



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**KARLA MONIQUE OLIVEIRA DE SOUSA**

**AVALIAÇÃO DE EROSÃO INTERNA EM INTERFACES SOLO-CONCRETO:  
ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO DE MEDIDA MITIGADORA**

**FORTALEZA**  
**2022**

KARLA MONIQUE OLIVEIRA DE SOUSA

AVALIAÇÃO DE EROÇÃO INTERNA EM INTERFACES SOLO-CONCRETO: ESTUDO  
EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO DE MEDIDA MITIGADORA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.

FORTALEZA  
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S697a Sousa, Karla Monique Oliveira de.  
Avaliação de Erosão Interna em Interfaces Solo-Concreto: Estudo Experimental e Simulação de Medida Mitigadora / Karla Monique Oliveira de Sousa. – 2022.  
92 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.

1. Interface solo-concreto. 2. Rugosidade. 3. Modelagem 3D. 4. Gradiente hidráulico. I. Título.  
CDD 624.15

---

KARLA MONIQUE OLIVEIRA DE SOUSA

AVALIAÇÃO DE EROÇÃO INTERNA EM INTERFACES SOLO-CONCRETO: ESTUDO  
EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO DE MEDIDA MITIGADORA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. André Luis Brasil Cavalcante

Universidade de Brasília (UnB)

A Deus.

Aos meus pais, Elzilene Oliveira e Francisco Loreto, a minha falecida avó Elza Oliveira e a todos da minha família e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por todas as maravilhas e bênçãos que venho recebendo Dele, por me dar muito mais do que eu preciso, e por me abençoar muito mais do que eu mereço. A Ele sou eternamente grata, pela vida que me proporcionou, pelas pessoas que foram colocadas em minha vida, por tudo que me moldou a ser hoje.

Aos meus pais, Elzilene Oliveira e Francisco Loreto, que não mediram esforços em me proporcionar a melhor educação e oportunidades, por acreditar no meu potencial e me apoiar durante toda minha caminhada.

A minha falecida avó, Elza Oliveira, pelo imenso amor e cuidado dado em mim durante sua vida, meu exemplo de fortaleza.

Aos meus queridos primos, Pedro Lucas Oliveira, Claudio Lima e sua esposa Lidiana Correia Lima e Enágio Oliveira por estarem sempre presentes em minha vida e pelo apoio e incentivo que recebo a cada dia.

Ao Rodrigo Mota, que acompanhou todas as fases do mestrado, por todo o incentivo, paciência e compreensão que teve comigo.

Aos meus grandes amigos João Batista Raulino e André Madson Frota que conheci durante minha vida acadêmica, obrigada por todo o companheirismo, suporte, apoio, convívio e amizade.

Ao meu orientador, Silvrano Adonias Dantas Neto, quero agradecer por toda a sua paciência, disponibilidade e dedicação na realização deste trabalho.

Ao laboratório de mecânica dos solos e pavimentação da Universidade Federal do Ceará, nas pessoas de Roberto Cordeiro, Anselmo Oliveira e Francisco da Silva, por toda ajuda e suporte.

A todos os professores do curso de mestrado, Alfran Moura, Anderson Borghetti e Francisco Chagas Filho, por todas as aulas ministradas e pela grande contribuição na minha formação.

Aos professores Alfran Moura e André Brasil pela disponibilidade em participar da banca.

À Universidade Federal do Ceará – UFC e ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – DEHA do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela oportunidade de realizar meus estudos em geotecnia.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP pelo apoio financeiro por meio da bolsa de estudos de Mestrado.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

**Marthin Luther King**

## RESUMO

A erosão interna é o transporte de partículas de solo induzido pela percolação e é o principal modo de falha de barragens de aterro (46%). O carreamento de partículas do solo pode gerar maior risco de ruptura quando interage com estruturas adjacentes, devido ao grande potencial de caminhos preferenciais de percolação ao longo das interfaces. Essa maior vulnerabilidade na interface ocorre devido às propriedades geotécnicas contrastantes entre a massa de solo e a estrutura adjacente, as quais podem levar à formação de zonas instáveis, de tubos e de cavidades ao longo do contato e, conseqüentemente, à ruptura. Estudos experimentais e simulações numéricas têm sido realizados para explorar o fenômeno de erosão interna interfacial, porém as modelagens realizadas não levam em consideração as propriedades contrastantes na interface solo-concreto. O objetivo deste trabalho é, portanto, analisar o fluxo de água em interfaces solo-estrutura a fim de avaliar a variável rugosidade da estrutura na permeabilidade do solo e a realizar uma simulação computacional tridimensional na interface, considerando a descontinuidade nesta região. Também é realizada a avaliação do muro em abraço como medida mitigadora do processo de erosão interfacial. A metodologia consta do desenvolvimento de um modelo experimental com diferentes rugosidades e alturas do solo em 1 cm, 3 cm e 5 cm, a fim de avaliar a influência da variável rugosidade na permeabilidade da massa de solo. A realização da modelagem se deu em três cenários para simular a interface do muro vertedouro em uma barragem de terra de 200 m de comprimento. O *software* SEEP/W da GEOSTUDIO foi utilizado para realizar as simulações. O primeiro cenário foi realizado sem interface e sem muro em abraço (maciço da barragem), o segundo com interface e sem muro em abraço e o terceiro com interface e um muro em abraço de 2 m de comprimento. Os resultados experimentais revelaram que quanto mais rugosa a superfície de concreto menor é a permeabilidade do sistema interface solo-concreto. Já os resultados da simulação numérica mostraram que: (i) a interface solo-concreto é mais vulnerável a fluxos de água e que o maciço da barragem (cenário 1-cenário 2); e (ii) o muro em abraço proporcionou a diminuição de gradientes hidráulicos, demonstrando ser uma medida importante para mitigar o risco de erosão interna interfacial (cenário 3). Também foi observado uma compatibilidade entre os resultados do experimento e das simulações. Conclui-se que a abordagem experimento-simulação é útil para avaliar o risco de erosão interna ao longo de interfaces solo-concreto.

**Palavras-chaves:** Interface solo-concreto. Rugosidade. Modelagem 3D. Gradiente hidráulico.



## ABSTRACT

Internal erosion is the transport of soil particles induced by percolation, being a phenomenon that can trigger major engineering disasters, such as the rupture of embankment dams. This phenomenon of erosion of soil particles in a dam can cause a greater risk of failure when it interacts with concrete structures due to the great potential of preferential percolation paths at the interfaces and the contrasting geotechnical properties between the soil and the adjacent structure. This can lead to the formation of unstable zones, tubes, and cavities at the contact which, consequently, will have a risk of rupture. Experimental studies and numerical simulations have been carried out to explore the phenomenon of internal erosion at the interfaces, however, these modelings do not take into account the contrasting properties nor the natural poor compaction around these interfaces. This dissertation, therefore, aims to analyze the water flow at soil-structure interfaces in order to evaluate the roughness variable of the structure in the soil permeability and to perform a three-dimensional computer simulation at the interface, considering the discontinuity in this region and evaluating the retaining wall as a mitigating measure of the internal erosion process. The methodology consists of the development of an experimental model with different roughness and soil heights in 1 cm, 3 cm, and 5 cm to evaluate the influence of the roughness variable on the soil permeability. The modeling was carried out in three scenarios using GEOSTUDIO's SEEP/W software to simulate the spillway wall interface in a 200 m long earth dam. The first scenario was performed without an interface and retaining wall, the second with an interface and without a retaining wall, and the third with an interface and a 2 m long retaining wall. The experimental results revealed that the rougher the concrete surface, the lower the permeability of the system, and the numerical simulation results showed that the retaining wall produced the reduction of hydraulic gradients, providing measures to combat the phenomenon of interfacial erosion in earth dams.

**Keywords:** Concrete-Soil Interface. Roughness. Modeling 3D. Hydraulic gradient.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Erosões laminares .....	6
Figura 2 - Retroerosão tubular regressiva ( <i>piping</i> ).....	7
Figura 3 - Aparato experimental utilizado por Xie <i>et al</i> (2018).....	9
Figura 4 - Gradiente hidráulico e velocidade de percolação e velocidade de percolação .....	10
Figura 5 - Gradiente crítico/velocidade de percolação para diferentes graus de compactação	11
Figura 6 - Esquema da interface concreto-solo para diferentes rugosidades .....	11
Figura 7 - Aparato experimental realizado por Xie <i>et al</i> (2019) .....	12
Figura 8 - Aparato experimental realizado por Kim, Park & Shin (2019).....	13
Figura 9 - Erosão entre o maciço da barragem e do muro vertedouro .....	15
Figura 10 - Muro em abraço e o maciço da barragem.....	15
Figura 11 - Execução do abraço na barragem de Gameleira, em Ipipoca - CE .....	16
Figura 12 - Croqui das jazidas do solo .....	20
Figura 13 – Coleta das amostras: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2; (c) Amostra 3 e (d) Amostra 4 .....	21
Figura 14 – Amostras quarteadas: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3; d) Amostra 4;	22
Figura 15 – Modelo do ensaio de permeabilidade na interface.....	25
Figura 16 – Equipamento utilizado no experimento .....	25
Figura 17 – Material graúdo, brita A0.....	26
Figura 18 - Bentonita utilizada no experimento .....	26
Figura 19 - Massa para calafetação .....	27
Figura 20 – Vedação do sistema utilizando massa para calafetação e parafusos .....	27
Figura 21 – Características das placas com rugosidade de madeira.....	28
Figura 22 – As placas utilizadas no experimento: (a) Placa de concreto; (b) Placa de madeira com rugosidade e espaçamento de 0,5 cm; (c) Placa de madeira com rugosidade e espaçamento de 1 cm.....	29
Figura 23 – Execução da montagem dos experimentos: a) Aplicação de bentonita; b) Instalação da placa; c) Compactação do solo; d) Última camada da aplicação de bentonita...	30
Figura 24 – Execução da montagem dos experimentos: a) Vedação completa do sistema; b) Sistema com água; c) Ensaio para a determinação dos coeficientes de permeabilidade; .....	31
Figura 25 - Geometria, materiais e condições de contorno da estrutura .....	32
Figura 26 – Malha da seção da barragem sem interface.....	33
Figura 27– Malha da seção da barragem com interface .....	34

Figura 28– Malha da seção da barragem com muro de 2m.....	35
Figura 29 - Curvas granulométricas das Amostra 1, 2, 3, e 4 .....	38
Figura 30 - Curvas de compactação .....	39
Figura 31- Coeficiente de permeabilidade na interface com a mistura das quatro amostras ...	41
Figura 32 - Resultados da modelagem do cenário um.....	42
Figura 33 - Resultados dos gradientes hidráulicos na direção de X.....	43
Figura 34 - Resultados dos gradientes hidráulicos na direção de Y .....	43
Figura 35- Resultados da modelagem do cenário dois .....	44
Figura 36- Resultados dos gradientes hidráulicos em função da altura do cenário dois.....	45
Figura 37 - Resultados dos gradientes hidráulicos em função transversal do cenário dois.....	45
Figura 38 – Resultado da modelagem do cenário três.....	46
Figura 39 - Resultados dos gradientes hidráulicos em função da altura do cenário três.....	47
Figura 40 - Resultados dos gradientes hidráulicos em função transversal do cenário três .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fases do processo erosivo .....	5
Tabela 2 - Dados de entrada para a modelagem .....	33
Tabela 3 - Resultados dos Limites de liquidez e Limites de plasticidade .....	38
Tabela 4 - Resultados das densidades das partículas.....	38
Tabela 5 - Resultados das umidades naturais .....	39
Tabela 6 – Resultados exatos do ensaio de na interface.....	41

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FEMA	Federal Guidelines for Dam Safety
ICOLD	International Commission on Large Dams
MEF	Método dos Elementos Finitos
SC	Areia Argilosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFC	Universidade Federal do Ceará

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1 Motivação da pesquisa</b> .....	1
<b>1.2 Objetivos</b> .....	3
<i>1.2.1 Objetivo Geral</i> .....	3
<i>1.2.2 Objetivos Específicos</i> .....	3
<b>1.3 Estrutura do trabalho</b> .....	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
<b>2.1 A Importância da Erosão Interna na Segurança de Barragens e seus Mecanismos</b> ....	5
<i>2.1.1 Mecanismo de erosão interna</i> .....	6
<i>2.1.1.1 Escoamentos Concentrados</i> .....	6
<i>2.1.1.2 Erosão Regressiva</i> .....	7
<i>2.1.1.3 Erosão de contato</i> .....	7
<i>2.1.1.4 Sufusão</i> .....	7
<i>2.1.2 Condições determinantes no progresso erosivo</i> .....	8
<i>2.1.2.1 Condições hidráulicas</i> .....	8
<i>2.1.2.2 Condições mecânicas</i> .....	8
<b>2.2 Estudos experimentais sobre interface solo-concreto</b> .....	9
<b>2.3 Erosão interna em interface solo/concreto</b> .....	14
<b>2.4 Principais variáveis do fenômeno de erosão interna na interface</b> .....	16
<b>2.5 Simulação numérica do fenômeno de erosão interna</b> .....	17
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	20
<b>3.1 Coleta das Amostras</b> .....	20
<b>3.2 Ensaio Laboratoriais</b> .....	21
<i>3.2.1 Ensaio de caracterização</i> .....	22
<i>3.2.1.1 Análise Granulométrica</i> .....	22
<i>3.2.1.2 Ensaio para Determinar os Limites de Consistência</i> .....	23
<i>3.2.1.3 Ensaio para Determinação da Densidade das Partículas pelo Método do Picnômetro</i> .....	23
<i>3.2.1.4 Ensaio para Determinação de Umidade</i> .....	23
<i>3.2.2 Ensaio de Compactação</i> .....	23
<i>3.2.3 Ensaio de Permeabilidade</i> .....	23
<b>3.3 Investigação Experimental na Interface</b> .....	24
<b>3.4 Modelagem do fluxo tridimensional</b> .....	31
<i>3.4.1 Definição da geometria, condições de contorno e geração da malha</i> .....	32

<i>3.4.2 Cenário um: Seção sem interface e sem abraço</i> .....	33
<i>3.4.3 Cenário dois: seção com interface e sem abraço</i> .....	34
<i>3.4.4 Cenário três: seção com interface e com abraço</i> .....	35
<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DA MODELAGEM TRIDIMENSIONAL</b> .....	37
<b>4.1.1 Ensaio Laboratoriais</b> .....	37
<i>4.1.1.1 Ensaio de Caracterização</i> .....	37
<i>4.1.1.2 Ensaio de compactação</i> .....	39
<i>4.1.1.3 Ensaio de permeabilidade</i> .....	40
<b>4.2 Modelos Experimentais do Fluxo na Interface</b> .....	40
<b>4.3 Apresentação e discussão dos resultados da modelagem tridimensional</b> .....	41
<b>4.3.1 Cenário um: seção sem interface e sem abraço</b> .....	42
<b>4.3.2 Cenário dois: seção com interface e com abraço</b> .....	43
<b>4.3.3 Cenário três: seção com interface e com abraço</b> .....	45
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</b> .....	48
<b>5.1 Conclusões</b> .....	48
<b>5.2 Sugestão para pesquisas futuras</b> .....	49

## 1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta a motivação da pesquisa realizada, a descrição dos objetivos geral e específicos que o trabalho busca atender e a organização da estrutura da dissertação.

### 1.1 Motivação da pesquisa

A erosão interna é o transporte de partículas de solo induzido pela percolação, sendo um fenômeno que pode desencadear grandes desastres na engenharia, como o rompimento de barragens de aterro (WANG *et al.*, 2021). De acordo com Foster, Fell e Spannagle (2000) e Richards (2007), cerca 0,5% das barragens de aterro em todo o mundo apresentam falha devido à erosão interna, que é a principal modo de falha, representando cerca de 46% de todos os tipos de falha. A ruptura de barragens induzida por erosão interna está sujeita à detecção precoce, o que é importante para garantir sua segurança e proteção (KHAN, 2014).

Foster, Fell e Spannagle (2000) resumiram em três principais elementos que induzem a erosão interna: (i) existência de uma zona frágil de percolação; (ii) fração erodível de solo dentro do caminho de percolação; e (iii) uma percolação de saída na superfície da barragem. Este fenômeno de erosão de partículas do solo dentro de uma barragem pode gerar maior risco de ruptura quando interage com estruturas afiliadas internas, devido ao grande potencial de caminhos preferenciais de percolação ao longo das interfaces (LUO *et al.*, 2013; XIE *et al.*, 2019). Contudo, este problema não tem sido devidamente investigado (KIM; PARK, SHIN, 2019).

A interface solo-galeria pode constituir um caminho preferencial de percolação, e a erosão interna associadas tem sido frequentemente observada (FLORES-BERRONES *et al.*, 2010). Em particular, investigações mostram que acidentes de barragens induzidas pela erosão interna por interfaces solo-galeria contabilizam 8,46% do total de falhas. Portanto, interfaces solo-galeria podem tornar a estrutura hidráulica mais propensa à erosão (FEMA, 2008; XIE *et al.*, 2019).

A interface entre o vertedouro e o maciço da barragem apresenta também caminhos preferenciais de percolação, devido às características distintas do solo e a estrutura de concreto. As principais alternativas para reduzir o risco nesse tipo interface concreto-solo são: utilizar um solo mais plástico no contato ou construir um muro de concreto que penetra no solo da barragem, denominado muro em abraço.



De acordo com Moraci (2012) e Kodieh (2020) numerosos estudos foram realizados a fim esclarecer o mecanismo de erosão interna do solo, incluindo análises experimentais e simulações numéricas.

A presença de uma superfície de estrutura em um solo modifica o arranjo das partículas do solo, fazendo com que as características da interface solo-estrutura sejam diferentes da massa de solo. O fenômeno está provavelmente relacionado as características da interface tais como vazios (permeabilidade) e atrito (resistência friccional) (XIE *et al.*, 2018).

Xie *et al.* (2019) realizaram um aparato de percolação projetado para simular e investigar o mecanismo de falha progressiva da erosão interfacial na interface de galeria-solo de barragens de terra. Isso ainda levou a uma investigação detalhada do limite e gradientes hidráulicos de falha de erosão interfacial, levando em consideração a influência de dois fatores geotécnicos críticos, o grau de compactação e o teor de argila. Além disso, análises numéricas foram realizadas para reproduzir o comportamento tensão-deslocamento da interface induzida por percolação, como um suplemento às investigações experimentais. É importante destacar que a simulação numérica foi realizada considerando a hipótese de homogeneidade do material na interface, o que não corresponde à realidade (FEMA, 2008; KIM; PARK, SHIN, 2019).

Kim, Park e Shin (2019) realizaram um estudo experimental a respeito do comportamento do fluxo e características de erosão regressiva na interface solo-estrutura. As investigações foram por análise teórica usando partículas esféricas uniformemente ideal e experimentos simples. Os fatores que influenciaram a erosão regressiva abaixo de uma estrutura foram avaliados, sendo as características de vazio das partículas de solo e a rugosidade da superfície da estrutura identificados como fatores significativos que afetaram os fenômenos e o comportamento do fluxo da interface.

O conjunto dos resultados confirmaram a hipótese da a interface solo-estrutura ser potencialmente vulnerável à erosão interna (SANDRONI, 2006; FEMA, 2008).

O fenômeno de erosão interna ao longo de interfaces solo-estrutura torna-se ainda mais relevante para o estudo geotécnico de barragens da região semiárida do Nordeste do Brasil (NEB), onde os processos cíclicos de enchimento e secagem de reservatório auxiliam no desgaste do solo, propiciando num aumento do processo erosivo dos grãos menores (ARAÚJO *et al.*, 2018; JALIL; BENAMAR; TOUHAMI, 2020).

Simulações numéricas adicionais também têm sido realizadas para complementar estudos sobre erosão interna ao longo de interfaces (LUO, 2008; HU, 2019). A modelagem matemática permite testar diferentes medidas de combate à erosão interna (SHAYAN; AMIRI-TOKALDANY, 2015). Porém, esses estudos têm negligenciado o diferente coeficiente de

permeabilidade existente na interface, podendo não gerar resultados compatíveis com a realidade (XIE *et al.*, 2018) e a compactação naturalmente deficiente na interface (FEMA, 2008). Isso pode ocorrer porque a presença de uma estrutura em um aterro modifica o arranjo das partículas do solo, fazendo com que as características na interface solo-estrutura sejam diferentes da massa de solo (maciço da barragem) (SANDRONI, 2006). Isto induz uma diferença entre o caminho de percolação na interface e no maciço da barragem, tornando o primeiro mais propício ao fluxo (KIM; PARK, SHIN, 2019).

Diante desse contexto, percebe-se a importância da análise do fluxo de água em interface solo-estrutura. Com este trabalho, almeja-se o aprimoramento da análise do comportamento do fluxo de água na interface solo-estrutura, mediante a realização de um modelo experimental construído em laboratório a fim de avaliar a influência da variável rugosidade na permeabilidade do solo e simulação computacional tridimensional do muro em “abraço”, propiciando a análise de uma medida mitigadora no processo de erosão interna utilizando SEEP/W adicionado ao SEEP3D da GEOSTUDIO (GEOSTUDIO, 2021).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é analisar experimentalmente o efeito da rugosidade sobre fluxo de água ao longo de interfaces solo-estrutura, bem como avaliar a aplicabilidade do muro em abraço como medida mitigadora da erosão interna interfacial utilizando modelagem tridimensional.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

São os seguintes os objetivos específicos, subdivididos em cada uma das abordagens propostas (experimento e simulação numérica).

- Para análise experimental:
  - Elaborar um protótipo de um estudo experimental para análise do fluxo ao longo de interfaces solo-estrutura;
  - Investigar diferentes tipos de rugosidade na interface para analisar a influência que essa variável tem no fenômeno de erosão interna interfacial;

- Para a modelagem numérico computacional:
  - Construir o modelo computacional representando interface solo-concreto;
  - Determinar o fluxo de água ao longo da interface;
  - Verificar a compatibilidade das simulações e estudo experimental;

### **1.3 Estrutura do trabalho**

A presente dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos, incluindo este capítulo introdutório. Um resumo dos capítulos seguintes está apresentado a seguir:

- a) O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica acerca do processo de erosão interna em barragens de terra.
- b) O Capítulo 3 descreve a metodologia desenvolvida para a concepção dos modelos experimentais adotados para análise da influência da rugosidade na permeabilidade do sistema e as configurações para a modelagem numérica-computacional tridimensional.
- c) O Capítulo 4 descreve as análises dos resultados obtidos do protótipo experimental e na modelagem numérica computacional.
- e) O Capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a teoria necessária para o entendimento da metodologia usada e dos resultados adquiridos. Os conceitos básicos e teóricos são apresentados de forma a fim de possibilitar o entendimento do fluxo de água em interfaces solo-concreto, enfatizando a erosão interna, análises experimentais e suas variáveis e simulação numérica computacional.

### 2.1 A Importância da Erosão Interna na Segurança de Barragens e seus Mecanismos

As barragens são essenciais para o desenvolvimento da sociedade, sendo usadas, por exemplo, para geração de energia elétrica, abastecimento doméstico e industrial, agricultura e controle de cheias (CAI *et al.*, 2018). Porém, essas obras possuem riscos intrínsecos de falhas (VIEIRA, 2005), sendo que a ruptura da estrutura pode ocasionar impactos sociais, econômicos, ambientais e, possivelmente, perdas de vidas humanas (OKEKE; WANG, 2016).

A erosão interna é uma das principais causas responsáveis por rupturas e incidentes em barragens de terra (46%) (FOSTER; FELL; SPANNAGLE, 2000). O fenômeno está relacionado quando as partículas de um solo, no maciço de uma barragem ou em sua fundação, são carregadas pelo fluxo da percolação existente.

Existem quatro condições determinantes no processo de erosão interna, as quais são o movimento de fluxo e carga hidráulica; o material susceptível a erosão no meio permeável; a saída desprotegida; e as condições favoráveis para formação da cavidade tubular (FELL *et al.*, 2004a). O processo erosivo apresenta diversas fases, que são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Fases do processo erosivo  
(continua)

<b>Fase</b>	<b>Assuntos Considerados</b>
Carregamento	O carregamento hidrostático
Localização no início da erosão	A localização do início da erosão interna pode ocorrer no maciço, fundação ou do maciço para fundação e entre interfaces
Início	Os mecanismos de erosão são: erosão laminar retroerosão, tubulação regressiva, erosão de contato ou sufusão
Continuação (Filtração)	Há ausência de filtro e zonas preferenciais para percolação
Progresso	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Para a ocorrência de erosão laminar e retroerosão tubular regressiva: o tubo continua aberto?</li> <li>2. Para a ocorrência de erosão de contato e sufusão: o gradiente crítico ou a velocidade de percolação atingiram valores significativos para a progressão da erosão?</li> </ol>

Tabela 1 – Fases do processo erosivo (conclusão)

Detecção	O processo de tubulação, o tipo de monitoramento e frequência de inspeção
Intervenção	A intervenção de uma equipe qualificada, utilização de equipamento disponíveis, observação da taxa de erosão e impactos ocorridos
Brecha	O desenvolvimento do alargamento agravante do tubo, galgamento e instabilidade na estrutura

Fonte: adaptada de *Fell et al* (2004b)

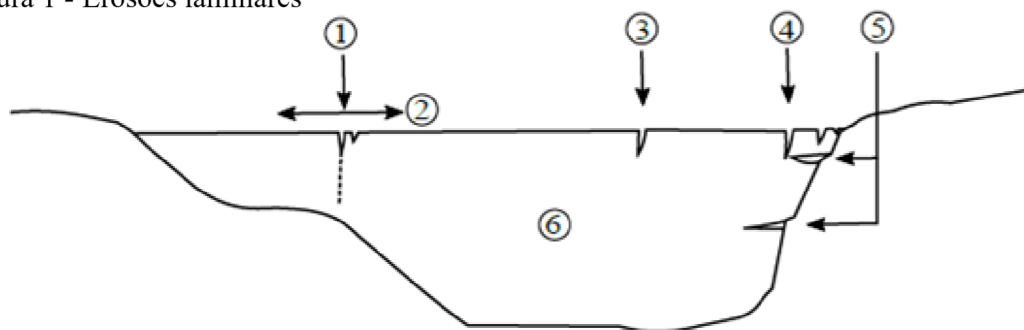
### 2.1.1 Mecanismo de erosão interna

Existem quatro mecanismos por meio dos quais um processo de erosão interna pode ser iniciado, os mecanismos são: escoamento concentrado, erosão regressiva, erosão de contato e sufusão.

#### 2.1.1.1 Escoamentos Concentrados

Os escoamentos concentrados ocorrem em regiões onde há presença de fenda, num determinado solo, através da qual um vazamento concentrado pode ocorrer, as paredes desta abertura podem ser erodidas pelo fluxo de água. Estas fendas podem ser decorrentes de abatimentos ou fratura hidráulica em solos coesivos, ou de trincas de tração no interior do maciço. Podem ocorrer em zonas contínuas de materiais granulares e/ou mal compactados, de modo a permitir a formação de “vazios intercomunicantes” (*Fell et al.*, 2008), como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Erosões laminares



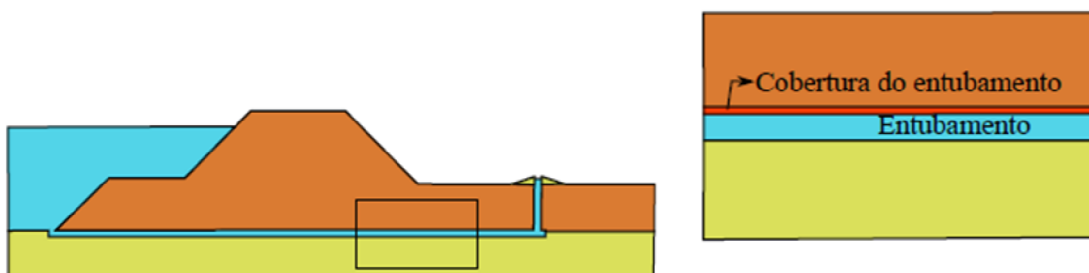
1. Brecha vertical proveniente do esforço lateral
2. Esforço lateral causado por recalque diferencial
3. Brecha vertical causada pela a dessecação
4. Brecha vertical causada pelo deslizamento do maciço na interface íngreme
5. Brecha horizontal causada pelo deslizamento do maciço na interface íngreme
6. Maciço da barragem

Fonte: adaptado de ICOLD (2013).

### 2.1.1.2 Erosão Regressiva

A erosão regressiva, também conhecida como o fenômeno *piping*, consiste em um processo específico de erosão interna o qual tem início por meio de uma erosão regressiva e resulta na formação de um canal, ou “tubo”, por meio do qual o fluxo percola, com vazões consideráveis, de forma contínua entre a porção de montante e jusante do maciço ou fundação da barragem, podendo conduzir à formação de fendas e até à ruptura do maciço (Fell *et al.*, 2008). A Figura 2 mostra o processo de erosão regressiva.

Figura 2 - Retroerosão tubular regressiva (*piping*)



Fonte: Adaptado de Sousa (2017).

### 2.1.1.3 Erosão de contato

Fell *et al* (2008), denominam a erosão de contato no carreamento de partículas finas localizadas na interface com determinado material granular, através do qual percola um fluxo na direção paralela ao contato entre os dois materiais. Esse contato poderá representar um caminho preferencial de percolação da água, podendo ocasionar o aparecimento de uma brecha. Pode ser desencadeada por ineficácia do dreno, em barragens de aterro sendo construídas diretamente em fundações permeáveis, ou por zonas não homogêneas (ICOLD, 2013).

### 2.1.1.4 Sufusão

A sufusão é a erosão interna de solos instáveis internamente no qual as partículas finas constituintes de uma matriz com partículas mais grosseiras são carreadas pelo fluxo de água que percola pelo maciço, deixando para trás apenas um esqueleto formado por partículas grosseiras (Fell *et al.*, 2008). Geralmente, a sufusão é caracterizada pela pequena ou nula variação de volume das camadas de solo envolvidas.

## ***2.1.2 Condições determinantes no progresso erosivo***

### ***2.1.2.1 Condições hidráulicas***

A progressão da erosão na barragem de terra deve apresentar condições hidráulicas favoráveis e apresentar velocidade de percolação adequada para o carreamento das partículas de solo (ICOLD, 2013). Para os mecanismos de erosão, os fatores indicadores para a iniciação do processo erosivo de acordo com ICOLD em 2013, são:

- Escoamento concentrado: o aumento do tubo está influenciado com o aumento das tensões de cisalhamento hidráulico, acarretando a progressão da erosão, a menos que os gradientes sejam reduzidos pelo rebaixamento do reservatório.
- Erosão regressiva: se a progressão da erosão se dá em direção ao reservatório esta será dependente do gradiente de infiltração no interior do tubo, no entanto, para velocidades críticas as partículas de solo serão carreadas no interior da tubulação.
- Erosão de contato: verifica-se igualmente a erosão laminar, podendo ainda ser evitada em caso de obstrução do solo grosso pelo material fino.
- Sufusão: desde que o solo erodido seja carreado, a condição hidráulica apresentará maiores condições de erodir a fração mais fina por meio da progressão da permeabilidade.

### ***2.1.2.2 Condições mecânicas***

De acordo com as condições hidráulicas, a barragem também deve apresentar condições geotécnicas favoráveis, como resistência (parcela de coesão), coesão aparente e falta de coesão em solos granulares, para a progressão da erosão. Solos coesivos, quando saturados totalmente ou parcialmente, apresentam maior capacidade de sustentação das aberturas no solo, atuando como um telhado para a tubulação (ICOLD, 2013).

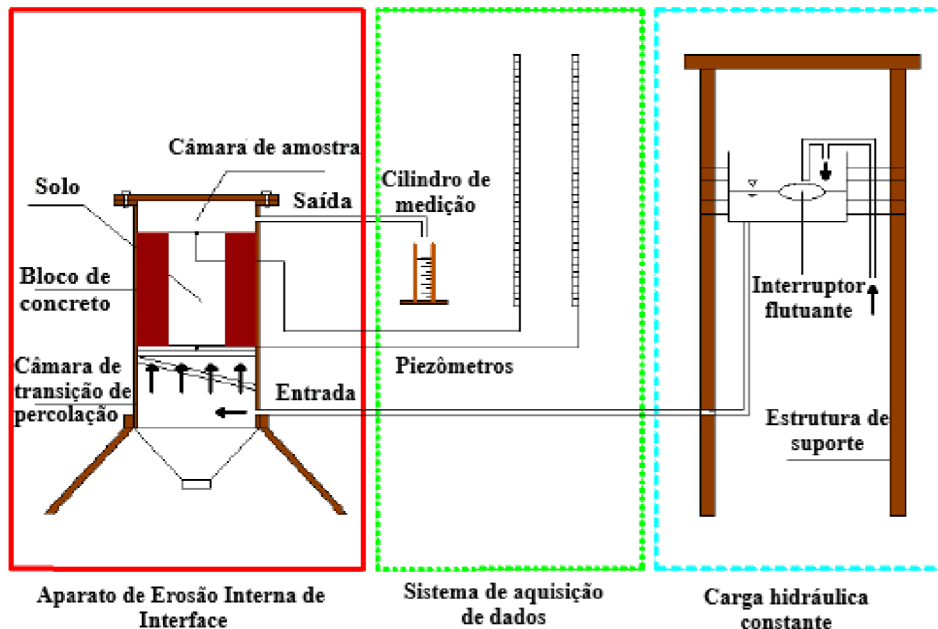
Solos granulares, saturados, não possuem características mecânicas para se sustentar, desencadeando seu desmoronamento. Para as condições parcialmente saturadas e com alto teor de finos, a sustentação é promovida pela sucção das pressões dos poros (ICOLD, 2013).

## 2.2 Estudos experimentais sobre interface solo-concreto

Estudos experimentais têm sido realizados para explorar o fenômeno de erosão interna ao longo de interfaces e ampliar o conhecimento de um problema ainda relativamente pouco explorado (REIS, 2006; LUO *et al.*, 2013; KIM; PARK; SHIN, 2019; XIE *et al.*, 2018, 2019).

Xie *et al.* (2018) realizaram um experimento utilizando um aparato de percolação empregado para investigar o mecanismo de falha de erosão interna nas interfaces solo-estrutura. Esses autores analisaram o gradiente hidráulico crítico de erosão interna submetida a propriedades críticas do solo, ou seja, grau de compactação e rugosidade. A Figura 3 mostra o aparato utilizado no experimento.

Figura 3 - Aparato experimental utilizado por Xie *et al* (2018)

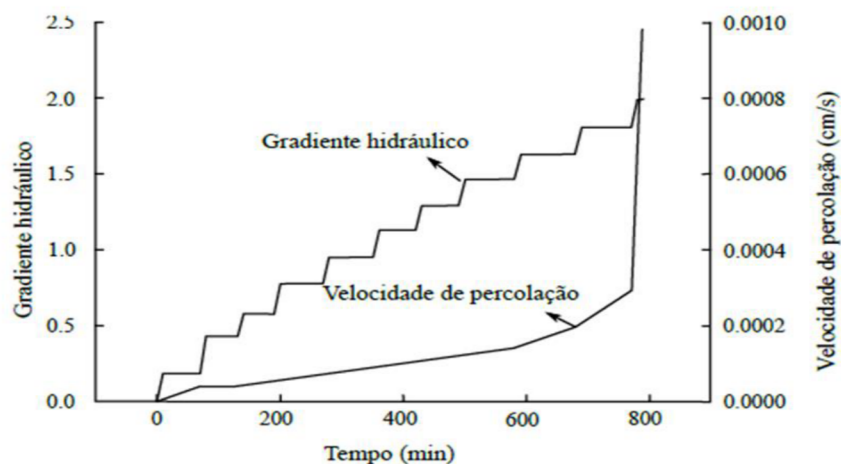


Fonte: adaptado XIE *et al* (2018).

Os resultados obtidos indicaram que quando o gradiente hidráulico atinge valores críticos, o processo erosivo se intensifica na interface solo-estrutura, como observado na Figura 4.



Figura 4 - Gradiente hidráulico e velocidade de percolação e velocidade de percolação



Fonte: Adaptado de XIE *et al* (2018).

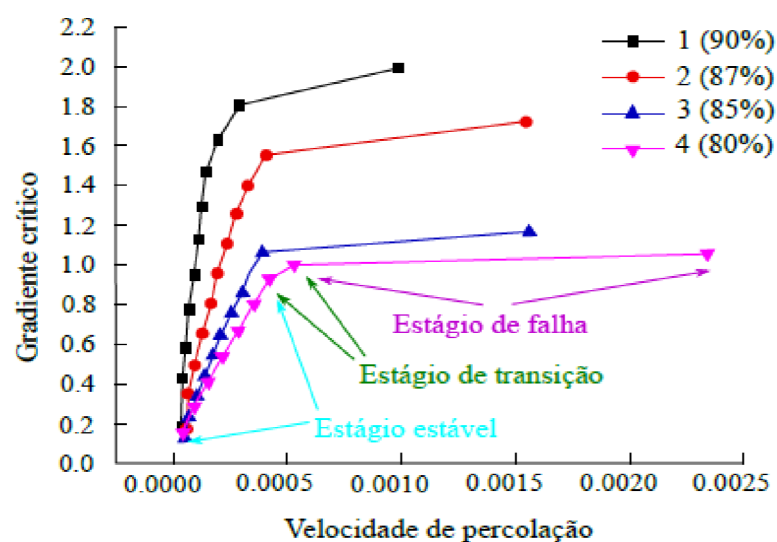
Baseando-se nos resultados obtidos definiu-se que o gradiente hidráulico crítico é utilizado para caracterizar a estabilidade de percolação de amostras de solo, em relação à porosidade e densidade do solo. É definido pelo gradiente hidráulico onde as partículas começam a escoar das amostras de solo (Xie *et al.*, 2018).

A determinação do gradiente hidráulico crítico de erosão interna é baseada na ocorrência de “sand boil”. Portanto, o gradiente hidráulico limiar, quando as partículas do solo escoam da interface, é definido como o gradiente hidráulico crítico para a erosão interna da interface. (XIE *et al.*, 2018).

Xie *et al.* (2018) também demonstrou, que o gradiente hidráulico crítico aumenta com a velocidade de percolação e o grau de compactação do solo, constatando os efeitos da compactação no fortalecimento estrutural e como processo essencial na prevenção da erosão interna. A Figura 5 apresenta os valores de gradientes críticos e velocidade de percolação para diferentes graus de compactação.

A razão para a análise da rugosidade na interface, de acordo com Xie *et al.* (2018), é que quando a interface solo-estrutura é relativamente lisa, as partículas do solo podem ser facilmente transportadas pela percolação e, portanto, o gradiente hidráulico crítico é baixo. Quando a rugosidade da interface é maior, a resistência à percolação e o gradiente hidráulico crítico são maiores como consequência de um maior atrito na interface. A Figura 6 mostra o esquema da interface concreto-solo para diferentes rugosidades.

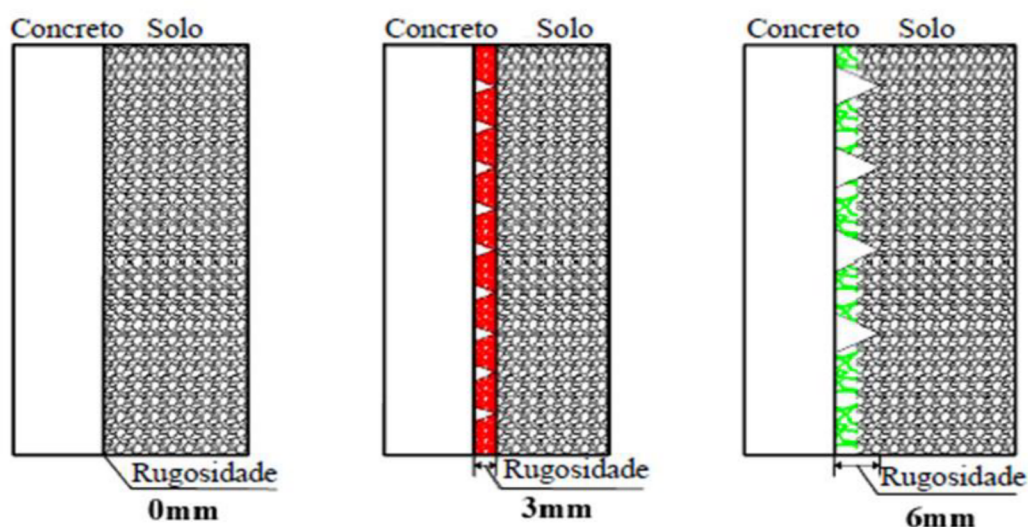
Figura 5 - Gradiente crítico/velocidade de percolação para diferentes graus de compactação



Fonte: adaptado de XIE *et al* (2018).

A principal conclusão do estudo foi que gradiente hidráulico crítico de erosão interna da interface está relacionado à resistência ao cisalhamento da interface e à severidade e porosidade do solo. Além disso, o grau de compactação afeta o coeficiente de permeabilidade da erosão interna solo-estrutura-interface através da alteração da porosidade e severidade do solo e a rugosidade da interface afeta principalmente a resistência ao cisalhamento do interface solo-estrutura.

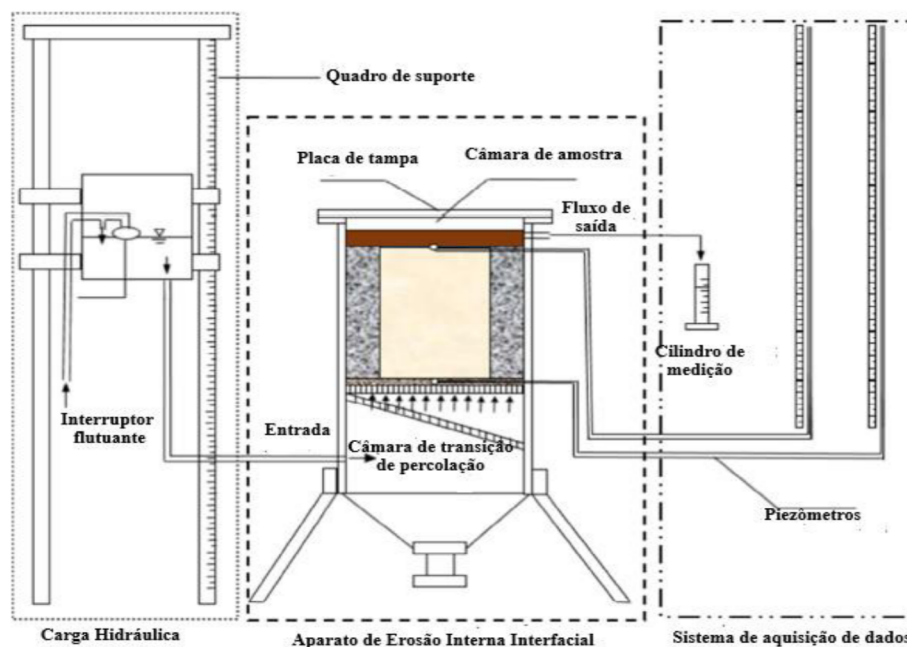
Figura 6 - Esquema da interface concreto-solo para diferentes rugosidades



Fonte: adaptado de XIE *et al* (2018).

Xie *et al* (2019) desenvolveram um aparato de percolação projetado para simular e investigar o mecanismo de falha progressiva da erosão interna interfacial em solo-galeria em barragens de terra. Os autores investigaram detalhadamente os gradientes hidráulicos de limiar e falha da erosão interfacial, levando em conta a influência de dois fatores geotécnicos críticos, ou seja, o grau de compactação e o teor de argila. A Figura 7 apresenta o aparato experimental.

Figura 7 - Aparato experimental realizado por Xie *et al* (2019)



Fonte: adaptado de XIE *et al* (2019).

XIE *et al.* (2019) realizaram análises numéricas para reproduzir o comportamento tensão-deslocamento da interface induzida por infiltração, como complemento às investigações experimentais. Considerando efeitos protetores de duas medidas típicas de mitigação (a camada filtrante e os anéis impermeáveis, que possuem funcionamento similar ao muro em abraço em razão ao aumento do caminho de percolação) contra a erosão interfacial.

As principais conclusões deste experimento foram:

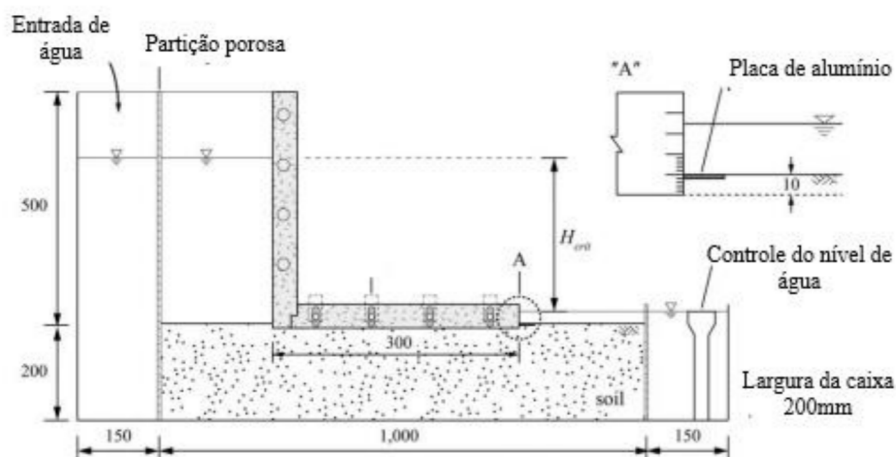
- A erosão interfacial nos casos desprotegidos mostra uma falha progressiva de três estágios à medida que o gradiente hidráulico aumenta, ou seja, os estágios estável, de transição e falha, enquanto o dos casos protegidos apresenta uma falha de quatro estágios, ou seja, os estágios estável, de transição, endurecimento e falha;

- Os gradientes hidráulicos críticos apresentam uma relação não linear com o grau de compactação ou o teor de argila;
- Os resultados do experimento mostram os efeitos protetores efetivos do emprego das duas medidas de mitigação contra a erosão interfacial, bloqueando os canais de infiltração formados.

Os autores também realizaram a simulação do fluxo pela interface solo-galeria, porém tais análises numéricas não consideraram as descontinuidades nas interfaces, fatores existentes devido as propriedades contrastantes dos materiais, particularmente o coeficiente de permeabilidade (RAULINO; MALVEIRA, 2019).

Kim, Park e Shin (2019) também analisaram o comportamento do fluxo e o mecanismo características de *piping* na interface solo-estrutura por análise teórica usando partículas esféricas uniformemente ideal e experimentos simples. A Figura 8 apresenta o aparato experimental.

Figura 8 - Aparato experimental realizado por Kim, Park & Shin (2019)



Fonte: adaptado de Kim, Park & Shin (2019).

Os resultados mostraram que a interface é mais vulnerável à ocorrência de erosão regressiva. O topo de superfície freática que induz o *piping* também aumentou com a diminuição da proporção de vazios e o aumento da rugosidade da interface. A segurança de

erosão regressiva pode, assim, ser parcialmente melhorada pelo uso de uma estrutura com uma superfície mais áspera e materiais de preenchimento bem graduados.

Os fatores que influenciam a erosão regressiva abaixo de uma estrutura foram avaliados, caracterizando os vazios das partículas de solo e a rugosidade da superfície da estrutura como fatores significativos que afetaram os fenômenos e o comportamento do fluxo da interface.

### **2.3 Erosão interna em interface solo/concreto**

A interface solo-estrutura apresenta um local propício a erosão interna devido as propriedades contrastantes da superfície do solo e da estrutura adjacente e sendo um local inerente de má compactação (FEMA, 2008).

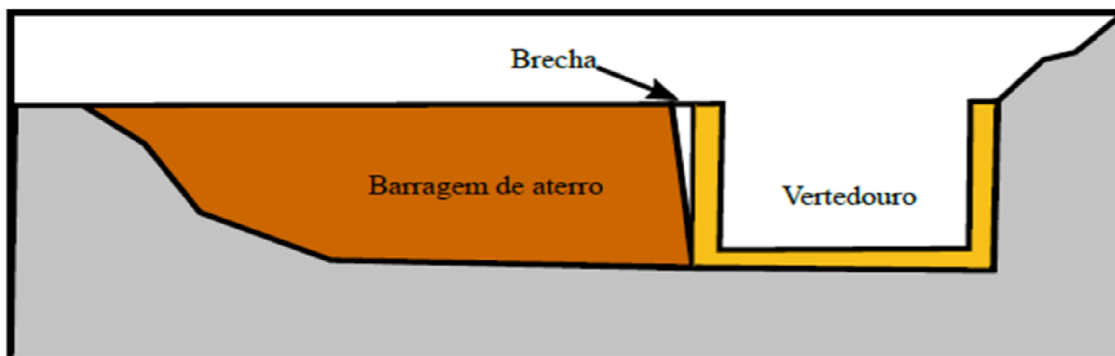
Tais interfaces existem amplamente em estruturas hidráulicas e as falhas de erosão interna da interface associadas ameaçam significativamente a segurança de obras de terra. Em particular, canais de infiltração podem ser facilmente desenvolvidos através de interfaces fracas devido às propriedades mecânicas diferenciais entre o solo e a estrutura (LUO *et al.*, 2013). Isso pode eventualmente levar à formação de tubos, cavidades e zonas instáveis em estruturas de aterro (KAOSER *et al.*, 2006). Por exemplo, a barragem de Teton nos EUA, com 91,5 m de altura, ruiu em junho de 1976. Após a investigação do acidente, o principal motivo do rompimento da barragem foi atribuído à erosão interna na interface entre a parede do núcleo de argila e a rocha (ARMANDO; SCHEFFLERS, 1982; MUHUNTHAN; PILLAI, 2008).

A interface entre o vertedouro e o maciço da barragem, é propícia a caminhos preferenciais de percolação devido às características distintas do solo e a estrutura de concreto (SEDGHI-ASL *et al.*, 2015). A possibilidade de percolação preferencial na interface se intensifica com a retração do solo, formando uma fissura, separando o muro do aterro. Este processo é decorrente das constantes fases de enchimento e esvaziamento do reservatório, bastante comum nas regiões semiáridas (FERDOS, 2016; RAULINO; MALVEIRA 2019), como ilustra a Figura 9. Quando este processo erosivo inicia-se e mantém as condições suscetíveis para sua evolução a tendência é o rompimento da estrutura (GOMES, 2019).

Uma das principais alternativas para reduzir o risco nesse tipo interface concreto-solo é construir um muro de concreto que penetra no solo da barragem, denominado muro em abraço. Esta alternativa tem sido mais aceita, porém, a extensão adotada para o muro é baseada na experiência do projetista, uma vez que não há metodologia na literatura que determine o

tamanho ideal do muro (ASEDGHI-ASL et al., 2015; RAULINO; MALVEIRA, 2019; SOUSA 2021).

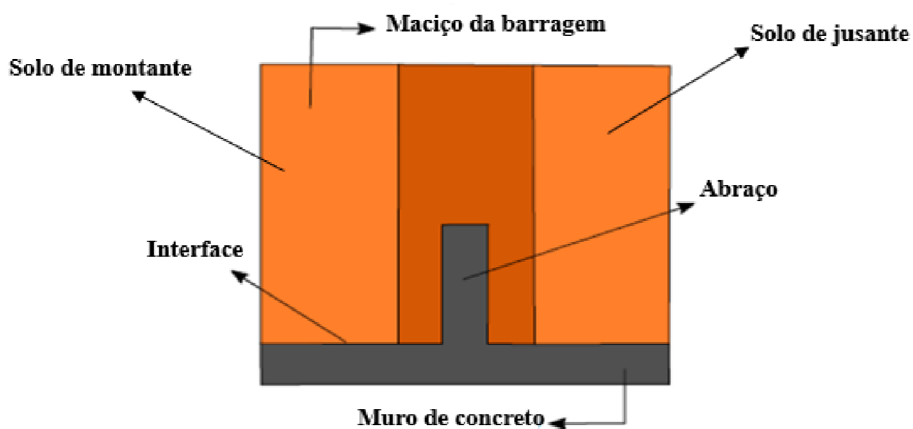
Figura 9 - Erosão entre o maciço da barragem e do muro vertedouro



Fonte: adaptado de FEMA (2008).

A barragem Davis em 1914 rompeu por erosão regressiva ao longo da interface entre o aterro e o muro do vertedouro, durante o primeiro enchimento. No qual o muro do vertedouro possuía paredes lisas e verticais e o maciço praticamente sem compactação, consistindo de um projeto inadequado. A interface sendo vertical e lisa, representa um “plano de fraqueza” em relação a percolação, pois o aterro pode se separar do muro, causando consequências de retração, deslocamentos devidos a recalques entre outros. Existem várias posturas de projeto de junções entre aterros e muros, a fim de evitar que o contato entre o aterro e o muro, também denominado “junção”, se constitua numa rota preferencial de percolação, ao longo da qual exista risco de carreamento. (SANDRONI, 2006). A Figura 10 mostra a junção em abraço e o maciço da barragem e a Figura 11 a execução do abraço na barragem de Gameleira, localizada em Itapipoca no Ceará.

Figura 10 - Muro em abraço e o maciço da barragem



Fonte: adaptado de Sousa (2021).

Figura 11 - Execução do abraço na barragem de Gameleira, em Ipipoca - CE



Fonte: SRH (2013).

#### 2.4 Principais variáveis do fenômeno de erosão interna na interface

De acordo com os principais estudos presentes na literatura sobre erosão interna ao longo de interfaces solo-concreto, as variáveis que condicionam o fluxo são:

- O coeficiente de permeabilidade do solo, que constitui no principal fator de vulnerabilidade na interface;
- Carga hidráulica: estudos realizados por Foster, Fell e Spannagle (2000) indicaram que todas as acidentes e ruptura estavam associadas a carga hidráulica máxima;
- O grau de compactação: Xie *et al.* (2019) destacaram que a interface possui naturalmente uma deficiência de compactação;
- A rugosidade e os índices de vazios: estudos executados por Kim, Park e Shin (2019) identificaram como fatores significativos que afetaram os fenômenos e o comportamento do fluxo da interface, mostrando que superfície mais áspera e materiais bem graduados podem diminuir o efeito da erosão interna.

## 2.5 Simulação numérica do fenômeno de erosão interna

Um modelo matemático busca representar um modelo de algum objeto, ou sistema do mundo real, que permite facilitar o entendimento e traduzi-lo em termos matemáticos, (GEOSLOPE, 2012 apud COUNCIL *et al.*, 1990). As realizações de análises tridimensionais em barragem de terra são justificadas quando algum problema particular da própria barragem ou do sitio de implantação se faz presente. Dentre os problemas inerentes a própria barragem, que tendem a justificar uma análise tão complexa, pode citar a utilização de diferentes materiais no sentido longitudinal, e a presença de estruturas enterradas (SABOYA JR, 1993), podendo destacar o muro em abraço e a presença de galerias.

Os softwares possibilitam a resolução de cálculos complexos por meio de métodos numéricos analíticos. O MEF é caracterizado pela formação de uma malha de elementos interconectados por nós, permitindo a conversão de uma geometria complexa de comportamento imprevisível em várias geometrias simples de fácil compreensão. A precisão dos resultados é definida a partir do grau de refinamento da malha, dependendo da quantidade de nós, do tamanho e dos tipos de elementos (MENEZES, 2019).

O método dos elementos finitos (MEF), no atual estágio de desenvolvimento, é uma ferramenta poderosa para engenheiros barragistas. Essa abordagem possibilita análises de fluxo de água no interior da barragem avaliando vazão, gradientes hidráulicos e das poropressões em diversas regiões da barragem em comportamento de fluxo permanente e transiente, a fim de se estimar os riscos decorrentes do fluxo d'água através do corpo da barragem, de sua fundação e ombreiras. O fluxo permanente é quando as propriedades de um fluido e das partículas que o constituem, em cada ponto, não apresentam variação no tempo. Já o fluxo transiente é determinado quando as propriedades de um fluido e das partículas que o constituem, em cada ponto, apresentam variação no tempo.

A equação básica para fluxo laminar tridimensional em solos (SOUSA PINTO, 2006) é determinada pela Equação 1.

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

$k_x$ : Coeficiente de permeabilidade na direção x (m/s);

$k_y$ : Coeficiente de permeabilidade na direção y (m/s);

$k_z$ : Coeficiente de permeabilidade na direção z (m/s);



h: Carga hidráulica total (m);

S: Grau de saturação;

e: Índice de vazios;

t: Tempo (s);

As simulações numéricas podem modelar o mecanismo de erosão interna, rastreando o movimento das partículas destacadas, visualizando a evolução dos canais dos poros e quantificando a variação da cadeia de força, ao contrário dos experimentos (WANG *et al.*, 2021). Porém não tem sido considerado a descontinuidade dos parâmetros do solo na interface e a intrínseca dificuldade de compactação na interface (XIE *et al.*, 2019). A não homogeneidade na interfaces solo-estrutura é a principal razão de torná-las mais vulneráveis ao fenômeno de erosão interna (LUO *et al.*, 2013; XIE *et al.*, 2018), portanto é imprescindível que as simulações numéricas levem isso em consideração.

Inúmeros são os estudos utilizando simulação numéricas para avaliar o processo de erosão interna.

Mercier *et al.* (2014) realizaram um estudo com foco na modelagem numérica da erosão por fuga concentrada de um solo coesivo considerando o escoamento turbulento em geometria assimétrica, utilizando o *Hole Erosion Test* (HET). O modelo numérico baseou-se no remalhamento adaptativo da interface água-solo para garantir a descrição precisa dos fenômenos mecânicos que ocorrem próximo à interface. Em seguida, os resultados numéricos foram comparados com o modelo de interpretação do HET. Os resultados mostraram que o modelo foi capaz de reproduzir com precisão a erosão de um solo coeso por percolação concentrada. Assim, os autores demonstram que a simulação numérica pode ser uma importante ferramenta de avaliação de erosão interna por fuga concentrada.

Fukumoto e Ohtsuka (2018) empregaram um modelo de simulação numérica acoplado partícula-fluido para o estudo da erosão interna de solos granulares com ampla distribuição granulométrica. O objetivo do estudo foi investigar os mecanismos do movimento de partículas finas de solo dentro da matriz de partículas grossas de solo do ponto de vista microscópico. As partículas grossas de solo foram simuladas pelo método acoplado em microescala onde o fluxo de fluido foi modelado em escalas menores que o diâmetro das partículas do solo, enquanto as partículas finas de solo foram simuladas pelo método acoplado em macroescala onde o fluxo de fluido é modelado em escalas maiores que o diâmetro das partículas do solo. Foram realizadas simulações bidimensionais e tridimensionais de sufusão e validada a aplicabilidade do modelo proposto à erosão interna de solos granulares.

Bouziane *et al.* (2020) realizaram uma investigação experimental e numérica do efeito da erosão interna na resistência ao cisalhamento de solos arenosos. Na primeira etapa, foram realizados ensaios de cisalhamento direto sem erosão em solos arenosos constituídos de areia misturada com três tipos de partículas finas em diferentes teores (10%, 15%, 20%). Na segunda etapa, testes de cisalhamento de erosão sequenciais foram realizados usando uma caixa de cisalhamento modificada que permite a percolação através de espécimes compactados e permite a coleta de efluente com partículas erodidas para posterior avaliação do efeito da erosão interna estendida na resistência ao cisalhamento do solo. Um modelo numérico baseado na lei de difusão da porosidade foi usado para simular a alteração da resistência do solo devido à sufusão, e a comparação entre os resultados experimentais e numéricos indicou uma concordância para a redução da coesão.

Zhang *et al.* (2021) estudaram e formularam o estágio inicial de erosão interna e deformação da barragem usando um modelo numérico que combina vários aspectos do problema, incluindo fluxo de água subterrânea, erosão e transporte de partículas sólidas e deformação do esqueleto sólido. Aplicaram o modelo à Barragem de Teton de Idaho, que falhou em 1976 devido à erosão interna. A simulação mostrou que o estágio inicial da erosão interna degrada a rigidez da barragem e produz subsidência do solo, além de aumentar a porosidade e a permeabilidade e acelera o fluxo e a erosão interna em um processo positivo.

Sousa (2021) realizou simulações numéricas por elementos finitos para realizar a análise tridimensional fluxo de água objetivando a mensuração da influência do muro de concreto (abraço) como medida preventiva contra a erosão interna em interfaces solo-concreto. A autora aplicou a metodologia à barragem de terra de Gameleira, Itapipoca no Ceará. Os resultados da simulação numérica mostraram-se satisfatórios, comprovando que o abraço é uma solução eficiente no controle do processo erosivo e que seu comprimento está diretamente relacionado com a redução dos gradientes.

É importante ressaltar que a utilização das simulações numéricas por elementos finitos utilizadas no fenômeno de erosão interna possui a grande vantagem de validar experimentos e permitir testar diferentes medidas mitigadoras de combate à erosão interna (SHAYAN; AMIRI-TOKALDANY, 2015). Xie *et al.* (2019), por exemplo, utilizaram um modelo computacional para corroborar seus resultados experimentais e simular diferentes condições para medidas mitigadoras de erosão interna ao longo de interfaces solo-concreto.

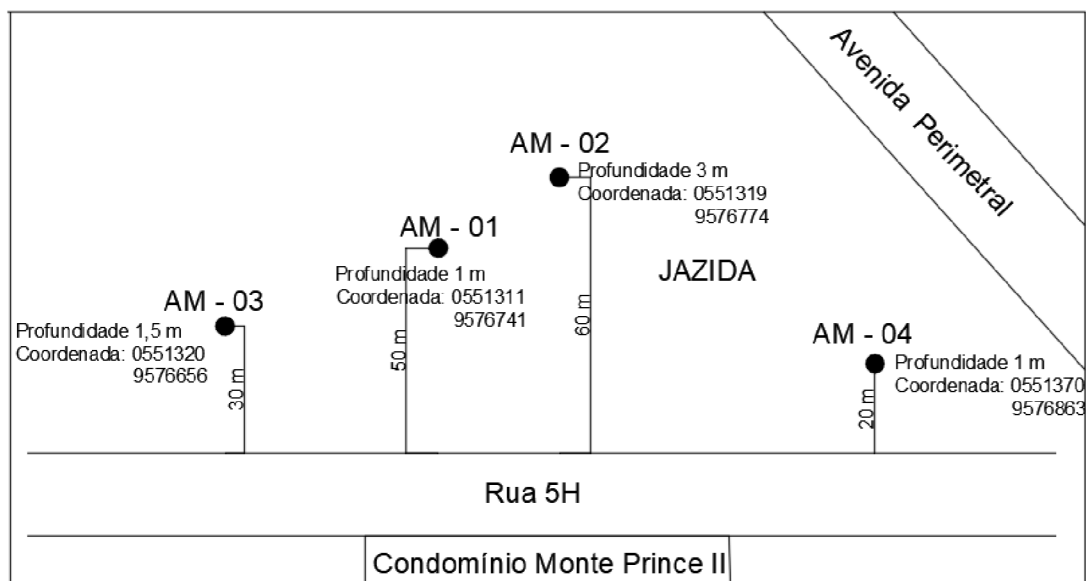
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo é composto pela descrição das amostras coletadas, a metodologia dos ensaios de laboratório realizados durante a pesquisa, a investigação experimental na interface e a investigação da modelagem tridimensional utilizando o *software* SEEP/W adicionado SEEP3D da GEOSTUDIO.

#### 3.1 Coleta das Amostras

Os solos utilizados nas análises experimentais foram retirados da jazida localizada no Bairro José Valter, Rua 5H na cidade de Fortaleza no Ceará. Solos que se mostraram favoráveis a compactação de acordo com a análise táctil visual para a realização do experimento. Foram colhidas quatro amostras em pontos diferentes. A Figura 12 mostra a localização da retirada das amostras e a Figura 13 a coleta das quatro amostras.

Figura 12 - Croqui das jazidas do solo



Fonte: Autora (2021).

Figura 13 – Coleta das amostras: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2; (c) Amostra 3 e (d) Amostra 4



Fonte: Autora (2021).

### 3.2 Ensaios Laboratoriais

Os ensaios de caracterização do solo foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará (UFC), nos meses de junho e julho de 2021.

Após a coleta e transporte para o laboratório, a preparação das amostras foi realizada de acordo com a norma NBR 6457 (ABNT, 2016). A Figura 14 mostra as quatro amostras coletadas quarteadas em laboratório.

Figura 14 – Amostras quarteadas: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3; d) Amostra 4;



Fonte: Autora (2021).

### ***3.2.1 Ensaios de caracterização***

#### ***3.2.1.1 Análise Granulométrica***

Os procedimentos de peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação, que compõe a análise granulométrica, foram executados para determinar as curvas granulométricas, realizadas de acordo com as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 2016).

### ***3.2.1.2 Ensaios para Determinar os Limites de Consistência***

Os limites de Atterberg, limites de liquidez e de plasticidade, foram determinados de acordo com as normas da NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente.

### ***3.2.1.3 Ensaio para Determinação da Densidade das Partículas pelo Método do Picnômetro***

As densidades reais dos grãos foram encontradas por meio do uso do método do picnômetro. Os ensaios foram realizados de acordo com norma NBR 6458 (ABNT, 2016).

### ***3.2.1.4 Ensaio para Determinação de Umidade***

As umidades dos solos foram determinadas segundo as recomendações descritas nas normas anteriores. O método utilizado foi o da estufa.

### ***3.2.2 Ensaio de Compactação***

As massas específicas secas máximas e as umidades ótimas foram encontradas no ensaio de compactação. O ensaio realizado foi o ensaio de compactação Proctor Normal de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016).

Os dados dos ensaios de caracterização e compactação dos solos utilizados estão disponíveis no Apêndice A.

### ***3.2.3 Ensaio de Permeabilidade***

Os coeficientes de permeabilidades foram encontrados pelo ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável de acordo com a NBR 14545 (ABNT, 2000).

Os dados dos ensaios permeabilidade dos solos utilizados encontram-se disponíveis nos Apêndices B.

### 3.3 Investigação Experimental na Interface

As realizações dos desenvolvimentos dos modelos experimentais do fluxo na interface, foram realizados também no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará (UFC), nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro de 2021.

A análise experimental consiste em base nos experimentos realizados por Kim, Park e Shin 2019 e Xie *et al* 2018.

A determinação dos coeficientes permeabilidade se deu em ensaios de carga variável devido a grande quantidade de finos que o solo apresentava. O coeficiente de carga variável foi determinado de acordo com a Lei de Darcy 1856, determinada pela equação 2.

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

k: Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

a: Área interna da bureta de vidro (cm<sup>2</sup>);

a: Área da seção transversal do corpo de prova (cm<sup>2</sup>);

t: Tempo decorrido entre o início e o final de cada leitura (s);

h1: Carga hidráulica no início de cada leitura (cm);

h2: Carga hidráulica no final de cada leitura (cm);

É importante ressaltar que Luo *et al.* (2013) demonstraram que é possível considerar a regra de fluxo darciano ao longo da interface solo-estrutura.

A análise foi realizada com verificação da influência da rugosidade com os valores de k, diferentes para cada altura do solo consideradas, sendo 1 cm, 3 cm e 5 cm. O solo utilizado no experimento consiste na mistura das quatro amostras coletadas.

No experimento a água entra a montante e sai a jusante, em níveis diferentes, com carga hidráulica utilizada de 220 cm. A água passa pela brita e percola o sistema, com a variação da altura do solo em 1 cm, 3 cm e 5 cm, para diferentes placas. A Figura 15 mostra o modelo do ensaio de permeabilidade na interface.

O equipamento é constituído de acrílico com 8mm de espessura para todas a placas e possui largura de 10 cm. As placas internas possuem furos por onde a água passa sem encontrar resistência. A Figura 16 mostra equipamento utilizado para o experimento em laboratório.

O material graúdo utilizado é uma brita do tipo A0, com granulometria variando de 4,8 mm a 9,5 mm. A finalidade do material graúdo consiste na dissipação da energia do fluxo de água que entra no modelo experimental para percolar o solo. A Figura 17 mostra a brita utilizada no experimento.

Figura 15 – Modelo do ensaio de permeabilidade na interface

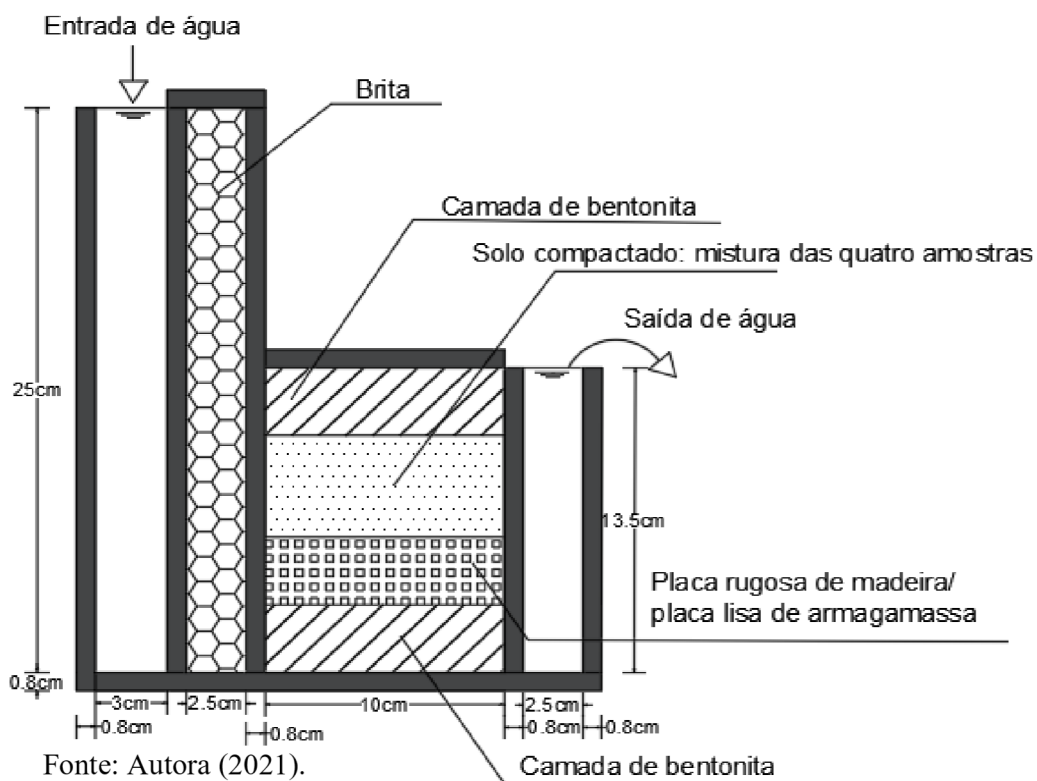


Figura 16 – Equipamento utilizado no experimento



Fonte: Autora (2021).



Figura 17 – Material graúdo, brita A0



Fonte: Autora (2021).

A camada de bentonita, cujo nome comum das argilas plásticas e coloidais do grupo esmectita, geralmente constituída de montmorilonita, foi utilizada com a finalidade de impermeabilizar e impedir um fluxo preferencial entre a interface solo-acrílico. A Figura 18 mostra a bentonita utilizada no experimento.

Figura 18 - Bentonita utilizada no experimento



Fonte: Autora (2021).

A completa vedação do sistema, foi obtida com o emprego de massa para calafetação e parafusos. As características da massa de calafetação consistem de um produto adesivo a base de borracha sintética de fácil moldagem e ótima aderência nos mais diversos substratos. Uma das finalidades é a utilização para vedar locais onde há a necessidade de evitar a penetração de água e umidade. A finalidade dos parafusos é permitir o fechamento do sistema. A Figura 19,

mostra a massa de calafetação empregada e a Figura 20 a vedação completa do sistema com a massa e parafusos.

Figura 19 - Massa para calafetação



Fonte: Autora (2021).

Figura 20 – Vedação do sistema utilizando massa para calafetação e parafusos

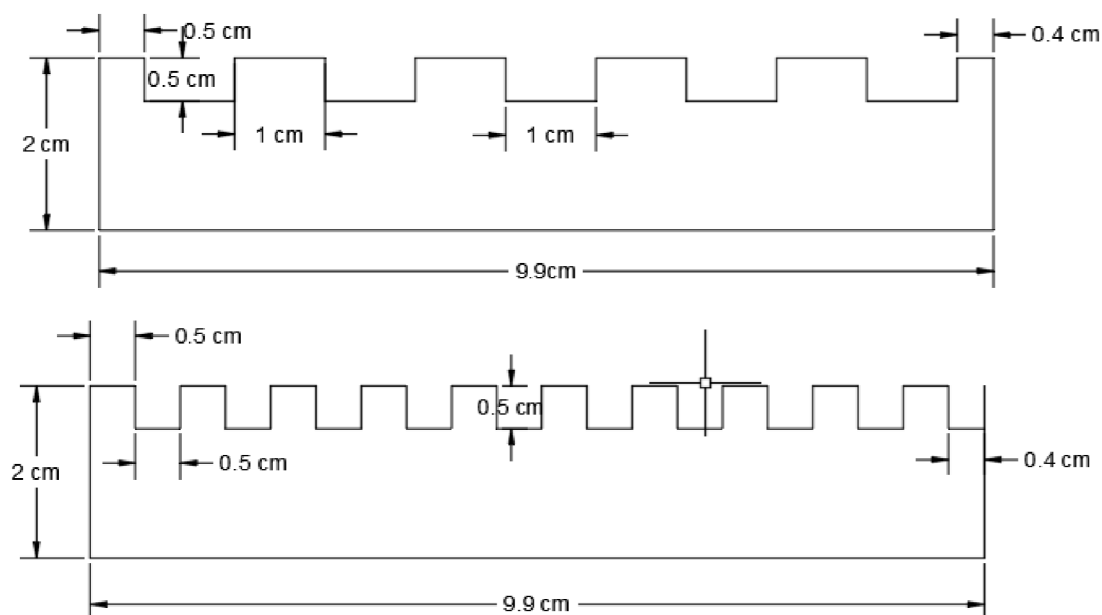


Fonte: Autora (2021).

Os parafusos internos na tampa do sistema têm a função de expulsar todo o ar no momento do enchimento com água no sistema. O dispositivo localizado ao lado esquerdo da Figura 20 consiste da saída de água que percolou o solo.

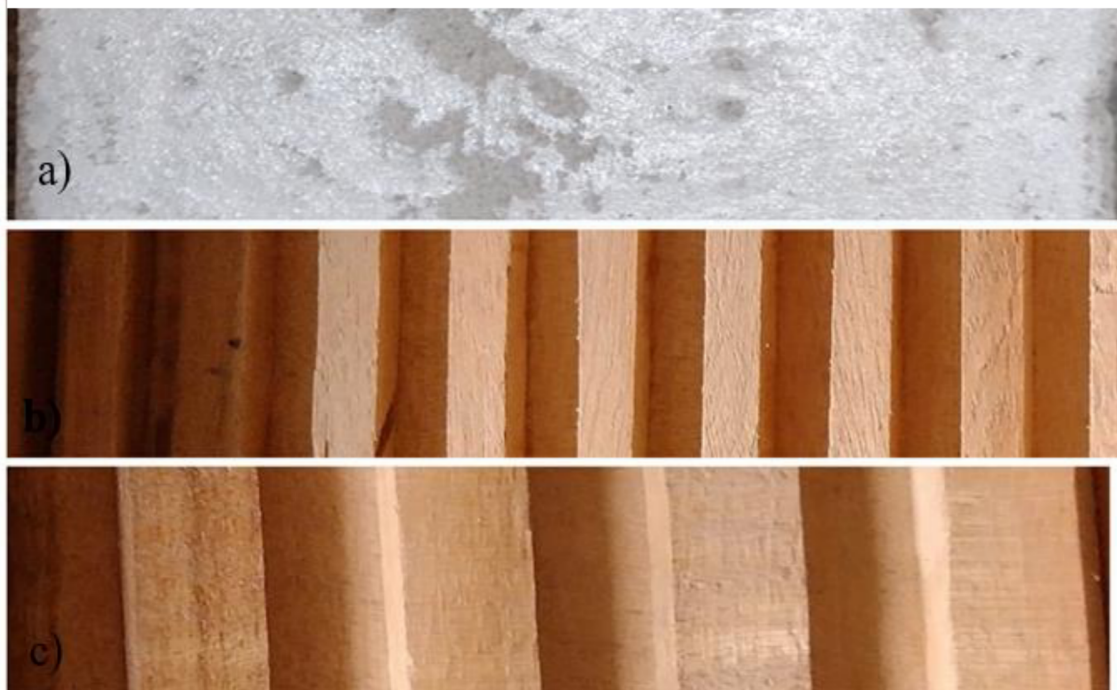
Para a simulação da rugosidade foi utilizada madeira do tipo maracatiaia com rugosidades dimensionalmente diferentes e uma placa de argamassa sem rugosidade. A placa de argamassa foi moldada com areia média e cimento Portland, com um traço de 2:1. A Figura 22 apresenta as características das placas com rugosidade e a Figura 11 as placas utilizadas nos experimentos.

Figura 21 – Características das placas com rugosidade de madeira



Fonte: Autora (2021).

Figura 22 – As placas utilizadas no experimento: (a) Placa de concreto; (b) Placa de madeira com rugosidade e espaçamento de 0,5 cm; (c) Placa de madeira com rugosidade e espaçamento de 1 cm



Fonte: Autora (2021).

A montagem dos experimentos foi executada de acordo com os itens a seguir:

- Inicialmente colocou-se 2,5 cm de camada de bentonita;
- Em seguida instalou-se a placa, onde foi empregada também bentonita nas extremidades da placa com o acrílico;
- A compactação do solo se deu com a umidade ótima das quatro misturas que para cada placa e variando o solo de espessura em 1cm, 3cm e 5cm. A compactação do solo foi realizada até conseguir o volume de solo desejado;
- Em seguida aplicou-se a segunda camada de bentonita;
- Realizou-se a vedação e o fechamento do sistema;
- Por fim, o enchimento do sistema com água e monitoramento para a determinação dos coeficientes de permeabilidade por meio de carga variável;

De acordo com as Figuras 23 e 24, é mostrado a sequência da execução da montagem do protótipo experimental do fluxo água na interface com a placa de argamassa sem rugosidade.

Figura 23 – Execução da montagem dos experimentos: a) Aplicação de bentonita; b) Instalação da placa; c) Compactação do solo; d) Última camada da aplicação de bentonita



Fonte: Autora (2022).

Figura 24 – Execução da montagem dos experimentos: a) Vedação completa do sistema; b) Sistema com água; c) Ensaio para a determinação dos coeficientes de permeabilidade;



Fonte: Autora (2022).

A sequência da execução do desenvolvimento do modelo experimental do fluxo de interface, foi igualmente repetida para as placas com rugosidade.

Os dados para a realização do experimento na interface realizando o ensaio de carga variável estão disponíveis no Apêndice C.

### 3.4 Modelagem do fluxo tridimensional

Nesta seção é apresentado a metodologia da pesquisa utilizando a modelagem computacional tridimensional para realizar a análise de controle de fluxo de água. Os gradientes hidráulicos foram avaliados e, conseqüentemente, a erosão interna pela interface concreto-solo.

A modelagem computacional consiste considerando três cenários, sendo eles:

- a) Seção sem interface e sem abraço (maciço da barragem);

- b) Seção com interface e seção sem abraço;
- c) Seção com interface e com abraço de comprimento de 2 m;

O primeiro cenário tem por objetivo analisar os gradientes hidráulicos desconsiderando-se a presença da interface. O segundo cenário busca analisar se a interface constitui um caminho preferencial para a percolação da água, avaliando o contraste dos resultados com o primeiro cenário, e o terceiro objetiva avaliar a eficiência do abraço no controle da percolação através da interface.

### 3.4.1 Definição da geometria, condições de contorno e geração da malha

Os dados característicos do solo compactado para a modelagem foram os mesmos utilizados na análise experimental e revela as características do material utilizado na construção do maciço. O detalhamento foi convertido em coordenadas cartesianas e utilizadas para a construção da modelagem da geometria na plataforma SEEP/W adicionado ao SEEP3D da GEOSTUDIO (2021). O sistema de drenagem interna foi desconsiderado na modelagem.

A definição dos dados de entrada foi referente as características da análise numérica, com a finalidade de controle e especificação das circunstâncias na estrutura. A carga total de água a montante, considerada foi de 8m. Utilizou-se uma região de descarga nula, estabelecendo onde não deve haver percolação de água, adotada no talude de jusante da barragem. A zona de pressão nula, a qual indica o caminho para onde a água deve ser conduzida, foi aplicada na extremidade do dreno de pé. O regime utilizado foi o permanente com a barragem em operação. A Figura 25 apresenta a geometria, os materiais e as condições de contorno da estrutura e a Tabela 1 os dados de entradas das condições de fluxo utilizados na caracterização do material.

Figura 25 - Geometria, materiais e condições de contorno da estrutura

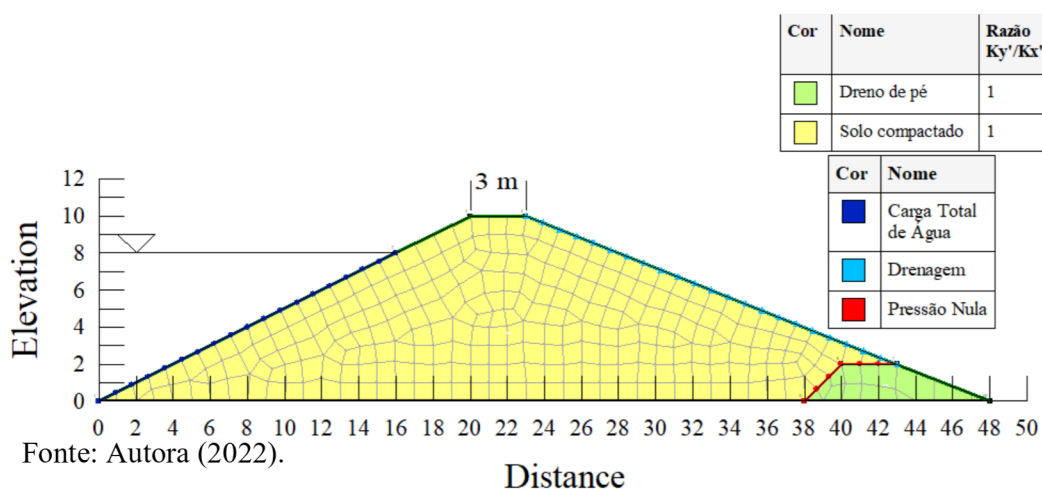


Tabela 2 - Dados de entrada para a modelagem

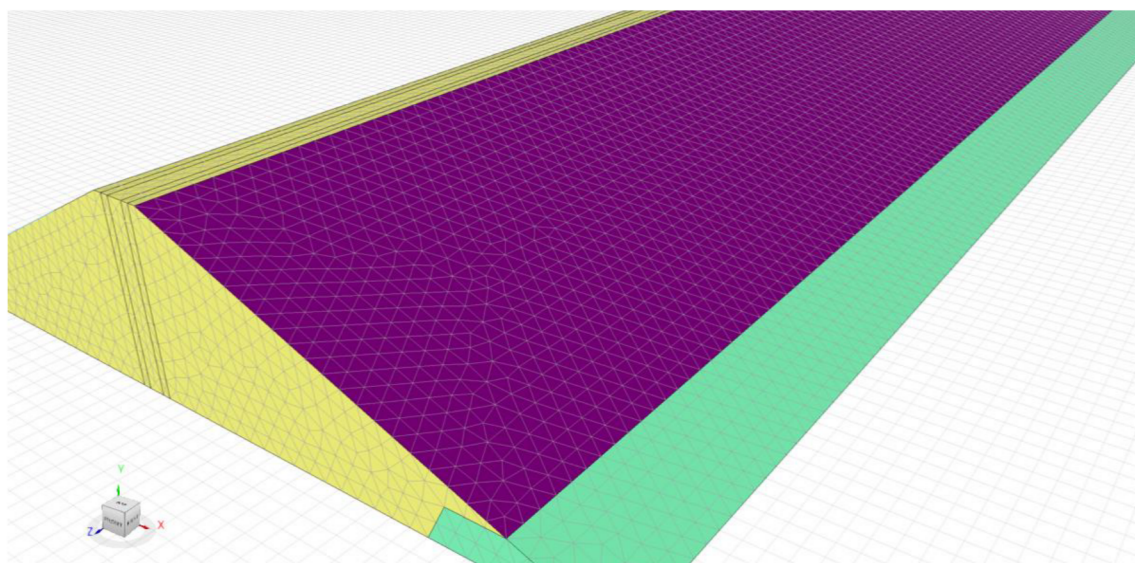
Material	Coefficiente de permeabilidade (m/s)	Kx/ky
Solo compactado	$9,5 \times 10^{-9}$	1
Concreto	$1,0 \times 10^{-16}$	1
Dreno de pé/Enrocamento	$1,0 \times 10^{-3}$	1

Fonte: Autora (2022).

### 3.4.2 Cenário um: Seção sem interface e sem abraço

A realização da análise de fluxo se deu com a utilização da plataforma SEEP/W adicionado ao SEEP3D do GEOSTUDIO (2021), fundamentado no Método dos Elementos Finitos para resolução de problemas de fluxo tridimensional. O *software* foi utilizado considerando-se a complexidade do fenômeno de percolação, por meio da análise de controle de fluxo, a fim de avaliar os gradientes hidráulicos na estrutura. Para isso, importou-se a análise bidimensional do SEEP/W, para qual foi adotada uma espessura de 200m na direção de z, logo então foi gerada uma malha automaticamente de geometria tetraédrica com 1m de comprimento de aresta, 85490 nós e 437825 elementos sólidos, como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Malha da seção da barragem sem interface



Fonte: Autora (2022).



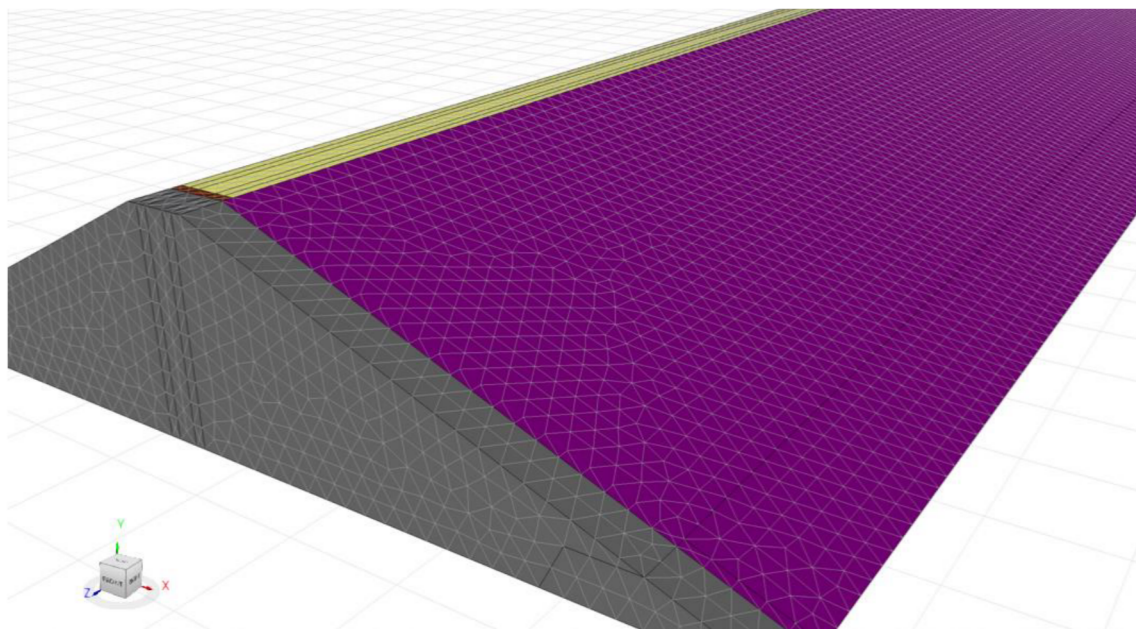
A realização dos gráficos dos gradientes hidráulicos foi feita analisando toda a geometria da barragem.

### 3.4.3 Cenário dois: seção com interface e sem abraço

A partir da modelagem do cenário um inseriu-se um muro lateral em concreto com 2m de espessura e um solo com 0,5m de espessura com permeabilidade de  $1,5E-08$  m/s, a fim de simular a deficiente má compactação nessa região. A geometria análoga do muro lateral e o solo mais permeável, consistiram na mesma seção da barragem. As condições de contorno foram modificadas, a pressão nula foi retirada do dreno de pé e colocada na face interna do muro de contato, indicando que o fluxo de água segue um caminho preferencial na interface da estrutura.

Na análise, foi gerada uma malha de geometria tetraédrica com 1m de comprimento de aresta, possuindo 86741 nós e 444191 elementos, como mostra a Figura 27.

Figura 27– Malha da seção da barragem com interface



Fonte: Autora (2022).

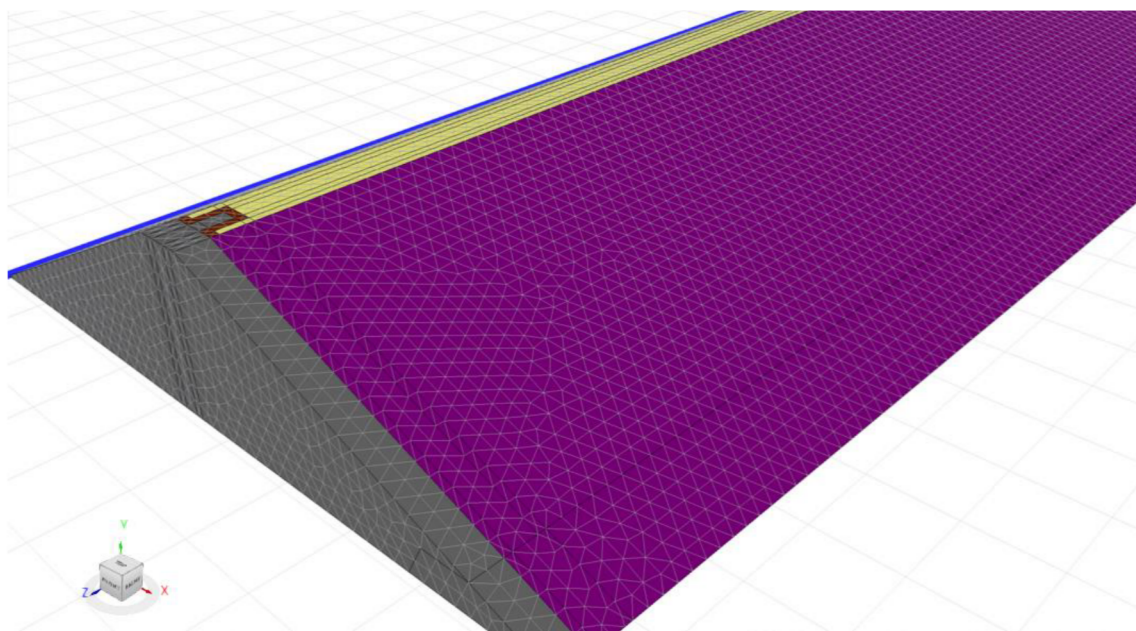
A geração dos gráficos dos gradientes hidráulicos selecionou-se como localização a face interna do muro de contato.

#### **3.4.4 Cenário três: seção com interface e com abraço**

A partir da modelagem do cenário dois, inseriu-se um abraço na interface da estrutura com geometria retangular de 1m de largura e 10m de altura, consistindo na mesma altura da barragem. As condições de contorno referentes à pressão nula foram retiradas para intensificar os resultados. A geometria da barragem foi bipartida, diferenciando-se apenas pela presença do abraço.

A modelagem foi realizada para o comprimento do abraço de 2m. Para geração da malha, selecionou-se uma geometria tetraédrica com 1 metros de comprimento de aresta. A geração do gráfico dos gradientes hidráulicos, deu-se como localização a geometria referente a face interna do muro e do abraço. Na análise, foi gerada uma malha de geometria tetraédrica com 1m de comprimento de aresta, possuindo 87807 nós e 449589 elementos. A Figura 28 mostra a malha gerada.

Figura 28– Malha da seção da barragem com muro de 2m



Fonte: Autora (2022).

Os resultados dos gradientes hidráulicos obtidos foram comparados com o gradiente hidráulico crítico (SOUSA PINTO, 2006), determinado de acordo com a equação 3.

$$i_{crit} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma\omega}$$

(3)

## **4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DA MODELAGEM TRIDIMENSIONAL**

Esse capítulo apresenta os resultados dos ensaios laboratoriais, experimentais e modelagem tridimensional realizados na presente pesquisa. Entre os resultados é apresentado a caracterização completa dos solos, as massas específicas secas máximas e umidades ótimas encontradas nos ensaios de compactação, coeficientes de permeabilidades das amostras e os coeficientes de permeabilidade no desenvolvimento do modelo experimental do fluxo de água na interface e os gradientes hidráulicos obtidos na simulação numérica.

### **4.1 Apresentação e discussão dos resultados experimentais**

#### **4.1.1 Ensaios Laboratoriais**

Nesse tópico são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais de caracterização, compactação e permeabilidade. É importante ressaltar que tais ensaios foram feitos de acordo com as normas técnicas vigentes no Brasil.

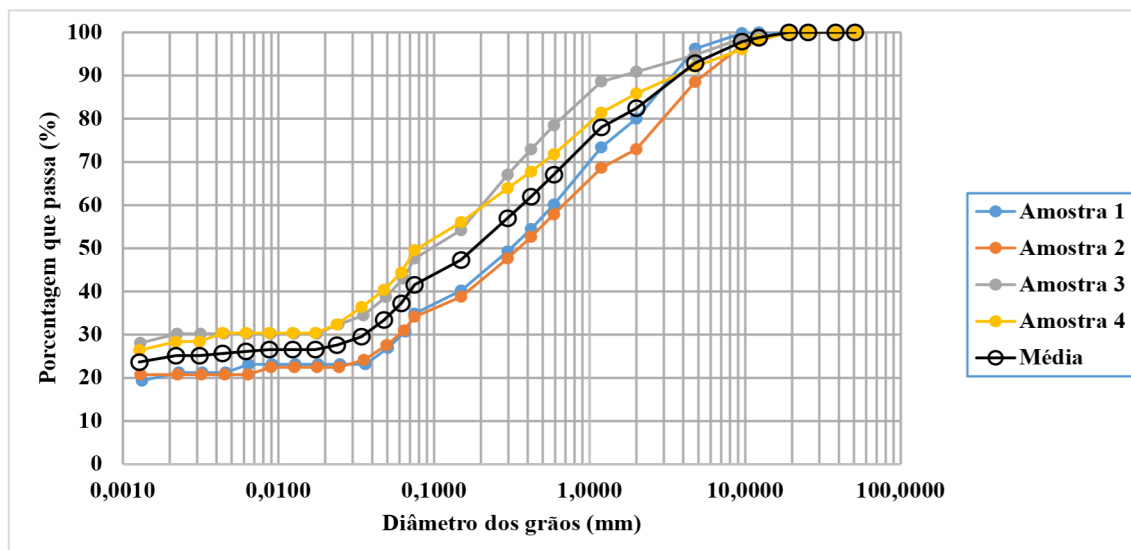
##### ***4.1.1.1 Ensaios de Caracterização***

As caracterizações dos solos foram realizadas a partir dos seguintes ensaios: análise granulométrica, ensaio para determinação da densidade real das partículas pelo método do picnômetro, dos limites de consistência e umidade. A Figura 29, mostra as curvas granulométricas obtidas.

De acordo com as curvas granulométricas, nota-se que os solos da Amostra 1, 2, 3 e 4 são solos arenosos. Conforme a ABNT NBR 6502, o solo da amostra 1 possui uma composição de 16% de areia média, 14% de areia fina, e 21% de argila. O da Amostra 2, 16% de areia média, 12% de areia fina e 21% de argila. A Amostra 3, 20 % de areia média, 18% de areia fina e 30% de argila e por fim, a Amostra 4, 12 % de areia média, 16 % de areia fina e 28% de argila.

Os resultados dos ensaios dos limites de consistência das Amostra 1, 2, 3, 4, da mistura das quatro amostras, as densidades reais das partículas realizados pelo método do picnômetro e da umidade natural, pelo método da estufa são mostrados nas tabelas 3, 4, e 5, respectivamente.

Figura 29 - Curvas granulométricas das Amostra 1, 2, 3, e 4



Fonte: Autora (2022).

Tabela 3 - Resultados dos Limites de liquidez e Limites de plasticidade

Amostras	Limite de Liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)
1	41,2	14
2	40	17
3	35	15
4	43	17
Mistura	42,5	15

Fonte: Autora (2022).

Tabela 4 - Resultados das densidades das partículas

Amostras	Densidade dos grãos (Gs)
1	2,61
2	2,64
3	2,63
4	2,68

Fonte: Autora (2022).

Tabela 5 - Resultados das umidades naturais

Amostras	Umidade (%)
1	2,36
2	1,42
3	1,6
4	1,9

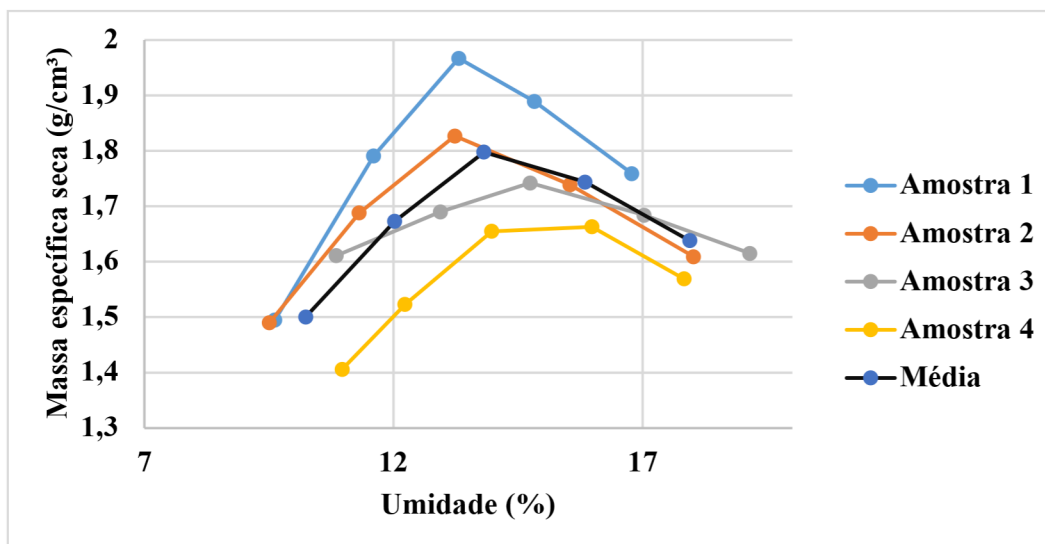
Fonte: Autora (2022).

Os resultados de caracterização das amostras coletadas e com a utilização do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), é observado que os solos das quatro amostras é uma areia argilosa (SC), possuindo maior quantidade de finos as amostras 2 e 4, ou seja, solos mais argilosos.

#### 4.1.1.2 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação permitiram as determinações das massas específicas secas máximas e das umidades ótimas dos solos. A Figura 30 mostra as curvas dos ensaios de compactação.

Figura 30 - Curvas de compactação



Fonte: Autora (2022).

As massas específicas secas máximas determinadas foram 1,87 g/cm<sup>3</sup>, 1,82 g/cm<sup>3</sup>, 1,742 g/cm<sup>3</sup> e 1,67g/cm<sup>3</sup> e as umidades ótimas foram 13,3%, 13,2%, 14,7% e 15%, para as amostras 1 ,2, 3 e 4, respectivamente.

#### **4.1.1.3 Ensaio de permeabilidade**

Os coeficientes de permeabilidade encontrados para as amostras 1, 2, 3, 4 e para a mistura destas quatro amostras foram, respectivamente,  $4,5 \cdot 10^{-7}$  cm/s,  $4,12 \cdot 10^{-6}$  cm/s,  $3,0 \cdot 10^{-8}$  cm/s,  $8,6 \cdot 10^{-8}$  cm/s e  $9,5 \cdot 10^{-7}$  cm/s, no qual foi realizado o ensaio de carga variável.

## **4.2 Modelos Experimentais do Fluxo na Interface**

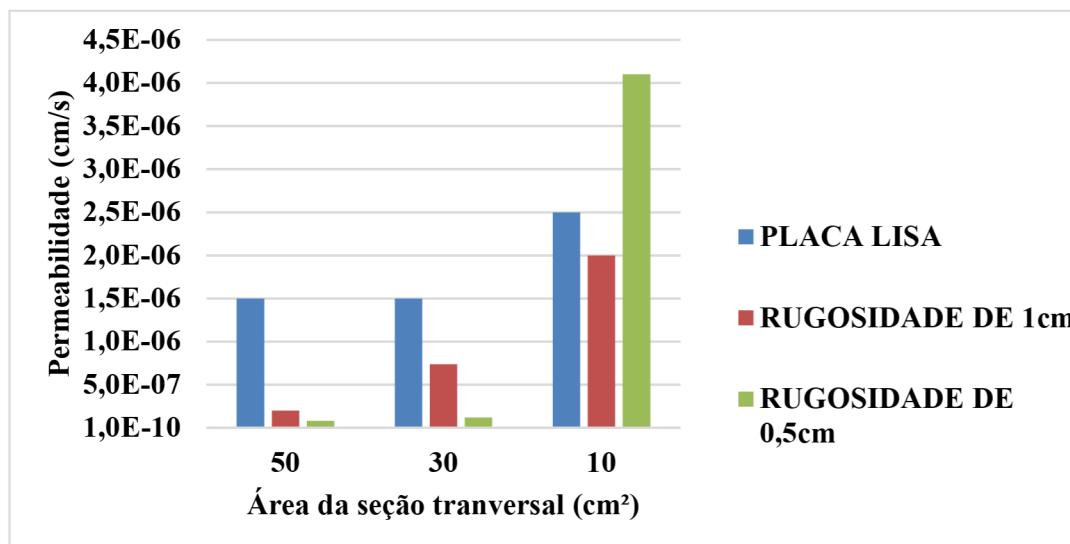
As realizações dos modelos experimentais de fluxo de água na interface simulando solo-estrutura, resultou na obtenção dos coeficientes de permeabilidade. A Figura 31, mostra os resultados para o solo com a mistura das quatro amostras e a Tabela 6 os resultados exatos.

Os coeficientes de permeabilidade obtidos com os experimentos na interface com a mistura das quatro amostras, solo SC, resultou numa diminuição dos coeficientes de permeabilidades significativas nas alturas do solo de 5 cm e 3 cm utilizando as placas rugosas, diminuindo assim a vazão nesta região e conseqüentemente, diminuição também a força de percolação.

Esses resultados são compatíveis com os encontrados por Kim, Park e Shin (2019), que observaram que as características da rugosidade da superfície da estrutura é um dos fatores que pode controlar fluxo de água ao longo da interface e, conseqüentemente, a erosão interna interfacial. No mesmo sentido, Xie *et al* (2018) identificaram que a rugosidade gera uma resistência a percolação.

A rugosidade não mostrou influência na altura de solo de 1 cm. Isso pode ser ocasionado devido a seção transversal do solo ser muito pequena (XIE *et al.*, 2018). Por outro lado, Kim, Park e Shin (2019) também identificaram que o coeficiente de permeabilidade na interface pode ser até 100 vezes maior do que massa de solo, criando uma descontinuidade dessa variável na interface que propicia a erosão interna interfacial (ASEDGHI-ASL *et al.*, 2015; RAULINO; MALVEIRA, 2019). Portanto, uma adequada rugosidade pode ter uma medida importante para reduzir o risco de erosão interna ao longo da interface (XIE *et al.*, 2019).

Figura 31- Coeficiente de permeabilidade na interface com a mistura das quatro amostras



Fonte: Autora (2022).

Tabela 6 – Resultados exatos do ensaio de na interface

<b>QUADRO RESUMO DE PERMEABILIDADE NA INTERFACE (cm/s)</b>			
<b>RUGOSIDADE</b>	<b>Área da seção transversal do solo (cm²)</b>		
	50	30	10
<b>PLACA LISA</b>	1,5E-06	1,5E-06	2,5E-06
<b>RUGOSIDADE DE 1cm</b>	2,0E-07	7,4E-07	2,0E-06
<b>RUGOSIDADE 0,50cm</b>	8,3E-08	1,2E-07	4,1E-06

Fonte: Autora (2022).

As deduções deste estudo são, obviamente, baseadas em testes de laboratório bem controlados. As características reais da interface são altamente suscetíveis aos fatores do trabalho de construção real, como a natural má compactação na interface, mão de obra, qualidade do material de enchimento e tensão de distribuição. Qualquer defeito pode resultar em uma lacuna ou rota de percolação preferencial, portanto, uma erosão interna relativamente fraca ainda pode ocorrer na interface.

### 4.3 Apresentação e discussão dos resultados da modelagem tridimensional

Nesta seção são apresentados os resultados das modelagens computacionais realizadas e as discussões referentes ao controle de fluxo na interface concreto-solo, com a finalidade de prevenir o processo erosivo. Os cenários considerados para modelagem computacional foram:



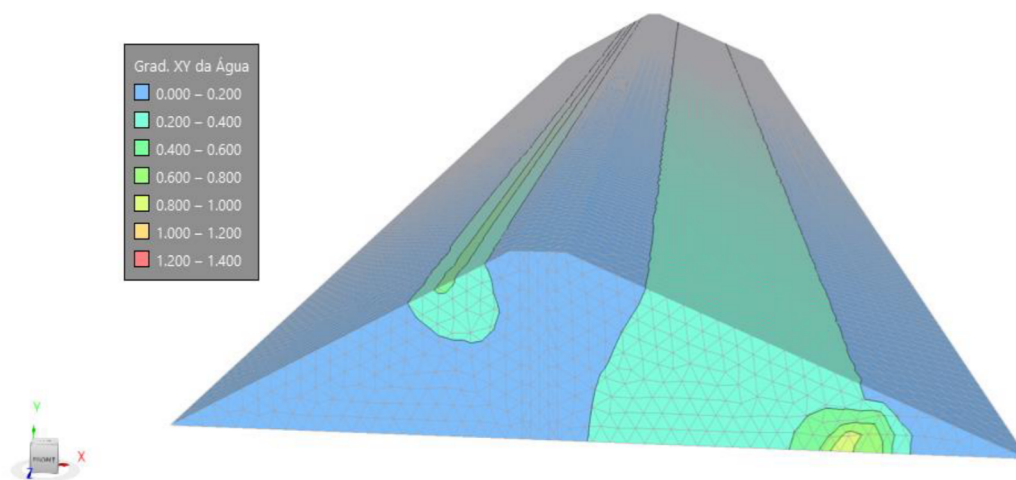
seção sem interface e sem abraço (I), seção com interface e sem abraço (II) e seção com interface e abraço (III).

#### 4.3.1 Cenário um: seção sem interface e sem abraço

Os resultados da modelagem computacional tridimensional e os gráficos dos gradientes hidráulicos em função da distância transversal e da altura da barragem, são apresentados nas Figuras 32, 33 e 34, respectivamente.

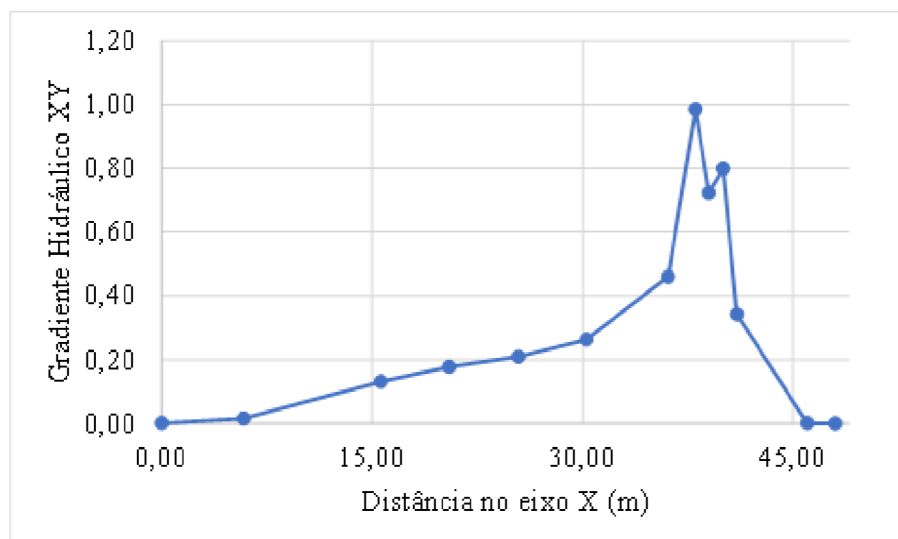
É possível observar de acordo com os resultados que a estrutura não apresenta gradientes hidráulicos críticos e, portanto, não possuem riscos de rompimento acarretados pela erosão do solo. O maior valor de gradiente hidráulico XY encontrado foi de aproximadamente 0,98 nos resultados de gradientes na direção de x.

Figura 32 - Resultados da modelagem do cenário um



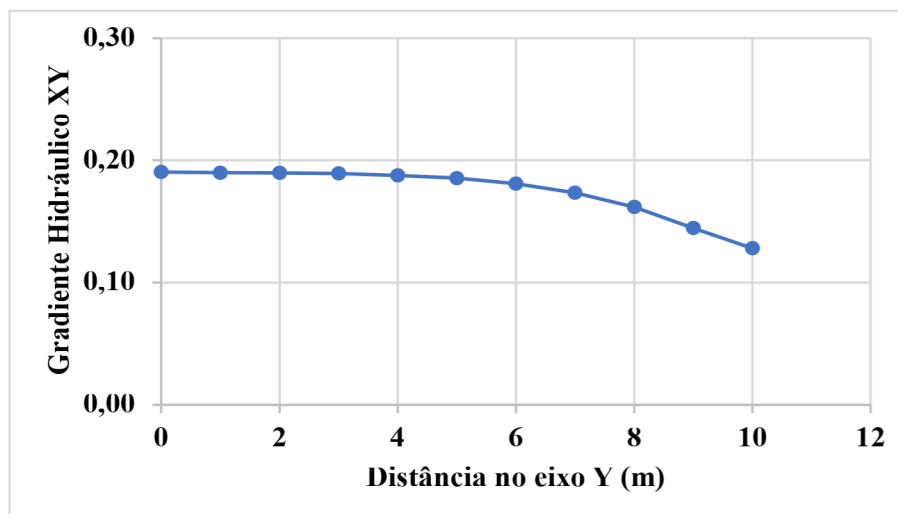
Fonte: Autora (2022).

Figura 33 - Resultados dos gradientes hidráulicos na direção de X



Fonte: Autora (2022).

Figura 34 - Resultados dos gradientes hidráulicos na direção de Y



Fonte: Autora (2022).

#### 4.3.2 Cenário dois: seção com interface e sem abraço

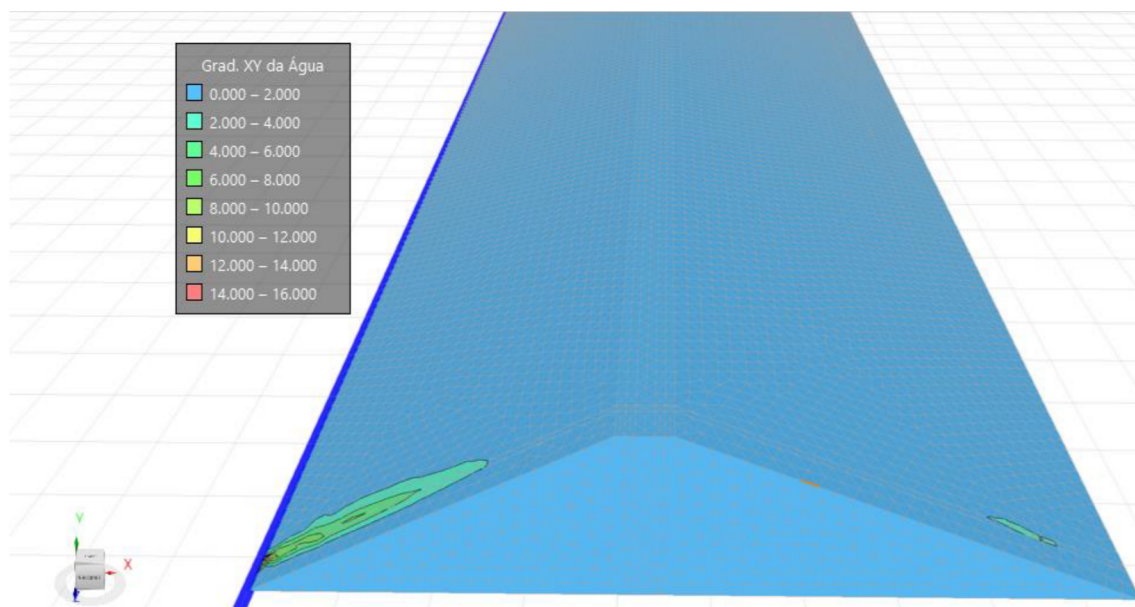
Os resultados da modelagem computacional tridimensional e os gráficos dos gradientes hidráulicos em função da distância transversal e da altura da barragem, são apresentados nas Figuras 35, 36 e 37, respectivamente.

Os resultados mostraram um aumento significativo dos gradientes hidráulicos na interface da barragem, quando comparados com o cenário um. Estes resultados são compatíveis com a literatura, que indica que a interface solo-concreto constitui um caminho preferencial de percolação e uma área propícia para a erosão interna e podendo trazer riscos mais sérios a estrutura da barragem (XIE *et al.* 2018, 2019; RAULINO; MALVEIRA, 2019).

Verificou-se que o houve cinco picos de gradientes hidráulicos, ambos no contato da estrutura, localizados a montante do maciço, com gradiente máximo de 12,63, 9,84, 5,76, 3,64 e 2,01 enquanto que na região de jusante do maciço o gradiente máximo foi 1,2.

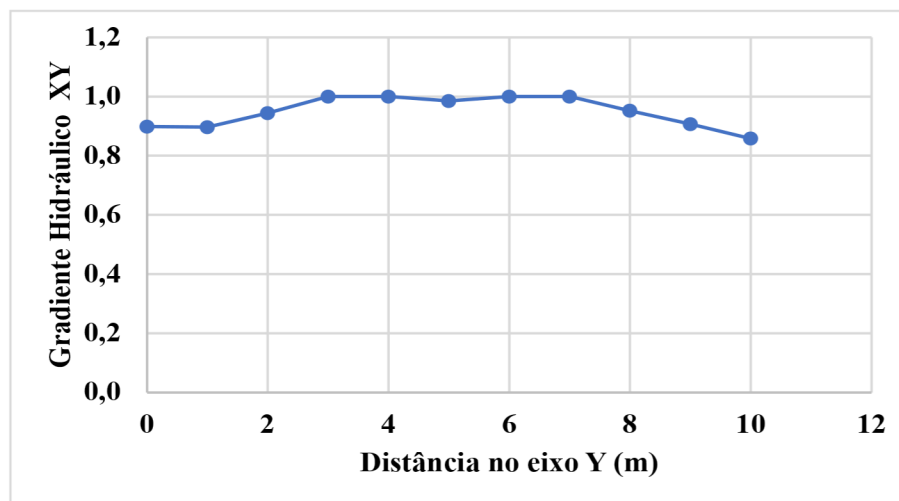
Esse aumento é em virtude da região de contato ser formada por dois materiais de características geotécnicas contrastantes, gerando uma descontinuidade do coeficiente de permeabilidade (KIM; PARK; SHIN, 2019). Os resultados se mostraram coerentes, com a presença de gradientes elevados e acima do crítico, oferecendo risco a estrutura.

Figura 35- Resultados da modelagem do cenário dois



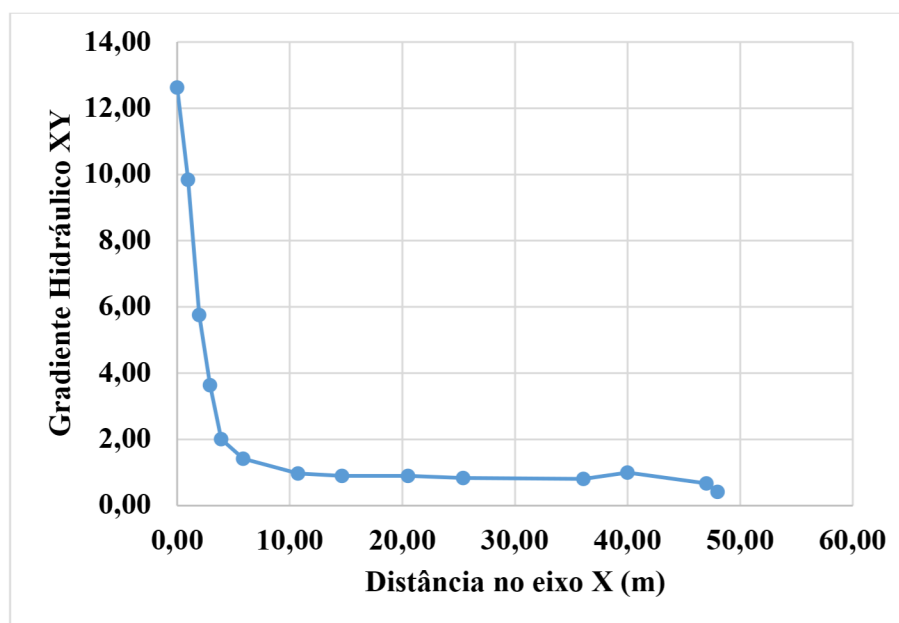
Fonte: Aurora (2022).

Figura 36- Resultados dos gradientes hidráulicos em função da altura do cenário dois



Fonte: Autora (2022).

Figura 37 - Resultados dos gradientes hidráulicos em função transversal do cenário dois



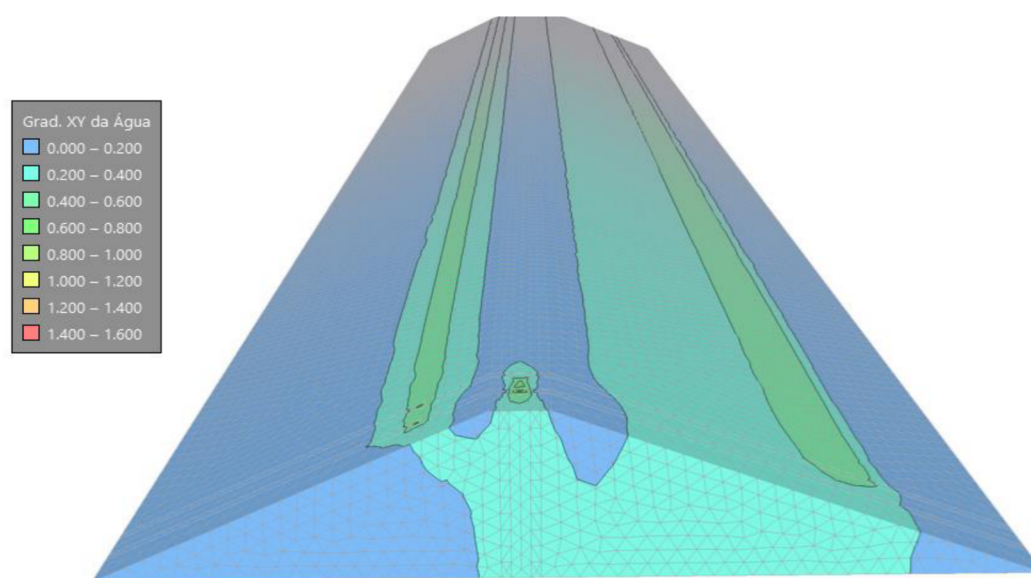
Fonte: Autora (2022).

#### 4.3.3 Cenário três: seção com interface e com abraço

Os resultados das modelagens computacionais tridimensionais são apresentados nas Figuras 38, 39 e 40.

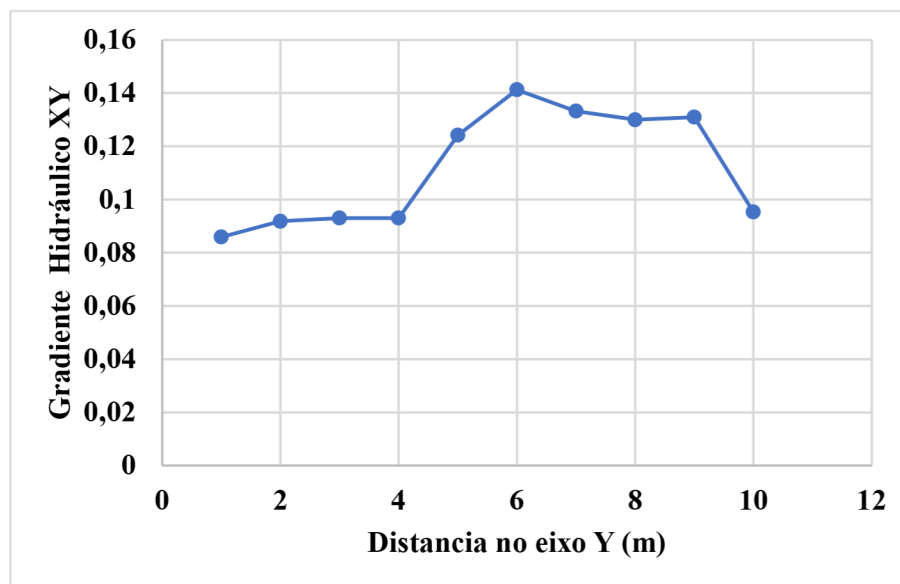
A partir dos resultados, é possível observar que houve uma redução significativa dos gradientes hidráulicos. Como observado por Sousa (2021) e Raulino (2019) na análise de cenário muro em abraço indicando a diminuição dos gradientes hidráulicos. Assim, os resultados se mostraram coerentes com a realidade, visto que o abraço promoveu a diminuição dos gradientes hidráulicos. Isto se deve ao fato que o muro aumenta o caminho de percolação e altera a direção do fluxo, dissipando maiores energias (RAULINO; MALVEIRA, 2019). Resultados similares foram encontrados por Xie *et al.* (2019), que usaram anéis impermeáveis para atuar como muro em abraço no experimento desenvolvido.

Figura 38 – Resultado da modelagem do cenário três



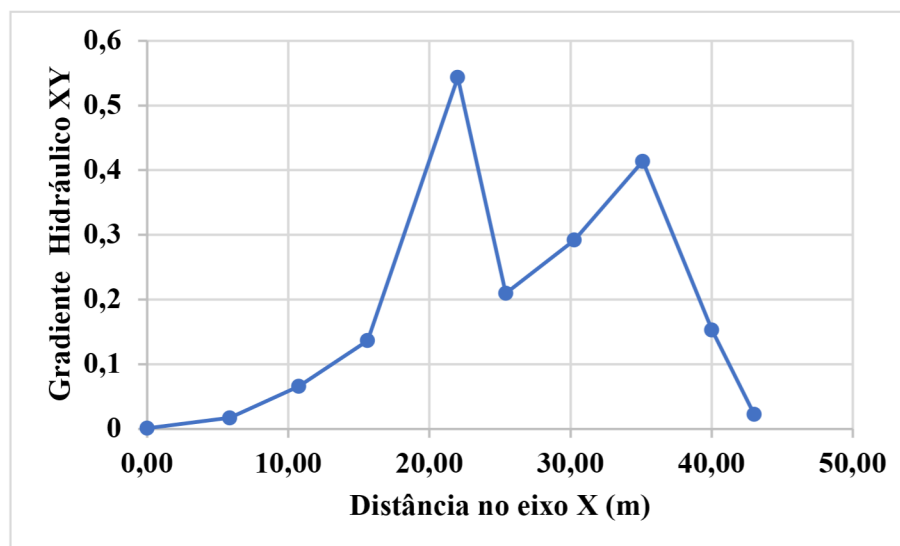
Fonte: Autora (2022).

Figura 39 - Resultados dos gradientes hidráulicos em função da altura do cenário três



Fonte: Autora (2022)

Figura 40 - Resultados dos gradientes hidráulicos em função transversal do cenário três



Fonte: Autora (2022).

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo será abordado as conclusões obtidas durante esta pesquisa, que compreende análises experimentais e numéricas. Em seguida, são apresentadas as sugestões para pesquisas futuras.

### 5.1 Conclusões

Este trabalho apresentou ensaios experimentais de laboratório realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará, na cidade de Fortaleza/CE. As informações, obtidas pelos ensaios experimentais, serviram de base para a modelagem da análise de fluxo água, por intermédio de um programa SEEP/W adicionado a SEEP3D da GEOSTUDIO. Através dos resultados dos ensaios e das análises numéricas, foi possível analisar o fluxo de água.

Com relação aos ensaios concluiu-se que:

- Os resultados dos experimentos de fluxo na interface, simulando o fluxo em interface solo-estrutura em uma barragem de terra, mostrou que a rugosidade tem influência no coeficiente de permeabilidade, indicando que quanto mais rugosa a superfície de concreto for, menor é o coeficiente de permeabilidade do sistema. Apresentando um controle e uma resistência ao fluxo e conseqüentemente uma diminuição do transporte dos grãos.
- A não interferência da rugosidade nos experimentos com área de 10 cm<sup>2</sup> pode indicar que isto aconteceu por se tratar de uma velocidade maior devido a área da seção transversal ser muito pequena.
- A erosão interna na interface de solo-estrutura em barragem de terra pode ser evitada aplicando na estrutura de concreto uma rugosidade, fazendo que haja dissipação da energia do fluxo de água e evitando caminhos preferenciais de percolação

Com relação a análise numérica pelo SEEP/W adicionado conclui-se que:

- A partir dos resultados das modelagens computacionais, é possível observar que a interface se identifica como um caminho preferencial a percolação da água no solo, apresentando gradientes hidráulicos elevados e, conseqüentemente, sendo mais susceptível a erosão interna.

- O abraço apresentou-se como uma solução eficiente no controle de percolação da água entre a interface, reduzindo significativamente os valores dos gradientes hidráulicos na estrutura.
- A modelagem computacional tridimensional se mostrou uma ferramenta útil para avaliar o risco de erosão ao longo da interface solo-concreto, bem como avaliar a efetividade do muro em abraço como medida mitigadora da erosão interna pela interface.
- Conforme preconizado pelo conceito de gradiente hidráulico, as interfaces se apresentam como caminho preferencial de percolação e, para evitar o processo erosivo e eventual ruptura da estrutura, devem ser consideradas medidas preventivas para tal processo, como o abraço, que se mostrou extremamente efetivo.
- Observou-se uma compatibilidade entre os resultados do experimento e das simulações.

## **5.2 Sugestão para pesquisas futuras**

Sugere-se para melhoria e continuação da pesquisa realizada na presente dissertação para futuros trabalhos baseados neste:

- a) Análises experimentais verificando a geometria diferentes para rugosidade e analisar qual geometria possui mais eficiência;
- b) Observar outros parâmetros na interface concreto-solo, como a poropressão;
- c) Realizar novas modelagens computacionais, considerando diferentes cenários, como a mudança da posição e tamanho do abraço;
- d) Encontrar um comprimento ideal para o abraço, que apresente gradientes abaixo do crítico e seja economicamente viável;



## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. A. F. **Estudo teórico e experimental da segurança de filtros de barragens de terra à erosão interna**. 2019. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

BOUZIANE, A. BENAMAR, A. TAHAKOURT, A. **Experimental and Numerical Investigation of Internal Erosion Effect on Shear Strength of Sandy Soil. P11, (2020)**.

CALDEIRA, L. Internal erosion in dams: studies and rehabilitation. **International Journal of Civil Engineering**, v. 17, p. 457-471, abr. 2018.

CAI, X.; WALLINGTON, K.; SHAFIEE-JOOD, M.; MARSTON, L. Understanding and managing the food-energy-water nexus – opportunities for water resources research. **Advances in Water Resources**, v. 111, p. 259-273, jan. 2018.

COUNCIL, N. R. et al. Ground water models: Scientific and regulatory applications. [S.l.]:National Academies Press, 1990.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). **Training aids for dam safety**. Washington DC: FEMA, 2008.

FELL, R.; FOSTER, M.; CYGANIEWICZ, J.; SILLS, G.; VROMAN, N.; DAVIDSON, R. Riskanalysis for dam safety: a unified method for estimating probabilities of failure of embankmentdams by internal erosion and piping. **Bureau of Reclamation, US Army Corps of Engineers, UNSW, URS Australia. North Sydney**, p. 4–4, 2008.

FELL, R.; FOSTER, M.; WAN, C. F. **Methods for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping-piping through the embankment**. [S.l.]: University of New South Wales, 2004.

FERDOS, F. **Internal Erosion Phenomena in Embankment Dams: Throughflow and internal erosion mechanisms**. Tese (Doutorado) — KTH Royal Institute of Technology, 2016.FOSTER, M.; FELLI, R.; SPANNAGLE, M. The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents. **Can. Geotech. J.** 2000, 37, 1000–1024, 2000.

FLORES-BERRONES, R.; LOPEZ-ACOSTA, N. P. **Internal erosion due to water flow through earth dams and earth structures**. [S.l.]: InTech, 2011.

FUKUMOTO, Y. S, OHTSUKA. **Coupled particle-fluid numerical simulation model for internal erosion of granular soils with a broad particle size distribution**. 9th International Conference on Scour and Erosion, ICSE 2018.

GEOSTUDIO. R2 versão 10.1.0.18696. 2021. <<https://www.geoslope.com/>>.

GOMES, F. H. de S. Quantificação de risco de piping em barragens de terra via abordagens probabilística e fuzzy. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

HU, Z.; ZHANG, Y.; YANG, Z. Suffusion-Induced Deformation and Microstructural Change of Granular Soils: A Coupled CFD–DEM Study. **Acta Geotech.**14, 795–814, 2019.

**ICOLD. Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations.** [S.l.:s.n.], 2013. v. 1: Internal Erosion Processes and Engineering Assessment.

JALIL, A.; BENAMAR, A.; TOUHAMI, M. Investigation of Internal Erosion Susceptibility of Core Soil from Three Dams. **Journal of Civil Engineering and Construction**, v. 10, p. 59-68, 25 fev. 2021.

JAIME, SILVA E VIRÃES; Simulação Computacional de Fluxo em Aquíferos com Análise Tridimensional. RBRH Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 4 n.3 Jul/Set 1999, 117-130

KAOSER, S.; BARRINGTON, S.; ELEKTOROWICZ, M.; AYADAT, T. The influence of hydraulic gradient and rate of erosion on hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, v. 15, n. 5, p. 481-496, 22 set. 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15320380600847815>

KIM, H. J.; PARK, J. M.; SHIN, J. H. **Flow behaviour and piping potential at the soil-structure interface.** Géotechnique, v. 69, n.1, p.79-84. jan. 2019

KHAN, A.A.; VRABIE, V.; BECK, Y.-L.; MARS, I.J.; D’Urso, G. Monitoring and Early Detection of Internal Erosion: Distributed Sensing and Processing. *Struct. Heal. Monit*, 13, 562–576, 2014.

KODIEH, A.; GELET, R.; MAROT, D.; FINO, A.Z. A Study of Suffusion Kinetics Inspired from Experimental Data: Comparison of Three Different Approaches. **Acta Geotech.** 1–19, 2020.

LUO, Y. L.; ZHAN, M. L.; SHENG, J. C.; WU Q. Hydro-mechanical coupling mechanism on joint of clay core-wall and concrete cut-off wall. **Journal of Central South University**, v. 20, p. 2578-2585, 6 set. 2013.

MERCIER, F. BONELLI, S. GOLAY, F. ANSELMET, F., PHILIPPE, P. BORGHI, R. Numerical modelling of concentrated leak erosion during Hole Erosion Tests. P. 14. (2014)

MORACI, N.; MANDAGLIO, M.C.; LELO, D. A New Theoretical Method to Evaluate the Internal Stability of Granular Soils. **Can. Geotech. J.** 49, 45–58, 2012.

MUHUNTHAN, B.; PILLAI, S. Teton dam, USA: uncovering the crucial aspect of its failure. **Civil Engineering**, v. 161, n. 6, p. 35-40, nov. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1680/cien.2008.161.6.35>.

OKEKE, A. C. U.; WANG, F. Hydromechanical constraints on piping failure of landslide dams: an experimental investigation. **Geoenvironmental Disasters**, v. 3, n. 4, p. 1-17, 1 abr. 2016.

R. ABOUL HOSNA, B. L. SIBILLEA, N. BENAHMEDB, B. CHAREYREA. **A discrete numerical model involving partial fluid-solid coupling to describe suffusion effects in soils.** Univ. Grenoble Alpes, CNRS. P. 20, (2017)

RAULINO, J.B.S; MALVEIRA, V. T. C. Desenvolvimento de uma tecnologia fuzzy para análise de risco em interface concreto-solo. XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens – SNGB, p. 20, 2019.

REIS, JOSELY HEMETÉRIO CORDEIRO DOS, Modelo de atrito em interfaces de contato entre concreto e areia. Tese doutorado. São Carlos 2006.

RICHARDS, K.S.; REDDY, K.R. Critical Appraisal of Piping Phenomena in Earth Dams. Bull. Int. Assoc. **Eng. Geol.**, 66, 381–402, 2007.

SANDRONI, S. S. **Geotecnia das barragens. Notas de aula.** Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SATO, M.; KUWANO, R. Suffusion and clogging by one-dimensional seepage tests on cohesive soil. **Soils and Foundations**, v. 55, n. 6, p. 1427-1440, dez. 2015.

SABOYA JÚNIOR, F. Análise de Barragem de Enrocamento de Face de Concreto Durante o Período de Construção e Enchimento. Tese de Doutorado, DEC/PUC – Rio de Janeiro, RJ, 225p. (1993)

SEDGHI-ASL, M.; PARVIZI, M.; ARMIN, M.; FLORES-BERRONES, R. Internal erosion under spillway rested on an embankment dam. **International Journal of Mining and Geo-Engineering**, v. 49, n. 2, p. 269-279, dez. 2015.

SHAYAN E AMIRI-TOKALDANY. Effects of blanket, drains, and cutoff wall on reducing uplift pressure, seepage, and exit gradient under hydraulic structures. **International Journal of Civil Engineering**, Vol. 13, No. 4A. DOI: 10.22068/IJCE.13.4.486, 2015.

SOUSA, A. C. M de S. influência do Gradiente Hidráulico na Erosão Interna em Interfaces Solo/Concreto. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral, 2021.

SOUZA PINTO, CARLOS DE. Curso Básico de Mecânica dos Solos. Oficina de Textos. São Paulo. 2006.

SRH, S. de R. H. Relatório "as built". 2013.

VIEIRA, V. P. P. B. **Análise de risco em recursos hídricos: fundamentos e aplicações.** Porto Alegre: ABRH, 2005.

XIE, Q.; LIU, J.; HAN, B.; LI, H.; LI, Y.; LI, X. Critical hydraulic gradient of internal erosion at the soil-structure interface. **Processes**, v. 6, n. 7, p. 1-15, jul. 2018.

XIE, Q.; LIU, J.; HAN, B.; LI, H.; LI, Y.; JIANG, Z. Experimental investigation of interfacial erosion on culvert-soil interface in earth dams. **Soils and Foundations**, v. 59, n. 3, p. 671-686, jun. 2019.

WANG, X.; TANG, Y.; HUANG, B.; HU, T.; LING, D. Review on Numerical Simulation of the Internal Soil Erosion Mechanisms Using the Discrete Element Method. **Water**.13, 169, 2021.

YOUSEFI, SEDGHI-ASL E PARVIZI. **Seepage and Boiling around a Sheet Pile under Different Experimental Configuration.** DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001449](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001449), 2016.

ZHANG, X ; WANG, C ; WONG, H; JIANG, T ; DONG, J. **Modeling dam deformation in the early stage of internal seepage erosion – Application to the Teton Dam, Idaho, before the 1976 incident.** *ournal of Hydrology*, v 605, February 2022

## APÊNDICE A – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS UTILIZADOS NO MODELO EXPERIMENTAL

### AMOSTRA 1 GRANULOMETRIA

#### Umidade da sedimentação

Nº da cápsula	52
Peso bruto úmido (g)	87,12
Peso bruto seco (g)	85,42
Peso da cápsula (g)	13,29
Peso da água (g)	1,7
Peso do solo seco (g)	72,13
Umidade (%)	2,36

#### Resumo da sedimentação

Pedregulho	Acima de 4,8 mm	3,79 %
Areia grossa	4,8 – 2mm	16,17 %
Areia média	2 – 0,4 mm	25,58 %
Areia fina	0,4 – 0,05 mm	27,51 %
Silte	0,05 – 0,002 mm	5,69 %
Argila	Abaixo de 0,002 mm	21,25 %
Argila coloidal	Abaixo de 0,001 mm	-

#### Amostra seca

	Amostra total	Amostra parcial
Nº da cápsula	1	2
Peso do solo úmido (g)	1000	70
Peso do pedregulho (g)	37,06	-
Peso miúdo úmido (g)	962,94	-
Peso miúdo seco (g)	940,77	-
Peso da amostra seca (g)	977,83	68,39
Constante K	-	1,897
Densidade a 20°C	2,61	

#### Peneiramento do solo graúdo

Peneira		Peso Retido (g)	Peso Passante (g)	% Passante
Polegada	mm			
2"	50,80	0	977,83	100
1 1/2"	38,10	0	977,83	100
1"	25,40	0	977,83	100
3/4"	19,10	0	977,83	100
1/2"	12,27	0	977,83	100
3/8"	9,52	1,75	976,08	99,8
Nº 4	4,76	35,31	940,77	96
Nº 10	2,00	158,14	782,63	80

## Peneiramento do solo miúdo

Peneira				
Polegada	mm	Peso Retido (g)	Peso Passante (g)	% Passante
Nº 16	1,19	5,68	62,71	73
Nº 30	0,59	11,32	51,39	60
Nº 40	0,42	4,86	46,53	54
Nº 50	0,297	4,42	42,11	49
Nº 100	0,149	7,75	34,36	40
Nº 200	0,075	4,56	29,8	35

## Sedimentação

Densímetro Nº 1									
Tempo Decorrido (s)	Leitura (L)	Temperatura °C	Correção meio dispersor	Leitura corrigida	Altura de queda (cm)	Leitura corrigida final	$\eta$ (g.s/cm <sup>2</sup> )	"d" dos grãos (mm)	% Total
35	18	27	3	15,00	15,36	16,20	0,00000872	0,0654	31
60	16	27	3	13,00	15,74	14,20	0,00000872	0,0506	27
120	14	27	3	11,00	16,12	12,20	0,00000872	0,0362	23
240	14	27	3	11,00	15,24	12,20	0,00000872	0,0249	23
460	14	27	3	11,00	15,24	12,20	0,00000872	0,0180	23
900	14	27	3	11,00	15,24	12,20	0,00000872	0,0128	23
1800	14	27	3	11,00	15,24	12,20	0,00000872	0,0091	23
3600	14	27	3	11,00	15,24	12,20	0,00000872	0,0064	23
7200	13	27	3	10,00	15,43	11,20	0,00000872	0,0046	21
14400	13	27	3	10,00	15,43	11,20	0,00000872	0,0032	21
28800	13	27	3	10,00	15,43	11,20	0,00000872	0,0023	21
86400	12	27	3	9,00	15,62	10,20	0,00000872	0,0013	19

## ENSAIO DE CONSISTÊNCIA

Ensaio de limite de liquidez

LIMITE DE LIQUIDEZ				
Nº de golpes	34	28	25	12
Nº da cápsula	43	32	34	13
Solo+tara+água (g)	16,57	18,08	16,36	15,96
Solo+tara (g)	13,68	14,85	13,29	13,06
Tara (g)	6,32	6,04	6,26	6,74
Água (g)	2,89	3,23	3,07	2,9
Solo (g)	7,36	8,81	7,03	6,32
Umidade (%)	39,27	36,66	43,67	45,89

Ensaio de limite de Plasticidade

LIMITE DE PLASTICIDADE				
Nº da cápsula	109	71	522	3051
Solo+tara+água (g)	7,95	7,93	7,83	8,88
Solo+tara (g)	7,66	7,67	7,56	8,63
Tara (g)	6,13	6,09	5,84	7,08
Água (g)	0,29	0,26	0,27	0,25
Solo (g)	1,53	1,58	1,72	1,55
Umidade (%)	18,95	16,46	5,57	6,83
Limite de Plasticidade	12%			

## COMPACTAÇÃO

Ensaio de compactação

Cilindro nº:	p	Volume: 100 cm <sup>3</sup>			Peso : 2051g
Nº de golpes:	26	Peso da amostra : 300g			
Peso da amostra + cilindro (g)	3690	4050	4280	4220	4105
Peso da amostra (g)	1639	1990	2229	2169	2054
Massa específica úmida (g/cm <sup>3</sup> )	1,639	1,999	2,229	2,169	2,054
Nº da cápsula	52	64	48	7	12
Peso bruto úmido (g)	71,20	61,40	74,94	69,12	72,49
Peso bruto seco (g)	66,12	56,48	67,71	61,89	64
Peso da cápsula (g)	13,30	14,05	13,37	13,14	13,41
Água (g)	5,08	4,92	7,23	7,23	8,49
Solo (g)	52,82	42,43	54,34	48,75	50,59
Umidade (%)	9,62	11,60	13,31	14,83	16,78
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,493	1,791	1,967	1,889	1,759

## AMOSTRA 2 GRANULOMETRIA

### Umidade da sedimentação

Nº da cápsula	48
Peso bruto úmido (g)	95,63
Peso bruto seco (g)	94,48
Peso da cápsula (g)	13,35
Peso da água (g)	1,15
Peso do solos seco (g)	81,13
Umidade (%)	1,42

### Resumo da sedimentação

Pedregulho	Acima de 4,8 mm	11,49 %
Areia grossa	4,8 – 2mm	15,54 %
Areia média	2 – 0,4 mm	20,33 %
Areia fina	0,4 – 0,05 mm	25,07 %
Silte	0,05 – 0,002 mm	6,81 %
Argila	Abaixo de 0,002 mm	20,76 %
Argila coloidal	Abaixo de 0,001 mm	-

### Amostra seca

	Amostra total	Amostra parcial
Nº da cápsula	1	2
Peso do solo úmido (g)	1000	70
Peso do pedregulho (g)	267,51	-
Peso miúdo úmido (g)	732,49	-
Peso miúdo seco (g)	722,25	-
Peso da amostra seca (g)	989,76	68,02
Constante do fator K	-	1,702
Densidade a 20°C	2,64	

### Peneiramento do solo graúdo

Polegada	mm	Peso Retido (g)	Peso Passante (g)	% Passante
2"	50,80	0	989,76	100
1 1/2"	38,10	0	989,76	100
1"	25,40	0	989,76	100
3/4"	19,10	0	989,76	100
1/2"	12,27	18,97	970,79	98
3/8"	9,52	11,28	959,51	97
Nº 4	4,76	83,49	876,02	89
Nº 10	2,00	153,77	722,25	73



## Peneiramento do solo miúdo

Peneira				
Polegada	mm	Peso Retido (g)	Peso Passante (g)	% Passante
Nº 16	1,19	4,11	64,91	69
Nº 30	0,59	10,18	54,73	58
Nº 40	0,42	4,94	49,79	53
Nº 50	0,297	4,73	45,06	48
Nº 100	0,149	8,39	36,67	39
Nº 200	0,075	4,36	32,31	34

## Sedimentação

Densímetro Nº 1									
Tempo Decorrido (s)	Leitura (L)	Temperatura °C	Correção meio dispersor	Leitura corrigida	Altura de queda (cm)	Leitura corrigida final	$\eta$ (g.s/cm <sup>2</sup> )	"d" dos grãos (mm)	% Total
30	20	27	3	17,00	14,98	18,20	0,00000872	0,064	31
60	18	27	3	15,00	15,36	16,20	0,00000872	0,0495	28
120	16	27	3	13,00	15,74	14,20	0,00000872	0,0354	24
240	15	27	3	12,00	15,05	13,20	0,00000872	0,0245	22
460	15	27	3	12,00	15,05	13,20	0,00000872	0,0177	22
900	15	27	3	12,00	15,05	13,20	0,00000872	0,0127	22
1800	15	27	3	12,00	15,05	13,20	0,00000872	0,0089	22
3600	14	27	3	11,00	15,24	12,20	0,00000872	0,0064	21
7200	14	27	3	11,00	15,24	12,20	0,00000872	0,0045	21
14400	14	27	3	11,00	15,24	12,20	0,00000872	0,0032	21
28800	14	27	3	11,00	15,24	12,20	0,00000872	0,0023	21
86400	14	27	3	11,00	15,24	12,20	0,00000872	0,0013	21

## ENSAIO DE CONSISTÊNCIA

Ensaio de limite de liquidez

LIMITE DE LIQUIDEZ				
Nº de golpes	37	25	20	14
Nº da cápsula	59	81	1	65
Solo+tara+água (g)	15,37	16,56	18,27	17,69
Solo+tara (g)	13,06	13,8	14,77	13,87
Tara (g)	6,21	6,48	6,42	6,04
Água (g)	2,31	2,76	3,5	3,82
Solo (g)	6,85	7,32	8,35	7,83
Umidade (%)	33,72	37,7	41,92	48,79

Tabela: Ensaio de limite de Plasticidade

LIMITE DE PLASTICIDADE				
Nº da cápsula	53	989	105	141
Solo+tara+água (g)	7,82	8,21	8,44	7,3
Solo+tara (g)	7,56	7,89	8,17	7
Tara (g)	5,93	6,03	6,54	5,19
Água (g)	0,26	0,32	0,27	0,3
Solo (g)	1,63	1,86	1,63	1,81
Umidade (%)	15,95	17,2	16,56	16,57
Limite de Plasticidade	17%			

## COMPACTAÇÃO

Ensaio de compactação

Cilindro nº:	p	Volume: 1000 cm <sup>3</sup>		Peso : 2051g	
Nº de golpes:	26	Peso da amostra :		300g	
Peso da amostra + cilindro (g)	3683	3930	4120	4060	3950
Peso da amostra (g)	1632	1879	2069	2009	1899
Massa específica úmida (g/cm <sup>3</sup> )	1,632	1,879	2,069	2,009	1,899
Nº da cápsula	19	38	37	101	40
Peso bruto úmido (g)	140,23	111,44	114,26	101,32	99,1
Peso bruto seco (g)	130	102,68	103,62	90,45	87,35
Peso da cápsula (g)	22,38	25,23	23,21	20,51	22,16
Água (g)	10,23	8,76	10,64	10,87	11,75
Solo (g)	107,62	77,45	80,41	69,94	65,19
Umidade (%)	9,51	11,31	13,23	15,54	18,02
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,49	1,688	1,827	1,739	1,609

### AMOSTRA 3 GRANULOMETRIA

#### Umidade da sedimentação

Nº da cápsula	6
Peso bruto úmido (g)	100,65
Peso bruto seco (g)	99,31
Peso da cápsula (g)	15,68
Peso da água (g)	1,34
Peso do solos seco (g)	83,63
Umidade (%)	1,60

#### Resumo da sedimentação

Pedregulho	Acima de 4,8 mm	5,26 %
Areia grossa	4,8 – 2mm	3,84 %
Areia média	2 – 0,4 mm	18,02 %
Areia fina	0,4 – 0,05 mm	34,13 %
Silte	0,05 – 0,002 mm	8,52 %
Argila	Abaixo de 0,002 mm	30,23 %
Argila coloidal	Abaixo de 0,001 mm	-

#### Amostra seca

	Amostra total	Amostra parcial
Nº da cápsula	1	2
Peso do solo úmido (g)	1000	70
Peso do pedregulho (g)	89,71	-
Peso miúdo úmido (g)	910,29	-
Peso miúdo seco (g)	895,93	-
Peso da amostra seca (g)	985,64	68,9
Constante do fator K	-	2,129
Densidade a 20°C	2,63	

#### Peneiramento do solo graúdo

Polegada	mm	Peso Retido (g)	Peso Passante (g)	% Passante
2"	50,80	0	985,64	100
1 1/2"	38,10	0	985,64	100
1"	25,40	0	985,64	100
3/4"	19,10	0	985,64	100
1/2"	12,27	11,2	974,44	99
3/8"	9,52	2,81	971,63	99
Nº 4	4,76	37,87	933,76	95
Nº 10	2,00	37,83	895,93	91

## Peneiramento do solo miúdo

Peneira				
Polegada	mm	Peso Retido (g)	Peso Passante (g)	% Passante
Nº 16	1,19	1,74	67,16	89
Nº 30	0,59	7,68	59,48	78
Nº 40	0,42	4,24	55,24	73
Nº 50	0,297	4,43	50,81	67
Nº 100	0,149	9,71	41,1	54
Nº 200	0,075	4,98	36,12	48

## Sedimentação

Densímetro Nº 1									
Tempo Decorrido (s)	Leitura (L)	Temperatura °C	Correção meio dispersor	Leitura corrigida	Altura de queda (cm)	Leitura corrigida final	$\eta$ (g.s/cm <sup>2</sup> )	"d" dos grãos (mm)	% Total
35	22	27	3	19,00	14,60	20,20	0,00000872	0,0634	43
60	20	27	3	17,00	14,98	18,20	0,00000872	0,049	39
120	18	27	3	15,00	15,36	16,20	0,00000872	0,0351	34
240	17	27	3	14,00	14,67	15,20	0,00000872	0,0243	32
460	16	27	3	13,00	14,86	14,20	0,00000872	0,0176	30
900	16	27	3	13,00	14,86	14,20	0,00000872	0,0126	30
1800	16	27	3	13,00	14,86	14,20	0,00000872	0,0089	30
3600	16	27	3	13,00	14,86	14,20	0,00000872	0,0063	30
7200	16	27	3	13,00	14,86	14,20	0,00000872	0,0045	30
14400	16	27	3	13,00	14,86	14,20	0,00000872	0,0032	30
28800	16	27	3	13,00	14,86	14,20	0,00000872	0,0022	30
86400	15	27	3	12,00	15,05	13,20	0,00000872	0,0013	28

## ENSAIO DE CONSISTÊNCIA

Ensaio de limite de liquidez

LIMITE DE LIQUIDEZ				
Nº de golpes	35	29	23	14
Nº da cápsula	10	29	49	143
Solo+tara+água (g)	14,87	15,95	16,94	18,63
Solo+tara (g)	12,87	13,66	14,05	15,01
Tara (g)	6,28	6,8	5,96	6,01
Água (g)	2	2,29	2,89	3,62
Solo (g)	6,59	6,86	8,09	9
Umidade (%)	30,35	33,38	35,72	40,22

Ensaio de limite de Plasticidade

LIMITE DE PLASTICIDADE				
Nº da cápsula	155	11	7.1	510
Solo+tara+água (g)	7,78	7,35	8,19	7,46
Solo+tara (g)	7,53	7,1	7,92	7,24
Tara (g)	5,93	5,47	6,18	5,68
Água (g)	0,25	0,25	0,27	0,22
Solo (g)	1,6	1,63	1,74	1,56
Umidade (%)	15,63	15,34	15,52	14,1
Limite de Plasticidade	15%			

## COMPACTAÇÃO

Ensaio de compactação

Cilindro nº:	p	Volume: 1000 cm <sup>3</sup>		Peso : 2051g	
Nº de golpes:	26	Peso da amostra : 300g			
Peso da amostra + cilindro (g)	3837	3960	4050	4022	3975
Peso da amostra (g)	1786	1909	1999	1971	1924
Massa específica úmida (g/cm <sup>3</sup> )	1,786	1,909	1,999	1,971	1,924
Nº da cápsula	2	30	21	11..	23
Peso bruto úmido (g)	105,62	98,4	105,69	92,57	94,16
Peso bruto seco (g)	97,7	90,06	95,4	81,15	83
Peso da cápsula (g)	24,69	25,6	25,6	14,11	24,72
Água (g)	7,92	8,34	10,29	11,42	11,16
Solo (g)	73,01	64,46	69,8	67,04	58,28
Umidade (%)	10,85	12,94	14,74	17,03	19,15
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,611	1,69	1,742	1,684	1,615

## AMOSTRA 4 GRANULOMETRIA

### Umidade da sedimentação

Nº da cápsula	77
Peso bruto úmido (g)	86,32
Peso bruto seco (g)	84,77
Peso da cápsula (g)	13,14
Peso da água (g)	1,55
Peso do solo seco (g)	71,63
Umidade (%)	2,16

### Resumo da sedimentação

Pedregulho	Acima de 4,8 mm	8 %
Areia grossa	4,8 – 2mm	6,2 %
Areia média	2 – 0,4 mm	18,1 %
Areia fina	0,4 – 0,05 mm	27,4 %
Silte	0,05 – 0,002 mm	12 %
Argila	Abaixo de 0,002 mm	28,4 %
Argila coloidal	Abaixo de 0,001 mm	-

### Amostra seca

	Amostra total	Amostra parcial
Nº da cápsula	1	2
Peso do solo úmido (g)	1000	70
Peso do pedregulho (g)	138,87	-
Peso miúdo úmido (g)	861,13	-
Peso miúdo seco (g)	842,89	-
Peso da amostra seca (g)	981,76	68,52
Constante do fator K	-	1,999
Densidade a 20°C	2,68	

### Peneiramento do solo graúdo

Peneira		Peso Retido (g)	Peso Passante (g)	% Passante
Polegada	mm			
2"	50,80	0	981,76	100
1 1/2"	38,10	0	981,76	100
1"	25,40	0	981,76	100
3/4"	19,10	0	981,76	100
1/2"	12,27	17,55	964,21	98
3/8"	9,52	21,1	943,11	96
Nº 4	4,76	39,49	903,62	92
Nº 10	2,00	60,73	842,89	86

## Peneiramento do solo miúdo

Polegada	mm	Peso Retido (g)	Peso Passante (g)	% Passante
Nº 16	1,19	3,55	64,97	81
Nº 30	0,59	7,69	57,28	72
Nº 40	0,42	3,21	54,07	68
Nº 50	0,297	3,07	51	64
Nº 100	0,149	6,27	44,73	56
Nº 200	0,075	5,17	39,56	50

## Sedimentação

Densímetro Nº 1		Temperatura °C	Correção meio dispersor	Leitura corrigida	Altura de queda (cm)	Leitura corrigida final	$\eta$ (g.s/cm <sup>2</sup> )	"d" dos grãos (mm)	% Total
Tempo Decorrido (s)	Leitura (L)								
35	24	27	3	21,00	14,21	22,20	0,00000872	0,0616	44
60	22	27	3	19,00	14,60	20,20	0,00000872	0,0477	40
120	20	27	3	17,00	14,98	18,20	0,00000872	0,0341	36
240	18	27	3	15,00	14,98	16,20	0,00000872	0,0237	32
460	17	27	3	14,00	14,67	15,20	0,00000872	0,0173	30
900	17	27	3	14,00	14,67	15,20	0,00000872	0,0123	30
1800	17	27	3	14,00	14,67	15,20	0,00000872	0,0087	30
3600	17	27	3	14,00	14,67	15,20	0,00000872	0,0062	30
7200	17	27	3	14,00	14,67	15,20	0,00000872	0,0044	30
14400	16	27	3	13,00	14,86	14,20	0,00000872	0,0031	28
28800	16	27	3	13,00	14,86	14,20	0,00000872	0,0022	28
86400	15	27	3	12,00	15,05	13,20	0,00000872	0,0013	26

## ENSAIO DE CONSISTÊNCIA

Ensaio de limite de liquidez

LIMITE DE LIQUIDEZ				
Nº de golpes	34	28	22	17
Nº da cápsula	91	42	79	7
Solo+tara+água (g)	15,9	13	15,33	18,16
Solo+tara (g)	13,16	10,97	12,51	14,37
Tara (g)	6,14	6,02	5,94	6,31
Água (g)	2,74	2,03	2,82	3,79
Solo (g)	7,02	4,95	6,57	8,06
Umidade (%)	39,03	41,01	42,92	47,02

Ensaio de limite de Plasticidade

LIMITE DE PLASTICIDADE				
Nº da cápsula	93	8	17	129
Solo+tara+água (g)	6,99	8,18	8,73	8,08
Solo+tara (g)	6,72	7,91	8,42	7,85
Tara (g)	5,11	6,23	6,56	6,51
Água (g)	0,27	0,27	0,31	0,23
Solo (g)	1,61	1,68	1,86	1,34
Umidade (%)	16,77	16,07	16,67	17,16
Limite de Plasticidade	17%			

## COMPACTAÇÃO

Ensaio de compactação

Cilindro nº:	p	Volume: 1000 cm <sup>3</sup>		Peso : 2051g	
Nº de golpes:	26	Peso da amostra : 300g			
Peso da amostra + cilindro (g)	3611	3760	3937	3980	3900
Peso da amostra (g)	1560	1709	1886	1929	1849
Massa específica úmida (g/cm <sup>3</sup> )	1,56	1,709	1,886	1,929	1,849
Nº da cápsula	18B	4	64	52	48
Peso bruto úmido (g)	76,94	85,13	81,19	74,41	76,15
Peso bruto seco (g)	70,65	77,38	72,96	65,99	66,65
Peso da cápsula (g)	13,32	14	14,05	13,3	13,37
Água (g)	6,29	7,75	8,23	8,42	9,5
Solo (g)	57,33	63,38	58,91	52,69	53,28
Umidade (%)	10,97	12,23	13,97	15,98	17,83
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,406	1,523	1,655	1,663	1,569



### DENSIDADE RELATIVA DAS QUATRO AMOSTRAS

Ensaio do picnômetro

FURO	DENSIDADE RELATIVA DOS GRÃOS									
	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	$\delta$	$\Delta\delta$	$\delta$	T°	K <sub>20</sub>	$\delta - 20^\circ$
AM-01	40,11	50,19	98,35	92,19	2,571	0,007	2,616	26	0,9986	2,61
	41,38	51,44	98,99	92,77	2,620					
	37,30	47,49	93,82	87,53	2,613					
AM-02	41,44	51,59	98,93	92,72	2,576	0,006	2,640	26	0,9986	2,64
	40,02	50,12	96,52	90,25	2,637					
	43,88	54,03	101,70	95,39	2,643					
AM-03	29,46	39,73	86,08	79,69	2,647	0,004	2,649	26	0,9986	2,63
	44,63	54,77	101,47	95,22	2,607					
	36,40	46,50	93,24	86,95	2,651					
AM-04	40,38	50,74	97,63	91,12	2,691	0,005	2,665	26	0,9986	2,68
	41,17	51,34	98,21	91,86	2,662					
	36,87	46,98	92,75	86,43	2,668					

### ENSAIO DE CONSISTÊNCIA DA MISTURA DAS QUATRO AMOSTRAS

Ensaio de limite de liquidez

LIMITE DE LIQUIDEZ					
Nº de golpes	36	30	24	16	
Nº da cápsula	2	7	6	30	
Solo+tara+água (g)	32,7	19,02	22,88	33,54	
Solo+tara (g)	30,43	17,33	20,73	31,01	
Tara (g)	24,66	13,11	15,67	25,59	
Água (g)	2,27	1,69	2,15	2,53	
Solo (g)	5,77	4,22	5,06	5,42	
Umidade (%)	39,34	40,05	42,49	46,68	

Tabela: Ensaio de limite de Plasticidade

LIMITE DE PLASTICIDADE					
Nº da cápsula	12	18B	511	38	
Solo+tara+água (g)	13,73	15,5	13,27	27,4	
Solo+tara (g)	13,47	15,21	13,06	27,12	
Tara (g)	11,76	13,32	11,75	25,25	
Água (g)	0,26	0,29	0,21	0,28	
Solo (g)	1,71	1,89	1,31	1,87	
Umidade (%)	15,2	15,3439	16,03	14,97	
Limite de Plasticidade	15%				

**APÊNDICE B – DADOS PARA O ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE CARGA VARIÁVEL DOS SOLOS UTILIZADOS NO  
MODELO EXPERIMENTAL**

**AMOSTRA 1**

Ensaio de permeabilidade de carga variável

ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA VARIÁVEL						
	$\gamma_s$ - Massa específica seca máxima ( $g/cm^3$ )					1,87
	w - Umidade ótima de compactação(%)					13,31
	M - Massa úmida do corpo de prova (g)					810
	L - Espessura do corpo de prova (cm)					2,3
	A - Área da seção transversal do corpo de prova ( $cm^2$ )					177
	$\gamma_s$ - Massa específica seca do corpo de prova ( $g/cm^3$ )					1,770
	G - Grau de compactação (%)					0,950
	a - Área da seção transversl da bureta ( $cm^2$ )					5,62
					Tara	23,6
					P.B.H	31,92
					P.B.S.	31,03
					Umidade (%)	11,98
CALCULO DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO DO CORPO DE PROVA						
Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção (20°C)	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)
1	27	0,9983	145	137	96	4,3E-05
2	27	0,9983	145	137	100	4,1E-05
3	27	0,9983	145	137	103	4,0E-05
4	27	0,9983	145	137	104	4,0E-05
5	27	0,9983	145	137	107	3,9E-05
<b>Resultado (m/s):</b>						<b>4,1E-07</b>

## AMOSTRA 2

Ensaio de permeabilidade de carga variável

ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA VARIÁVEL						
$\gamma_s$ - Massa específica seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )						1,827
w - Umidade ótima de compactação(%)						13,12
M - Massa úmida do corpo de prova (g)						900
L - Espessura do corpo de prova (cm)						2,6
A - Área da seção transversal do corpo de prova (cm <sup>2</sup> )						177
$\gamma_s$ - Massa específica seca do corpo de prova (g/cm <sup>3</sup> )						1,77
G - Grau de compactação (%)						0,968
a - Área da seção transversl da bureta (cm <sup>2</sup> )						5,62
					Tara	13,13
					P.B.H	25,03
					P.B.S.	23,89
					Umidade (%)	10,59
CALCULO DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO DO CORPO DE PROVA						
Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção (20°C)	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)
1	27	0,9983	145	130	22	4,1E-04
2	27	0,9983	145	130	22	4,1E-04
3	27	0,9983	145	130	22	4,1E-04
4	27	0,9983	145	130	22	4,1E-04
5	27	0,9983	145	130	21	4,3E-04
Resultado (m/s):	<b>4,12E-06</b>					

**AMOSTRA 3**

Ensaio de permeabilidade de carga variável

ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA VARIÁVEL									
$\gamma_s$ - Massa específica seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )									1,742
w - Umidade ótima de compactação(%)									14,70
M - Massa úmida do corpo de prova (g)									900
L - Espessura do corpo de prova (cm)									2,8
A - Área da seção transversal do corpo de prova (cm <sup>2</sup> )									177
$\gamma_s$ - Massa específica seca do corpo de prova (g/cm <sup>3</sup> )									1,579
G - Grau de compactação (%)									0,907
a - Área da seção transversal da bureta (cm <sup>2</sup> )									5,62
								Tara	23,6
								P.B.H	36,64
								P.B.S.	34,94
								Umidade (%)	14,99
CALCULO DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO DO CORPO DE PROVA									
Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção (20°C)	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)			
1	27	0,9983	145	144	199,00	3,1E-06			
2	27	0,9983	145	144	216,00	2,8E-06			
3	27	0,9983	145	144	210,00	2,9E-06			
4	27	0,9983	145	144	202,00	3,0E-06			
5	27	0,9983	145	144	212,00	2,9E-06			
Resultado (m/s):	<b>2,96E-08</b>								

**AMOSTRA 4**

Ensaio de permeabilidade de carga variável

ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA VARIÁVEL									
	$\gamma_s$ - Massa específica seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )								1,67
	w - Umidade ótima de compactação(%)								15,00
	M - Massa úmida do corpo de prova (g)								900
	L - Espessura do corpo de prova (cm)								2,7
	A - Área da seção transversal do corpo de prova (cm <sup>2</sup> )								177
	$\gamma_s$ - Massa específica seca do corpo de prova (g/cm <sup>3</sup> )								1,628
	G - Grau de compactação (%)								0,975
	a - Área da seção transversal da bureta (cm <sup>2</sup> )								5,62
								Tara	13,13
								P.B.H	28,69
								P.B.S.	26,58
								Umidade (%)	15,69
CALCULO DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO DO CORPO DE PROVA									
Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção (20°C)	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)			
1	27	0,9983	145	143	184,00	6,5E-06			
2	27	0,9983	145	143	122,00	9,7E-06			
3	27	0,9983	145	143	128,00	9,3E-06			
4	27	0,9983	145	143	131,00	9,1E-06			
5	27	0,9983	145	142,6	171,00	8,3E-06			
Resultado (m/s):		<b>8,6E-08</b>							

### PERMEABILIDADE DA MISTURA DAS QUATRO AMOSTRAS

Ensaio de permeabilidade de carga variável

ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA VARIÁVEL						
$\gamma_s$ - Massa específica seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )						1,802
w - Umidade ótima de compactação(%)						14,05
M - Massa úmida do corpo de prova (g)						1000
L - Espessura do corpo de prova (cm)						3,3
A - Área da seção transversal do corpo de prova (cm <sup>2</sup> )						177
$\gamma_s$ - Massa específica seca do corpo de prova (g/cm <sup>3</sup> )						1,497
G - Grau de compactação (%)						0,831
a - Área da seção transversal da bureta (cm <sup>2</sup> )						5,62
					Tara	20,5
					P.B.H	35
					P.B.S.	33,18
					Umidade (%)	14,35
CALCULO DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO DO CORPO DE PROVA						
Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção (20°C)	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)
1	27	0,9983	145	135	77,00	9,7E-05
2	27	0,9983	145	135	78,00	9,6E-05
3	27	0,9983	145	135	79,00	9,5E-05
4	27	0,9983	145	135	79,00	9,5E-05
5	27	0,9983	145	135	79,00	9,5E-05
Resultado (m/s):	<b>9,5E-07</b>					

### APÊNDICE C – DADOS PARA O ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE CARGA VARIÁVEL NA INTERFACE COM SOLO SC

Permeabilidade na interface com placa sem rugosidade (seção transversal 50cm<sup>2</sup>)

Área da seção transversal da bureta: 1,89cm<sup>2</sup>

Bureta graduada de 0 a 100ml

Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)	Leitura inicial da bureta (cm <sup>3</sup> )	Leitura final da bureta (cm <sup>3</sup> )
1	29	0,811	219,9	213,0	6060	1,6E-06	0,2	13,2
2	29	0,811	220	213,7	6050	1,5E-06	0	12
3	29	0,811	220	213,3	6028	1,6E-06	0	12,6
4	29	0,811	220	216,8	3041	1,5E-06	0	6
<b>Resultado:</b>						<b>1,5E-06</b>		

Permeabilidade na interface com placa sem rugosidade (seção transversal 30cm<sup>2</sup>)

Área da seção transversal da bureta: 1,89cm<sup>2</sup>

Bureta graduada de 0 a 100ml

Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)	Leitura inicial da bureta (cm <sup>3</sup> )	Leitura final da bureta (cm <sup>3</sup> )
1	29	0,811	220	205,5	25020	1,4E-06	0	27,4
2	29	0,811	220	213,7	10020	1,5E-06	0	12
3	29	0,811	220	214,9	8760	1,4E-06	0	9,7
4	29	0,811	220	218,5	2340	1,5E-06	0	2,8
<b>Resultado:</b>						<b>1,5E-06</b>		



Permeabilidade na interface com placa sem rugosidade (seção transversal 10cm<sup>2</sup>)

Área da seção transversal da bureta: 1,89cm<sup>2</sup>

Bureta graduada de 0 a 100ml

Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)	Leitura inicial da bureta (cm <sup>3</sup> )	Leitura final da bureta (cm <sup>3</sup> )
1	29	0,811	220	215,7	10640	2,9E-06	0	8,2
2	29	0,811	220	216,5	9.180	2,7E-06	0	6,6
3	29	0,811	219,6	215,7	12.420	2,2E-06	0,8	8,2
4	29	0,811	220	206,4	42.980	2,3E-06	0	25,8
<b>Resultado:</b>						<b>2,5E-06</b>		

Permeabilidade na interface com placa rugosa de 1cm (seção transversal 50cm<sup>2</sup>)

Área da seção transversal da bureta: 1,89cm<sup>2</sup>

Bureta graduada de 0 a 100ml

Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)	Leitura inicial da bureta (cm <sup>3</sup> )	Leitura final da bureta (cm <sup>3</sup> )
1	29	0,811	220,0	216,0	20580	2,7E-07	0	7,6
2	29	0,811	220,0	212,9	57.120	1,8E-07	0	13,5
3	29	0,811	220,0	217,4	20.420	1,8E-07	0	4,9
4	29	0,811	220,0	217,7	18.360	1,8E-07	0	4,4
<b>Resultado:</b>						<b>2,0E-07</b>		

Permeabilidade na interface com placa rugosa de 1cm (seção transversal 30cm<sup>2</sup>)

Área da seção transversal da bureta: 1,89cm<sup>2</sup>

Bureta graduada de 0 a 100ml

Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)	Leitura inicial da bureta (cm <sup>3</sup> )	Leitura final da bureta (cm <sup>3</sup> )
1	29	0,811	220,0	217,7	69080	7,1E-07	0	4,4
2	29	0,811	220,0	216,7	92.802	7,4E-07	0	6,2
3	29	0,811	220,0	217,5	69.301	7,7E-07	0	4,8
4	29	0,811	220,0	218,9	30.980	7,5E-07	0	2,1
<b>Resultado:</b>						<b>7,4E-07</b>		

Permeabilidade na interface com placa rugosa de 1cm (seção transversal 10cm<sup>2</sup>)

Área da seção transversal da bureta: 1,89cm<sup>2</sup>

Bureta graduada de 0 a 100ml

Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)	Leitura da bureta (cm <sup>3</sup> )	
							Leitura inicial da bureta (cm <sup>3</sup> )	Leitura final da bureta (cm <sup>3</sup> )
1	29	0,811	220,0	217,4	8760	2,1E-06	0	5,0
2	29	0,811	220,0	217,8	7.372	2,1E-06	0	4,1
3	29	0,811	220,0	217,8	7.498	2,1E-06	0	4,2
4	29	0,811	220,0	217,9	7.586	2,0E-06	0	4,0
<b>Resultado:</b>						<b>2,0E-06</b>		

Permeabilidade na interface com placa rugosa de 0,5cm (seção transversal 50cm<sup>2</sup>)

Área da seção transversal da bureta: 1,89cm<sup>2</sup>

Bureta graduada de 0 a 100ml

Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)	Leitura inicial		Leitura final	
							da bureta (cm <sup>3</sup> )	da bureta (cm <sup>3</sup> )	da bureta (cm <sup>3</sup> )	da bureta (cm <sup>3</sup> )
1	29	0,811	220,0	218,9	15000	9,8E-08	0		2,0	
2	29	0,811	220,0	216,4	87.060	5,9E-08	0		6,9	
3	29	0,811	220,0	214,5	84.540	9,2E-08	6,9		10,4	
Resultado:						<b>8,3E-08</b>				

Permeabilidade na interface com placa rugosa de 0,5cm (seção transversal 30cm<sup>2</sup>)

Área da seção transversal da bureta: 1,89cm<sup>2</sup>

Bureta graduada de 0 a 100ml

Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)	Leitura inicial		Leitura final	
							da bureta (cm <sup>3</sup> )	da bureta (cm <sup>3</sup> )	da bureta (cm <sup>3</sup> )	da bureta (cm <sup>3</sup> )
1	29	0,811	220,0	216,9	58980	1,2E-07	0		5,8	
2	29	0,811	220,0	217,3	53.127	1,2E-07	0		5,2	
3	29	0,811	220,0	217,1	54.968	1,2E-07	6,9		5,4	
4	29	0,811	220,0	217,4	51.470	1,2E-07	10,4		5	
Resultado:						<b>1,2E-07</b>				

Permeabilidade na interface com placa rugosa de 0,5cm (seção transversal 10cm<sup>2</sup>)

Área da seção transversal da bureta: 1,89cm<sup>2</sup>

Bureta graduada de 0 a 100ml

Leitura	Temperatura (°C)	Fator de correção	ho (cm)	hf (cm)	t (seg)	K20 (cm/s)	Leitura inicial da bureta (cm <sup>3</sup> )	Leitura final da bureta (cm <sup>3</sup> )
1	29	0,811	220,0	207,9	21240	4,1E-06	0	23
2	29	0,811	220,0	208,4	20.175	4,1E-06	0	22
3	29	0,811	220,0	209,4	18.360	4,1E-06	0	20
4	29	0,811	220,0	212,6	12.572	4,2E-06	0	14,1
5	29	0,811	221,0	212,8	12.495	4,1E-06	0	13,7
<b>Resultado:</b>						<b>4,1E-06</b>		