



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**THALYTA BRUNA SOUZA GOMES**

**MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO DA BARRAGEM  
DO ASSENTAMENTO OLIVENCIA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE  
QUIXADÁ/CE**

**RUSSAS**  
**2019**

THALYTA BRUNA SOUZA GOMES

MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO DA BARRAGEM DO  
ASSENTAMENTO OLIVENCIA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE QUIXADÁ/CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do  
Campus de Russas da Universidade Federal do  
Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. M.<sup>a</sup> Andriele Nascimento de  
Souza

RUSSAS

2019

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)

---

G618m Gomes, Thalya Bruna Souza.  
Modelagem e caracterização geotécnica do solo da barragem do Assentamento Olivencia localizada no município de Quixadá/CE / Thalya Bruna Souza Gomes. – 2019.  
89 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2019.  
Orientação: Profª. Ma. Andriele Nascimento de Souza.

1. Barragem de terra. 2. Caracterização do solo. 3. Simulação numérica. I. Título.

CDD 620

---

THALYTA BRUNA SOUZA GOMES

MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO DA BARRAGEM DO  
ASSENTAMENTO OLIVENCIA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE QUIXADÁ/CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do  
Campus de Russas da Universidade Federal do  
Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. M<sup>a</sup>. Andriele Nascimento de Souza (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

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

---

Prof. M<sup>a</sup>. Daniela Lima Machado da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Maria José e Erli.

Aos meus professores e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter estado sempre ao meu lado durante todo o processo, me concedendo calma, inspiração e energia para a realização desse trabalho.

Aos meus pais, Maria José e Erli Gomes, pela dedicação e apoio durante todo o meu processo de formação, por sempre me inspirarem a ser uma pessoa melhor, além da extrema ajuda durante todo o processo de execução do trabalho.

Aos meus familiares, que mesmo de longe me deram total apoio e incentivo.

Ao meu irmão, Erly Junior, que sempre permaneceu ao meu lado em todos os momentos.

À minha querida orientadora e professora Andriele Nascimento, pelo apoio e suporte durante todo o período de execução da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Rosiel Ferreira e sua esposa Fabíola, que sem eles não sei como conseguiria realizar essa pesquisa. Só tenho palavras de gratidão por todo o auxílio, orientação e dedicação na execução dos ensaios e no esclarecimento das dúvidas existentes.

À professora Daniela, que aceitou fazer parte da minha banca e auxiliar no meu crescimento como profissional.

Aos meus colegas de turma, em especial ao Thales, Mateus, Renan e Tayslan, por todos os momentos de sofrimento e alegria que a faculdade nos proporcionou.

A minha panelinha, Rayanne, Larisse, Jocássia, Paulo Filho e Ian, por estarem sempre ao meu lado, pelos conselhos e por todo amor recebido, além de todo o companheirismo ao logo desses anos, o que tornou a faculdade um momento único e inesquecível na minha vida.

## RESUMO

A água é um elemento essencial para a existência de vida. No entanto, existem diversas regiões que sofrem com a falta desse recurso, passando assim por longos períodos de estiagem, como é o caso da região Nordeste do Brasil. Visando melhorar a situação relacionada à seca, a construção de barragens se tornou uma prática comum, especialmente em zonas rurais, destacando-se as construções de barragens de terra de pequeno porte. Contudo, essas obras, muitas vezes, ocorrem sem um estudo prévio do solo que irá compor o barramento, analisando se ele é adequado ou não, como também sem a verificação do comportamento do barramento frente algumas situações importantes. Além disso, as fiscalizações e visitas por parte do governo em relação a essas estruturas são extremamente limitadas. Em vista disso, o presente trabalho consiste na determinação das propriedades geotécnicas do solo da barragem de terra de pequeno porte, localizada na comunidade Assentamento Olivencia, situada no município de Quixadá/CE, promovendo a análise de fluxo e da estabilidade do talude de jusante através dos softwares SEEP/W e SLOPE/W. A análise do solo ocorreu por meio de amostras deformadas do mesmo, retiradas ao longo do maciço do barramento. Com essas amostras foram realizados ensaios de caracterização, compactação, permeabilidade e de resistência triaxial CD, de modo, que a partir deles, foram feitas simulações estacionárias considerando o regime de operação máximo da barragem e a classificação do solo. Utilizando o software SEEP/W, foi feita a determinação da linha freática no interior do maciço e dos caminhos de fluxos. Já usando o SLOPE/W, foi executado o estudo da estabilidade e da determinação do fator de segurança crítico do talude de jusante. Nos resultados obtidos foi mostrado a influência da falta de elementos de drenagem na disposição dos caminhos de fluxos, além de mostrar, que para a condição analisada, a barragem se encontra com um nível satisfatório de segurança.

**Palavras-chave:** Barragem de terra; Caracterização do solo; Simulação numérica.

## ABSTRACT

Water is an essential element for the existence of life. However, there are several regions that suffer from the lack of this resource, going through long periods of drought, as is the case of the Northeast region of Brazil. Aiming at improving the drought-related situation, dam construction has become a common practice, especially in rural areas, principally small earth dam construction. However, these works often occur without a previous study of the soil that will compose the damming, analyzing whether it is suitable or not, and without checking the behavior of the damming in front of some important situations. Furthermore, government inspection and visitation of these structures are extremely limited. In view of this, the present work consists of determining the geotechnical properties of the soil of the small earth dam, located in the Settlement Olivencia community, located in Quixadá city/ CE, promoting the flow and the stability of the downstream slope analysis through SEEP / W and SLOPE / W software. Soil analysis was performed by deformed soil samples, taken along the busbar massif. With these samples, characterization, compaction, permeability and CD triaxial resistance tests were performed, so that, from them, stationary simulations were made considering the maximum dam operation regime and the soil classification. Using the SEEP / W software, the water table inside the massif and the flow paths were determined. However using the SLOPE / W, the stability study and determination of the critical safety factor of the downstream slope were performed. Results showed the influence of the lack of drainage elements in the arrangement of the flow paths, also showing that, for the analyzed condition, the dam has a satisfactory safety level.

**Keywords:** Earth dam; Soil characterization; Numerical simulation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Escalas granulométricas .....	22
Figura 2	– Carta de plasticidade .....	24
Figura 3	– Sistema de Classificação H.R.B .....	26
Figura 4	– Tipos de barragens de terra .....	28
Figura 5	– Principais elementos de uma barragem .....	31
Figura 6	– Localização da barragem estudada .....	34
Figura 7	– Localização da área de pesquisa no contexto estadual e municipal e o trajeto entre Quixadá e a Capital, respectivamente .....	35
Figura 8	– Imagem da barragem através do Google Earth .....	36
Figura 9	– Imagens reais da barragem do Assentamento Olivencia .....	36
Figura 10	– Seção transversal da barragem .....	37
Figura 11	– Medidas da barragem .....	38
Figura 12	– Sangradouro da barragem .....	38
Figura 13	– Etapas da metodologia .....	41
Figura 14	– Coleta do solo por meio de instrumentos .....	42
Figura 15	– Amostra deformada do solo .....	43
Figura 16	– Quarteamento e destorroamento, respectivamente.....	44
Figura 17	– Peneiras usadas no peneiramento grosso .....	45
Figura 18	– Ensaio de sedimentação .....	46
Figura 19	– Peneiras usadas no peneiramento fino .....	47
Figura 20	– Ensaio do picnômetro .....	48
Figura 21	– Limites de Atterberg .....	49
Figura 22	– Ensaio do limite de liquidez (LL) .....	50
Figura 23	– Ensaio do limite de plasticidade (LP) .....	51

Figura 24 – Ensaio de compactação .....	53
Figura 25 – Ensaio de permeabilidade .....	54
Figura 26 – Moldagem do corpo de prova para o ensaio triaxial .....	57
Figura 27 – Preparação do corpo de prova para a câmara cilíndrica .....	58
Figura 28 – Etapas do ensaio triaxial .....	62
Figura 29 – Peneiramento grosso e fino .....	66
Figura 30 – Faixas de permeabilidade .....	70
Figura 31 – Corpos de prova submetidos ao rompimento .....	71
Figura 32 – Malha de elementos finitos .....	73
Figura 33 – Linha freática .....	74
Figura 34 – Barragem com um elemento drenante .....	75
Figura 35 – Distribuição das poropressões .....	75
Figura 36 – Distribuição das pressões totais .....	75
Figura 37 – Superfície crítica .....	76
Figura 38 – Fator de segurança crítico .....	76

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Curva de adensamento para tensão de confinamento de 50 kPa .....	60
Gráfico 2	– Curva de adensamento para tensão de confinamento de 100 kPa .....	60
Gráfico 3	– Curva de adensamento para tensão de confinamento de 200 kPa .....	61
Gráfico 4	– Distribuição granulométrica por peneiramento .....	65
Gráfico 5	– Distribuição granulométrica completa .....	67
Gráfico 6	– Limite de liquidez .....	68
Gráfico 7	– Curva da compactação utilizando energia Proctor Normal .....	69
Gráfico 8	– Tensão Desvio x Deformação axial .....	71
Gráfico 9	– Círculo de Mohr e envoltória Mohr-Coulomb .....	72
Gráfico 10	– Trajetória de tensões efetivas .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Significado das letras utilizadas para a classificação unificada .....	23
Tabela 2	– Resumo para a classificação SUCS .....	24
Tabela 3	– Peneiras utilizadas no peneiramento grosso .....	45
Tabela 4	– Peneiras utilizadas no peneiramento fino .....	46
Tabela 5	– Coeficientes de permeabilidade inseridos no programa <i>SEEP/W</i> .....	63
Tabela 6	– Parâmetros de resistência inseridos no programa <i>SLOPE/W</i> .....	64
Tabela 7	– Dados sobre os resultados obtidos para os limites de Atterberg .....	68
Tabela 8	– Coeficiente de permeabilidade .....	70
Tabela 9	– Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo analisado .....	72
Tabela 10	– Fatores de segurança mínimos na análise da estabilidade dos taludes .....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional das Águas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FS	Fator de Segurança
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IP	Índice de Plasticidade
IPLANCE	Instituto de Planejamento do Ceará
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
SNISB	Sistema Nacional de Informação sobre segurança de barragens
SUCS	Sistema Unificado de Classificação
UFC	Universidade Federal do Ceará

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma_s$	Peso específico real
$\gamma_d$	Peso específico seco máximo
$\gamma_w$	Peso específico da água
$W_{ótima}$	Umidade ótima
$n$	Porosidade
$k$	Coefficiente de permeabilidade
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\sigma$	Tensão Normal
$\sigma_1$	Tensão principal
$\sigma_3$	Tensão confinante
$\sigma_d$	Tensão desvio
$\varphi$	Ângulo de atrito
$c$	Coesão

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	15
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i> .....	15
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i> .....	15
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	16
<b>1.3</b>	<b>Estrutura da dissertação</b> .....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Considerações iniciais</b> .....	18
<b>2.2</b>	<b>Origem, natureza e definição de solos</b> .....	18
<b>2.3</b>	<b>Classificação dos solos</b> .....	20
<i>2.3.1</i>	<i>Sistema Unificado de Classificação (SUCS)</i> .....	22
<i>2.3.2</i>	<i>Sistema Rodoviário de Classificação (H.R.B)</i> .....	25
<b>2.4</b>	<b>Barragens</b> .....	26
<i>2.4.1</i>	<i>Barragens de terra</i> .....	27
<i>2.4.2</i>	<i>Finalidades de uma barragem</i> .....	29
<i>2.4.3</i>	<i>Elementos básicos de uma barragem</i> .....	30
<i>2.4.4</i>	<i>Fatores importantes na escolha do tipo de barragem</i> .....	31
<b>2.5</b>	<b>Ensaio de laboratório</b> .....	32
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM</b> .....	34
<b>3.1</b>	<b>Descrição geral da barragem</b> .....	34
<b>3.2</b>	<b>Seção transversal da barragem</b> .....	37
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	39
<b>4.1</b>	<b>Classificação da pesquisa</b> .....	39
<i>4.1.1</i>	<i>Quanto aos objetivos gerais</i> .....	39
<i>4.1.2</i>	<i>Quanto aos procedimentos técnicos</i> .....	40
<i>4.1.3</i>	<i>Quanto à natureza</i> .....	41
<i>4.1.4</i>	<i>Quanto a abordagem do problema</i> .....	41
<b>4.2</b>	<b>Etapas desenvolvidas na elaboração da pesquisa</b> .....	41
<b>4.3</b>	<b>Escolha da barragem</b> .....	42
<b>4.4</b>	<b>Coleta da amostra</b> .....	42
<b>4.5</b>	<b>Ensaio laboratoriais</b> .....	43

4.5.1	<i>Análise granulométrica</i> .....	44
4.5.2	<i>Densidade real dos grãos</i> .....	47
4.5.3	<i>Limites de Atterberg</i> .....	49
4.5.4	<i>Compactação</i> .....	52
4.5.5	<i>Permeabilidade</i> .....	53
4.5.6	<i>Ensaio de resistência triaxial</i> .....	55
4.5.6.1	<i>Moldagem do corpo de prova</i> .....	56
4.5.6.2	<i>Montagem dos corpos de prova na câmara triaxial</i> .....	57
4.5.6.3	<i>Execução do ensaio</i> .....	59
4.6	<b>Utilização do programa GeoStudio 2019 (SEEP/W e SLOPE/W)</b> .....	63
4.6.1	<i>Análises de fluxo</i> .....	63
4.6.1.1	<i>SEEP/W</i> .....	63
4.6.2	<i>Análise da estabilidade dos taludes</i> .....	64
4.6.2.1	<i>SLOPE/W</i> .....	64
5	<b>RESULTADOS</b> .....	65
5.1	<b>Ensaio de caracterização e resistência</b> .....	65
5.1.1	<i>Análises granulométrica, umidade natural e densidade real</i> .....	65
5.1.2	<i>Limites de Atterberg e classificação do solo</i> .....	67
5.1.3	<i>Ensaio de compactação</i> .....	69
5.1.4	<i>Ensaio de permeabilidade</i> .....	69
5.1.5	<i>Ensaio de resistência triaxial CD</i> .....	70
5.2	<b>Análises de fluxo</b> .....	73
5.3	<b>Análises de estabilidade</b> .....	75
6	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	78
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	80
	<b>APÊNDICE A - MODELOS DE DADOS INSERIDOS NOS SOFTWARES SEEP/W E SLOPE/W</b> .....	84
	<b>APÊNDICE B - TABELAS DE DADOS OBTIDAS A PARTIR DOS ENSAIOS REALIZADOS EM LABORATÓRIO</b> .....	85



## 1 INTRODUÇÃO

A água consiste em um elemento fundamental para a existência de vida, visto que todos os seres vivos necessitam desse recurso para sobreviver e sustentar a preservação das espécies. Segundo Marco Antônio Gomes (2011), o planeta Terra é composto por cerca de 70% desse bem em sua superfície, sendo um dos recursos existentes mais abundantes. No entanto, não se deve possuir a falsa impressão de recurso ilimitado, pois de toda essa água existente, apenas uma pequena parcela é de água doce, ou seja, que pode ser utilizada para consumo humano.

Segundo dados da Agência Nacional das águas (ANA), o Brasil apresenta cerca de 12% da quantidade de água doce disponível no planeta Terra, no entanto, a distribuição desse bem não é feita de maneira igualitária, sendo que a região Norte do país concentra 80% da quantidade disponível, possuindo apenas 5% da população. Já a região Nordeste sofre muito com a escassez de água devido a longos períodos de seca, tornando assim, a construção de barragens um meio fundamental para o armazenamento desse bem.

O barramento de cursos d'água possui diversos mecanismos de controle com a finalidade de obter a elevação do nível de água ou criar um reservatório de acumulação ou de regularização de vazões. Esta técnica, para maior disponibilidade hídrica, é uma das mais antigas já conhecidas pelo homem, as quais eram realizadas para atender as demandas de águas para povoados e sociedades (ADAM, 2011).

Dentre os diversos tipos de barragens existentes, será abordado no presente trabalho características das barragens de terra homogênea de pequeno porte, sendo muito usada em zonas rurais para uma série de finalidades, principalmente para a irrigação, seguida de: abastecimento da propriedade, criação de peixes, recreação, bebedouro, elevação de água por bombeamento e outros (CARVALHO, 2011).

Apesar de não existirem dúvidas em relação aos benefícios das barragens para a sociedade, é necessário ter bastante atenção em relação ao risco de ruptura que elas apresentam. Acidentes envolvendo barragem causam prejuízos imensuráveis, como por exemplo, perdas de vidas, danos materiais, impossibilidade de exploração de recursos hídricos, interrupção de atividades produtivas, traumas físicos e psicológicos, entre outros motivos. Com isso, deve-se ter um cuidado especial em relação a barragens de terra de pequeno porte, pois esses elementos devem obedecer a critérios básicos e fundamentais de segurança. Contudo, é frequente encontrar em propriedades rurais barragens construídas sem nenhum dimensionamento técnico, se tornando assim estruturas com risco de rompimento (STHEPENS, 2011).

Na maioria dos casos, a construção de barramentos de pequeno porte é feita sem a utilização de dados obtidos em ensaios de campo e laboratório, ou mesmo, sem a realização de análises de estabilidade, favorecendo a ocorrência de rupturas, além do aparecimento de fissuras, problemas de infiltrações, solapamento de taludes, recalques acentuados, etc. Essa situação ocorre devido ao fato de ser, na maior parte dos casos, economicamente inviável a obtenção destes dados em laboratório ou a contratação de serviços de sondagem, ocorrendo na prática a utilização de valores baseados quase unicamente na experiência do construtor (PASCHOALIN FILHO, 2002).

Dessa maneira, o presente trabalho consiste no estudo e na análise de uma pequena barragem de terra localizada na comunidade chamada de Assentamento Olivencia, no município de Quixadá/CE. O principal intuito da pesquisa é conhecer as características do solo desse barramento através da realização de diversos ensaios laboratoriais, como por exemplo, ensaios de granulometria, sedimentação, compactação, permeabilidade e de resistência. Com a obtenção desses dados, são empregados os softwares SEEP/W e SLOPE/W na simulação do comportamento da barragem em regime estacionário, considerando a condição de operação em nível máximo, com o intuito dos resultados obtidos se aproximarem ao máximo das situações reais de campo.

## **1.1 Objetivos**

Conforme Marconi e Lakatos (2003) “Toda pesquisa deve ter um objetivo determinado para saber o que se vai procurar e o que se pretende alcançar. ” Os objetivos definidos são de grande importância para a realização de uma pesquisa, devendo ser claros, pois retratam o resultado que se pretende alcançar ao final do trabalho.

### ***1.1.1 Objetivo geral***

Promover a análise em regime estacionário do fluxo e da estabilidade de uma barragem de pequeno porte localizada no Assentamento Olivencia, no município de Quixadá/CE, na condição de operação em nível máximo, através de modelagem numérica.

### ***1.1.2 Objetivos específicos***

- a) Realizar ensaios em laboratório para determinar as propriedades geotécnicas do solo, entre elas, a granulométrica, a de resistência e a de permeabilidade;

- b) Efetuar a devida classificação do solo por meio de dois sistemas, o Sistema Unificado de Classificação (SUCS) e o Sistema Rodoviário Brasileiro (HRB);
- c) Utilizar o programa computacional GeoStudio (SEEP/W e SLOPE/W) na análise da estabilidade do talude de jusante e na percolação de água pelo interior do maciço da barragem, considerando um regime de fluxo estacionário.

## **1.2 Justificativa**

A lei nº 12.334/2010 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e o Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens (SNISB), objetivado assim, a criação de uma política pública e de um sistema de integração entre os diversos órgãos visando assegurar a segurança das barragens. No entanto, essa lei só é aplicada a barragens que possuam pelo menos uma das seguintes características:

- a) Altura do maciço for maior ou igual a 15 metros;
- b) Capacidade total do reservatório for maior ou igual a 3.000.000 m<sup>3</sup>;
- c) Reservatório que contenha resíduos perigosos;
- d) Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º.

Com isso, a escolha deste tema está relacionada à falta de fiscalização e apoio que barragens de pequeno porte possuem, pois, em alguns cenários, nenhum desses requisitos são atendidos.

Além disso, na maior parte dos casos, não é realizado um estudo do solo que irá compor a estrutura do barramento, muito menos, a análise do comportamento da barragem frente à algumas situações, como, primeiro enchimento, esvaziamento rápido, operação em nível máximo, entre outros, sendo esses fatores fundamentais na determinação da seção a ser utilizada e dos elementos que deverão estar presentes na barragem. A falta desses estudos pode gerar rupturas, recalques, infiltrações, entre outros problemas.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

O presente trabalho apresenta-se dividido em 6 capítulos. O capítulo 2 abrange assuntos da revisão bibliográfica, que tem como principal objetivo conceder subsídios teóricos para o embasamento da pesquisa, sendo assim, essenciais para a análise dos resultados. Esse

capítulo apresenta um levantamento de assuntos sobre os solos e suas características, ensaios geotécnicos e barragens de terra, tendo como base, livros, artigos científicos e diversos trabalhos científicos.

O capítulo 3 caracteriza a barragem do Assentamento Olivencia, mostrando sua localização, dimensões, finalidades e sua seção transversal.

O Capítulo 4 mostra a metodologia utilizada na elaboração do trabalho, explanando o tipo de trabalho, além de explicar os ensaios laboratoriais realizados.

O capítulo 5 aborda os resultados obtidos com os ensaios de laboratório e a análise da estabilidade e do fluxo da barragem por meio do programa computacional GeoStudio (SEEP/W e SLOPE/W), mostrando a linha freática e a superfície de ruptura.

Por último, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões acerca do que foi estudado e analisado, evidenciando as principais características e resultados obtidos com esse trabalho.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Considerações iniciais**

Este capítulo tem por objetivo apresentar e explicar características sobre os solos de um modo geral, além de explicar como é feita a classificação do mesmo utilizando dois sistemas, um mais usado pelos engenheiros geotécnicos e o outro mais utilizado pelos engenheiros rodoviários. Além disso, fala sobre as características, elementos e tipos de barragens, mostrando vantagens e desvantagens. Essa parte também fornece uma simples introdução sobre os ensaios geotécnicos e acerca do programa utilizados para análise da estabilidade e do fluxo.

### **2.2 Origem, natureza e definição de solos**

As obras de engenharia civil, como um todo, requerem um estudo dos solos, visto que é de extrema importância o conhecimento do comportamento e das propriedades destes para o uso apropriado em cada caso. Os solos são formados pela união de partículas com algum líquido, na maioria dos casos a água, e com ar nos espaços intermediários, sendo assim, o comportamento desses materiais dependem do deslocamento das partículas sólidas entre si (LAMBE; WHITMAN, 1969).

Segundo a NBR 6502 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), os solos são definidos como: “ Material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica”.

E ainda, de acordo com Reichet (2007), “os solos são corpos naturais, ocupando porções na superfície terrestre, suportando plantas e edificações, e verificando-se propriedades resultantes do clima e do relevo da região”.

Os solos são constituídos basicamente por três fases, a sólida, a líquida e a gasosa. A primeira consiste nos minerais, que podem apresentar características variáveis em relação ao tamanho, textura, constituição mineralógica, forma, entre outra. A fase líquida, que consiste primordialmente na água, além de ar e sais dissolvidos e a fase gasosa que é composta por ar livre e vapor de água (GON, 2011).

Essas fases são de extrema importância para determinar a situação do solo, podendo ser saturado ou não saturado. O solo saturado apresenta apenas duas fases, uma vez que os vazios da parte gasosa estarão preenchidos com água. Já o não saturado apresenta as três fases, na qual os vazios são preenchidos por ar e água.

Os solos são resultados da desintegração da rocha por meio de um mecanismo chamado de intemperismo (ação do tempo). Existem várias formas de intemperismo, sendo classificada em dois grandes grupos: intemperismo mecânico e químico. O primeiro é consequência da ação mecânica do transporte de água, do vento e da variação de temperatura. Já o segundo refere-se aos diversos processos químicos que alteram, solubilizam e depositam minerais de rochas, convertendo-se assim em solo. Essa forma de intemperismo é mais comum em regiões de clima quente e úmido, sendo assim, muito comum no Brasil. Vale ressaltar que é comum a ocorrência de vários agentes de intemperismo de forma conjunta (ORTIGÃO, 2007).

De acordo com Jenny (1994), os elementos mais importantes na formação dos solos são: material de origem, clima, organismos vivos, relevo e tempo. Caputo (1988) estabelece uma função mostrando a relação entre a formação do solo (s) e seus principais constituintes, que são a rocha de origem (r), organismos vivos (o), clima (cl), fisiologia (p) e o tempo (t), como mostrado na fórmula 1.

$$S = f(r, o, cl, p, t) \quad (1)$$

De acordo com Santos e Reichert (2007), os elementos importantes na formação dos solos são caracterizados da seguinte maneira:

- a) Em relação aos materiais do qual o solo é constituído, se dividem em materiais de natureza mineral ou orgânica. Os de origem mineral podem ser formados por rochas, outro solo ou materiais retrabalhados, sendo que a intensidade de deterioração depende do estado da rocha e do grau e tipo de intemperismo. Já os solos de origem orgânica existem geralmente em lugares mais frios ou mal drenados;
- b) Com referência ao clima, consiste em um fator de extrema importância na ação do intemperismo. As variáveis climáticas que mais se destacam são a temperatura, a precipitação e a evapotranspiração. Pode-se observar que solos formados em regiões tropicais já sofreram mais ação do intemperismo do que solos sob o clima mais temperado;
- c) Quanto ao relevo, sua principal atuação consiste na redistribuição da energia proveniente da radiação solar, além de interferir no intemperismo influenciando a penetração de água no solo. Em solos planos há uma elevada taxa de infiltração e o escoamento superficial é menor, propiciando a existência de solos mais profundos. Já em regiões com maiores declividades, as taxas de

escoamento são maiores que as de infiltração, contribuindo para a maior presença de solos rasos;

- d) Com relação à função dos organismos vivos, sendo de grande importância na formação dos solos, atuando na criação e destruição de feições, propriedades e características dos materiais constituintes das rochas. Já o tempo refere-se ao período em que o clima e os organismos vivos atuaram sobre o material de origem, podendo ser classificados em jovem, maduro ou velho.

Para a engenharia civil, os solos são de grande importância na utilização como material de fundação e de construção. Além disso, nas barragens de terra e nas fundações, o solo está sujeito a esforços que tendem a comprimi-lo e a cisalhá-lo, assim como o concreto e aço, provocando deformações e podendo até levar, eventualmente, a ruptura (ORTIGÃO, 2007).

### **2.3 Classificação dos solos**

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2006, p.27):

O solo que classificamos é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contém matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrem e, eventualmente, terem sido modificados por interferências antrópicas.

A grande variedade e a diferença de comportamento dos solos diante das solicitações referentes a engenharia, ocasionou o seu agrupamento em conjuntos diferentes, nos quais eram estabelecidas características e certas propriedades. Desse modo, surgiram os sistemas de classificação (PINTO, 2006).

A unidade básica de estudo do Sistema Brasileiro de Classificação é o perfil do solo, sendo que este é examinado em uma área mínima que assegure o estudo das características e propriedades das camadas do solo (EMBRAPA, 2006).

Segundo a pedologia, ciência que tem por objetivo estudar as camadas superficiais da crosta terrestre, principalmente sua formação e sua classificação, o perfil do solo é constituído por horizontes, que são camadas mais ou menos horizontais que vão desde a superfície até o material inalterado na base. Este perfil é utilizado em estudos do solo, principalmente por meio da amostragem, e assim, desenvolver diversas análises desse material (SANTOS; REICHET, 2007).

O principal objetivo da classificação do solo na perspectiva da engenharia é conseguir fazer uma provável avaliação do comportamento deste ou instruir o programa de investigação a realizar a análise correta para o problema (PINTO, 2006). Ainda segundo esse autor, existem variados métodos de classificação dos solos, seja pela sua origem, pela presença de matéria orgânica, pela estrutura, pela evolução, entre outros. No entanto, os sistemas de classificação que se baseiam no tipo e no comportamento das partículas são as mais conhecidas no ambiente da engenharia.

Os sistemas de classificação que se fundamentam nas características dos grãos têm o objetivo de determinar grupos que apresentam tópicos importantes para a Engenharia Civil. Nesses tipos de classificação, geralmente, são empregados a classificação granulométrica e os índices de Atterberg (PINTO, 2006).

Mesmo que os diferentes tipos de classificações apresentem limitações, são um meio mais prático de identificação dos solos, além de ser uma forma para a transmissão de conhecimentos (CAPUTO, 1988).

Os dois principais meios de classificação que serão abordados nesse trabalho são: o Sistema Unificado de Classificação (SUCS), que foi desenvolvido por Casagrande, e o Sistema Rodoviário de Classificação (Highway Research Board – H.R.B), originária da classificação do Public Roads Administration.

Campos (2009) diz que “o reconhecimento do tipo de solo é complicado, uma vez que os solos são misturados”. Na determinação do tipo de solo, é necessário a utilização da curva granulométrica obtida a partir de ensaios de laboratório, na qual mostra a distribuição das diferentes dimensões das partículas. Com isso, adota-se uma escala que define a posição relativa referente aos quatro grupos: pedregulho, areia, silte e argila, determinando assim suas respectivas porcentagens.

Existem diversas escalas granulométricas na determinação das faixas de composição do solo, como mostrada na Figura 1, no entanto, para o seguinte trabalho foi utilizada a da American Society for Testing and Materials (ASTM), pois seus intervalos coincidem com as peneiras utilizadas em ensaio de laboratório.



Figura 1 – Escalas granulométricas.

<u>ASTM</u>												
PEDREGULHO			AREIA				SILTE			ARGILA	COLOIDE	
			G	M	F							
60	4,75	2,0	0,425	0,075						0,005	0,001	0
	#4	#10	#40	#200								
<u>AASHTO</u>												
PEDREGULHO			AREIA				SILTE			ARGILA	COLOIDE	
			G		F							
60	2,0		0,425	0,075						0,005	0,001	0
<u>M. I. T.</u>												
PEDREGULHO			AREIA				SILTE			COLOIDE		
G	M	F	G	M	F	G	M	F				
60	20	6	2,0	0,6	0,2	0,06				0,002	0	
<u>ABNT</u>												
PEDREGULHO			AREIA				SILTE			ARGILA		
G	M	F	G	M	F							
60	20	6	2,0	0,6	0,2	0,06				0,002	0	

Fonte: <https://pt.slideshare.net/marianicancellier/classificao-granulometrica-do-solo>.

Por meio da Figura 1, pode-se observar que a argila é formada por grãos pequenos e invisíveis a olho nu, já as areias e os pedregulhos apresentam grãos visíveis e separáveis. Segundo Campos (2009), estas características influem no comportamento do solo, sendo que os principais tipos são classificados em:

- a) Solos arenosos: São aqueles em que os principais constituintes são os grãos de areia, podendo ser subdividido em grossos, médios e finos, porém, visíveis a olho nu. A principal característica desse tipo é não apresentar coesão, ou seja, seus grãos são facilmente separáveis um dos outros;
- b) Solos siltosos: O componente silte consiste no intermediário entre areia e argila. Não apresenta uma coesão apreciável e nem uma plasticidade considerável;
- c) Solos argilosos: Caracterizam-se por apresentar grãos microscópicos, de cores mais vivas e com uma grande impermeabilidade. Os grãos de argila têm o formato lamelar, ao contrário das areias que possuem o formato de esferas, devido a esse fator, a argila apresenta bastante coesão tendo dificuldade de desagregação.

### 2.3.1 Sistema Unificado de Classificação (SUCS)

A idealização desse modo de classificação foi feita por Casagrande e, inicialmente, era empregado para as obras de aeroporto. Porém, hoje em dia, é muito usado para diversos estudos na área da geotecnia, principalmente para os que trabalham em barragens de terra (PINTO, 2006).

De acordo com Caputo (1988), nesse sistema os solos são classificados em três

grandes grupos:

- a) Solos grossos: a maioria das partículas desse solo apresentam diâmetro superior a 0,075 mm, ou seja, mais da metade do seu peso é retido na peneira de número 200. Nesse grupo estão os pedregulhos, areias, solos pedregulhosos ou arenosos com pequena quantidade de finos;
- b) Solos finos: a maioria das partículas desse solo apresentam diâmetro inferior a 0,075 mm, ou seja, mais da metade do seu peso passa na peneira de número 200. Nesse grupo encontram-se os solos argilosos e siltosos;
- c) Turfas: Consiste basicamente em solos mais orgânicos.

Por este método, os solos são classificados por meio da união de duas letras, que apresentam os significados mostrados na Tabela 1, sendo que as primeiras seis letras indicam o grupo principal e as demais indicam características complementares dos solos.

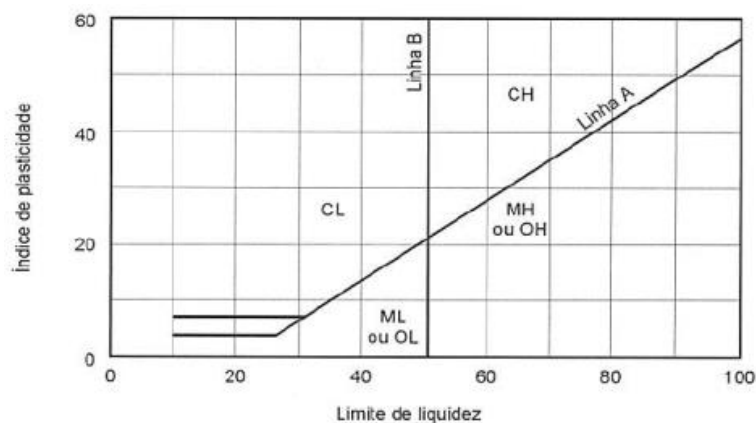
Tabela 1 – Significado das letras utilizadas para a classificação unificada.

<b>G</b>	Pedregulho
<b>S</b>	Areia
<b>M</b>	Silte
<b>C</b>	Argila
<b>O</b>	solo orgânico
<b>Pt</b>	Turfas
<b>W</b>	bem graduado
<b>P</b>	mal graduado
<b>H</b>	alta compressibilidade
<b>L</b>	baixa compressibilidade

Fonte: Pinto, 2006.

Para a realização da classificação por este sistema, inicialmente, deve-se determinar a quantidade de finos no solo, ou seja, a porcentagem que passa na peneira de número 200. Quando a fração fina é predominante, se torna necessário o conhecimento dos índices de consistência, pois o comportamento argiloso é determinado não apenas pelo teor de argila, mas também por sua atividade. A partir da carta de plasticidade desenvolvida por Casagrande, como mostrado na Figura 2, é possível executar a classificação do solo localizando o par de valores LL e IP.

Figura 2 – Carta de plasticidade.



Fonte: Pinto, 2006.

A linha A representa a divisão entre solos argilosos e siltosos ou orgânicos. Os solos orgânicos se diferenciam do siltosos especialmente pela sua cor, pois apresentam uma coloração muito escura. A linha B representa a divisão quanto a compressibilidade, já que quanto maior o limite de liquidez mais compressível é o solo.

A Tabela 2 mostra o resumo do modo de classificação proposto pelo Sistema Unificado de Classificação (SUCS).

Tabela 2 – Resumo para a classificação SUCS.

<b>Classificação geral</b>	<b>Tipos principais</b>	<b>Símbolos</b>
SOLOS GROSSOS (Menos de 50 % passando na #200 )	Pedregulho ou solos pedregulhosos	GW, GP, GM e GC
	Areias ou solos arenosos	SW, SP, SM e SC
SOLOS FINOS (Mais de 50 % passando na #200 )	Siltosos ou argilosos	Baixa compressibilidade (LL < 50)  MH, CH e OH
		Alta compressibilidade (LL > 50)  MH, CH e OH
SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS	Turfas	Pt

Fonte: Caputo, 1988.

### 2.3.2 Sistema Rodoviário de Classificação (H.R.B)

Essa forma de identificação, também conhecida como classificação da AASHTO, é originária dos Estados Unidos, pelos sistemas do *Bureau of Public Roads e Public Roads Administration*, sendo comumente utilizado no sistema rodoviário, classificando subleitos e as camadas de base. Nesse sistema os solos são reunidos em grupos e subgrupos, baseando-se na sua granulometria e nos limites de Atterberg.

Inicialmente, deve-se saber a porcentagem de material que passa na peneira de número 200. Se menos de 35% passa por esta peneira os solos são chamados de granulares e compreendem os grupos A-1, A-2, A-3, porém, se mais de 35% passar por esta peneira os solos são chamados de finos e compreendem os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7.

Segundo De Almeida (2005, p.113):

O melhor material de subleito é um solo bem graduado constituído principalmente de pedregulho e areia mas contendo pequena quantidade de finos para servir de liga (A-1). Solos mal graduados, como areias finas, são difíceis de serem compactados para alcançar altas densidades e são menos desejáveis para suportar pavimentos (categoria A-3). Solos contendo grande proporção de finos são inadequados como materiais de subleito. Estes são classificados de A-4 a A-7, na ordem decrescente de adequação como material de sub-leito. Argilas com altos índices de limite de liquidez e de plasticidade estão sujeitas a amplas variações na resistência durante os ciclos de secagem e umedecimento, que são indesejáveis. Quando nestes solos estão presentes em quantidades suficientes para influir no seu comportamento, o solo é enquadrado como A-6 ou A-7.

De acordo com a norma DNIT 141/10, o solo para ser empregado como camada de base do pavimento deve apresentar um limite de liquidez (LL) menor que 25 e um índice de plasticidade (IP) menor que 6.

A Figura 3, mostra esse sistema de classificação de forma detalhada, expondo os tipos de materiais, sua identificação e sua classificação como subleito.

Figura 3 – Sistema de classificação H.R.B.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia		Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos		
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

\* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: Caputo, 1988.

## 2.4 Barragens

A crescente conscientização em relação a restrição dos recursos naturais, especialmente pelo aumento da necessidade destes, estimulou o homem a alterar o ambiente no qual habita realizando algumas atividades na natureza, como por exemplo, a construção de barragens.

A construção de barramentos consiste em uma intervenção do homem na natureza com o objetivo de adaptar os padrões das vazões naturais dos rios, aos padrões demandados pela sociedade (CAMPOS, 1996).

Conforme Bordeaux (1980), até os primeiros anos do século passado, a maioria das barragens eram estruturas de baixa altura e de projeto bastante simples, que visavam apenas uma única função, abastecer a população. Posteriormente, com a crescente demanda por energia elétrica e com o abastecimento agrícola, industrial, entre outros, as barragens começaram a ter uma importância maior.

Segundo De Araújo (2004), cerca de 91% do abastecimento humano no estado do Ceará é feito por meio de barragens, tornando-se necessário o planejamento e o controle desses

barramentos.

As barragens podem ser de grande porte e de pequeno porte. As de grande porte apresentam uma altura superior a 15 m, ou com alturas entre 10 a 15 m e que atendam uma das seguintes características: o comprimento da crista deve ser igual ou superior a 500m, reservatório com volume superior a 1000000 m<sup>3</sup>, vertedouro com capacidade superior a 2000 m<sup>3</sup>/s, barragens com condições difíceis de fundações e barragem com projeto não convencional.

Quanto aos tipos básicos de barragens estão destacadas as seguintes: de concreto gravidade, de concreto estrutural com contrafortes, de concreto em arco de dupla curvatura, de terra, de enrocamento com membrana de concreto e de aterro hidráulico.

Segundo Sayão (2009), o tipo de barragem mais comum no Brasil é a barragem de terra e enrocamento, que corresponde a 82% do total, sendo os 18% restante de barragem de concreto.

#### **2.4.1 Barragens de terra**

As barragens de terra são construções de longa data. Um dos registros mais antigos corresponde a uma barragem de 12 m, construída no Egito, há aproximadamente 6,8 mil anos, e que sofreu rompimento por transbordamento (MASSAD, 2003).

Segundo Massad (2003), as barragens de terra eram “homogêneas”, com o material transportado manualmente e compactado por pisoteamento, por animais ou homens. Em 1820, consta que Telford introduziu o uso de núcleos de argila para garantir a estanqueidade das barragens. Já o uso de enrocamento na construção de barragens iniciou-se, provavelmente, com os mineiros da Califórnia, na década de 50, pela carência de materiais terrosos.

De acordo com Vargas (1977), as primeiras barragens de terra no Brasil foram feitas no Nordeste, no começo do Século XX, dentro do plano de obras de combate à seca, e foram projetadas baseando-se no empirismo.

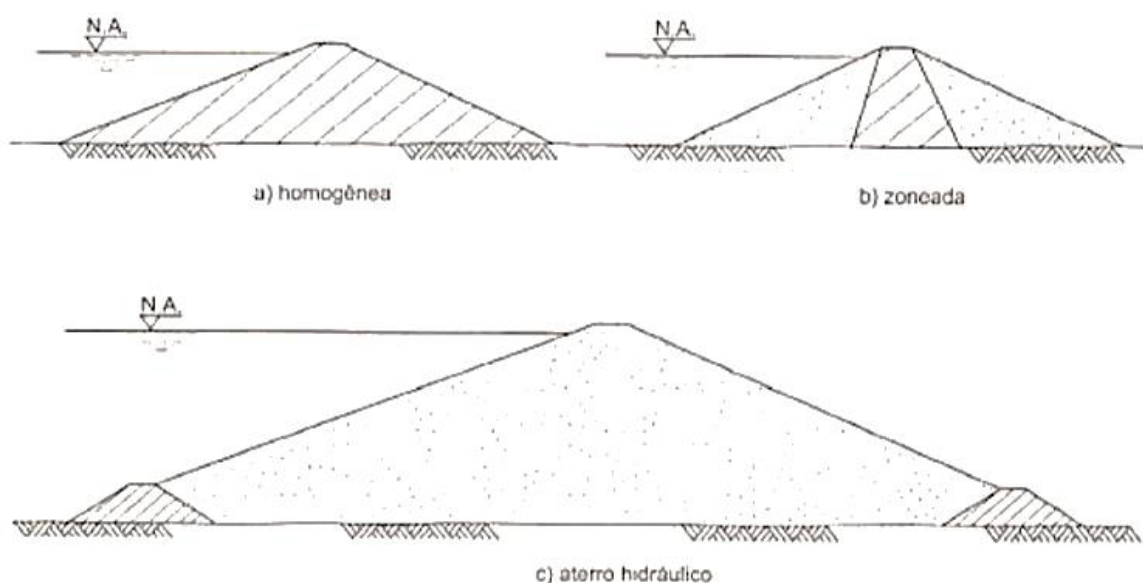
As barragens de terra são as mais comuns no Brasil, tanto pelas condições topográficas quanto pela disponibilidade de material terroso, sendo divididas em três tipos principais, as homogêneas, zoneadas e aterro hidráulico, como ilustrada na Figura 4.

- a) Homogêneas: São barragens construídas utilizando apenas um tipo de material, por isso, possuem taludes com inclinações mais suaves para fornecer uma maior estabilidade, em torno de 1:3 a montante e 1:2 a jusante. Uma vantagem para esse tipo de barramento é que são consideradas de baixo custo em comparação aos demais tipos, pois, geralmente, utilizam um material das proximidades ou do

próprio local de construção. Além disso, elas podem ser construídas sobre qualquer tipo de fundação, pois a sua base larga facilita na distribuição de cargas. Uma desvantagem é durante a construção, se a compactação do solo não for feita de maneira adequada é provável o surgimento de pontos de infiltração, por isso, é necessário uma constante manutenção, analisando possíveis pontos de erosão, crescimento de árvores, danos por animais, entre outros.

- b) Zoneadas: Na maioria dos casos, são barramentos que apresenta um núcleo central mais impermeável, como por exemplo, argila, e esse núcleo é envolvido por zonas de materiais com características mais permeáveis, servindo de suporte e protegendo o núcleo. Os materiais mais permeáveis podem ser areia, fragmentos de rochas, cascalho, ou uma mistura desses materiais. Segundo Stephens (2011), os custos desse tipo são mais elevados, porém, os perigos de infiltração são reduzidos ao mínimo. Os taludes podem ser reduzidos para aproximadamente 1:2 a montante e 1:1,75 a jusante.
- c) Aterro hidráulico: São barragens em que sua construção ocorre por meio do transporte do material em forma de lama, através de tubulações, que são lançadas entre diques de contenção, na qual ocorre a deposição dos sólidos e a drenagem de uma parte da água. Como esse solo é apenas lançado e não ocorre a compactação, sua resistência é baixa e seus taludes devem, obrigatoriamente, ser mais suaves.

Figura 4 – Tipos de barragens de terra.



Fonte: Gaioto, 2003.

Vale ressaltar que as barragens de terra não são estruturas completamente impermeáveis, isto é, sempre irá ocorrer percolação de água. As barragens de terra homogêneas que são construídas sem drenos ou estruturas de impermeabilização, como é o caso da barragem abordada no presente trabalho, tendem a aumentar a possibilidade de ocorrência do ‘piping’ ou erosão regressiva tubular, que consiste basicamente na saída das partículas finas devido às forças de percolação da água.

#### ***2.4.2 Finalidades de uma barragem***

A barragem é toda barreira artificial que se interpõe a um curso hídrico para interromper o movimento das águas e segundo Gaioto (2003) ela pode ser construída para atender finalidades específicas ou múltiplas, destacando-se:

- a) Geração de energia elétrica;
- b) Abastecimento de água;
- c) Controle de enchentes;
- d) Navegação;
- e) Saneamento;
- f) Irrigação;
- g) Contenção de rejeitos, etc.

Quando a barragem tem a função de basicamente armazenar água para o consumo, irrigação ou ser utilizada em atividades agrícolas, é muito comum escolher barragens de terra de pequeno porte, por apresentar uma maior simplicidade na elaboração e construção. Dentre as principais vantagens dessas barragens exposta por Stephens (2011), destacam-se as seguintes:

- a) São utilizados materiais naturais;
- b) Os procedimentos do projeto são simples;
- c) São necessários pequenos ativos fixos tangíveis;
- d) Os requisitos para as fundações são menos exigentes do que para outro tipo de barragens, pois a base larga de uma barragem de terra distribui melhor a carga nas fundações;
- e) Resistem ao assentamento e movimentos melhor do que estruturas mais rígidas e podem ser mais adequadas para áreas onde os movimentos do solo são comuns.



No entanto, ainda existem desvantagens e as principais destacadas por esse autor são as seguintes:

- a) Essas barragens são mais propensas a sofrerem danificações ou serem destruídas devido a água corrente, que passa sobre ou bate contra ela;
- b) Projetar e construir descarregadores ou vertedores adequados é normalmente a parte tecnicamente mais difícil de qualquer trabalho de construção duma barragem;
- c) Se na fase de construção não ocorrer uma compactação adequada é comum o surgimento de pontos preferenciais de infiltração;
- d) Esses barramentos exigem uma manutenção contínua de forma a evitar erosão, crescimento de árvores, sedimentação, infiltração e danos provocados por insetos e animais.

#### ***2.4.3 Elementos básicos de uma barragem***

Baseando-se nos mais variados fatores que devem ser levados em conta no projeto de uma barragem, será muito raro a mesma configuração de uma seção transversal para dois projetos. Mesmo seguindo a mesma metodologia, as condições impostas pelo local de construção influirão na determinação da melhor seção (GAIOTO, 1998).

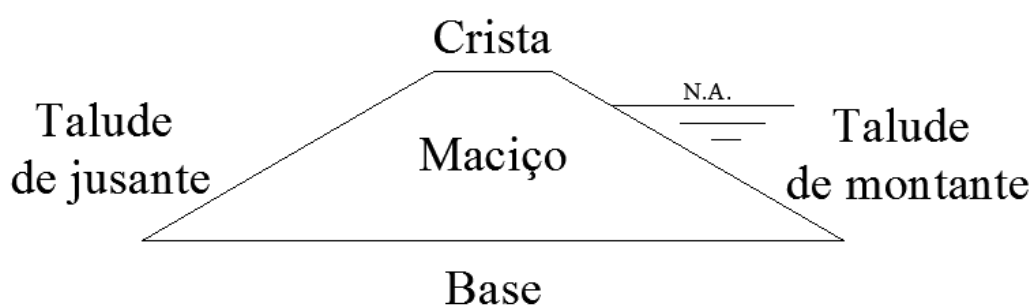
De acordo com Marangon (2004), os principais elementos das barragens, como mostrado na Figura 5, são definidos como:

- a) Maciço: Consiste na própria estrutura da barragem, sendo construído de forma transversal ao curso d'água, tem a função de reter a água.
- b) Crista: É a região do topo do maciço onde pode ou não ocorrer o trânsito de pessoas ou veículos. A largura da crista é determinada pela necessidade de tráfego que irá percorrer sobre ela. Na maioria dos casos há uma variação em torno de 6 a 12 metros, adotando as larguras maiores para barragens de grande porte. Para barragens de menor porte não é recomendável largura inferior a 3 metros, pois é necessário ter um acesso adequado a barragens para ações de manutenção e correção.
- c) Taludes: Corresponde as faces laterais e inclinadas que estão paralelas ao eixo do maciço e podem ser taludes de montante e jusante. O talude de montante é aquele que fica em contato com a água já o talude de jusante fica do outro lado,

ou seja, sem o contato com a água. Para as barragens de terra são indicadas inclinações de 1:2 a 1:3 (relação entre vertical e horizontal).

- d) Base: Consiste basicamente na projeção da crista e dos taludes sobre a superfície do terreno, ou seja, corresponde a área do terreno sobre a qual está a barragem.
- e) Borda livre ou folga: Consiste na diferença entre o nível da crista e o nível máximo do reservatório, para que as ondas que são formadas não ultrapassem o maciço da barragem. Segundo Gaioto (2003), o valor da borda livre deve ser igual a altura da onda máxima acrescentando 50% para compensar sua corrida sobre o talude, além de adicionar um fator de segurança, que geralmente varia de 0,60 a 3,00 metros, dependendo do tipo de barragem.

Figura 5 – Principais elementos de uma barragem.



Fonte: Autor, 2019.

#### **2.4.4 Fatores importantes na escolha do tipo de barragem**

Segundo Massad (2003), o projeto de uma barragem deve se basear em dois princípios fundamentais: a segurança e a economia, sendo que o primeiro apresenta uma importância maior, pois dele depende vidas humanas, bens individuais e comunitários, entre outros.

No entanto, os fatores físicos também são importantes na escolha do tipo da barragem. Gaioto (2003) destaca os principais elementos:

- a) Topografia: Esse fator indica a escolha inicial do tipo de barragem, pois um vale apertado favorece uma barragem de concreto, por outro lado, um vale aberto, sugere uma barragem de terra.
- b) Condições geológicas- geotécnica das fundações: Quando as fundações são em rochas, tem como propriedade apresentar uma alta resistência, ou seja,

apresentam poucos obstáculos em relação a escolha do barramento, por isso pode-se escolher qualquer tipo de barragem. No entanto, quando a fundação é constituída por solos, ou seja, cascalho, areia, silte ou argila, é preferível a utilização de barragens de terra.

- c) Material de construção: Os materiais que serão utilizados na construção da barragem devem, de preferência, estar disponíveis próximo ao local de construção, pois uma distância curta, especialmente para os materiais que serão utilizados em maior quantidade, indica uma diminuição no custo da obra.
- d) Dimensão e locação dos vertedouros: A seleção do tipo do vertedouro depende da magnitude das vazões que devem passar por ele. O custo de construção de um vertedouro é considerado uma parcela importante no custo total da obra, por isso deve-se fazer uma análise bastante completa.
- e) Condições climáticas: Nas regiões em que a incidência de chuvas é alta, a realização da compactação de solos argilosos fica prejudicada devido ao excesso de umidade que vai ser transferido para o solo, com isso, é preferível a seleção de barragens de enrocamento.
- f) Meio ambiente: A principal influência que este fator pode exercer está relacionada a necessidade de proteção de áreas que iriam ser afetadas pela construção da barragem. Nos últimos anos as considerações sobre o meio ambiente vêm tendo um maior destaque, especialmente devido a obrigação de ser elaborado o documento conhecido como RIMA (Relatório de impacto ambiental), caso se queira construir uma barragem.
- g) Experiência de construção: No caso do Brasil, a experiência na construção de barragens terra e enrocamento é maior que as de concreto, então, a seleção de uma barragem de concreto ficaria um pouco prejudicada, necessitando de pessoas com mais experiência nesse tipo de construção.

## **2.5 Ensaio de laboratório**

Os ensaios laboratoriais têm uma grande relevância na engenharia geotécnica, constituindo-se como o conjunto de atividades que visa a investigação geológica e geotécnica, tendo por objetivo obter informações a respeito das características e comportamento dos solos.

As amostras utilizadas nos ensaios podem ser de dois tipos:

- a) Deformadas: são as amostras na qual o solo é retirado com a alteração considerável das suas características *in situ*, podendo também ser chamada de amostra amolgada quando ocorre a fragmentação do material.
- b) Indeformadas: são as amostras na qual o solo é cortado, retirado e acondicionado, com as menores alterações possíveis.

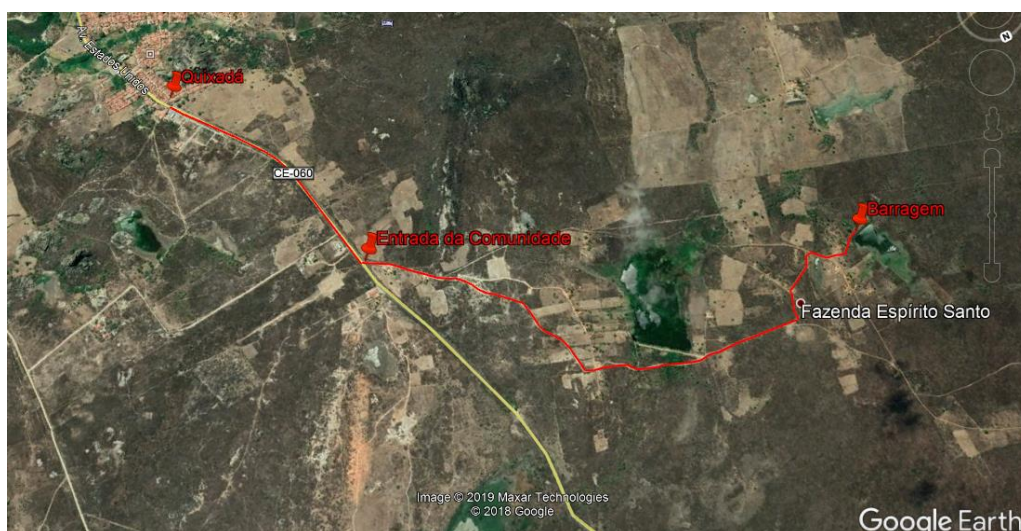
### 3 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM

#### 3.1 Descrição geral da barragem

A barragem analisada está situada na latitude 4°56'6.94"S e longitude 39°3'14.08" na comunidade Assentamento Olivencia. Essa comunidade está localizada a cerca de 4 Km do bairro São João na cidade de Quixadá, apresentando uma entrada na rodovia CE – 060, como mostrado na Figura 6. O município de Quixadá encontra-se no estado do Ceará e ocupa parte da microrregião denominada Sertões de Quixeramobim, região central do estado. A área da região corresponde a um polígono irregular, com superfície de cerca de 1.798 km<sup>2</sup>, limitado pelos municípios de Choró, Itapiúna e Ibaretama, a norte, Morada Nova e Ibicuitinga, a leste, Banabuiú, ao sul, e Quixeramobim, a oeste (FEITOSA et al., 1998). O acesso principal à sua sede, a partir de Fortaleza, é feito através da BR-116, até a localidade conhecida por Triângulo de Quixadá, e então, pela rodovia estadual CE-013, perfazendo cerca de 150 km, como exibido na Figura 7.

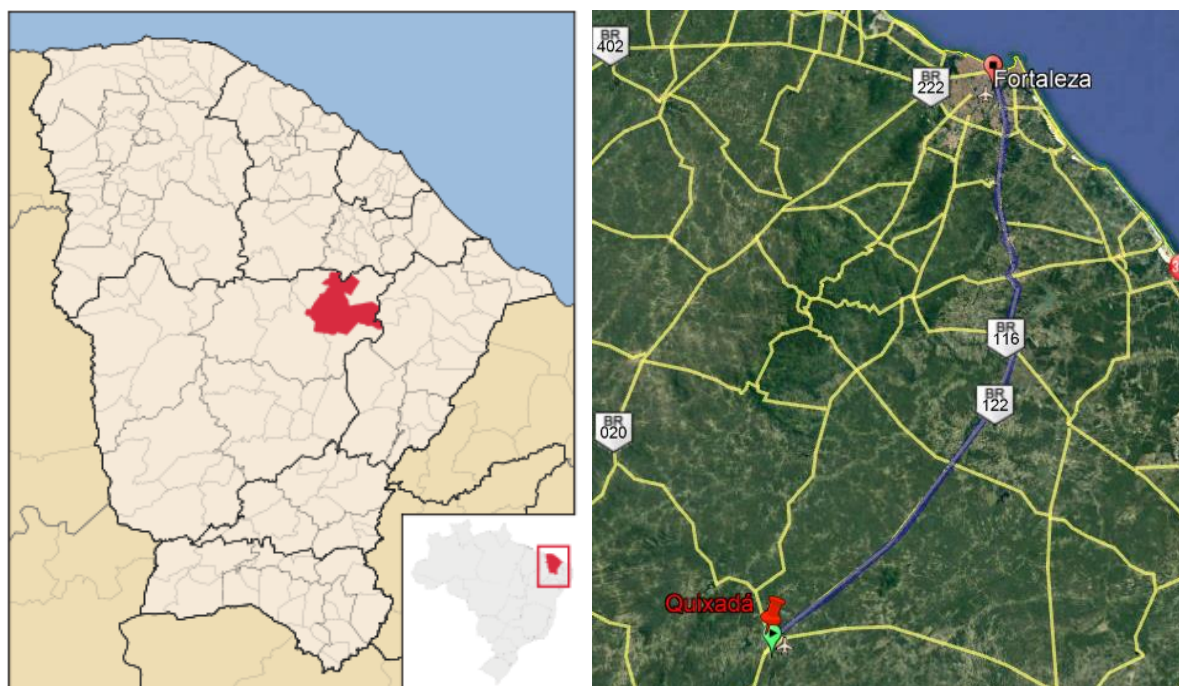
Segundo o Atlas da Fundação Instituto de Planejamento do Ceará (IPLANCE, 1997) e o Plano Estadual dos Recursos Hídricos da Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (1992), do ponto de vista geológico, há um grande predomínio de rochas do embasamento cristalino, representadas por gnaisses migmatíticos e granitos, aos quais se associam restos de supracrustais, sob a forma de estreitas faixas preenchidas por xistos, quartzitos, metacalcários e anfibolitos. Ocorrem, ainda, constituindo manchas isoladas, áreas de coberturas recentes formadas por sedimentos detríticos conglomeráticos, arenosos a argilosos, de espessuras bastante reduzidas e aluviões.

Figura 6 – Localização da barragem estudada.



Fonte: Google Earth.

Figura 7 – Localização da área de pesquisa no contexto estadual e municipal e o trajeto entre Quixadá e a Capital, respectivamente.



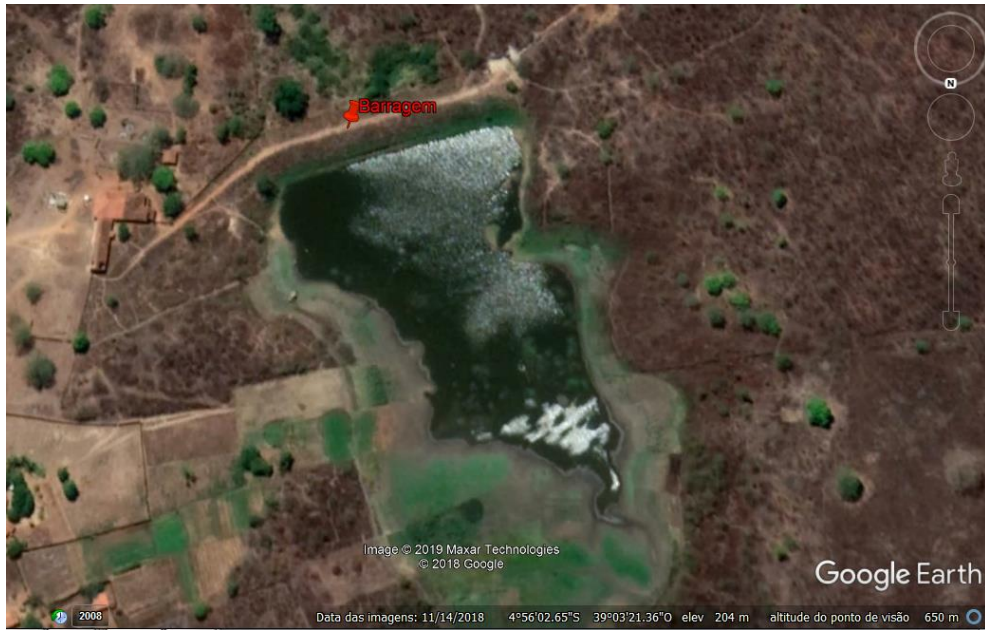
Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Quixad%C3%A1>; Google Earth.

Segundo moradores da comunidade, a barragem, mostrada na Figura 8 e 9, foi construída em 2009, sendo que o material usado em sua composição foi obtido a partir de jazidas localizadas próximo ao barramento. Esse mesmo ano foi característico por ter apresentando chuvas frequentes e de grandes intensidades, provocando o primeiro sangramento do açude.

A construção desse empreendimento foi financiada pelo Governo Federal e é classificada como sendo de terra homogênea e de pequeno porte. Dentre suas principais funções destacam-se a irrigação e abastecimento humano e animal, sendo utilizada para o abastecimento de aproximadamente 40 famílias da comunidade, cerca de 120 pessoas.



Figura 8 – Imagem da barragem através do Google Earth.



Fonte: Google Earth.

Figura 9 – Imagens reais da barragem do Assentamento Olivencia .

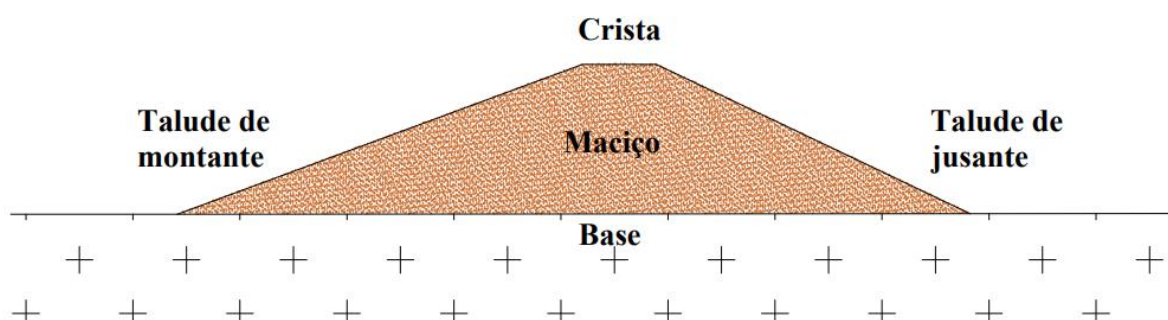


Fonte: Autor, 2019.

### 3.2 Seção transversal da barragem

Em relação à seção transversal, foi analisada a seção central máxima da barragem, verificando-se que esta apresenta um formato trapezoidal, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Seção transversal da barragem.



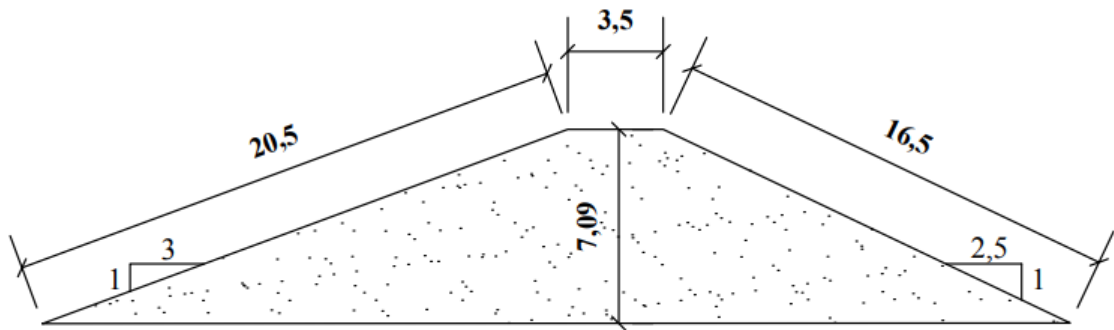
Fonte: Autor, 2019.

Devido à falta de documentação registrando características importantes do barramento, como a altura, o comprimento, inclinação dos taludes e dados do sangradouro, a obtenção destas informações ocorreu por meio da medição direta, feita através de trenas e inclinômetros, como também, correlações matemáticas. Com isso, a barragem apresentou as seguintes características, ilustradas na Figura 11 e 12:

- a) Altura: aproximadamente 7 metros;
- b) Comprimento do talude de montante: 20,5 metros;
- c) Comprimento do talude de jusante: 16,5 metros;
- d) Largura da crista: 3,5 metros;
- e) Comprimento total da barragem: 170 metros;
- f) Inclinação talude de montante: 35 %, 20° ou 3:1;
- g) Inclinação talude de jusante: 45 %, 25° ou 2,5:1;
- h) Diferença entre a cota máxima da barragem e do sangradouro: 1 metro.



Figura 11– Medidas da barragem.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 12– Sangradouro da barragem.



Fonte: Autor, 2019.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Segundo Gil (2002), a metodologia é a seção onde se descrevem os procedimentos a serem seguidos na realização da pesquisa. Nesse capítulo é mostrado a classificação da pesquisa em relação à vários aspectos, além de mostrar cada etapa desenvolvida na elaboração do trabalho, desde a coleta do solo, até a fase de execução dos ensaios e análise por meio de programa GeoStudio (SEEP/W e SLOPE/W).

### 4.1 Classificação da pesquisa

De acordo com Gil (2002), “toda e qualquer classificação se faz mediante algum critério”, sendo a pesquisa abordada classificada quanto aos objetivos gerais, procedimentos técnicos, natureza e quanto à abordagem do problema.

#### 4.1.1 Quanto aos objetivos gerais

Em relação aos objetivos, a pesquisa pode se dividir em três grandes grupos: exploratórias, descritivas e explicativas. O enquadramento do estudo como pesquisa exploratória ocorre quando há pouco conhecimento sobre a área temática a ser abordada. De acordo com Silva (2017), “a exploratória é realizada em área na qual há pouco conhecimento acumulado e sistematizado. Tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, para torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses.” Com isso, colabora na busca por mais conhecimento e um maior entendimento sobre o assunto relatado.

Na concepção de Gil (2002) “as pesquisas descritivas têm como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis”. Comumente, é apontada como intermediária entre a pesquisa exploratória e a explicativa, ou seja, não é tão preliminar como a primeira nem tão profunda quanto a segunda. Essa pesquisa exige do pesquisador um certo grau de responsabilidade para apresentar validade, para isto, faz-se necessário delimitação de técnicas, métodos, modelos e teorias que orientarão a coleta e interpretação dos dados (SILVA, 2017).

Já a pesquisa explicativa é considerada como sendo aquela que mostra uma preocupação principal em conhecer os motivos que contribuem para a ocorrência de fatos, sendo esse tipo, a que apresenta um maior aprofundamento em relação a realidade, explicando o porquê das coisas. Pode-se então dizer que o conhecimento científico está assentado nos

resultados oferecidos pelos estudos explicativos (GIL, 2002).

O presente trabalho utilizou a Pesquisa Exploratória, Descritiva e Explicativa, procurando atingir os objetivos estabelecidos e para servir de ferramenta na busca das respostas envolvendo as situações da pesquisa.

#### ***4.1.2 Quanto aos procedimentos técnicos***

De acordo com Raupp e Beuren (2004), com relação aos procedimentos “enquadram-se o estudo de caso, a pesquisa de levantamento, a pesquisa bibliográfica, a pesquisa documental, a pesquisa participante e a pesquisa experimental”. Na seguinte pesquisa foi utilizado principalmente o estudo de caso, a pesquisa documental, pesquisa bibliográfica, e pesquisa experimental ou de laboratório.

O estudo de caso é mais utilizado em pesquisas envolvendo casos específicos, propiciando uma maior riqueza de detalhes, além de um maior conhecimento acerca do problema estudado, Gil (2002) aponta algumas vantagens do estudo de caso que são: estímulo a novas descobertas, uma ênfase na totalidade e a simplicidade dos procedimentos.

De acordo com Gil (2002, p.44):

A pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. Embora em quase todos os estudos seja exigido algum tipo de trabalho dessa natureza, há pesquisas desenvolvidas exclusivamente a partir de fontes bibliográficas. Esse tipo de pesquisa é a realizada pela maioria dos pesquisadores, discutindo e explicando um determinado tema utilizando como base livros, revistas, artigos, entre outros.

Já a pesquisa documental consiste na organização das informações que se encontram dispersas, visando a interpretação e a análise das mesmas, diferencia-se da pesquisa bibliográfica por utilizar material que ainda não recebeu tratamento ou que pode ser reelaborado. Segundo Gil (2002) O desenvolvimento da pesquisa documental segue os mesmos passos da pesquisa bibliográfica. Apenas cabe considerar que, enquanto na pesquisa bibliográfica as fontes são constituídas sobretudo por material impresso localizado nas bibliotecas, na pesquisa documental, as fontes são muito mais diversificadas e dispersas.

De acordo com Silva (2017), “ a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, na qual o pesquisador manipula e controla variáveis independentes e observa as variações que tais manipulação e controle produzem em variáveis dependentes. ”

#### 4.1.3 Quanto à natureza

O estudo se classifica como pesquisa aplicada, pois busca uma solução para uma questão específica. A pesquisa aplicada pode ser definida como atividades em que conhecimentos previamente adquiridos são utilizados para coletar, selecionar e processar fatos e dados, afim de se obter e confirmar resultados, e se gerar impacto.

#### 4.1.4 Quanto à abordagem do problema

Em relação a abordagem do problema a pesquisa pode ser qualitativa ou quantitativa. O trabalho realizado utilizou ambas, sendo que a abordagem qualitativa se destaca por apresentar características que não podem ser avaliadas pela pesquisa quantitativa. Já a quantitativa se baseia por meio de cálculos e equações.

### 4.2 Etapas desenvolvidas na elaboração da pesquisa

A metodologia adotada para a realização desta pesquisa apresenta como base a execução das etapas mostradas a seguir, e ilustrada na Figura 13.

- a) Escolha da barragem a ser estudada;
- b) Coleta de amostras deformadas do solo;
- c) Realização de ensaios de caracterização, de permeabilidade e de resistência em laboratório;
- d) Utilização do software SEEP/W na análise de fluxo;
- e) Utilização do software SLOPE/W na análise da estabilidade dos taludes;
- f) Análise e interpretação dos resultados obtidos.

Figura 13 – Etapas da metodologia.



Fonte: Autor, 2019.

### 4.3 Escolha da barragem

A escolha da barragem do Assentamento Olivencia ocorreu por ser uma barragem de terra de pequeno porte e por possuir uma proximidade com a cidade de Quixadá, o que proporcionava uma maior facilidade na visitação objetivando a coleta dos diversos dados necessários, além da sua importância para os moradores da comunidade.

### 4.4 Coleta da amostra

A coleta da amostra ocorreu em pontos ao longo do maciço do barramento através de instrumentos como pá e picareta, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Coleta do solo por meio de instrumentos.



Fonte: Autor, 2019.

A amostra deformada do solo, exibida na Figura 15, foi identificada e armazenada em sacos plásticos fechados para evitar a perda de umidade, sendo então levada para o laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará (UFC) para a realização de diversos ensaios.



Figura 15 – Amostra deformada do solo.



Fonte: Autor, 2019.

#### 4.5 Ensaio laboratoriais

Os ensaios laboratoriais que foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Ceará (UFC), no período de Julho e Agosto de 2019, utilizando amostras deformadas do mesmo, foram os seguintes:

- a) Análise granulométrica;
- b) Densidade real dos grãos por meio do picnômetro;
- c) Limites de Atterberg;
- d) Compactação;
- e) Permeabilidade;
- f) Resistência pelo ensaio triaxial.

#### 4.5.1 Análise Granulométrica

Os solos apresentam partículas de dimensões variadas, sendo que esses elementos constituintes são classificados dentro dos limites conhecidos por ‘frações constituintes’ dos solos. Essas frações, de acordo com a escala granulométrica da ASTM, são: os pedregulhos, com os diâmetros equivalentes entre 60 e 4,8 mm, as areias, na faixa de 4,8 a 0,075 mm, silte, entre 0,075 e 0,005mm e argila, inferiores a 0,005mm.

A análise granulométrica tem como principal função a obtenção da curva granulométrica através da determinação das dimensões das partículas que compõe o solo, sendo esse processo dividido em duas etapas: a granulometria e a sedimentação, ambas baseadas na NBR 7181/84.

Antes da realização do ensaio, foi feito o quartejamento do solo e realizado o destorroamento de cada parte, preparando conforme a NBR 6457/86, a fim de homogeneizar a amostra, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Quartejamento e destorroamento, respectivamente.



Fonte: Autor, 2019.

Da amostra destorroada separou-se cerca de 4 kg e, em seguida, aproximadamente 2 kg desse material foi passado na peneira de N° 10. A parte do solo retida foi lavada e, logo depois, colocada para secar na estufa, sendo então realizado o peneiramento grosso. Além disso, cerca de 120 g do material que passou da peneira de 2 mm foi utilizado na determinação da umidade natural através da estufa.

O início da definição do tamanho das partículas ocorre pelo processo do peneiramento grosso, no qual a amostra de solo passa por uma série de peneiras, que apresentam aberturas e numeração padronizadas, como mostrada na Tabela 3, que são colocadas umas sobre

as outras em ordem decrescente de abertura da malha com o propósito de obter o valor das massas acumuladas em cada peneira. A Figura 17 ilustra as peneiras que foram utilizadas no peneiramento grosso.

Tabela 3 – Peneiras utilizadas no peneiramento grosso.

<b>Peneiras</b>	
<b>Polegadas ou Numeração</b>	<b>Mm</b>
1,5''	38,1
1''	25,4
3/4''	19
1/2''	12,5
3/8''	9,5
Nº 4	4,75
Nº 10	2

Fonte: Autor, 2019.

Figura 17 – Peneiras usadas no peneiramento grosso.



Fonte: Autor, 2019.

Para o peneiramento fino e sedimentação foi separado cerca de 70g do solo que passa na peneira de Nº10. No caso da sedimentação, essa amostra foi transferida para um recipiente contendo uma solução de hexametáfosfato de sódio, e em seguida, o material foi transferido para o copo dispersor durante 15 minutos. Posteriormente, a dispersão foi transferida



para a proveta adicionando água destilada até completar o volume de 1.000 cm<sup>3</sup> e agitou-se manualmente para manter as partículas em suspensão. Logo depois, foi colocado a proveta sobre a mesa e anotado a hora exata do início do experimento, sendo feita a leitura por meio do densímetro durante um período de 24 horas. A Figura 18 ilustra a execução do ensaio de sedimentação.

Figura 18 – Ensaio de sedimentação.



Fonte: Autor, 2019.

Finalizado o processo de sedimentação, foi derramado todo o conteúdo da proveta na peneira N<sup>o</sup> 200, incluindo aquele que tenha se aderido às paredes, e então promovida a lavagem de todo o material. Após essa lavagem, o solo foi secado em estufa e passado por um conjunto de peneiras destinadas ao peneiramento fino, como mostrada na Tabela 4, obtendo-se o valor das massas acumuladas de cada peneira. A Figura 19 exhibe as peneiras utilizadas nesse procedimento.

Tabela 4 – Peneiras utilizadas no peneiramento fino.

<b>Peneiras</b>	
<b>Polegadas ou Numeração</b>	<b>Mm</b>
Nº 30	0,60
Nº 40	0,42
Nº 50	0,30
Nº 100	0,15
Nº 200	0,075

Fonte: Autor, 2019.

Figura 19 – Peneiras usadas no peneiramento fino.



Fonte: Autor, 2019.

#### 4.5.2 Densidade real dos grãos

A densidade ou peso específico real ( $\gamma_s$ ) é definida como sendo a razão entre o peso dos sólidos e o volume das partículas, desconsiderando assim os vazios existentes. O ensaio realizado para a determinação dessa variável foi feito em laboratório com base na norma do DNER-ME 093/94.

Esse procedimento, mostrado na Figura 20, consiste na utilização de três picnômetros. Inicialmente eles foram pesados em seu estado seco (P1) e logo depois foram colocados cerca de 10g do material que passa na peneira de Nº 10 em cada um deles e então pesados (P2). Em seguida, foi acrescentado água destilada nos picnômetros até cobrir as

amostras e aquecidas por volta de 20 a 30 minutos. Passado esse tempo, os picnômetros são retirados com bastante cuidado e ficam em repouso até a temperatura se equilibrar com a do laboratório. Após isso, preenche o restante do picnômetro com água destilada, possuindo o cuidado desta escorrer pela parede, e então é feita a pesagem do conjunto picnômetro, solo e água (P3). A última medida realizada corresponde ao picnômetro preenchido apenas de água destilada (P4). Com todos esses valores, é possível a determinação da densidade real dos grãos através da Fórmula 2.

Figura 20 – Ensaio do picnômetro.



Fonte: Autor, 2019.

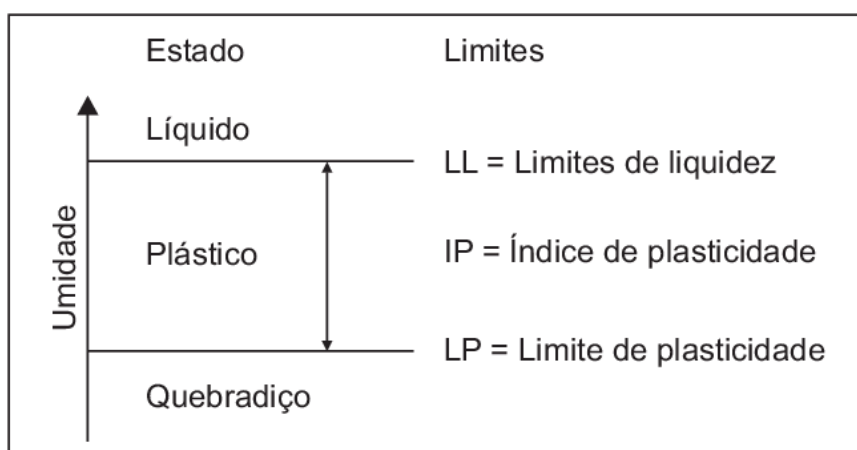
$$Dt = \frac{P2 - P1}{(P4 - P1) - (P3 - P2)} \quad (2)$$

### 4.5.3 Limites de Atterberg

As argilas são materiais que se caracterizam por apresentarem partículas de minerais com estrutura mineralógica diferenciadas. Com isso, a mesma porcentagem de fração argilosa pode gerar comportamentos muito diferentes do solo (PINTO, 2006). Como uma maneira de identificar a influência das partículas argilosas, começou a ser utilizado o ensaio elaborado pelo engenheiro químico Atterberg, na qual estudava o comportamento dessas partículas em contato com a água.

Quando a umidade do solo é muito alta, ele se comporta como um líquido. À medida que a água evapora, ele começa a perder a sua capacidade de fluir, e, quando chega ao limite de liquidez, se torna plástico. Nesse estado, o solo ainda pode ser moldado, porém, com a continuação da perda de água, ele chega ao limite de plasticidade e então fica no estado semi-sólido, começando a se desmanchar quando moldado, como ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Limites de Atterberg.



Fonte: Pinto, 2006.

O limite de liquidez (LL), determinado por meio do aparelho Casagrande, é definido como sendo o teor de umidade do solo, que após uma ranhura feita por meio do cinzel, requer 25 golpes para suas bordas inferiores se unirem.

Esse ensaio é padronizado pela NBR 6459/84 e ocorre com a utilização de aproximadamente 70 g do solo. Com isso, são adicionados aos poucos incrementos de água destilada até formar uma massa plástica. Esse material é transferido para o aparelho de Casagrande, de forma que a parte central tenha uma espessura de cerca de 1 cm. Com o uso do cinzel, é feita uma ranhura no centro do aparelho dividindo a massa de solo em duas partes. O processo de golpeamento é iniciado, seguida da determinação da quantidade de golpes



necessária para o fechamento bordas inferiores. Esse processo foi repetido cinco vezes com o propósito de obter outros pontos visando a elaboração do gráfico que irá auxiliar na determinação do limite de liquidez. Esse gráfico apresenta nos eixos das abcissas, em escala linear, os teores de umidade, que são obtidos pelas amostras que são levadas para a estufa, e nas ordenadas, em escala logarítmica, o número de golpes para o fechamento das bordas. Esse procedimento está ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Ensaio do limite de liquidez (LL).



Fonte: Autor, 2019.

Caputo (1988, p.52) define a plasticidade como sendo:

Uma propriedade dos solos, que consiste na maior ou menor capacidade de serem eles moldados, sob certas condições de umidade, sem variação de volume. Trata-se de uma das mais importantes propriedades das argilas.

O limite de plasticidade (LP) marca a transição entre o estado plástico e o semi-plástico ou quebradiço, sendo muito importante na determinação do índice de plasticidade dos solos. Esse limite é definido como sendo o menor teor de umidade com o qual o solo começa a fraturar quando se tenta moldar um cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento com a palma da mão.

Esse procedimento está baseado na norma NBR 7180/84, sendo utilizado cerca de 50 gramas de solo, na qual foi adicionado água destilada com o objetivo de se obter uma pasta homogênea. Com essa amostra forma-se uma pequena bola que foi rolada em uma placa de vidro para formar um cilindro no formato do gabarito. A operação é repetida até que, por perda da umidade, o cilindro se fragmente ao atingir as medidas desejadas. Em seguida, esse material foi transferido para uma cápsula com a finalidade de determinar a sua umidade na estufa. O processo foi repetido três vezes para a obtenção dos outros pontos do ensaio e o limite de plasticidade é obtido a partir da média desses valores. Esse procedimento está ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Ensaio do limite de plasticidade (LP).



Fonte: Autor, 2019.

Atterberg denotou que a diferença, em porcentagem, entre os limites de plasticidade e liquidez, denominada índice de plasticidade (IP), informa quanto à amplitude da faixa de plasticidade. A equação correspondente está demonstrada na Fórmula 3.

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

#### **4.5.4 Compactação**

A compactação consiste no processo mecânico ou manual que visa reduzir o volume de vazios do solo com o intuito de aumentar sua resistência e deixá-lo mais estável. Representa uma operação simples e de grande importância pelos seus efeitos sobre a estabilização de maciços terrosos, além de melhorar características relacionadas à permeabilidade, compressibilidade e absorção de água (CAPUTO, 1988).

Nesse processo, as partículas de solo e de água permanecem constantes, sendo que o aumento da massa específica ocorre devido a eliminação do ar nos vazios. Quando a umidade não é muito elevada, a retirada do ar é facilitada pois este encontra-se na forma de canalículos intercomunicados. Esses canalículos contribuem para uma massa específica elevada quando maior for o teor de umidade, pois a água promove uma redução no atrito. No entanto, a partir de um determinado teor de umidade, a compactação não consegue mais eliminar o ar dos vazios, pois estes já estão envolvidos por água. Com isso, estabelecida a energia a ser aplicada, um certo teor de umidade, chamado de umidade ótima, conduz a uma densidade seca máxima (PINTO, 2006).

O ensaio foi baseado na norma NBR 7182/86 e, a princípio, foi feita a secagem da amostra no ar e o destorroamento. O procedimento iniciou-se com a adição de água em 3 kg do solo até que este começasse a formar “bolões”, e então, ocorreu a compactação dessa amostra dentro de um cilindro, com volume de  $997 \text{ cm}^3$ , em três camadas sucessivas, utilizando a energia de Proctor normal, ou seja, sob a ação de 26 golpes de um soquete, que pesava cerca de 2,5 kg, caindo a uma altura aproximada de 30 cm. Esse ensaio é repetido seis vezes para diferentes teores de umidade e com a reutilização do solo, sendo acrescentando 2% de água em cada repetição, e assim, foi determinado o peso específico aparente seco em cada caso. Com esses valores é possível realizar a curva de compactação, na qual relaciona umidade de cada ponto (abscissas) com o peso específico (ordenadas), e assim, obter os valores da umidade ótima e densidade seca máxima. Esse processo está mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Ensaio de compactação.



Fonte: Autor, 2019.

#### 4.5.5 Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade que o solo possui de permitir a percolação da água através dele, sendo que essa característica é demonstrada numericamente pelo coeficiente de permeabilidade (CAPUTO, 1988).

De acordo com Pinto (2006), o conhecimento do escoamento da água nos solos é de extrema importância para a solução de problemas práticos, como por exemplo:

- a) Na estimativa das vazões que irá percolar através do maciço da barragem, em obras de drenagem, em fundações entre outros;
- b) Na análise de recalques, pois, está muitas vezes relacionada com os índices de vazios do solo, que ocorre por meio da expulsão da água por esses vazios;
- c) Na análise da estabilidade, pois a tensão efetiva depende da pressão neutra, que corresponde às tensões provocadas pela percolação da água.



O coeficiente de permeabilidade consiste na variável que verifica a facilidade com que um fluido escoar através de um meio poroso. Esse coeficiente varia de acordo com o tipo do solo, e caso for o mesmo, depende principalmente da temperatura e do índice de vazios. A sua determinação está baseada na lei experimental de Darcy, na qual a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico, e pode ser feita em laboratório por permeâmetros (carga constante ou carga variável).

O ensaio foi baseado na NBR 14545/2000, sendo realizado através da compactação do solo na sua umidade ótima e transferindo-o para o cilindro de permeabilidade, sendo colocado sobre pedras porosas. Após isso, esse conjunto chamado de permeâmetro, é posto para saturar durante um período de 24 horas no sentido da base para o topo. Finalizado esse procedimento, foi iniciado a percolação pela carga variável, adotando-se um tempo de 3 minutos e então fazendo a leituras das cargas. Esse procedimento está demonstrado na Figura 25.

Figura 25 – Ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autor, 2019.

Após a repetição desse procedimento e com os valores obtidos foi calculado o coeficiente de permeabilidade (k), por meio da média dos valores, através da Fórmula 4.

$$K_{20} = 2,3 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \log \frac{h_o}{h_f} \quad (4)$$

Onde,

$K_{20}$ : Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

a: Área interna do tubo de carga (cm<sup>2</sup>);

L: Altura do corpo de prova (cm);

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

$h_i$ : Altura da carga no instante inicial (cm);

$h_f$ : Altura da carga no instante final (cm);

t: Tempo decorrido para a água percolar no corpo de prova (s).

#### ***4.5.6 Ensaio de resistência triaxial***

Em um plano qualquer no interior do solo, a tensão atuante não é obrigatoriamente normal ao plano, podendo ser decomposta duas componentes, sendo uma delas normal, chamada de tensão normal ( $\sigma$ ), e a outra paralela ao plano, conhecida como tensão de cisalhamento ( $\tau$ ). Esses planos são normais entre si e recebem o nome de planos principais, e as tensões atuantes nele são conhecidas por tensões principais. A tensão principal maior é representada por  $\sigma_1$  e a tensão principal menor corresponde a  $\sigma_3$  (PINTO, 2006).

O conhecimento dessas tensões é de extrema importância, pois, a partir delas, é realizado o cálculo da tensão de cisalhamento e da tensão normal, como mostrado nas Fórmulas 5 e 6.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \cos(2\alpha) \\ \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \sin(2\alpha) \end{array} \right. \quad (5)$$

$$(6)$$

O estado de tensões que passam por um ponto em todos os planos pode ser representado graficamente pelo círculo de Mohr, que consiste em um sistema de coordenadas nas quais as abcissas correspondem as tensões normais e as ordenadas as tensões cisalhantes, sendo construído facilmente quando se conhece os valores das tensões principais.

A propriedade do solo em suportar cargas e se manter estável, depende da resistência ao cisalhamento que o solo possui. A ruptura do solo acontece quando essa resistência é excedida (CAPUTO, 1988).

A resistência ao cisalhamento depende principalmente de dois fatores: o ângulo de atrito e a coesão. O primeiro consiste no ângulo máximo que uma determinada força pode fazer com a normal sem que ocorra o deslizamento, sendo representada por  $\phi$ , já o segundo refere-se à atração química das partículas constituintes do solo que pode provocar uma certa resistência, essa coesão pode ser real ou aparente. A real é a parcela de resistência ao cisalhamento que solos úmidos apresentam por causa da tensão entre partículas decorrente da pressão capilar da água, já a aparente é um fenômeno de atrito que é consequência da pressão capilar, por exemplo, a capacidade de fazer castelos de areia na praia (PINTO, 2006).

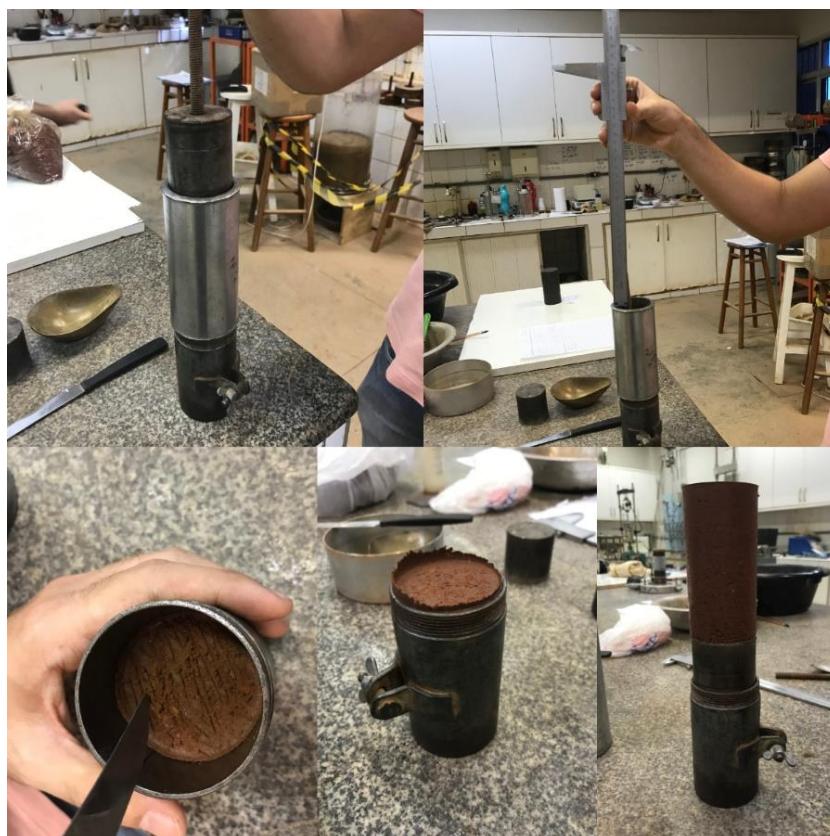
Os critérios de ruptura são ideias que buscam representar as condições na qual ocorre a ruptura dos materiais. O critério adotado no seguinte trabalho foi o de Mohr-Coulomb, consistindo basicamente em utilizar círculos representativos dos estados de tensões e estes se encontrarem no interior de uma reta dada pela expressão  $c + f \cdot \sigma$ , sendo  $c$  e  $f$ , respectivamente, coesão e coeficiente de atrito.

#### 4.5.6.1 Moldagem do corpo de prova

Os dados necessários para a moldagem dos corpos de prova foram obtidos do ensaio de compactação, ou seja, os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima. A moldagem do corpo de prova foi feita de forma manual, a partir da amostra deformada, com a utilização de um cilindro moldador e um bloco para compactar o solo. Essa compactação foi feita em três camadas, de modo que, com o auxílio do paquímetro, a primeira medida gerasse

um valor de 108 mm, a segunda de 75 mm e a terceira de 43 mm, sendo necessário realizar uma ranhura entre as camadas para facilitar a aderência. Esse procedimento está ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Moldagem do corpo de prova para o ensaio triaxial.



Fonte: Autor, 2019.

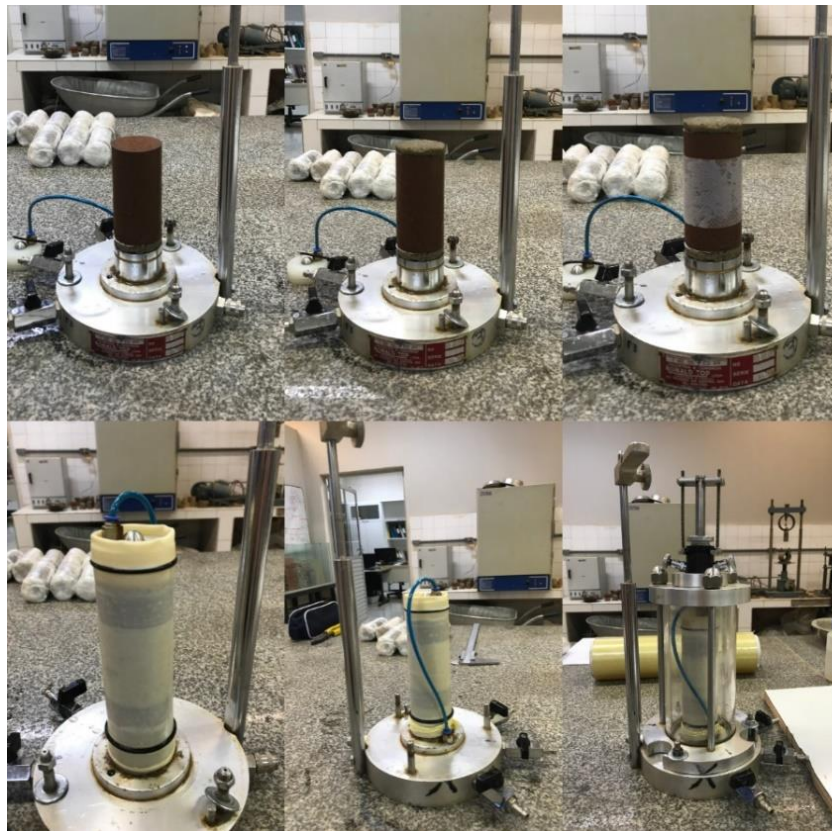
Neste trabalho foram realizados ensaios em condições consolidadas e drenadas (CD ou S), como será visto posteriormente, no intuito de se obter os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo. Sendo assim, realizou-se a moldagem de três corpos de prova para a realização do ensaio, adotando-se tensões confinantes de 50, 100 e 200kPa, em função da capacidade do equipamento.

#### *4.5.6.2 Montagem dos corpos de prova na câmara triaxial*

Após essa moldagem, foi realizada a preparação do corpo de prova com o objetivo de ser colocado de forma correta na câmara cilíndrica, e assim, iniciar o ensaio de resistência triaxial. Esse processo está ilustrado na Figura 27 e seguiu os seguintes passos:

- a) Colocação de uma pedra porosa, previamente saturada, sobre a base da célula;
- b) Posicionar um papel filtro sobre as pedras porosas, para evitar o entupimento destas.
- c) Colocação do corpo de prova apoiada no papel filtro e dispor de outro papel filtro na superfície desse elemento;
- d) Colocação da pedra porosa superior, apoiada no papel filtro;
- e) Colocação do cabeçote, acima da pedra porosa;
- f) Colocação do papel filtro na lateral do corpo de prova para facilitar o processo de saturação;
- g) Colocação de membranas de látex, para evitar a deformação do corpo de prova;
- h) Colocação de orings e ligas para fixar o corpo na célula;
- i) O sistema é fechado para iniciar o procedimento.

Figura 27 – Preparação do corpo de prova para a câmara cilíndrica.



Fonte: Autor, 2019.

Após a montagem do corpo de prova na câmara triaxial, ocorrerá a execução das etapas seguintes: saturação do corpo de prova por percolação simples e por contrapressão, a

consolidação ou adensamento e, por fim, o rompimento.

#### 4.5.6.3 Execução do ensaio

O ensaio de compressão triaxial, que é mais completo que o de cisalhamento direto, consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre o corpo de prova. Esse ensaio não apresenta uma norma específica e a realização do ensaio foi fundamentada na tese de Slongo (2008), consistindo na utilização de uma câmara cilíndrica, de parede transparente, na qual se coloca um corpo de prova do solo que foi anteriormente moldado, envolvido por uma membrana de borracha.

A primeira etapa do procedimento é a de saturação, sendo realizada em duas fases: por percolação de água na amostra e pela aplicação de incrementos de pressão confinante e contra-pressão alternadamente. A percolação foi usada devido ao baixo grau de saturação do solo e para diminuir o valor das pressões aplicadas no processo seguinte.

Na saturação por percolação foi aplicada uma pressão confinante de 60 kPa e uma contra-pressão na base igual a 50 kPa, com o intuito de promover uma maior facilidade na penetração da água, e assim, o conjunto permaneceu saturando por um período de 24 horas. Após isso, é feita a saturação pela aplicação de incrementos da pressão confinante e da contra-pressão alternadamente. Esse processo é repetido até a saturação do corpo-de-prova atingir cerca de 90 %, sendo essa porcentagem calculada por meio da Fórmula 7.

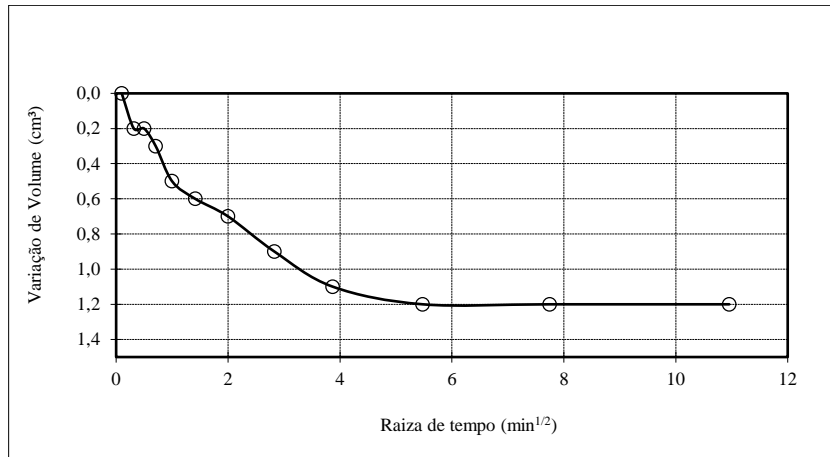
$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (7)$$

Finalizada a saturação do corpo de prova, foi aplicado uma tensão de confinamento na câmara do equipamento triaxial no sentido de levar o material ao adensamento, ou seja, reduzir gradualmente e evolutivamente sua porosidade. Nessa etapa, elevamos a pressão confinante de tal forma que a diferença entre essa pressão e a interna ao corpo de prova fosse a mesma utilizada durante a ruptura dele na prensa triaxial. As tensões de confinamento usadas no ensaio foram de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

As leituras realizadas nesta etapa foram feitas em intervalos de tempo pré-determinados de (0s, 5 s, 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2h, 4h e 8h) com suas respectivas variações de volume. As deformações são então lidas até a constância de valor, quando se considera o fim desta fase. Esses dados são então plotados como nos

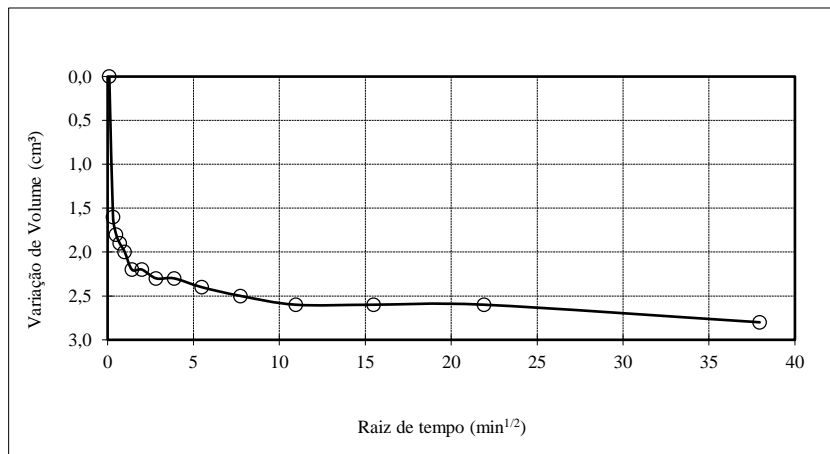
gráficos 1, 2 e 3.

Gráfico 1 – Curva de adensamento para tensão de confinamento de 50 kPa.



Fonte: Autor, 2019.

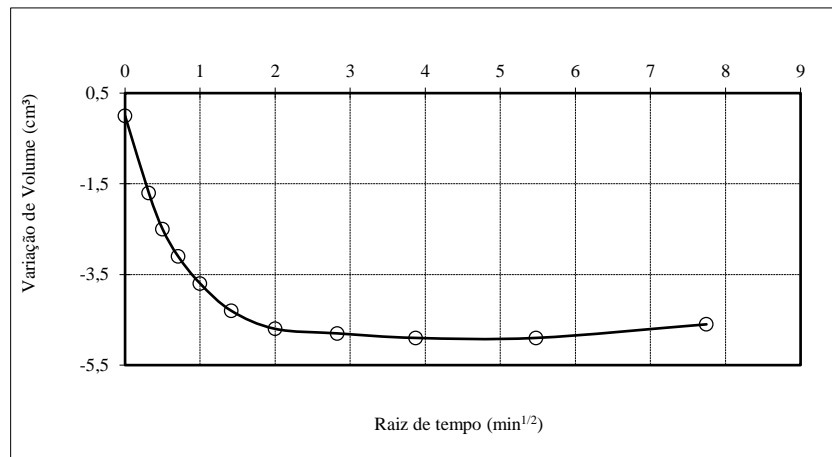
Gráfico 2 – Curva de adensamento para tensão de confinamento de 100 kPa.



Fonte: Autor, 2019.



Gráfico 3 – Curva de adensamento para tensão de confinamento de 200 kPa.



Fonte: Autor, 2019.

Com isso, pode-se observar com essas curvas de adensamento a continuação de um padrão horizontal, isto é, para um determinado tempo, a consolidação do corpo se manteve constante. Com esse processo, é possível determinar aproximadamente a velocidade a ser adotada durante o rompimento.

Por último, ocorre o cisalhamento propriamente dito, sendo que, para sua realização terá que ser determinada as condições de drenagem que desejam ser empregadas, podendo ser de três tipos segundo Pinto (2006):

- a) Ensaio adensado e drenado: É representado pelo símbolo CD (de “consolidated-drained”) ou S (de “slow”), pois consiste em um ensaio lento, que utiliza velocidades baixas para realizar a dissipação das pressões neutras. Neste processo ocorre a permanente drenagem do corpo de prova, sendo que as tensões de confinamento e a tensão axial são aplicadas lentamente e com a válvula aberta para que a água possa sair, fazendo que a pressão neutra seja praticamente nula ou desprezível. Essa água expulsa é levada para uma bureta no exterior, que tem a função de controlar a variação do volume da água.
- b) Ensaio adensado não drenado: Conhecido pela simbologia CU (de “consolidated undrained”) e R (de “rapid”), pois também é chamado de ensaio rápido pré-adensamento. Consiste na aplicação da tensão confinante e deixa dissipar a tensão neutra correspondente, indicando assim a resistência não drenada em função da tensão de adensamento.
- c) Ensaio não drenado e não adensado: Indicados pela simbologia UU (de “unconsolidated undrained”) e Q (de “quick”), pois é um ensaio rápido que não ter tempo para drenagem. Nesse ensaio o corpo de prova é submetido à pressão



confinante, e depois, ao carregamento axial, sem que se permita qualquer drenagem.

Na realização do presente trabalho foi escolhido na execução do cisalhamento a condição de adensado e drenado (CD). O ensaio de carregamento axial é feito pelo procedimento de deformação controlada, na qual a câmara é colocada numa prensa, e então, é deslocada para cima para pressionar o pistão, sendo que essa carga é medida por meio de um anel dinamométrico externo. A pressão feita pelo líquido é chamada de tensão confinante ( $\sigma_3$ ) e a tensão causada pela carga axial é conhecida por tensão desvio e consiste na diferença entre as tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ .

Durante o carregamento ocorre a medição da tensão axial e da deformação vertical atuante, sendo que esta é calculada a partir da divisão pela altura inicial medida do corpo de prova. A tensão desvio é representada em função da deformação, indicando assim o valor máximo que ocorre a ruptura, definindo o círculo de Mohr.

Todas essas etapas do ensaio estão demonstradas na Figura 28.

Figura 28 – Etapas do ensaio triaxial.



Fonte: Autor, 2019.

## 4.6 Utilização do programa GeoStudio 2019 (SEEP/W e SLOPE/W)

### 4.6.1 Análises de fluxo

A análise de fluxo foi feita para o regime de operação da barragem em nível máximo. Para a execução das análises foi utilizado o software SEEP/W da GeoSlope, sendo que o fluxo bidimensional foi analisado no maciço da barragem considerando um regime permanente.

#### 4.6.1.1 SEEP/W

O *SEEP/W* consiste em um componente do pacote GeoStudio, desenvolvido pela GeoSlope. Este programa modela a percolação de água no interior dos solos através da teoria dos elementos finitos, podendo considerar o fluxo em regime transiente ou estacionário. Com esse software é possível calcular o movimento das águas considerando o solo saturado, baseando-se na lei de Darcy, ou não saturado.

No presente trabalho foi adotado o modelo saturado, que considera uma região do solo que sempre ficará abaixo da superfície freática, e analisado o fluxo no regime permanente ou estacionário. Além disso, foram utilizados os valores obtidos do coeficiente de permeabilidade e da umidade natural do solo, como mostrado na Tabela 5 e ilustrados no Apêndice A.

Tabela 5 – Coeficientes de permeabilidade inseridos no programa *SEEP/W*.

<b>Maciço da barragem</b>	
K (Coeficiente de permeabilidade)	$4,73 \times 10^{-7}$ m/s
<b>Aluvião</b>	
K (Coeficiente de permeabilidade)	$1 \times 10^{-5}$ m/s

Fonte: Autor, 2019.

#### 4.6.2 Análise da estabilidade dos taludes

Para a análise da estabilidade dos taludes foi utilizado o software SLOPE/W da GeoSlope. Com a seção transversal modelada foram realizadas simulações considerando a operação do reservatório em nível máximo.

##### 4.6.1.2 SLOPE/W

Esse software foi desenvolvido como ferramenta na análise da estabilidade de estruturas de terra. Para essa análise foi utilizado o método de Morgenstern-Price, o qual considera tanto o esforço normal como o de cisalhamento entre as fatias, sendo o fator de segurança (FS) obtido por meio de equações de equilíbrio das forças e dos momentos.

A modelagem é realizada em função das seguintes características: geometria do talude, geometria das superfícies potenciais de ruptura, poropressões, parâmetros de resistência (peso específico, ângulo de atrito e coesão). Além disso, foi adotado o método de entradas e saídas na análise da estabilidade para a superfície de pesquisa. A Tabela 6 e o Apêndice A mostra alguns parâmetros do maciço que são inseridos no programa.

Tabela 6 – Parâmetros de resistência inseridos no programa *SLOPE/W*.

<b>Maciço da barragem</b>	
Peso específico	28,81 kN/m <sup>3</sup>
Ângulo de atrito ( $\phi$ )	30,3°
Coesão efetiva (c)	7,6 kPa

Fonte: Autor, 2019.

## 5 RESULTADOS

Este tópico apresenta e analisa os resultados obtidos através dos ensaios geotécnicos, promovendo um maior conhecimento das características do solo, além de mostrar as conclusões geradas a partir da simulação da barragem pelos softwares SEEP/W e SLOPE/W.

### 5.1 Ensaios de caracterização e resistência

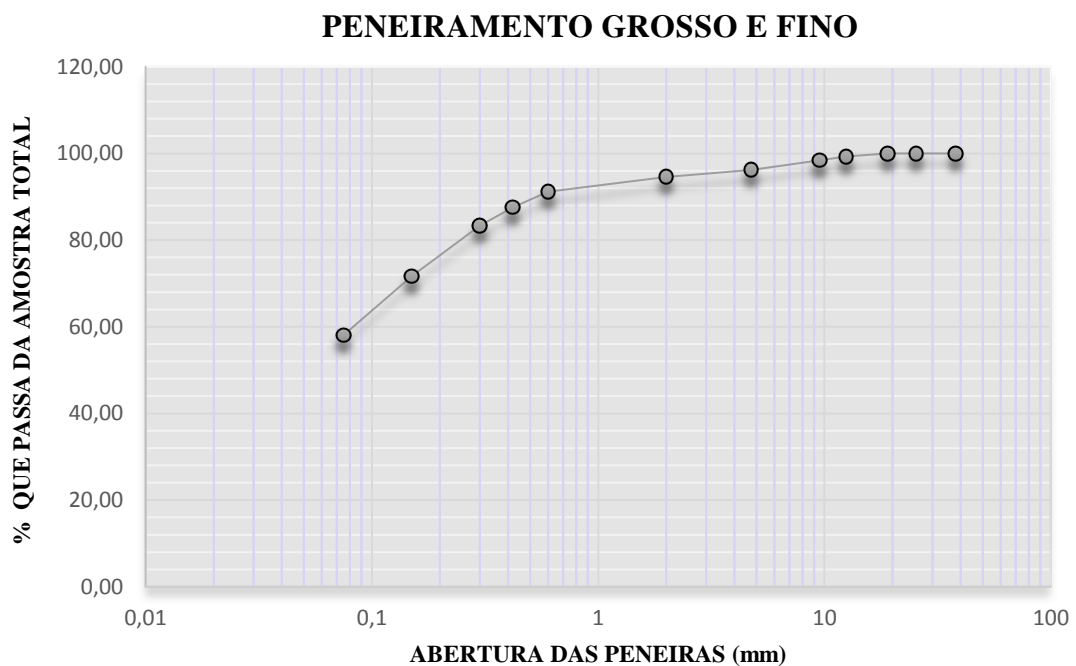
Os diversos ensaios executados em laboratório apresentam a finalidade de promover a caracterização e análise da resistência do solo.

#### 5.1.1 Análise granulométrica, umidade natural e densidade real

A granulometria foi estudada pela combinação de análises por peneiramento e por sedimentação. O apêndice B mostra os resultados obtidos em laboratório para o peneiramento grosso e fino do solo analisado.

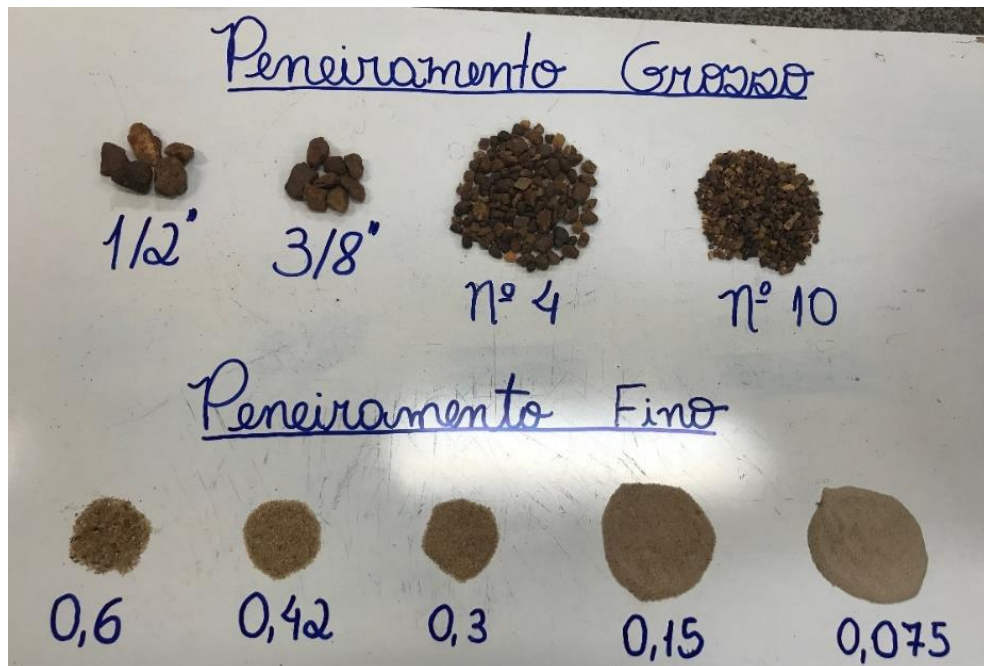
No Gráfico 4 é mostrada a distribuição granulométrica do solo para o peneiramento. Posteriormente será exibida a distribuição completa, incluindo o material que sofreu sedimentação. A Figura 29 expõe os resultados obtidos no laboratório.

Gráfico 4 – Distribuição granulométrica por peneiramento.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 29 – Peneiramento grosso e fino.



Fonte: Autor, 2019.

Por meio da análise dos resultados do peneiramento da amostra é possível determinar as porcentagens dos materiais constituintes do solo de acordo com diversos sistemas. Utilizando a sistemática da American Society for Testing and Materials (ASTM) a composição da amostra corresponde a cerca de 3,84 % de pedregulhos, 1,57 % de areia grossa, 7,04 % de areia média, 29,45% de areia fina e 58,10 % de silte e argila.

A determinação da porcentagem do tamanho das partículas constituintes da fração fina do solo, no caso silte e argila, é feita a partir do ensaio de sedimentação com a finalidade de se obter a composição granulométrica total do solo. Para a realização dos cálculos do diâmetro dessas partículas é necessário inicialmente determinar a umidade do solo e a densidade real do mesmo.

A umidade natural do solo foi determinada em laboratório através da estufa, sendo realizados três ensaios e em seguida efetuado a média, obtendo o valor de aproximadamente 4,50 %.

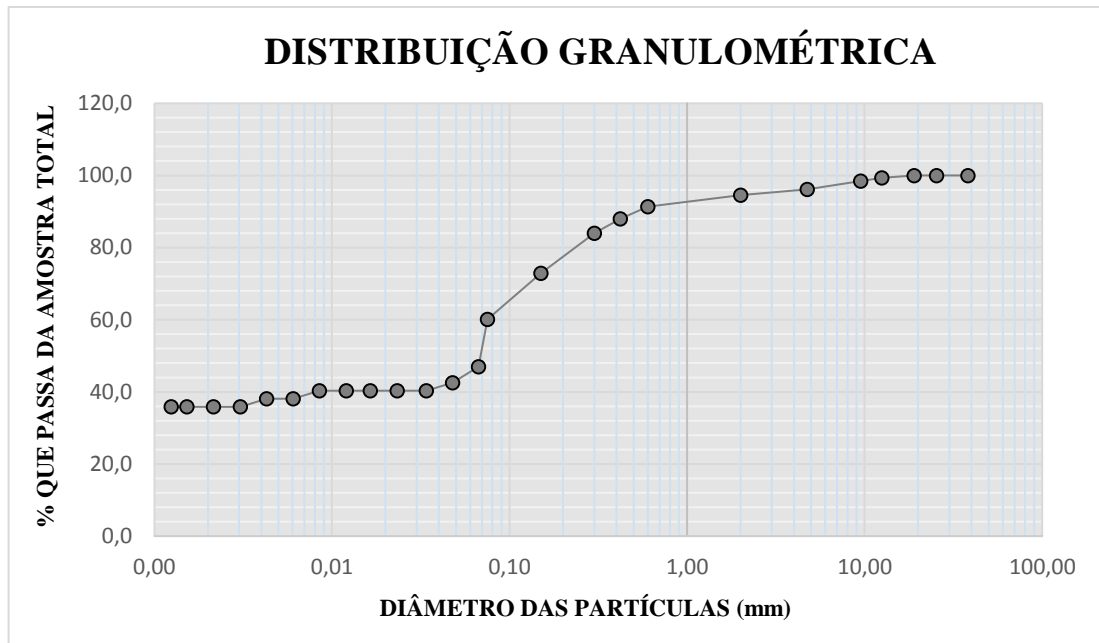
A densidade real dos grãos foi determinada por meio do ensaio do picnômetro através da realização de três ensaios e, em seguida feito a média dos três resultados obtendo o valor 2,72 g/cm<sup>3</sup>, como mostrado no apêndice B.

Assim, com esses parâmetros calculados anteriormente e com a leitura do densímetro do ensaio de sedimentação, é possível realizar o cálculo dos diâmetros das partículas que passam na peneira de número 200, além da determinação da porcentagem de cada uma,

completando a análise granulométrica do solo. Os dados obtidos tanto em laboratório como através de fórmulas pré-determinadas estão dispostos no apêndice B.

No Gráfico 5, é evidenciada a distribuição granulométrica completa, incluindo a sedimentação da amostra analisada.

Gráfico 5 – Distribuição granulométrica completa.

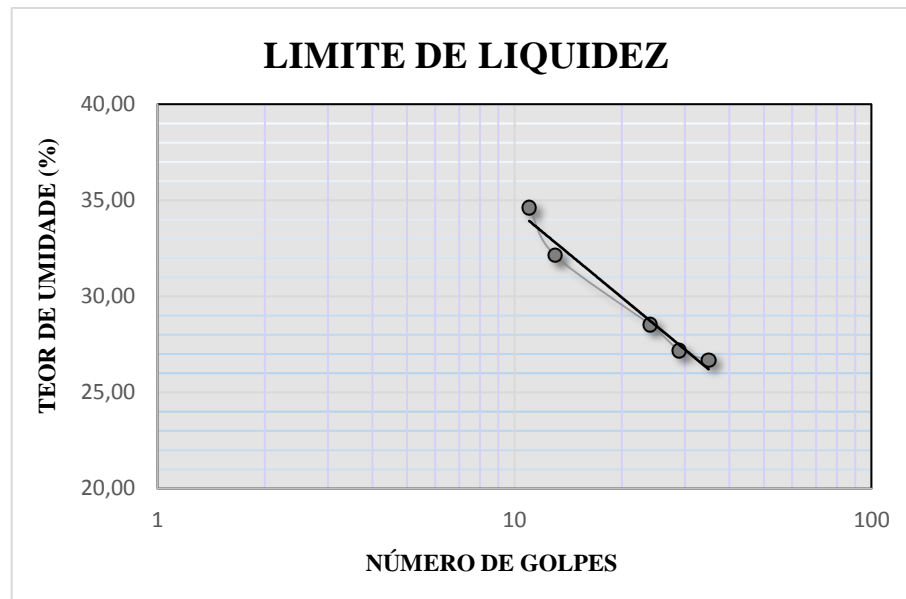


Fonte: Autor, 2019.

### 5.1.2 Limites de Atterberg e classificação do solo

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, para o solo em seu estado natural, foram realizados com a finalidade da obtenção do índice de consistência do solo estudado. O limite de liquidez (LL) foi obtido a partir do gráfico 6, que mostra a relação entre o número de golpes e a umidade.

Gráfico 6 – Limite de liquidez.



Fonte: Autor, 2019.

Os valores calculados para o limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade estão mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados sobre os resultados obtidos para os limites de Atterberg.

<b>LL</b>	<b>28,01</b>
<b>LP</b>	<b>16,09</b>
<b>IP</b>	<b>11,92</b>

Fonte: Autor, 2019.

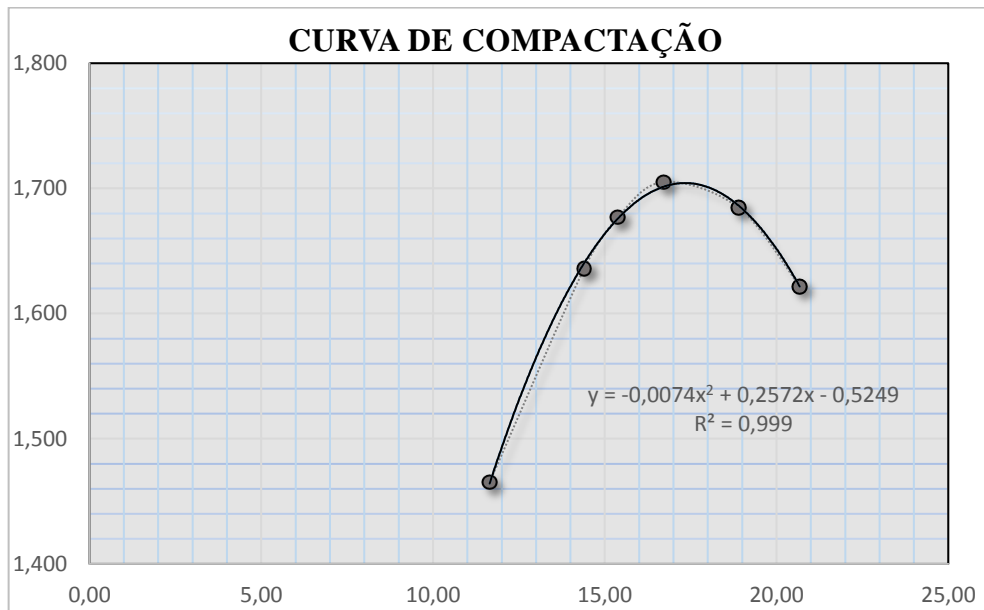
A partir desses valores é possível realizar a classificação do solo, na qual foi utilizada dois sistemas de classificação, a unificada (SUCS) e o sistema rodoviário de classificação (HRB). Pelo SUCS o solo é um CL, ou seja, uma argila de baixa compressibilidade, apresentando a vantagem de o material ser mais impermeável, formando uma barreira adequada contra a água. Pelo HRB, o solo se enquadra no grupo A-6, que nesse sistema é considerado um solo de regular a ruim para ser usado no subleito e não apropriado para o uso em bases do pavimento, pois apresenta um  $IP > 6$  e um  $LL > 25$ . Este último método, apesar de não ser utilizado na construção de barragens, foi considerado por conta das jazidas de obtenção do solo da barragem se localizarem próximos a áreas que ainda não apresentam estradas pavimentadas, servindo assim, como banco de dados para possíveis construções, explicitando que o solo, por esse sistema, não é adequado para o uso em camadas de base do pavimento.

### 5.1.3 Ensaio de Compactação

A curva de compactação foi elaborada com o objetivo principal de determinar a umidade ótima do solo analisado ( $w_{ótima}$ ) e o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_d$ ).

O Gráfico 7 mostra a relação entre a variação da massa específica seca máxima do solo analisado e a suas correspondentes umidades ótimas.

Gráfico 7 – Curva de compactação utilizando energia Proctor normal.



Fonte: Autor, 2019.

A partir da determinação da curva é possível estipular a equação mais próxima dela, e assim, determinar a umidade ótima do solo ( $w_{ótima}$ ), que corresponde a 17,38 %, e a massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ), que equivale a 1,71 g/cm<sup>3</sup>. Segundo Souza Pinto (2006), de uma forma geral, os solos argilosos apresentam densidades secas baixas e umidades ótimas elevadas, o que explica esses resultados, já que o solo analisado corresponde a uma argila de baixa compressibilidade.

### 5.1.4 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi executado a partir de uma carga variável e foram obtidos os resultados mostrado na Tabela 8.



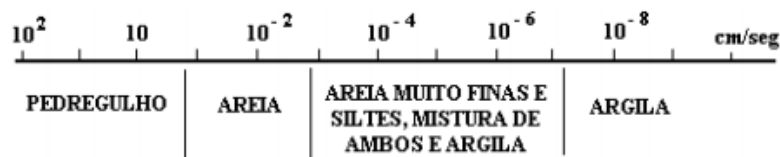
Tabela 8 – Coeficiente de permeabilidade.

hi (cm)	hf (cm)	T(s)	k (cm/s)
145	137,8	180	$4,60 \times 10^{-5}$
145	137,8	180	$4,60 \times 10^{-5}$
145	137,2	180	$4,99 \times 10^{-5}$
145	137,4	180	$4,86 \times 10^{-5}$
<b>MÉDIA</b>			<b><math>4,73 \times 10^{-5}</math></b>

Fonte: Autor, 2019.

Pelos resultados analisados foi determinado o coeficiente de permeabilidade do solo, que apresentou o valor de  $4,73 \times 10^{-5}$  cm/s, mostrando assim, estar dentro dos padrões estabelecidos para um solo argiloso, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Faixas de permeabilidade.

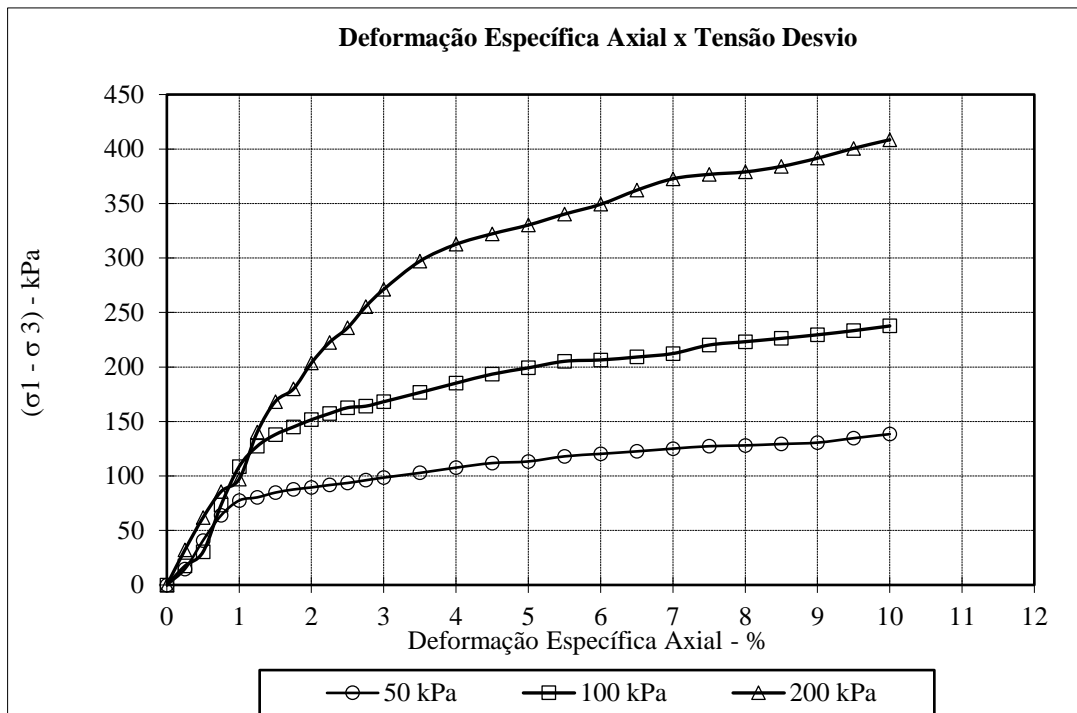


Fonte: Caputo, 1923.

### 5.1.5 Ensaio de resistência triaxial CD

Durante o carregamento ocorre a medição do acréscimo da tensão axial atuante e o deslocamento vertical do corpo de prova. A deformação específica vertical corresponde a divisão desse deslocamento vertical pela altura inicial do corpo de prova à medida que as tensões desviadoras vão crescendo, permitindo assim o traçado das curvas tensão x deformação axial, como mostrado Gráfico 8.

Gráfico 8 – Tensão desvio x Deformação axial.



Fonte: Autor, 2019.

Observa-se pelas curvas que quanto maior a tensão confinante, maior o valor da tensão desviadora que provoca a ruptura.

Os corpos de prova após serem submetidos à ruptura por meio de diferentes tensões confinantes estão destacados na Figura 31.

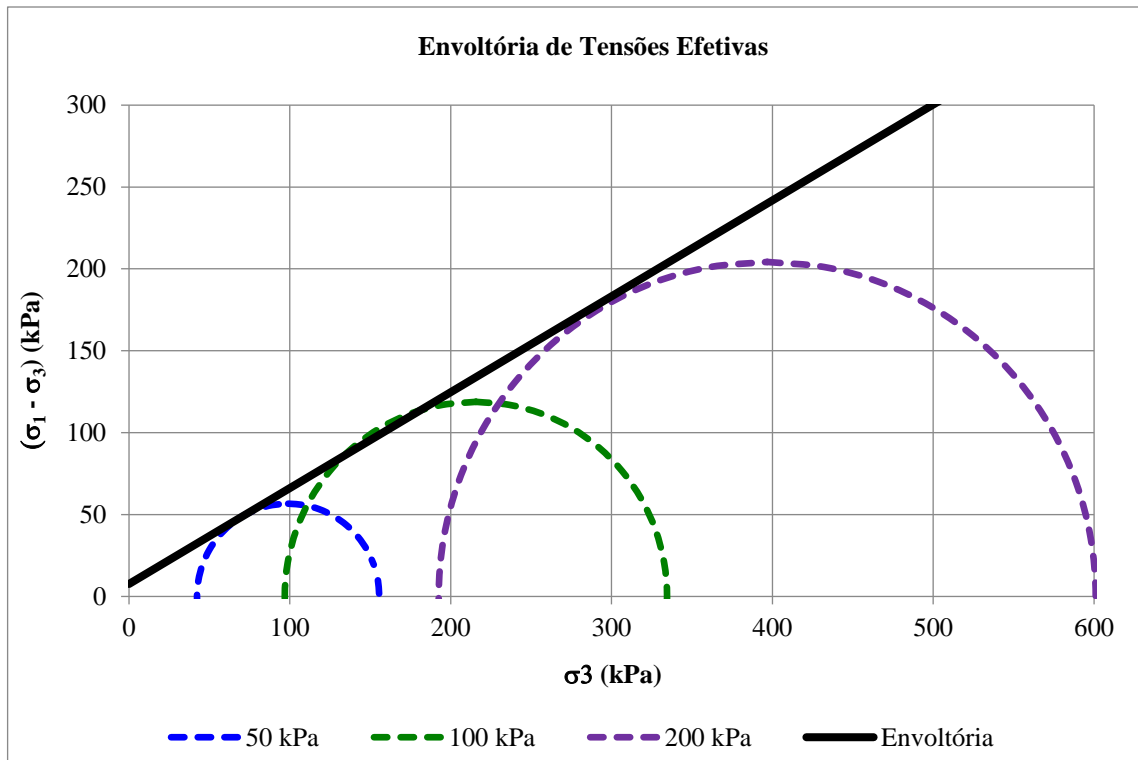
Figura 31 – Corpos de prova submetidos ao rompimento.



Fonte: Autor, 2019.

As tensões desviadoras em função da deformação específica, mostradas anteriormente, indicam o valor máximo corresponde à ruptura. A situação de ruptura é definida por meio do círculo de Mohr. O Gráfico 9 apresenta os círculos de Mohr e a envoltória de Mohr - Coulomb, para as três tensões confinantes ensaiadas.

Gráfico 9 – Círculo de Mohr e envoltória Mohr-Coulomb.



Fonte: Autor, 2019.

Fica evidente que no traçado da envoltória de resistência é necessário a determinação do valor de  $\sigma_1$ , pois é de extrema importância na definição da tensão desvio, e assim, mostrar o crescimento dos círculos durante o ensaio. A Tabela 9 apresenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo argiloso obtidos do ensaio triaxial CD.

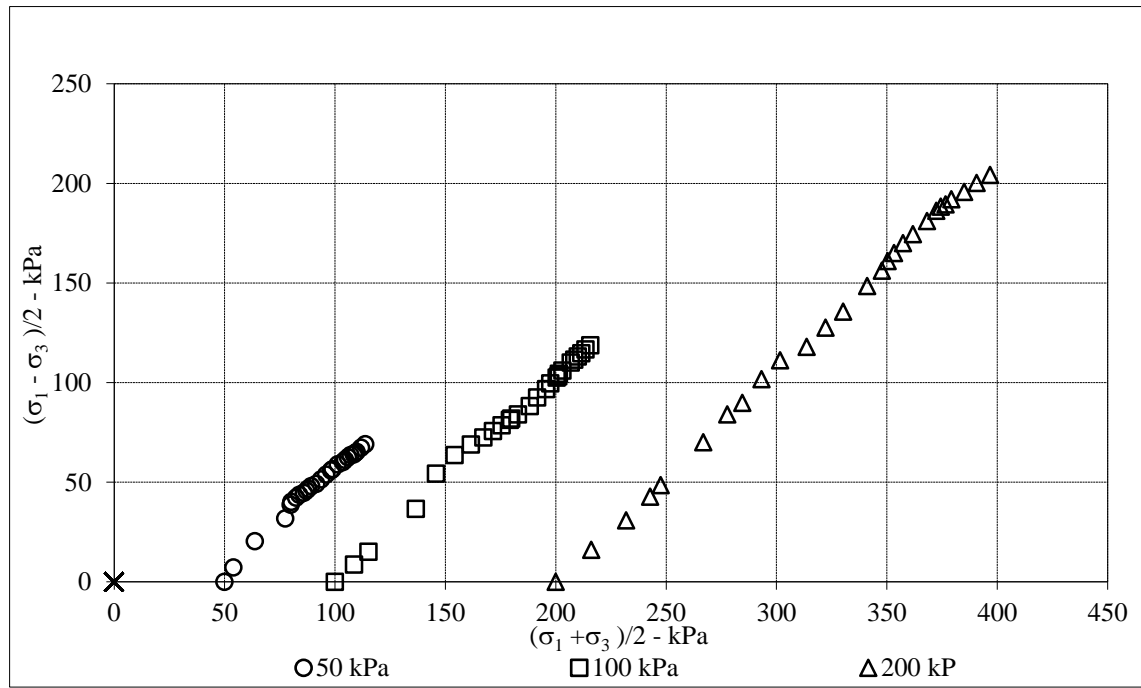
Tabela 9 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo analisado.

Parâmetros	
Ângulo de atrito ( $\varphi$ )	30,3 °
Coesão (c)	7,6 kPa

Fonte: Autor, 2019.

O Gráfico 10 apresenta as trajetórias de tensões efetivas do ensaio CD, mantendo-se constantes as tensões confinantes e aumentando-se as tensões axiais.

Gráfico 10 – Trajetória de tensões efetivas.

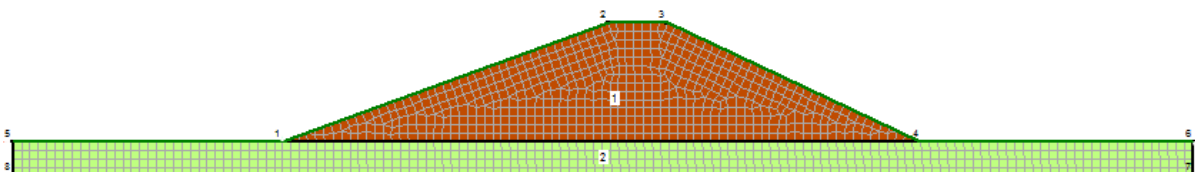


Fonte: Autor, 2019.

## 5.2 Análises de fluxo

A seção da barragem que foi utilizada no programa, mostrada na Figura 32, foi definida a partir de 8 pontos, e então, analisada uma malha de elementos finitos contendo 1283 nós e 1148 elementos, fornecidos pelo SEEP/W. A região 1 corresponde ao maciço da barragem, composto de uma argila de baixa compressibilidade. Já a região 2, refere-se ao solo da base do barramento, constituído de um material um pouco mais permeável que o primeiro.

Figura 32 – Malha de elemento finitos.



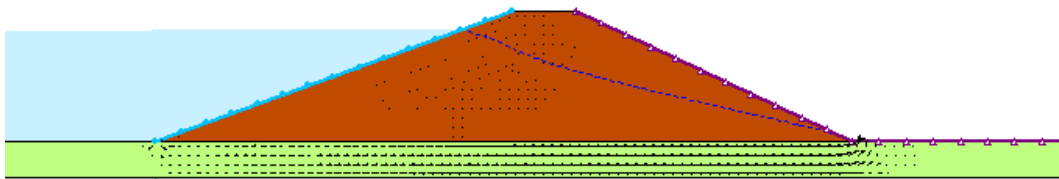
Fonte: SEEP/W, 2019.

Como características dos materiais foram inseridos os coeficientes de permeabilidade de  $4,73 \times 10^{-7}$  m/s para a região do maciço, obtido através do ensaio de permeabilidade, e foi adotado  $1 \times 10^{-5}$  m/s para a região do aluvião, considerando uma permeabilidade maior nessa área, devido ser um solo menos argiloso do que o maciço da barragem, mas inserido na mesma faixa de permeabilidade proposta por Caputo, como mostrado na Figura 30.

As condições de contorno empregadas nas análises de fluxo permanente são referentes a uma carga hidráulica de 6 m a montante, referentes a diferença de cota máxima entre o maciço e o sangradouro do barramento, atuando em um regime de operação máximo. Além disso, é empregado no talude de jusante a condição de drenagem, já que a barragem não apresenta filtros ou outros elementos drenantes.

Após esse procedimento é iniciada a solução do problema, obtendo-se a posição da linha freática, que separa a zona saturada da não-saturada, como mostrada na Figura 33.

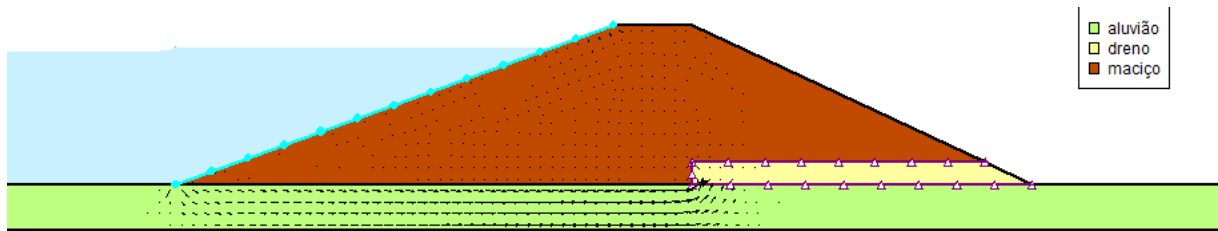
Figura 33 – Linha freática.



Fonte: SEEP/W, 2019.

Pode-se verificar que o fluxo, indicado pelos vetores, ocorrerá preferencialmente pelo solo da base da barragem, uma vez que seu coeficiente de permeabilidade é maior que a do maciço. O ideal seria que o barramento possuísse algum elemento de drenagem, visando assim, provocar o redirecionamento do fluxo, evitar a erosão interna e reduzir as pressões intersticiais na porção de jusante, o que aumenta a estabilidade da obra. A exemplificação de como a barragem funcionaria com um elemento de drenagem está mostrado na Figura 34.

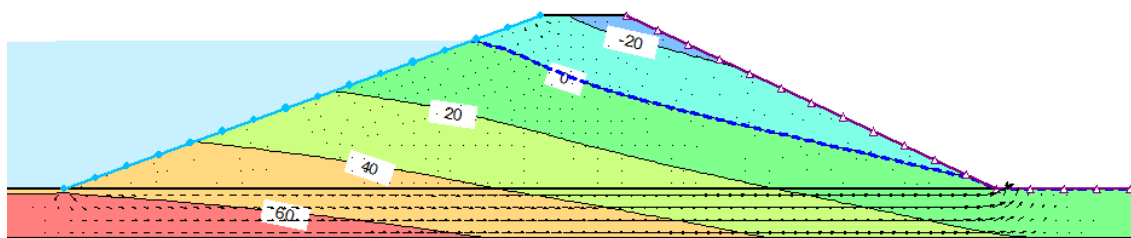
Figura 34 – Barragem com um elemento drenante.



Fonte: SEEP/W, 2019.

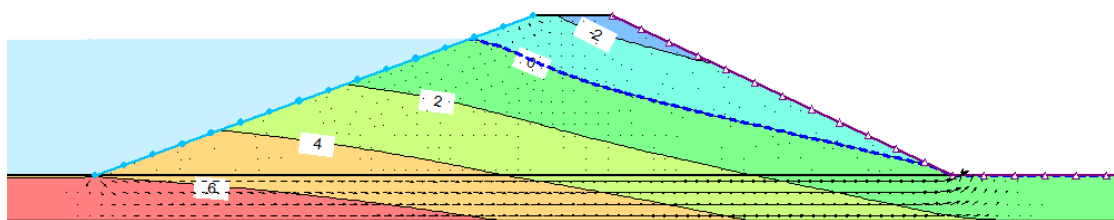
Também são obtidas as distribuições das poropressões e da pressão total ao longo das isolinhas da barragem, como está ilustrada nas Figuras 35 e 36, respectivamente.

Figura 35 – Distribuição das poropressões.



Fonte: SEEP/W, 2019.

Figura 36 – Distribuição das pressões totais.



Fonte: SEEP/W, 2019

### 5.3 Análises de estabilidade

A análise da estabilidade em regime permanente propicia a avaliação da segurança da barragem na condição de operação em nível máximo. Com isso, as forças de percolação tendem a promover uma maior estabilidade no talude de montante e uma instabilidade no talude de jusante, por isso, a análise só foi realizada para esse último talude.

Para esse estudo, foram utilizados alguns parâmetros de resistência, como o ângulo de atrito e a coesão, obtidos a partir do ensaio triaxial CD, além do peso específico saturado, de 20,81 kN/m<sup>3</sup>, sendo obtido através das fórmulas mostradas na Fórmulas 8 e 9.

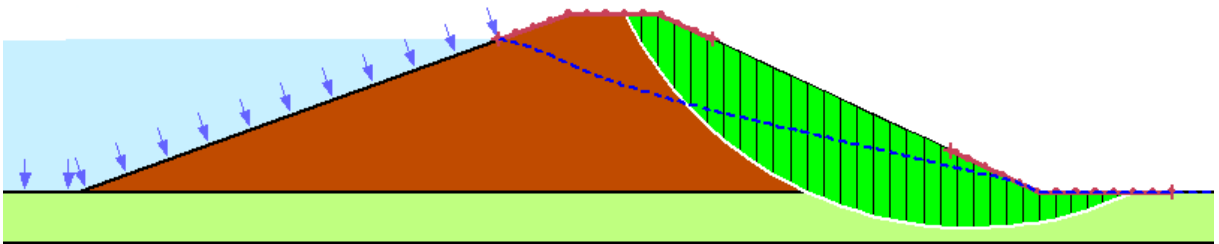
Esse peso específico foi considerado, pois boa parte do maciço está em contato com a água, além de ser escolhida a opção de saturado na realização da análise.

$$\left\{ \begin{array}{l} n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \\ \gamma_{sat} = \gamma_s - (\gamma_s - \gamma_w) \cdot n \end{array} \right. \quad (8)$$

$$(9)$$

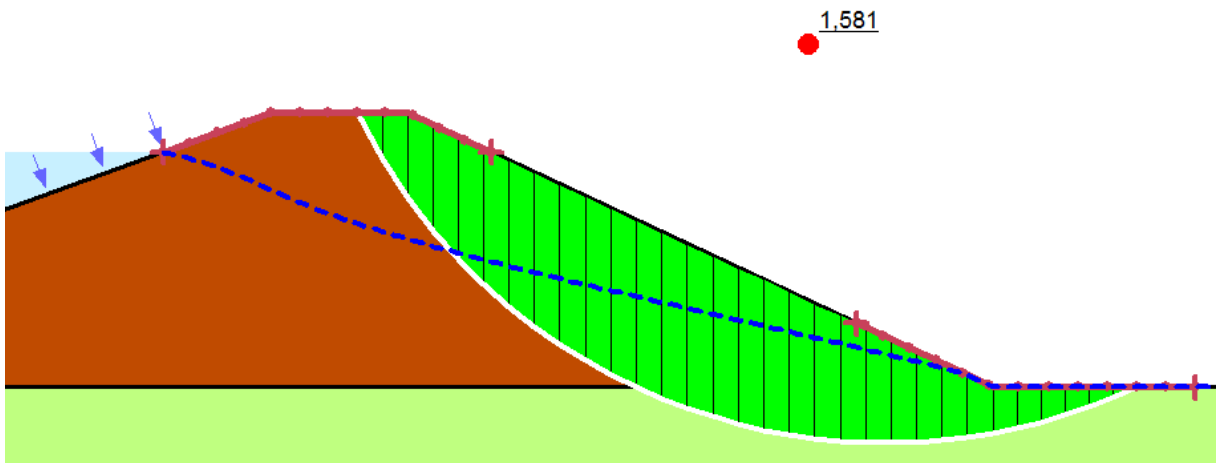
Desse modo, ocorreu a determinação da superfície de ruptura e do fator de segurança (FS) crítico por meio da verificação do problema no software SLOPE/W. Esse resultado está mostrado nas Figuras 37 e 38.

Figura 37 – Superfície crítica.



Fonte: SLOPE/W, 2019.

Figura 38 – Fator de segurança crítico.



Fonte: SLOPE/W, 2019.

A superfície potencial de ruptura abrange o talude de jusante e parte do aluvião da base da barragem. Isso pode ter sido ocasionado pelo aumento da distribuição das poropressões, já que essa região apresenta um maior fluxo de água, proporcionando assim, uma diminuição da tensão normal e, conseqüentemente, da resistência.

Da Cruz (1996), estabeleceu fatores de segurança mínimos na análise da estabilidade dos taludes. Esses valores estão mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Fatores de segurança mínimos na análise da estabilidade dos taludes.

<b>Condição de solicitação</b>	<b>Talude</b>	<b>FS mínimo</b>
Final de construção	Montante	1,3
	Jusante	1,3
Regime permanente de operação	Montante	1,5
	Jusante	1,5
Rebaixamento do reservatório	Montante	1,1

Fonte: Carvalho e Paschoalin Filho, 2004.

Com isso, o fator de segurança de 1,581 encontrado na análise em regime permanente de operação máxima, indica que a barragem se encontra em um estado satisfatório de segurança.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi desenvolvido a partir do estudo do solo, realizado por meio de diversos ensaios laboratoriais, visando a utilização dos resultados como base para a execução de simulações de fluxo e estabilidade.

Através da análise granulométrica foi possível determinar que o solo apresenta uma grande porção de finos, cerca de 58,10 %. Esse resultado, juntamente com os dos limites de Atterberg, possibilitaram a efetuação da classificação do solo.

A classificação pelo Sistema Unificado (SUCS) caracteriza o solo como um CL, argila de baixa compressibilidade, apresentando uma vantagem na utilização em barramentos por ser um material mais impermeável, e assim, promover uma melhor vedação. Já pelo Sistema Rodoviário (H.R.B), o solo se enquadra no grupo A-6, que por esse modo de classificação é considerado como não apropriado para o uso em camadas de base do pavimento, já que seu índice de plasticidade é maior que 6 e o limite de liquidez maior que 25.

Com relação aos resultados do ensaio de compactação e de permeabilidade, a amostra obteve uma umidade ótima de 17,38 %, um peso específico aparente seco de 1,71 g/cm<sup>3</sup> e um coeficiente de permeabilidade de 4,73 x 10<sup>-5</sup> cm/s, sendo esses valores coerentes para o solo do tipo argiloso.

O ensaio de resistência triaxial adensado e drenado (CD) forneceu dados relacionados a resistência do solo ao cisalhamento, sendo eles, o ângulo de atrito ( $\phi$ ), de 30,3°, e a coesão, de 7,6 kPa. Essas informações foram de extrema importância na análise da estabilidade do talude de jusante usando o software SLOPE/W.

Por meio das simulações de fluxo referentes ao período de operação da barragem no nível máximo e considerando o regime permanente, foi possível a determinação da linha freática e, conseqüentemente, da zona de saturação, além da distribuição das poropressões e da pressão total ao longo da barragem. Com essa análise, foi possível realizar uma comparação relacionada aos vetores de fluxo no estado real da barragem e se esta possuísse um elemento simples de drenagem, evidenciando que com o sistema drenante o fluxo seria redirecionado e reduziria as pressões atuantes na porção do talude de jusante, aumentando assim a estabilidade da obra.

As simulações relacionadas a estabilidade do talude de jusante forneceram a superfície crítica, ou seja, a provável faixa caso ocorra a ruptura, e o fator de segurança (FS) crítico, apresentando o valor de 1,581. Através desse resultado, foi possível realizar uma comparação por meio de dados bibliográficos, e então, verificar que a barragem encontra valores satisfatórios de segurança.

## REFERÊNCIAS

- ADAM. ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS. **Roteiro básico para o dimensionamento de pequenas barragens de terra no estado de MG.** Disponível em: [http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos\\_aplicativos/roteiro\\_dimensionamento\\_barragens.html](http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos_aplicativos/roteiro_dimensionamento_barragens.html). Acesso em: 14 out. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de segurança de barragens 2017.** Brasília: ANA, 2018.
- ALMEIDA, Gil Carvalho Paulo de. **Caracterização física e classificação dos solos.** [S. l.]: UFJF, 2005.
- ARAÚJO, José Carlos de; MELO, Antônio Macário Cartaxo de; FREITAS, João César Amorim de. Otimização da altura de uma barragem de terra homogênea. **Revista Tecnologia**, [s. l.], v. 25, n. 1, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457:** amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459:** solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502:** rochas e solos: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180:** solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181:** solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182:** solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14545:** solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- BOURDEAUX, G. H. R.M. **Projeto e construção de barragens de terra e enrocamento.** São Paulo: [s. n.], 1980.
- BRASIL. **Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010.** Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens [...], cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei n 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4 da Lei 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília: Presidência da República, 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm). Acesso em: 10 set. 2019.

CAMPOS, Arq Iberê M. **Conheça os três tipos principais de solo: areia, silte e argila.** Disponível em: <http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=9&Cod=59>. Acesso em: 10 set. 2019.

CAMPOS, N. B. **Dimensionamento de reservatórios.** Fortaleza: UFC, 1996.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 6. ed. rev e ampl. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988.

CARVALHO, David de. **Barragens uma introdução para graduandos.** Campinas, SP: UNICAMP, 2011.

CASTRO, Michele Alves de. **Utilização de solos saprolíticos na construção de pequenas barragens de terra.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil- Geotecnia) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

CEARÁ. SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Plano Estadual de Recursos Hídricos.** Fortaleza: Atlas, 1992. v. 1.

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto.** [S. l.]: Oficina de Textos, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 093/94: solos: determinação da densidade real.** [S. l.]: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/10-ES: pavimentação: base estabilizada granulometricamente: especificação de serviço.** Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006.

FEITOSA, Fernando A. C.; VASCONCELOS, Antônio; COLARES, Jaime. **Programa de recenseamento de fontes de abastecimento por água subterrânea no estado do Ceará: diagnóstico do município de Ibicuitinga.** [S. l.]: CPRM, 1998.

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PLANEJAMENTO DO CEARÁ. **Atlas do Ceará.** Fortaleza: IPLANCE, 1997. 1 atlas. Escala 1:1.500.000.

GAIOTO, N. **Barragens de terra e enrocamento.** São Carlos: USP, 1998.

GAIOTO, N. **Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento.** São Carlos: USP, 2003.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, Marco Antônio Ferreira. **Água: sem ela seremos o planeta Marte de amanhã.** [S. l.]: EMBRAPA, 2011. Disponível em: [http://www.redepeabirus.com.br/redes/form/post?pub\\_id=86583](http://www.redepeabirus.com.br/redes/form/post?pub_id=86583). Acesso em: 22 set. 2019.

GON, Fernanda dos Santos et al. **Caracterização geotécnica através de ensaios de laboratórios de um solo de diabásio da região de Campinas/SP**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil- Geotecnia) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

JENNY, Hans. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. [S. l.]: Courier Corporation, 1994.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. **Soil mechanics**. New York: Wiley, 1969.

MARANGON, Márcio. **Tópicos em geotecnia e obras de terra**. Juiz de Fora: UFJF, 2004.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MASSAD, Faiçal. **Curso básico de Geotecnia-Obras de terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3. ed. [Rio de Janeiro]: Terratek, 2007.

PANORAMA das águas. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>. Acesso em: 31 jul. 2019.

PASCHOALIN FILHO, João Alexandre et al. **Utilização de solo residual de diabásio como elemento de fundação e material de construção de aterros compactados para barragens de pequeno porte**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RAUPP, Fabiano Maury; BEUREN, Ilse Maria. Metodologia da pesquisa aplicável às ciências sociais. In: BEUREN, Ilse Maria *et al* (org.). **Como elaborar trabalhos monográficos em contabilidade: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2004. p.77-88.

REICHERT, José Miguel; REINERT, Dalvan José. **Propriedades físicas do solo**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2007.

SANTOS, Danilo Reinheimer dos; REICHERT, José Miguel. **Gênese e propriedades do solo**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2007.

SAYÃO, A. **Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento**. Rio de Janeiro: PUC, 2009.

SILVA, Antônio Carlos Ribeiro de. **Metodologia de pesquisa aplicada à contabilidade**. São Paulo: Atlas, 2007.

SLONGO, Guilherme Roberto. **Desenvolvimento de um sistema triaxial servo-controlado e avaliação do comportamento mecânico de um solo residual de Biotita Gnaisse**. 2008.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2008.

SOUZA, Andriele Nascimento de. **Análise do comportamento da barragem engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves-Açu/RN-durante sua construção, primeiro enchimento e operação do reservatório.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

STEPHENS, T. **Manual sobre pequenas barragens de terra, guia para a localização, projeto e construção.** Roma: FAO, 2011. v. 64.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos: segunda parte, hidráulica dos solos.** [S. l.]: McGraw Hill, 1977.

## APÊNDICE A – MODELOS DE DADOS INSERIDOS NO SOFTWARE SEEP/W E SLOPE/W

Figura A.1 – Modelo saturado adotado no programa SEEP/W.

The screenshot shows the 'Dados - Materiais' window with the 'Hidráulica' tab selected. The material 'MACIÇO DA BARRAGEM' is highlighted in the list. The 'Modelo do Material' is set to 'Saturado'. The input fields are as follows:

Propriedade	Valor
Conductividade X - Saturada:	4,73e-07 m/seg
Teor de Umid. Vol. Sat.:	0,45
Compressibilidade:	0 /kPa
Relação kv'/kv':	1
Rotação:	0 °
Poropressão Inicial:	0 kPa

Fonte: SEEP/W, 2019.

Figura A.2 – Dados relacionados a resistência inseridos no SLOPE/W..

The screenshot shows the 'Dados - Materiais' window with the 'Estabilidade de Taludes' tab selected. The material 'MACIÇO DA BARRAGEM' is highlighted. The 'Modelo do Material' is set to 'Mohr-Coulomb'. The 'Básico' sub-tab is active, showing the following input fields:

Propriedade	Valor
Peso Específico:	20,81 kN/m³
Coesão Efetiva (C):	7,6 kPa
Phi:	30,3 °

Fonte: SLOPE/W, 2019.

**APÊNDICE B – TABELAS DE DADOS OBTIDAS A PARTIR DOS ENSAIOS  
REALIZADOS EM LABORATÓRIO**

Tabela B.1 – Resultado para o peneiramento.

<b>PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL</b>						
<b>Peneiras</b>	<b>Material Retido</b>			<b>% que passa</b>	<b>Peneiras em mm</b>	
	<b>Peso (g)</b>	<b>% Amostra total</b>	<b>% acumulada</b>			
<b>Grosso</b>	1,5"	0	0,00	0	100,00	38,1
	1"	0	0,00	0	100,00	25,4
	3/4"	0	0,00	0	100,00	19
	1/2"	12,97	0,68	0,68	99,32	12,5
	3/8"	17,37	0,91	1,59	98,41	9,5
	N° 4	43,17	2,26	3,84	96,16	4,75
	N° 10	30,12	1,57	5,41	94,59	2
<b>Fino</b>	N° 30	2,29	3,42	8,83	91,17	0,6
	N° 40	2,42	3,61	12,45	87,55	0,42
	N° 50	2,8	4,18	16,63	83,37	0,3
	N° 100	7,86	11,73	28,36	71,64	0,15
	N° 200	9,07	13,54	41,90	58,10	0,075

Fonte: Autor, 2019.



Tabela B.2 – Dados do ensaio de densidade real.

<b>DENSIDADE REAL</b>					
<b>Amostra 1</b>		<b>Amostra 2</b>		<b>Amostra 3</b>	
P1	29,61	P1	29,33	P1	29,4
P2	39,68	P2	39,36	P2	39,5
P3	85,8	P3	86,31	P3	85,75
P4	79,4	P4	79,92	P4	79,43
$\delta t$	2,74	$\delta t$	2,76	$\Delta t$	2,67
temperatura (°C)	23	temperatura (°C)	23	temperatura (°C)	23
Fator de correção	0,9993	Fator de correção	0,9993	Fator de correção	0,9993
<b><math>\delta 20</math></b>	<b>2,74</b>	<b><math>\delta 20</math></b>	<b>2,75</b>	<b><math>\delta 20</math></b>	<b>2,67</b>
<b>Média</b>			<b>2,72</b>		

Fonte: Autor, 2019.

Tabela B.3 – Dados do ensaio de sedimentação.

<b>SEDIMENTAÇÃO</b>							
<b>Tempo decorrido (s)</b>	<b>Leitura Densímetro</b>	<b>T (°C)</b>	<b>Correção</b>	<b>Leitura corrigida</b>	<b>Altura de queda (cm)</b>	<b>% que passa da amostra total</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>
30	22	25	2,14	21,06	14,19	47,0	0,0667
60	20	25	2,14	19,06	14,54	42,5	0,0478
120	19	25	2,14	18,06	14,71	40,3	0,0340
240	19	25	2,14	18,06	13,80	40,3	0,0233
480	19	25	2,14	18,06	13,80	40,3	0,0165
900	19	25	2,14	18,06	13,80	40,3	0,0120
1800	19	25	2,14	18,06	13,80	40,3	0,0085
3600	18	25	2,14	17,06	13,97	38,1	0,0060
7200	18	25	2,14	17,06	13,97	38,1	0,0043
14400	17	25	2,14	16,06	14,14	35,8	0,0030
28800	17	25	2,14	16,06	14,14	35,8	0,0021
57600	17	25	2,14	16,06	14,14	35,8	0,0015
86400	17	25	2,14	16,06	14,14	35,8	0,0012

Fonte: Autor, 2019.