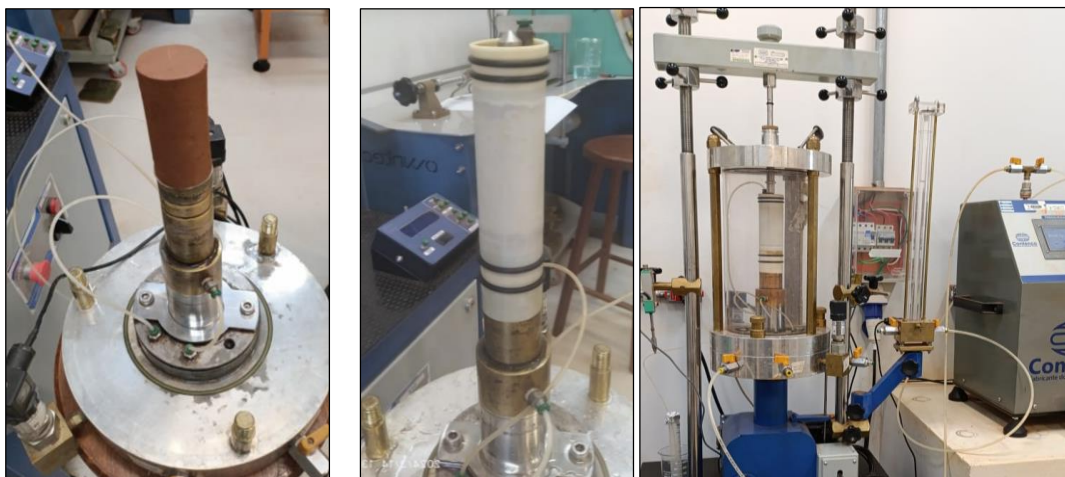
O corpo de prova foi moldado na direção vertical com material de solo argiloso passante na peneira #10 (2,0 mm) e umidade natural do solo de fundação de 28%, valor próximo da umidade ótima de compactação da argila do maciço de terra da BTME, conforme indicado no relatório de Itaipu (IECO e ELC, 1992). A compactação foi realizada em cinco camadas para alcançar um peso específico seco ( $\gamma_d$ ) semelhante ao especificado, para o material de argila do maciço compactado, no referido relatório. A seguir, é mostrado o processo de moldagem do corpo de prova na figura 29.

**Figura 29** – Moldagem do corpo de prova mediante compactação manual



A montagem do corpo de prova foi realizada na câmara do equipamento triaxial seguindo as indicações da ASTM D5084-10 (figura 30)

**Figura 30** – Montagem do corpo de prova na câmara triaxial



Os parâmetros utilizados no ensaio estão resumidos no quadro 4.

**Quadro 4** - Dados iniciais do corpo de prova do solo de argila

Dados	
m (kg)	187,15
L(cm)	9,00
D (cm)	3,80
A(cm <sup>2</sup> )	11,34
V(cm <sup>3</sup> )	102,07
W (%)	28
$\gamma_h$	1,834
$\gamma_d$	1,43
Gs	2,79
S (%) (inicial)	82,43

Conforme à ASTM D5084, uma saturação inicial de 82,4% exige uma contrapressão mínima de 65 ps (450 kPa) para atingir 98% de saturação. Seguindo essa diretriz, no ensaio, a contrapressão foi ajustada em estágios variando entre 50 e 500 kPa. Simultaneamente, foi mantida uma pressão confinante de 100 kPa para minimizar variações no volume e evitar a expansão do corpo de prova, bem como o fluxo preferencial através das paredes da membrana flexível.

No ensaio, buscou-se atingir uma saturação superior a 98% sob condições de fluxo constante na saída. Para a etapa de permeação da água, foi mantido um gradiente hidráulico ( $i = \Delta h / L$ ) de 27,6, em conformidade com a recomendação da ASTM D5084, que especifica que os gradientes durante esta fase não devem ser excessivamente altos.

### 3.8.2 Medição da condutividade hidráulica do solo de saprólito

Para este ensaio, foi utilizado o Método A - Carga Constante da ASTM D5084, que é indicado para a medição da condutividade hidráulica de materiais porosos saturados, empregando um permeâmetro de parede flexível.

O corpo de prova da amostra deformada foi moldado na direção vertical com a umidade natural da fundação (46%), conforme indicado no relatório de Itaipu (IECO e ELC, 1992). Assim, o material foi compactado em camadas até alcançar um peso específico úmido ( $\gamma_h$ ) semelhante ao especificado no referido relatório. O processo de moldagem é mostrado na figura 31.

**Figura 31** – Moldagem do corpo de prova de saprólito por compactação manual



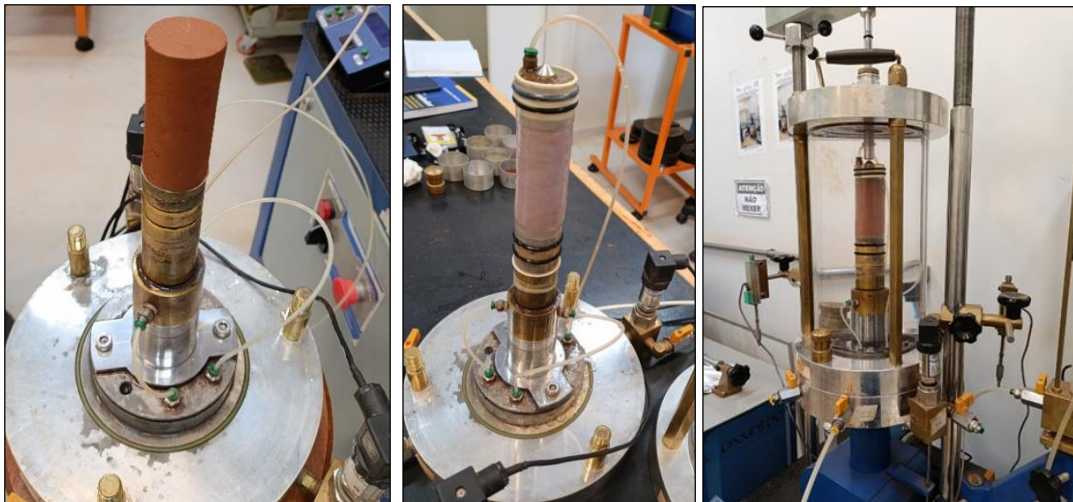
Os parâmetros utilizados para a moldagem estão resumidos no quadro 5.

**Quadro 5** - Dados iniciais do corpo de prova do solo de saprólito

Dados	
m (kg)	183,15
L(cm)	9,04
D (cm)	3,8
A(cm <sup>2</sup> )	11,341
V(cm <sup>3</sup> )	102,524
w (%)	46
$\gamma_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,786
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,22
S <sub>i</sub> (%)	94
G	3,03

A montagem foi realizada de acordo com as recomendações da norma mencionada, figura 32, assegurando que não houvesse entrada de ar entre as paredes da membrana flexível e o corpo de prova, ao igual que nas tubulações.

**Figura 32** – Montagem do corpo de prova do solo de saprólito



Conforme a ASTM D5084, foi estimada a saturação inicial do corpo de prova com base na densidade real do grão para o saprólito  $G_s = 3,03$ , valor referencial indicado no relatório de Itaipu. Determinou-se que, para alcançar 99% de saturação, era necessária uma contrapressão mínima de 180 kPa. Assim, durante a etapa de saturação, foram aplicados estágios de contrapressão variando entre 50 e 200 kPa, enquanto uma pressão confinante de 100 kPa foi mantida ao longo de todo o ensaio. Esse procedimento visou minimizar variações no volume, evitar a expansão do corpo de prova e o fluxo preferencial através das paredes da membrana flexível.

No ensaio, foi considerada uma saturação acima de 99% com condições de fluxo constante na saída. Nesse contexto, para a etapa de permeação da água, foi mantido um gradiente hidráulico ( $i = \Delta h / L$ ) de 10,2, conforme a recomendação da ASTM D5084, que especifica que os gradientes nesta fase do ensaio não devem ser excessivamente altos.

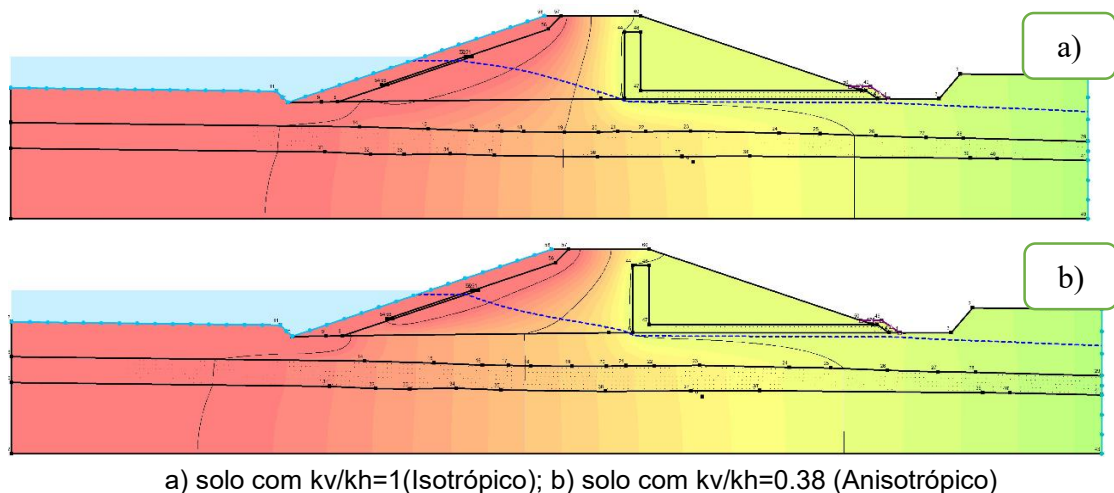
### 3.9 Hipóteses para a análise de fluxo bidimensional

Na realização deste trabalho, foram consideradas as seguintes quatro condições ou hipóteses para a análise de fluxo bidimensional:

- A condição do solo é saturada
- O solo é incompressível (não há variação de volume durante o fluxo)
- Escoamento em regime permanente ou estacionário
- Solo isotrópico enquanto a sua permeabilidade ( $k_v=k_h$ )

Para avaliar o impacto da anisotropia da permeabilidade no solo, foram realizadas simulações utilizando o software SEEP/W da GeoEstudo. Na figura a seguir são apresentados os dois casos do solo (isotrópico e anisotrópico).

**Figura 33** – Simulação computacional considerando a anisotropia da permeabilidade do solo de fundação

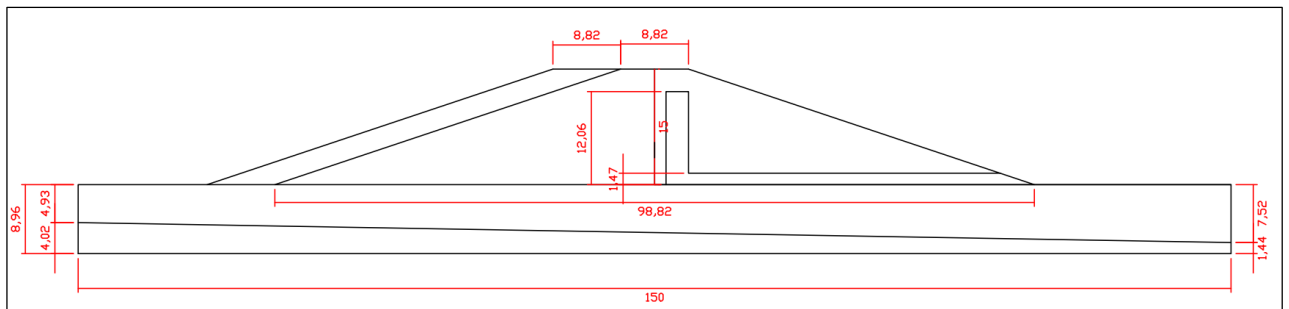


Como pode ser observado na figura 33, a principal diferença entre as duas condições analisadas está na forma da linha freática, que apresenta uma leve concavidade. Dessa forma, para a etapa de modelagem em laboratório, considerou-se o solo como isotrópico na análise do fluxo.

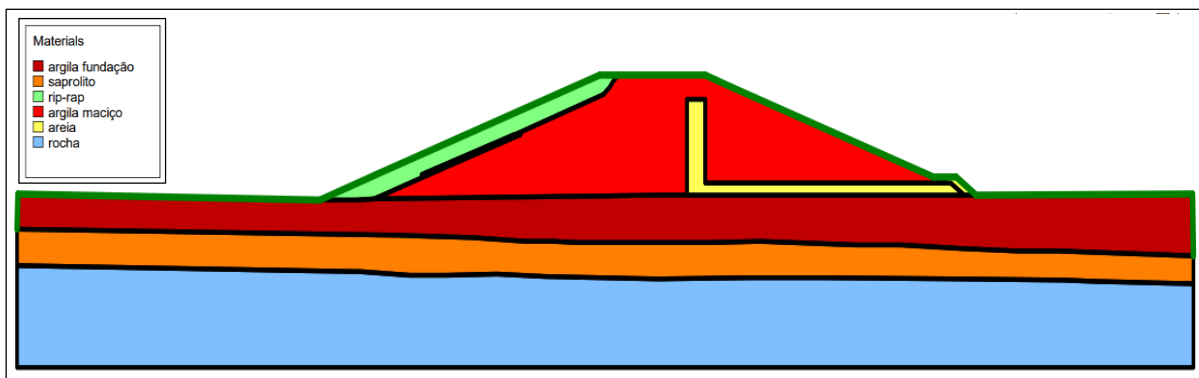
### 3.10 Características geométricas adaptadas ao modelo físico

A geometria e dimensões do modelo foram determinadas a partir de certas simplificações da seção típica 135+50. Considerando as dimensões do tanque, foi decidido utilizar uma escala de 1:68, a seção transversal final é mostrada nas figuras 34 e 35.

**Figura 34** - Dimensões utilizadas no modelo físico reduzido



**Figura 35** – Seção 135+50 utilizada no modelo físico reduzido

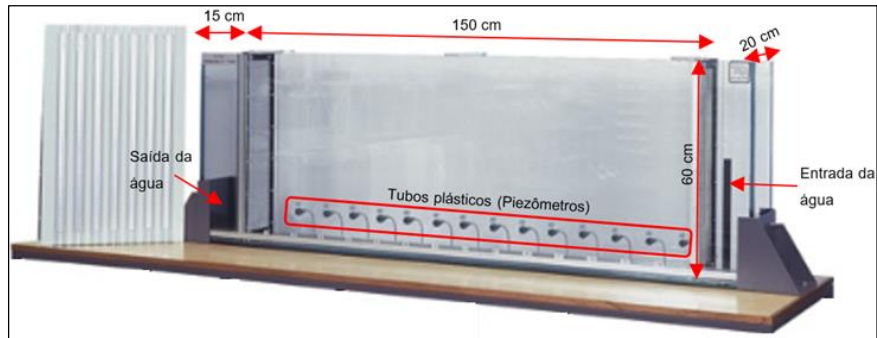


Como é observado na figura 35, a seção descreve um maciço homogêneo a base de argila, a fundação com as camadas de solo de argila e saprólito, no sistema de filtro e drenagem a areia e no talude montante o rip rap.

### 3.11 Construção do modelo reduzido

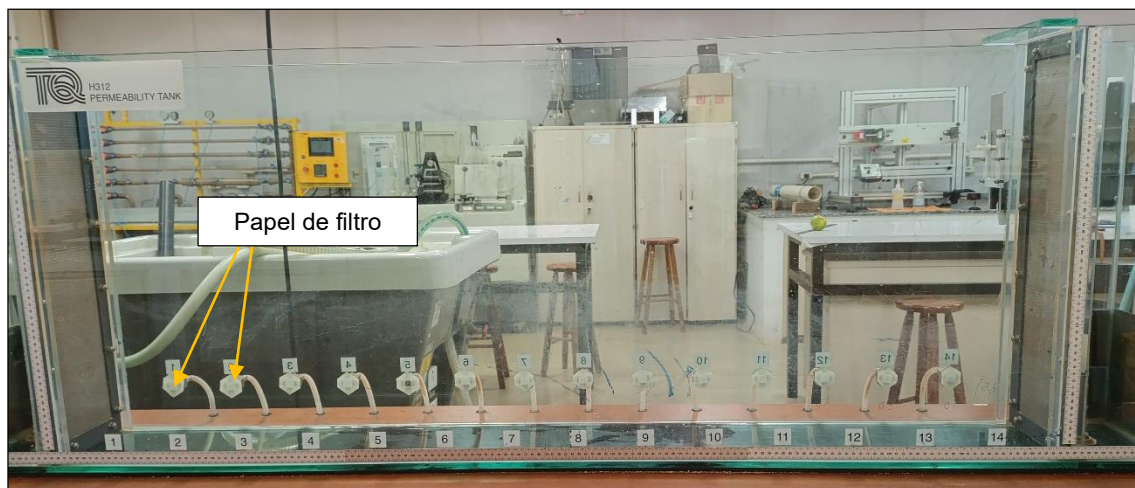
Nesta etapa foi utilizado o tanque de permeabilidade com dimensões mostradas na figura 36 a seguir.

**Figura 36** – Tanque de vidro



No primeiro momento, foi realizado um condicionamento do tanque de vidro para receber solos do tipo argiloso, pois geralmente os ensaios são com areia. Assim, foram adaptados filtros de papel nos pontos de instalação das tubulações dos piezômetros, na figura 37 mostra-se o tanque.

**Figura 37** – Adaptação do tanque de permeabilidade para solos finos



A continuação foi realizada a marcação da geometria em escala 1:68 no vidro do tanque, o esboço é mostrado na figura 38.

**Figura 38** – Marcação da geometria no vidro



Em seguida, foi preparada a amostra de saprólito com um teor de umidade natural de 43%, valor próximo ao indicado no relatório de IECO e ELC (1992). Para a compactação do solo na fundação, conforme mostrado na figura 39, utilizou-se um soquete manual de 1,3 kg. A amostra foi aplicada em duas camadas: inicialmente na primeira metade do tanque, respeitando a geometria definida, e posteriormente na segunda metade. A quantidade de solo por camada foi calculada com base no volume da seção, na massa específica aparente natural do solo ( $1,22 \text{ g/cm}^3$ ) e no teor de umidade natural.

**Figura 39** – Processo de compactação da camada de saprólito na fundação



O mesmo procedimento foi aplicado para a argila, figura 40, sendo sua umidade natural 28% e sua massa aparente natural ( $1.23 \text{ g/cm}^3$ ).

**Figura 40** – Processo de compactação da camada de argila na fundação



A compactação da fundação tardou um dia laboral de trabalho, de modo que para evitar a compressão dos solos pela perda de umidade, foi enchido o reservatório até a metade da espessura da fundação e se deixou até o próximo dia de trabalho.

No caso do corpo da barragem, foi utilizado também um soquete maior com 2kg de peso para a compactação das camadas. A compactação foi realizada em camadas de 2 cm com 29% de umidade, sendo os taludes cortados após a compactação uniforme do maciço por blocos.

Para auxiliar no processo de compactação, foram utilizados suportes de madeira e acetato para conseguir separar as regiões da argila e da areia no filtro vertical conforme as imagens da figura 41.

**Figura 41** – Procedimento de compactação e modelagem do maciço



No quadro 6 a seguir são indicadas as quantidades de solo utilizadas na construção do modelo.

**Quadro 6** – Parâmetros e quantidades de material utilizados no modelo

Camada	Volume (cm <sup>3</sup> )	Peso específico úmido (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade	Massa úmida (kg)	Massa seca(kg)
Saprólito (fundação)	7507,5	1,2	0,43	9,00	6,30
Argila (fundação)	12967,5	1,2	0,28	19,97	15,60
Argila (maciço)	11422,1	1,8	0,29	20,56	15,93

A areia utilizada no sistema de drenagem tinha uma permeabilidade média de  $2.8 \times 10^{-3}$  (cm/s), e para evitar o carregamento de finos na interseção do material de argila e areia, foi utilizado um geotêxtil. Além disso, no talude montante se colocou uma superfície com brita 0 (rip-rap).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Composição granulométrica do solo

#### 4.1.1 Distribuição granulométrica do solo de argila

Os resultados dos ensaios de peneiramento mecânico e sedimentação para a amostra de argila são apresentados nos quadros 7 e 8 respectivamente.

**Quadro 7** –Ensaio de granulometria por peneiramento mecânico

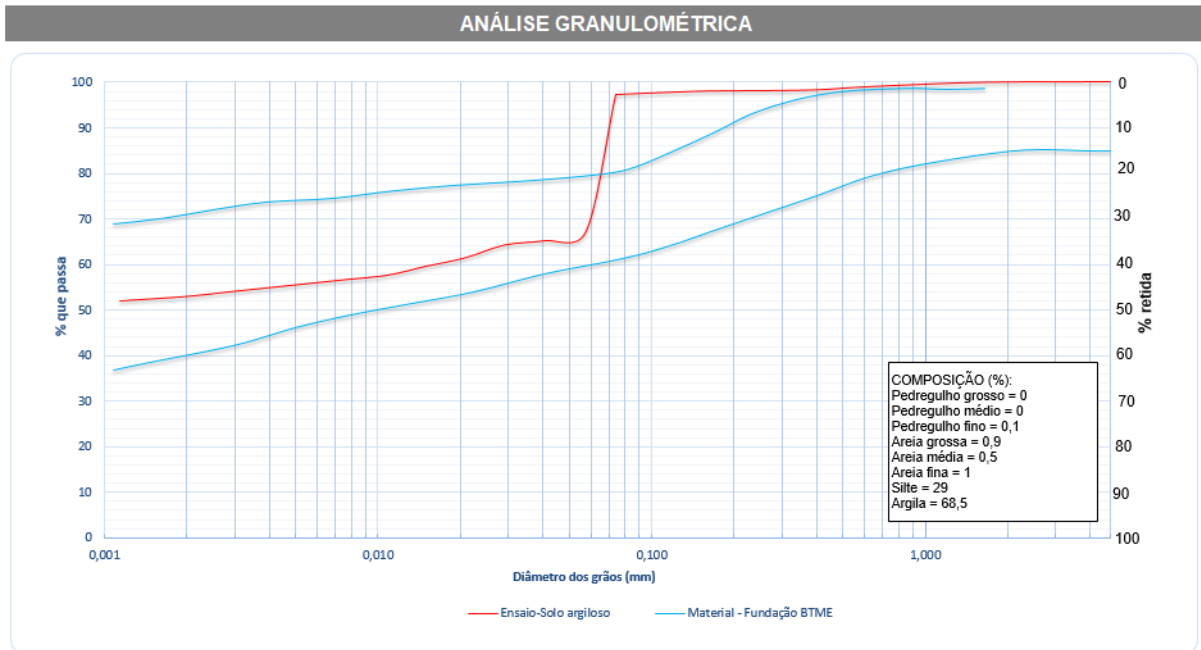
PENEIRAMENTO MECÂNICO						
Amostra de argila	Massa de solo (g)					500,00
	Massa retida lavada na peneira # 200 (g)					14,30
Peneira #	Diâmetro (mm)	Massa retida (g) Ms(#i)	Massa retida acumulada (g) ΣMs(#i)	% retida Pr(#_)	% retida acum. ΣPr(#_)	% que passa Pp(#_)
4	4,76	0	0,00	0,00	0,0	100,0
10	2	0,25	0,25	0,05	0,1	100,0
16	1,2	1,50	1,75	0,30	0,35	99,7
30	0,59	4,05	5,80	0,81	1,16	98,8
40	0,42	2,80	8,60	0,56	1,72	98,3
50	0,297	1,02	9,62	0,20	1,92	98,1
100	0,149	0,80	10,42	0,16	2,08	97,9
200	0,074	3,66	14,08	0,73	2,82	97,2
Prato	-----	0,03	14,11	0,01	2,82	97,2

**Quadro 8** – Ensaio de sedimentação

AMOSTRA DE ARGILA			
Massa do solo (g)		50,14	
Massa específica dos sólidos g/cm <sup>3</sup>		2,800	
DEFLOCULANTE			
Tipo		Hexametáfosfato de sódio	
Puro / Água destilada ((g) / (cm <sup>3</sup> ))		45,7/1.000	
Volume da solução (cm <sup>3</sup> )		125	
SEDIMENTAÇÃO			
Tempo de ensaio (min)	t	Altura de queda L (cm)	Diâmetro equivalente D (mm)
0,5		10,40	0,057
1		10,50	0,041
2		10,60	0,029
4		10,90	0,021
8		11,10	0,015
15		11,20	0,011
30		11,30	0,008
60		11,40	0,005
120		11,45	0,004
240		11,50	0,003
480		11,60	0,002
1440		11,70	0,001
			% de partículas com Ø < que D
			67,120
			65,240
			64,300
			61,479
			59,599
			57,719
			56,779
			55,839
			54,899
			53,959
			53,019
			52,079

A partir dos dados obtidos, foi determinada a curva granulométrica, figura 42.

**Figura 42** – Composição granulométrica do solo de argila



ESCALA ABNT NBR 6502:2022							
argila	silte	areia			pedregulho		
		fina	média	grossa	fino	médio	grosso
0,002		0,060	0,200	0,600	2,000	6,000	20,00
							60,00

A comparação entre os resultados da análise granulométrica do solo argiloso e a faixa correspondente ao material de fundação da BTME (documento interno SAT 2063.50.0253.P) indica que o solo analisado é representativo, uma vez que apresenta distribuição granulométrica compatível com a do material de fundação. No entanto, essa compatibilidade não é total, pois observa-se uma inclinação acentuada na curva de sedimentação, possivelmente influenciada pela equação utilizada nos cálculos. Devido à ausência da equação de calibração do densímetro, foi adotada uma equação aproximada, comumente empregada nesse tipo de ensaio.

#### 4.1.2 Distribuição granulométrica do solo de saprólito

Os resultados dos ensaios de peneiramento mecânico e sedimentação para o solo de saprólito são mostrados nos quadros 9 e 10.

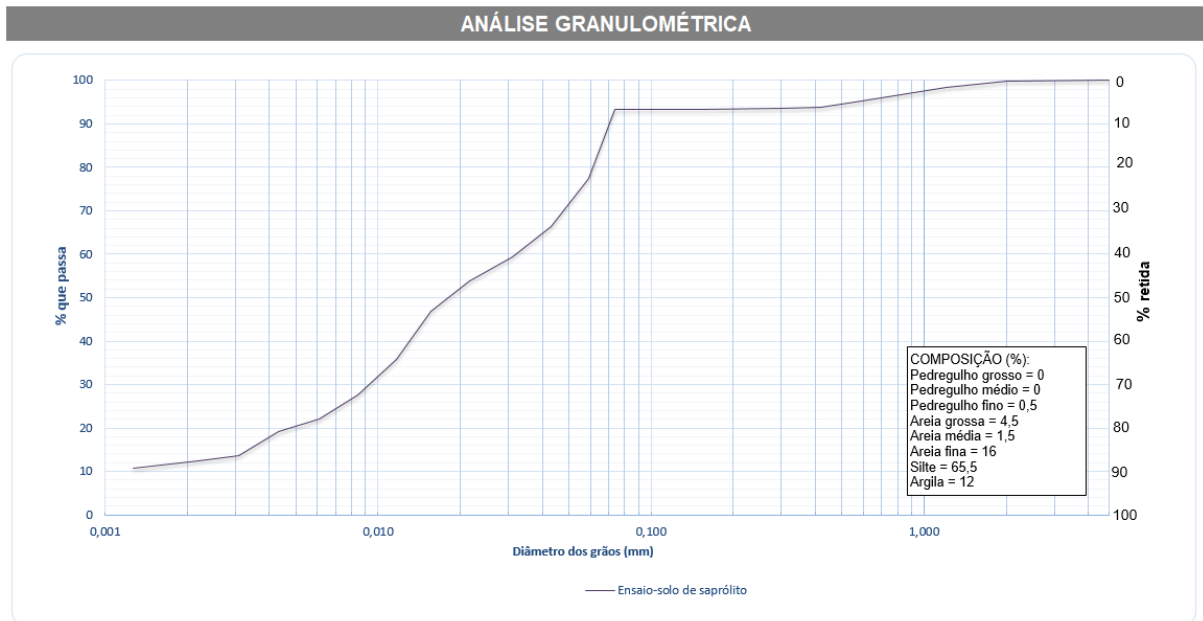
**Quadro 9 – Ensaio de granulometria por peneiramento mecânico**

PENEIRAMENTO MECÂNICO						
Massa total de solo úmido (g)				500		
Massa de sólidos (g)				485,34		
Massa retida lavada na peneira # 200 (g)				32,60		
Peneira #	Diâmetro (mm)	Massa retida (g) Ms(#i)	Massa retida acumulada (g) $\Sigma Ms(\#i)$	% retida Pr(#_)	% retida acum. $\Sigma Pr(\#_)$	% que passa Pp(#_)
4	4,76	0	0	0	0	100
10	2	0,29	0,29	0,06	0,06	99,94
16	1,2	7,40	7,69	1,52	1,58	98,42
30	0,59	15,68	23,37	3,23	4,82	95,18
40	0,42	6,02	29,39	1,24	6,06	93,94
50	0,297	1,23	30,62	0,25	6,31	93,69
100	0,149	1,06	31,68	0,22	6,53	93,47
200	0,074	0,62	32,30	0,13	6,66	93,34
Prato	-----	0,03	32,33	0,01	6,66	93,34

**Quadro 10 – Ensaio de sedimentação**

AMOSTRA DE SAPRÓLITO				
Descrição do solo		Saprólito		
Massa do solo (g)		50,14		
Massa específica dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )		3,030		
DEFLOCULANTE				
Tipo		Hexametáfosfato de sódio		
Puro / Água destilada (g / cm <sup>3</sup> )		45,7/1.000		
Volume da solução (cm <sup>3</sup> )		125		
SEDIMENTAÇÃO				
Tempo de ensaio (min)	t	Altura de queda (cm)	z	
Diâmetro equivalente (mm)	D	% de partículas com $\phi <$ que D		
30s = 0,5		12,39	0,0592	77,520
1min		13,19	0,0432	66,405
2min		13,69	0,0311	59,458
4min		13,28	0,0217	53,900
8min		13,78	0,0156	46,954
15min		14,59	0,0117	35,838
30min		15,19	0,0085	27,502
1h = 60min		15,59	0,0061	21,945
2h = 120min		15,79	0,0043	19,166
4h = 240min		16,19	0,0031	13,675
8h = 480min		16,29	0,0022	12,353
24h=1440min		16,39	0,0013	10,829

**Figura 43** – Composição granulométrica do solo de saprólito



ESCALA ABNT NBR 6502:2022								
argila	silte	areia			pedregulho			
		fina	média	grossa	fino	médio	grosso	
0,002		0,060	0,200	0,600	2,000	6,000	20,00	60,00

A análise da composição do solo (figura 43) indica uma predominância de silte, representando 68,5% da amostra. A curva granulométrica apresenta uma inclinação acentuada na faixa correspondente a partículas com diâmetros inferiores a 0,074 mm (peneira #200), evidenciando uma significativa presença de finos. Segundo Bowles (1980), esse comportamento pode estar associado ao método de cálculo adotado para as correções em ensaios com densímetros mais comuns.

## 4.2 Determinação dos índices de consistência

### 4.2.1 Índices de consistência do solo de argila

Para a obtenção do Limite de Plasticidade foram utilizados os dados do ensaio no quadro 11. O valor do Limite de Plasticidade ( $LP$ ) do solo dado pela média dos valores de teor de umidade obtidas com o ensaio, arredondado ao inteiro próximo,  $LP = 37\%$ .

**Quadro 11 – Limite de Plasticidade do solo de argila**

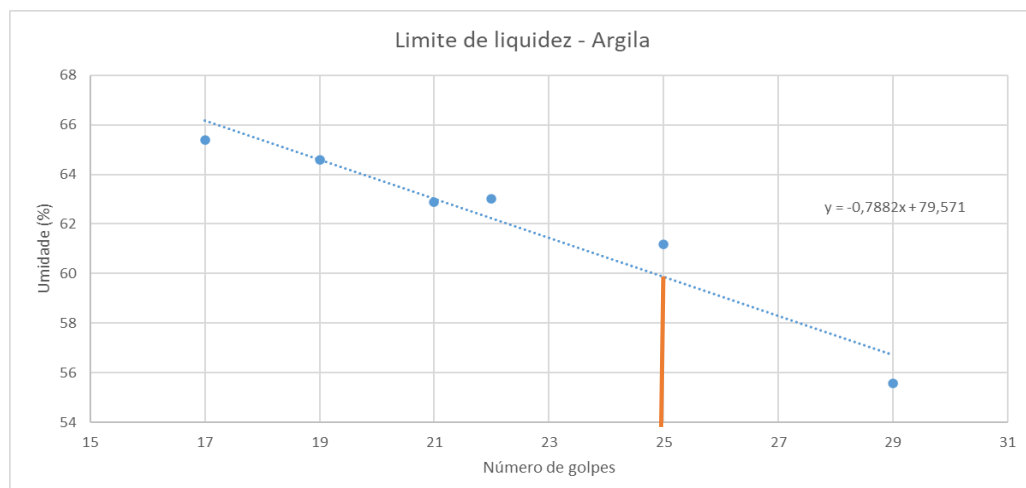
Dados /Cápsula	C22	C45
Peso da Cápsula (g)	7,77	7,46
Peso Cápsula + Solo Úmido (g)	12,16	11,36
Peso Cápsula + Solo Seco (g)	10,93	10,34
Peso de Água (g)	1,23	1,02
Peso Solo Seco (g)	3,16	2,88
Teor de Umidade (%)	38,92	35,42
Média	37,17	
Limite de Plasticidade (LP)	37	

No caso do ensaio no aparelho de Casagrande para a obtenção do Limite de Liquidez, o número de golpes e teor de umidade para cada amostra é mostrado no quadro 12 a seguir.

**Quadro 12 – Limite de Liquidez do solo de argila**

Dados	C27	C55	C51	C50	C31	C22
Peso da Cápsula (g)	7,75	7,57	8,07	6,98	6,92	7,73
Peso Cápsula + Solo Úmido (g)	11,95	12,02	12,58	11,85	12,46	12,05
Peso Cápsula + Solo Seco (g)	10,45	10,3	10,81	9,97	10,27	10,41
Peso de Água (g)	1,5	1,72	1,77	1,88	2,19	1,64
Peso Solo Seco (g)	2,7	2,73	2,74	2,99	3,35	2,68
Teor de Umidade (%)	55,56	63,00	64,60	62,88	65,37	61,19
Número de golpes	29	22	19	21	17	25
Limite de Liquidez (LL)	60					

Conforme a figura 44 o Limite de Liquidez (LL), teor de umidade com o qual a amostra cinzelada fecha após 25 golpes do aparelho, resultou no valor de LL= 60%.

**Figura 44 - Limite de liquidez do solo de argila**

**Quadro 13** – Índice de Plasticidade da argila

Parâmetros	LMS-Unila
Limite de Plasticidade (LP)	37
Limite de Liquidez (LL)	60
IP	23

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e com base nos resultados dos ensaios de caracterização, o solo foi classificado como argila de alta plasticidade (CH). No relatório de Itaipu (IECO e ELC, 1992), os valores indicados para o material argiloso são LL = 63% e IP = 38. Nos ensaios realizados, foi obtido um valor de Limite de Liquidez (LL) bastante próximo, de 60% (Quadro 13), porém o Índice de Plasticidade (IP) foi menor, registrando 23%. Mesmo com essa diferença, a classificação do solo como CH foi mantida.

#### 4.2.2 Índices de consistência do solo de saprólito

Os dados obtidos do ensaio de determinação do Limite de Plasticidade da amostra de saprólito são apresentados no quadro 14.

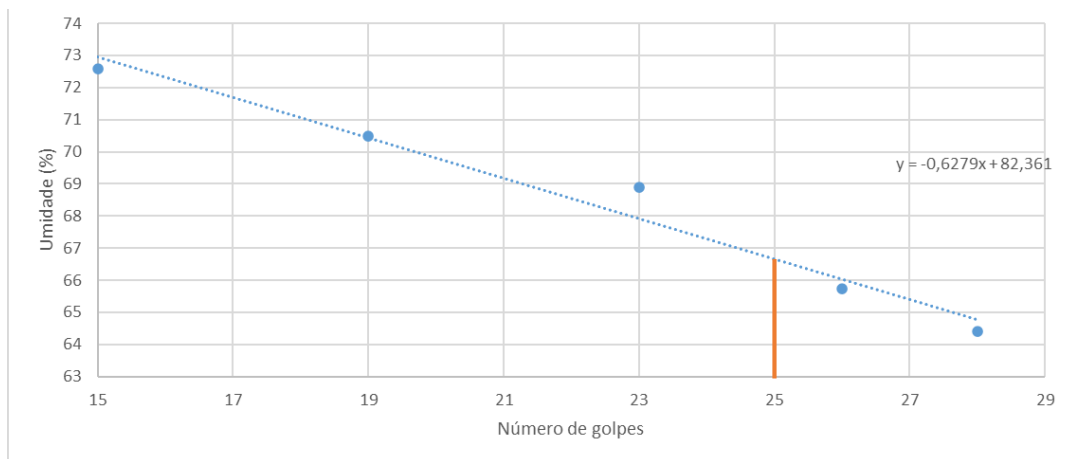
**Quadro 14** – Limite de Plasticidade do solo de saprólito

Medições /Cápsula	C10	C53	C16
Peso da Cápsula (g)	7,56	7,82	7,22
Peso Cápsula + Solo Úmido (g)	8,74	9,24	8,84
Peso Cápsula + Solo Seco (g)	8,34	8,75	8,31
Peso de Água (g)	0,4	0,49	0,53
Peso Solo Seco (g)	0,78	0,93	1,09
Teor de Umidade (%)	51,28	52,69	48,62
Média	50,86		
Limite de Plasticidade (LP)	51		

No quadro 15 são mostrados os dados do ensaio para determinar o limite de plasticidade do solo de saprólito. A curva obtida a partir desses dados, figura 45, apresenta o valor do LP com 25 golpes.

**Quadro 15 – Limite de Liquidez do solo de saprólito**

Dados	C24	C1	C14	C6	C45
Peso da Cápsula (g)	8,13	7,34	7,08	6,87	7,46
Peso Cápsula + Solo Úmido (g)	15,89	13,34	11,37	12,53	12,62
Peso Cápsula + Solo Seco (g)	12,85	10,96	9,62	10,19	10,45
Peso de Água (g)	3,04	2,38	1,75	2,34	2,17
Peso Solo Seco (g)	4,72	3,62	2,54	3,32	2,99
Teor de Umidade (%)	64,41	65,75	68,90	70,48	72,58
Número de golpes	28	26	23	19	15
Limite de Liquidez (LL)	67				

**Figura 45 – Limite de liquidez do solo saprólito**

Logo, o índice de plasticidade calculado pela diferença do LL e LP, para solo de saprólito foi de 16% como é indicado no quadro 16.

**Quadro 16 – Índice de plasticidade do saprólito**

Parâmetros	LMS-Unila
Limite de Plasticidade (LP)	51
Limite de Liquidez (LL)	67
IP	16

Seguindo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e em base dos resultados dos ensaios realizados, o solo foi classificado como silte inorgânico elástico (MH). Embora o Índice de Plasticidade obtido para o saprólito seja diferente do valor de IP = 27 informado no relatório de Itaipu (quadro 2).

### 4.3 Densidade real dos grãos de argila

Para calcular a densidade real dos grãos do solo foi aplicado o valor de correção da temperatura para obter  $G_s 20^\circ$  (quadro 17).

**Quadro 17 – Densidade real dos grãos de argila**

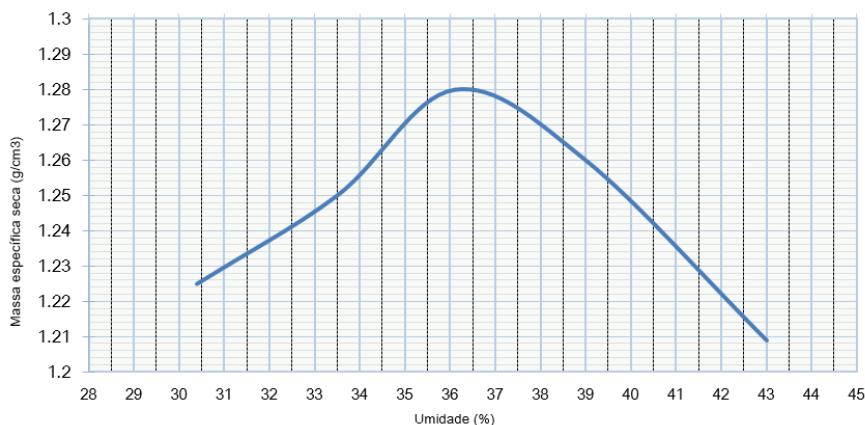
PESOS MEDIDOS		
P1	Peso do picnômetro vazio (g)	114,36
P2	Peso do picnômetro mais amostra (g)	126,32
P3	Peso do picnômetro mais amostra mais água (g)	616,41
P4	Peso do picnômetro mais água (g)	608,65
$G_s 25^\circ$		2,79
$G_s 20^\circ$		2,78

O valor de  $G_s$  medido foi menor ao valor indicado no relatório de Itaipu, quadro 1 ( $G_s=2.95$ ). A diferença do resultado entre os ensaios pode ser consequência do pouco tempo de aplicação da bomba de vácuo no ensaio deste trabalho.

### 4.4 Curva de compactação do solo de saprólito

Para o ensaio de compactação (Proctor Normal), foram calculados os valores da massa específica ( $\gamma$ ) para cada teor de umidade dos corpos compactados. A Figura 46 apresenta a curva de compactação do solo, a partir desta se obtém uma umidade ótima de 36,5% para uma massa específica aparente seca de  $1,28 \text{ g/cm}^3$ .

**Figura 46 – Curva de compactação do saprólito**



#### 4.5 Determinação da condutividade hidráulica do solo de argila

Segundo a recomendação da ASTM D5084, foi calculado o  $k_{20^\circ}$  ajustado com o fator de correção devido à temperatura. No quadro 18 são apresentados os resultados do ensaio da condutividade hidráulica para o solo de argila.

**Quadro 18** – Ensaio da condutividade hidráulica do solo de argila

Estágio com fluxo e saturação acima de 98%		
$\Delta Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	i	k (cm/s)
3,12E-05	27,6	9,99E-08
3,59E-05	27,6	1,15E-07
3,49E-05	27,6	1,12E-07
3,52E-05	27,6	1,13E-07
3,23E-05	27,6	1,03E-07
3,08E-05	27,6	9,86E-08
3,14E-05	27,6	1,00E-07
MÉDIA $K_{25^\circ}$ (cm/s) = 1,1E-07		
$K_{20^\circ}$ (cm/s) = 9,4E-08		

#### 4.6 Determinação da condutividade hidráulica do solo de saprólito

A seguir, são apresentados no quadro 20 os resultados das medições da condutividade hidráulica e o valor médio com a correção para  $k_{20^\circ}$  (quadro 19).

**Quadro 19** – Ensaio da condutividade hidráulica do solo de saprólito

Estágio com fluxo e saturação acima de 98%		
$\Delta Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	i	k (cm/s)
1,75E-03	10,2	1,52E-05
2,01E-03	10,2	1,75E-05
1,99E-03	10,2	1,72E-05
1,82E-03	10,2	1,58E-05
1,89E-03	10,2	1,64E-05
1,30E-03	10,2	1,13E-05
1,53E-03	10,2	1,32E-05
MÉDIA $K_{25^\circ}$ (cm/s) = 1,52E-05		
$K_{20^\circ}$ (cm/s) = 1,35E-05		

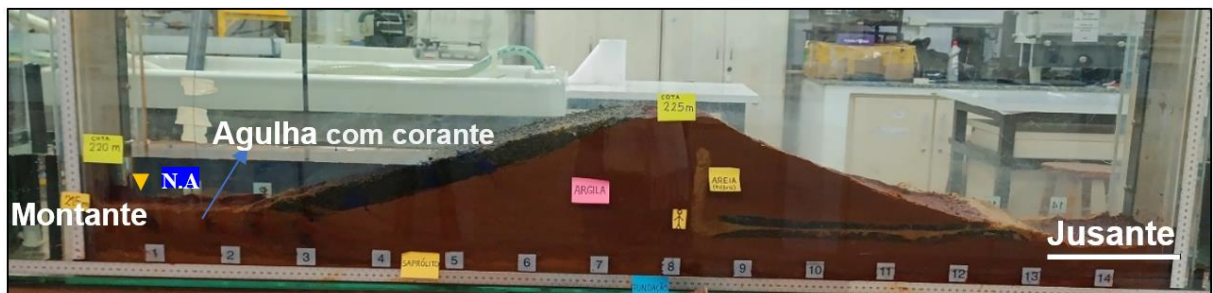
#### 4.7 Análise do fluxo na seção 135+50

O N.A. do reservatório (montante) para o regime estacionário no modelo físico reduzido foram de 14,6cm, elevação representativa do nível normal de operação do reservatório (El. 220m). A jusante o N.A. foi de 4cm na saída, assim a diferença de carga hidráulica que provocou a percolação foi de 10,6cm.

Depois de 4 semanas foi considerado o regime permanente no fluxo evidenciado no nível de água na saída ao manter-se constante e nos valores de vazão na saída (uma média de 0,00375 L/min). O fluxo começou na superfície equipotencial com a maior carga hidráulica, talude de montante, e chegou até a superfície com menor carga hidráulica no nível de saída perto da representação da superfície do terreno no modelo.

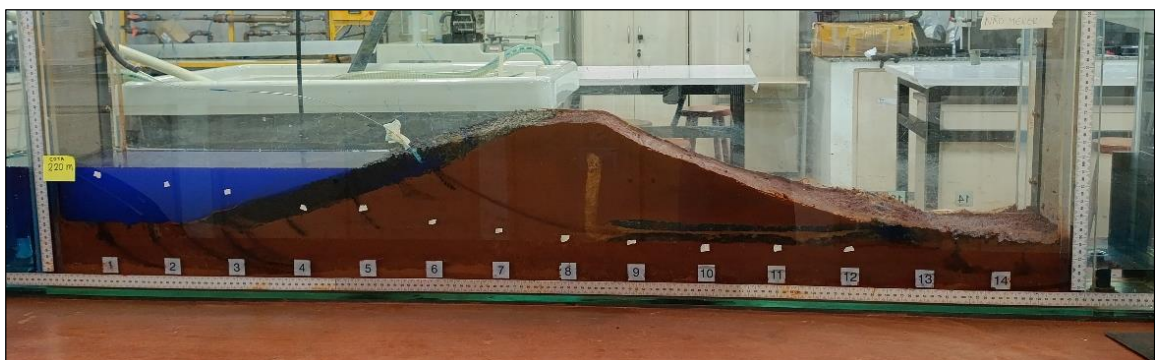
A figura 47 mostra o modelo reduzido com as marcas do corante aplicados em distintos pontos da superfície de terreno a montante em direção à fundação da seção.

**Figura 47** – Condições de fluxo no modelo físico da seção 135+50



A marcação das linhas com a aplicação da agulha no talude de montante ocorreu de maneira mais lenta no corpo do maciço em comparação com a fundação. Diante disso, para determinar a linha freática foi aplicado o corante diretamente no reservatório, conforme mostrado na figura 48.

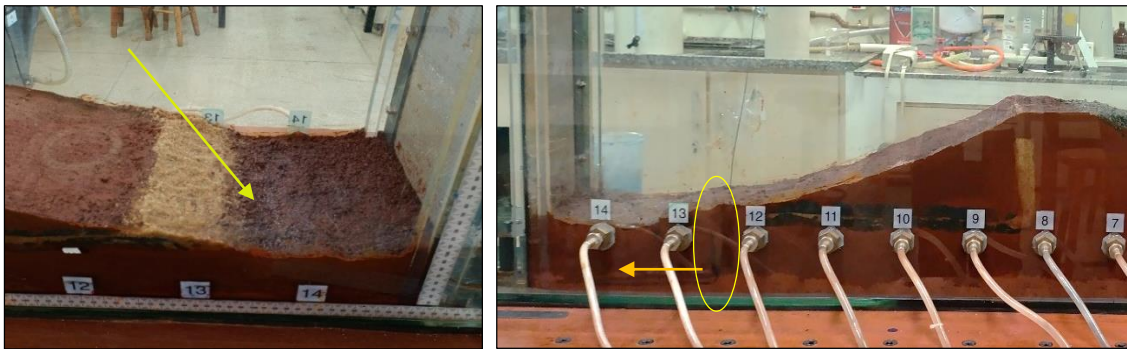
**Figura 48** – Aplicação de corante para obter a linha freática



É pertinente mencionar que algumas linhas foram ressaltadas com um marcador para facilitar sua captura nas imagens.

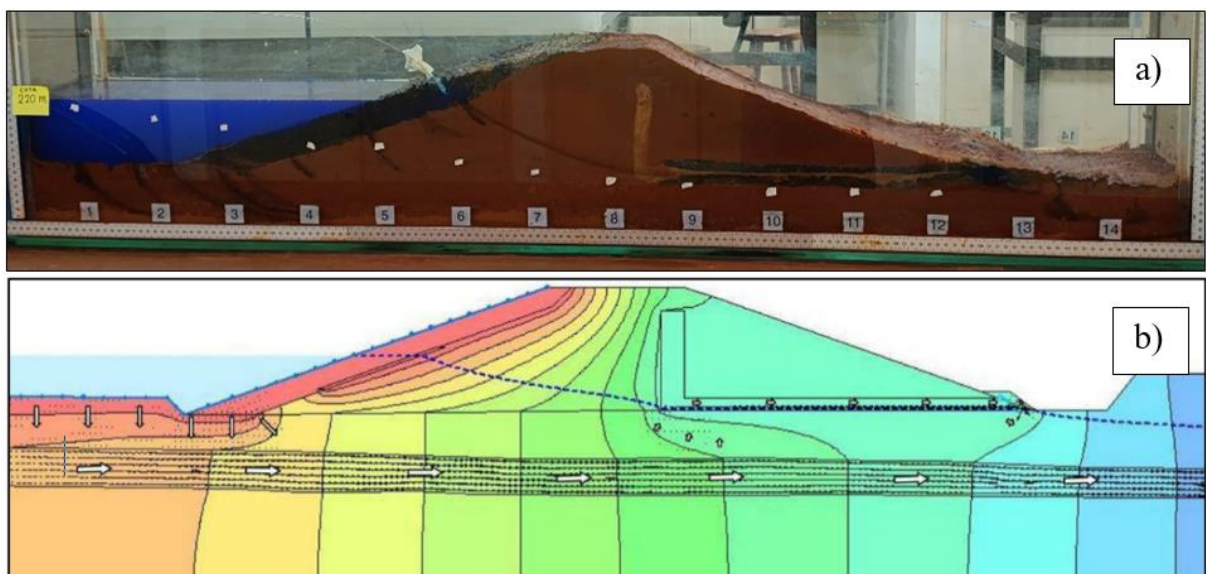
Também foi possível observar, na superfície do terreno a jusante, uma área com alta umidade, resultado da drenagem da água pelo tapete drenante composto por areia (figura 49). Nessa mesma região, aplicou-se corante na camada de saprólito, com o auxílio de uma agulha, com o intuito de identificar se as linhas de fluxo da água seguiam uma trajetória ascendente ou horizontal. A imagem apresentada na figura a seguir mostra o trajeto percorrido pelo corante desde o ponto de injeção, evidenciando que seu percurso se manteve predominantemente horizontal até alcançar a saída do sistema.

**Figura 49** – Observações nas condições de fluo na região de jusante



Os modelos experimental e computacional da seção 135+50 são apresentadas na figura 50.

**Figura 50** – Linhas de fluxo nos modelos físico a) e computacional b)



Fonte, a) Autoria própria, 2024; b) Rodrigues (2017)

A figura 50 (a) indica a trajetória das linhas de fluxo no modelo do tanque na região de montante, se observa uma mudança na direção de vertical e horizontal antes da tinta atingir a camada de saprólito na fundação. Isso sugere caminhos preferencias de fluxo pela interface dos materiais com diferentes níveis de compactação e então diferente permeabilidade.

Em quanto ao maciço compactado, observa-se que linha freática em ambos modelos (figura 52 a e b) conecta o nível de água do reservatório com o sistema de filtro de areia a uma altura similar, mas de concavidade diferente. No entanto, a linha freática ao término do talude de jusante não foi possível de observar no modelo reduzido, pois o corante não foi dispersado com o fluxo de água.

A linha pontilhada branca marca a linha de carga hidráulica total registrada pelos piezômetros nos 14 pontos no modelo. Diante disso, pode-se dizer que em condições de regime estacionário, a percolação pelo maciço compactado é intensa e o sistema de drenagem cumpre sua função de dissipação das cargas controlando o fluxo.

#### 4.8 Análise das cargas piezométricas e poropressões

Em base das leituras dos piezômetros no tanque de permeabilidade instalados nos 14 pontos conforme a figura 51, foram determinadas as cargas piezométricas para o regime estacionário estabelecido.

**Figura 51**– Leituras piezométricas no modelo físico



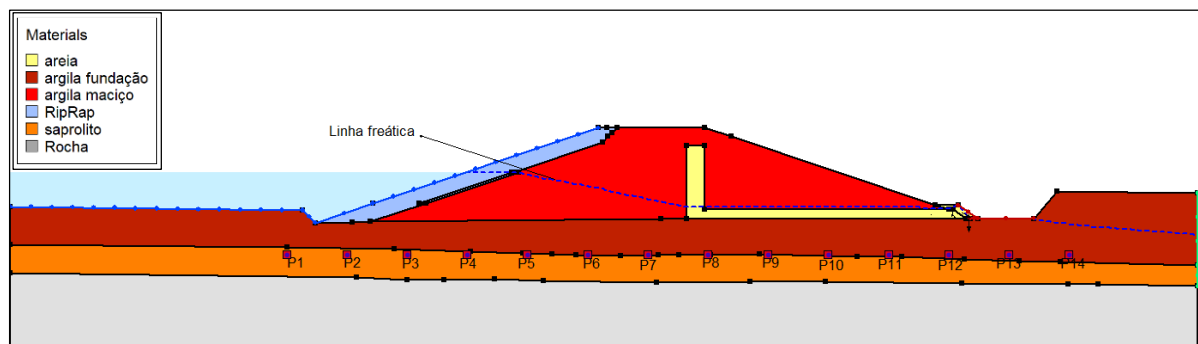
Foi evidenciada uma carga hidráulica nula nos piezômetros P13 e P14 localizados na região de jusante da seção.

Com esses dados se realizou o cálculo da poropressão em cada um dos pontos considerando o peso específico da água como  $9,807 \text{ kN/m}^3$ . No quadro 20 a seguir são mostrados os valores obtidos.

**Quadro 20** – Cargas hidráulicas e poropressões nos pontos dos piezômetros

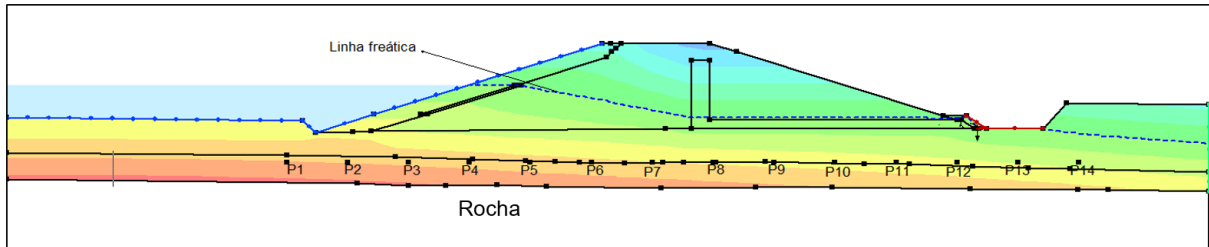
X(cm)	Piezômetro	Carga Total (cm)	Carga de elevação (cm)	Poropressão (kPa)
0	1	17	3	1,37
10	2	16	3	1,27
20	3	15,5	3	1,23
30	4	14,5	3	1,13
40	5	13	3	0,98
50	6	12	3	0,88
60	7	11	3	0,78
70	8	10,9	3	0,77
80	9	9,5	3	0,64
90	10	9,5	3	0,64
100	11	9,4	3	0,63
110	12	9,4	3	0,63
120	13	0	3	-0,29
130	14	0	3	-0,29

Utilizando a escala geométrica de 1:68 adotada para o modelo reduzido, os pontos dos piezômetros foram identificados em locais equivalentes na seção em escala real. Os dados da seção 135+50 da BTME do relatório de Itaipu ((IECO e ELC, 1992) foram utilizados na simulação computacional no software SEEP/W com regime estacionário, N.A do reservatório a cota 220m. Na figura 52 pode-se observar a localização dos pontos dos piezômetros (P1, P2, ...P14) na seção simulada:

**Figura 52** – Pontos dos piezômetros equivalentes na seção em escala real

Na figura 53 pode-se observar as regiões que indicam como varia a poropressão na seção, sendo a linha freática a linha onde a carga de pressão é zero.

**Figura 53** – Poropressões simuladas na seção 135+50

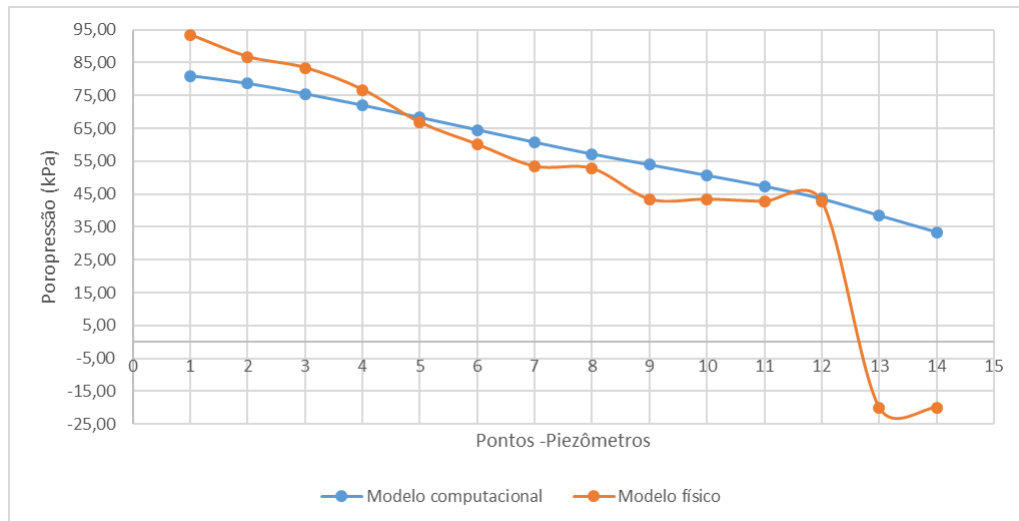


Os valores obtidos de poropressão no modelo em escala reduzida do quadro 20 foram transformados com o fator de escala 1/68 (ou seja, na mesma escala que os valores da simulação numérica). No quadro 21 são mostrados os valores da poropressão respeito a cada piezômetro, nas figuras 54 e 55 se apresentam os gráficos desses valores.

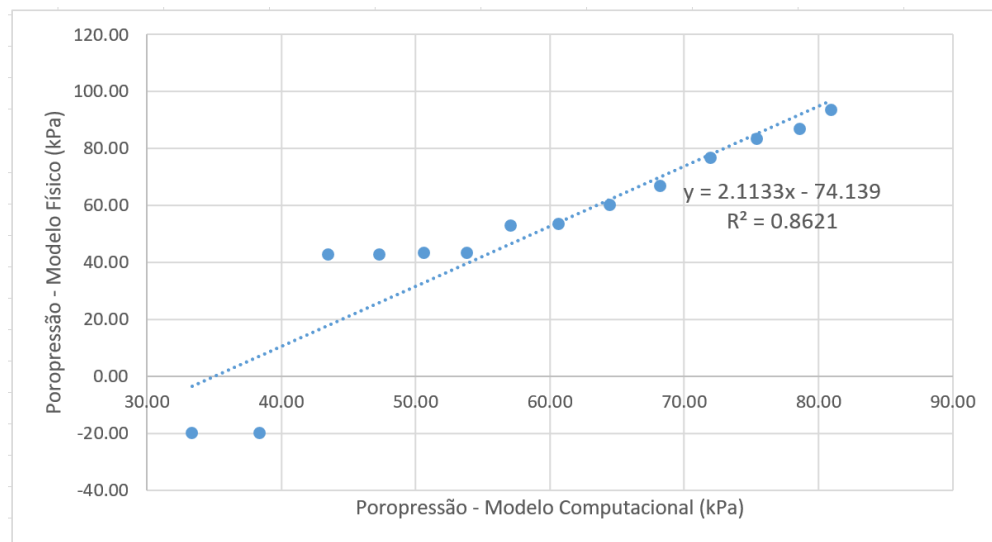
**Quadro 21** – Valores das Poropressões nos modelos

Pontos		Poro-pressão (kPa)	
X(m)	Piezômetro	Modelo computacional	Modelo físico
0,0	1	80,96	93,36
6,8	2	78,63	86,69
13,6	3	75,45	83,36
20,4	4	71,98	76,69
27,2	5	68,26	66,69
34,0	6	64,49	60,02
40,8	7	60,70	53,35
47,6	8	57,10	52,68
54,4	9	53,87	43,35
61,2	10	50,63	43,35
68,0	11	47,32	42,68
74,8	12	43,50	42,68
81,6	13	38,43	-20,01
88,4	14	33,38	-20,01

**Figura 54** – Gráfico das poropressões nos modelos



**Figura 55** – Correlação dos valores do modelo físico e computacional



O Coeficiente de correlação de Pearson, calculado a partir do gráfico da figura 55, foi de  $(r) = 0,92$ , indicando uma forte correlação positiva entre os valores do modelo físico e do modelo computacional. No entanto, o 13,8% de percentual de erro pode ser atribuído a simplificações feitas na geometria do modelo físico, sendo os piezômetros P13 e P14 os que geraram uma maior variação ao registrar carga hidráulica nula.

Além disso, os erros gerados de pequenas variações podem ocorrer devido a efeitos não capturados no modelo físico, como anisotropia da permeabilidade dos solos ( $k_v \neq k_h$ ) da barragem, variações nas condições de contorno, saturação dos solos, entre outros fatores.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi possível comprovar a viabilidade do uso de modelos físicos reduzidos em estudos de percolação em barragens de terra. Demonstrou-se a aplicabilidade desses modelos, compostos por solos finos como argila e silte, na visualização das linhas de fluxo e na estimativa das poropressões. Dessa forma, os modelos físicos se mostram como uma ferramenta prática e acessível, capaz de complementar as análises obtidas por meio de simulações numéricas.

Os ensaios de caracterização das amostras deformadas do local próximo à BTME, permitiram identificar, de maneira prática, os principais parâmetros necessários para elaboração do modelo físico reduzido. Além disso, utilizando o método A da norma ASTM D5084, foi possível determinar os valores de condutividade hidráulica dos solos utilizados. Esses resultados foram importantes para garantir que os materiais analisados sejam representativos.

A construção do modelo reduzido da seção 135+50 da BTME, no tanque de permeabilidade, foi realizada seguindo criteriosamente o controle da densidade por meio da massa e do volume de solo utilizado, além do teor de umidade durante o processo de compactação. A condição de fluxo em regime permanente foi fundamental para conseguir visualizar as linhas de fluxo, utilizando corante aplicado em diferentes pontos com o auxílio de uma agulha. O fluxo foi mantido continuamente por um período de 60 dias para garantir a estabilização do sistema e a observação dos padrões de percolação.

Assim, os resultados obtidos mostraram uma boa correspondência entre os dados do modelo físico e as simulações computacionais, enquanto à similitude da superfície freática interceptando de maneira direta o filtro vertical. Além disso, nas trajetórias de fluxo na fundação, se observou que as linhas tendem a se direcionar para a camada de saprólito e à interfase coma argila.

Na análise das cargas piezométricas e poropressão, o Coef. Correlação de Pearson 0,92 indica uma forte correlação entre os valores de poropressão no modelo reduzido e no modelo computacional. Porém, o 13,8% de erro pode se dever às simplificações geométricas, imprecisões experimentais, ou às considerações de análise.

Por fim, esta pesquisa abre espaço para futuras investigações sobre a percolação em barragens de terra, através de modelos físicos reduzidos podendo-se considerar a análise de cenários em outras condições específicas.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Relatório de segurança de barragens 2023. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2024/06/rsb%E2%80%93relatorio-seguranca-barragens-2023-ANA-27jun2024-compactado.pdf>.

ALBUQUERQUE, P. J. R. (Org.). Anais do XX COBRAMSEG. Campinas, SP: Chuva Inc., 2022.

ASSIS, A. P. Apostila do curso de barragens. Brasília: UnB, 2003. 170 p.

ARAÚJO, M. C. N. Estudo de equivalência entre drenos franceses e tapetes drenante em barragens de terra. [s.l.], 2013. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/36865>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6457: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Solo - Determinação da massa específica aparente do solo. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13969: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos por carga constante. Rio de Janeiro, 1997.

ASTM. Standard test methods for particle-size analysis of soils. ASTM D422-63 (1998). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, EUA, 1998. 8 p.

ASTM. Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. ASTM D5084-10. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>.

BOWLES, J. E. Manual de laboratório de solos em engenharia civil. 1. ed. Bogotá, Colômbia: McGraw-Hill Latinoamericana, 1980.

Centrais Elétricas de São Paulo S.A. (CESP). (1976). Ensaio geotécnicos sobre amostras indeformadas da fundação da barragem de terra - margem esquerda e dos aterros experimentais e sobre amostras deformadas das áreas de e da fundação da barragem da Usina de Itaipu. Documento interno de Itaipu, SAT 2063.50.0253.P

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. Mecânica de fluidos: Fundamentos e aplicações. 1. ed. México: McGraw-Hill, 2006.

CORREIA, K. R. et al. Análise de permeabilidade em modelo reduzido de barragem através da altura piezométrica. Engineering Sciences, [s.l.], 2019.

DAS, B. M. Fundamentos de engenharia geotécnica. São Paulo: Cengage Learning, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). DNER-ME 093/64 – Densidade real dos solos: método de ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1964.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. The statistics of embankment dam failures and accidents. Canadian Geotechnical Journal, [s.l.], v. 37, n. 5, p. 1000–1024, 2000. Disponível em: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/t00-030>.

FRANCA, M. J. Caracterização e modelação numérica e experimental da ruptura provocada por galgamento de barragens de enrocamento. 2002. Dissertação - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2002.

GEO-SLOPE. SEEP/W for seep analysis – User's Guide. GEO-SLOPE International Ltd., Canadá, 2001.

International Engineering Company (IECO) & Enerconsult Engenharia Ltda (ELC) (1977). Aprovechamiento Hidroeléctrico de Itaipu - Presa de Tierra Margen Izquierda y Transición con la Presa de Enrocado - Informe final del proyecto. Arquivo interno de Itaipu, SAT 4280.50.8003-E.

\_\_\_\_\_. 1988. Aproveitamento Hidrelétrico de Itaipu - Barragens de Terra E Enrocamento - Instrumentação - Comportamento das estruturas. Arquivo interno de Itaipu, SAT 4006.50.0018.P-RO.

\_\_\_\_\_. 1992. Aprovechamiento Hidroeléctrico de Itaipu - Presa de Tierra de la Margen Izquierda - Informe geotécnico final - Síntesis de los parámetros geotécnicos y análisis de estabilidad del macizo. Arquivo interno de Itaipu, SAT 4280.50.8007.E.

ITAIPU BINACIONAL. Itaipu - Usina Hidrelétrica - Aspectos de engenharia. Foz do Iguaçu, 2009.

LADEIRA, J. E. R. Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: o caso UHE São Simão. [s.l.], 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/FRPC-78HHUG>.

MARANGON, M. Unidade 05 - Barragens de terra e enrocamento. In: Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra: Barragens de Terra e Enrocamento. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004. 25 f.

MASSAD, F. Obras de terra: Curso básico de geotecnia. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MELO L. R. T. Monitoração de modelos físicos reduzidos para investigação do comportamento de estruturas em escala real. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MOHAMED, N. S. Analysis of seepage through earth dams with internal core. International Journal of Engineering Research and, [s.l.], v. 8, n. 8, p. IJERTV8IS080168, 2019. Disponível em: <https://www.ijert.org/analysis-of-seepage-through-earth-dams-with-internal-core>.

MONTES, C. C. Estudos piezométricos e análises de estabilidade de taludes da barragem Bico de Pedra. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Barragens) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

NELIO, G. Barragens de terra e enrocamento. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1982.

OLIVEIRA, D. A. Análise do fluxo d'água na barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves - Açú/RN. 2014. MasterThesis - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s.l.], 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/19622>.

OLIVEIRA, T. C. F. et al. Avaliação de Modelos Físicos Reduzidos Construídos em Laboratório para o Estudo da Percolação de Água em Duas Barragens Homogêneas de Terra. [s. l.], 2018. Disponível em: <https://zenodo.org/record/3946233>.

PATIAS, J.; FERNANDES, D.; RODRIGUES, R. Mapeamento do perfil de solos residuais presentes no Canal da Piracema de Itaipu Binacional. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2024. Editora Omnis Scientia, 2024. Disponível em: <https://editoraomnisscientia.com.br/post-artigo/?artigo=4269>.

ROCHA, L. C. As tragédias de Mariana e Brumadinho. Caderno de Geografia, [s.l.], v. 31, n. 1, p. 184, 2021. Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/25541>.

RODRIGUES, R. L. Comportamento da Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu Durante o Período de Operação. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/32942/32942.PDF>.

SILVEIRA, J. F. A. Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SOUZA, M. M. Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani. Rio de Janeiro, 2013.

THÁ, P. Estudo Das Condições De Fluxo Pela Barragem De Terra Da Margem Esquerda De Itaipu. 2007. Mestre em Ciências De Engenharia Civil - Pontifícia Universidad e Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2007. Disponível em: [http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca\\_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=11080@1](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=11080@1).

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. Soil mechanics in engineering practice. New York: John Willey & Sons, 1948.

UNAS, M. S. P. Estudo experimental e numérico de problemas de percolação em modelo reduzido. [s.l.], 2010. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/61368>.

UNITED STATES. Army Corps of Engineers. Hydrologic engineering requirements for reservoirs. Engineer Regulation ER 1110-2-1420. Washington, D.C.: US Army Corps of Engineers, 2010.

XU, Guanchao; GUO, Bowen; MENG, Zhuolun; ZHAO, Jiwei. Revisão de segurança sísmica de barragens gravitacionais com base no método dos elementos finitos. Geofluids, vol. 2022, artigo ID 5463613.