



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

**KAENNA INGRID DA SILVA LOUREIRO**

**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE SOLO DO MUNICÍPIO DE RUSSAS-CE  
E EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO EM UMA BARRAGEM DE SEÇÃO TRANSVERSAL  
TÍPICA - ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES**

**RUSSAS**

**2020**

KAENNA INGRID DA SILVA LOUREIRO

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE SOLO DO MUNICÍPIO DE RUSSAS-CE E  
EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO EM UMA BARRAGEM DE SEÇÃO TRANSVERSAL TÍPICA  
- ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES

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

Orientadora: Profa. Me. Andriele Nasci-  
mento de Souza

RUSSAS

2020

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)

---

L553c Loureiro, Kaenna Ingrid da Silva.  
Caracterização geomecânica de solo do município de Russas-CE e exemplo de utilização em uma barragem de seção transversal típica : Análise da estabilidade de taludes / Kaenna Ingrid da Silva Loureiro. – 2020.  
69 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,  
Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2020.

Orientação: Profa. Ma. Andriele Nascimento de Souza.

1. Solo. 2. Caracterização. 3. Estabilidade de taludes. I. Título.

CDD 620

---

KAENNA INGRID DA SILVA LOUREIRO

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE SOLO DO MUNICÍPIO DE RUSSAS-CE E  
EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO EM UMA BARRAGEM DE SEÇÃO TRANSVERSAL TÍPICA  
- ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES

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

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Me. Andriele Nascimento de  
Souza (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Me. Tahyara Barbalho Fontoura  
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

---

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

À minha família, por sua capacidade de acreditar  
no estudo e investir em mim.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pilares: minha família e meus grandes amigos.

Mãe obrigada por toda compreensão com meu temperamento, especialmente durante a elaboração deste trabalho. Este sonho está sendo possível pois você sempre valorizou o estudo acima de tudo. Agradeço por ter me escolhido para ser sua filha e me amar incondicionalmente. Não há palavras que expressem o tamanho do meu amor.

Pai, agradeço por todos os momentos, inclusive os de ausência. Tenho muito orgulho de sua história, que você carrega com leveza, e da pessoa corajosa, engraçada e sonhadora que eu vejo em você. Seus conselhos, embora tímidos, são valiosos.

Tias queridas: Paula e Ua. Que eu seja forte, prestativa e honesta como vocês. Tia Paula, que simplifica a vida e bota nossos pés no chão. Tia Ua, “antes de tudo, um forte”, obrigada por me ensinar a amar livros, incentivando isto desde que eu era criança.

Tia Daninha, você é tudo: mãe, tia, amiga... Obrigada por me fazer ver que o mundo é vasto e a vida é bela. Encontrar com você nesta vida é um presente e não tem gratidão no mundo que seja suficiente. Obrigada pela compreensão nos dias tristes, pelas inúmeras risadas e pelas reflexões sobre a vida, o universo e tudo mais. Você é luz.

Vovô, que me deixou todos os dias no colégio e é um grande estudioso nas mais variadas áreas do conhecimento. Obrigada! No que depender de sonhos o senhor não envelhecerá nunca! Vovó Dudu obrigada por me ensinar sobre ter paciência com as obras de Deus em nossas vidas e sobre o amor.

Meus irmãos: Leticia, Maria, Anna Clara e Benjamim, primos, familiares e madrastra, nunca esqueçam o valor do estudo, da honestidade e da humildade. Não é um caminho fácil. O mundo é do tamanho das asas de vocês. Quero acompanhar o sucesso e realizações de vocês de pertinho. Obrigada a todos!

Aos grandes amigos que a UFC me trouxe, obrigada por transformarem essa amarga caminhada em uma caminhada mais feliz e cheia de risadas. Alane, Malu, Belle, Letícia, Isa, João Pedro, Gilson, Mateus, João Augusto, Rômulo, Cândido. Obrigada também aos colegas e servidores que me auxiliaram e transmitiram conhecimentos.

Ao meu grande amigo João Pedro, que hoje tenho o encanto de chamar de namorado, obrigada por compartilhar os sonhos comigo, pela calma que você transmite e pela ajuda com o  $\text{\LaTeX}$ . Quero compartilhar com você muitas conquistas ainda.

Alane, obrigada por todo o apoio durante a graduação. Nunca esquecerei todos os

trabalhos, atividades e estudos. Mas foi além disso, você se tornou muito mais. É uma amiga pra vida, para as horas mais felizes e mais tristes. Obrigada por ser meu pontinho de confiança.

Isa, obrigada não somente pela ajuda, neste trabalho, com o  $\text{\LaTeX}$ , mas pelo apoio emocional em todos os momentos difíceis e desafiadores, por escutar minhas lamentações e ser sempre sincera.

Manu, obrigada por toda a ajuda neste trabalho, por escutar meu choro e desespero e me ajudar a encontrar uma saída em meio ao caos. Espero ser uma boa ouvinte para você e uma amiga para todas as horas, como você é para mim.

“Quem tem amor na vida, tem sorte...” E que sorte tenho eu, por ter tanto. Somente gratidão a todos que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho.

“Mas como sabem pode-se encontrar a felicidade mesmo nas horas mais sombrias, se a pessoa se lembrar de acender a luz.”

(Alvo Dumbledore)

## RESUMO

O solo é um elemento estritamente necessário para a construção civil, e diante disso é importante conhecer as características físico-químicas e suas aplicações, como por exemplo na construção de barragens. Caracterizar o solo de uma região que possui impacto socioeconômico, é de fundamental importância no ramo da engenharia civil. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi caracterizar o solo de uma jazida localizada no município de Russas, no interior do Ceará, e analisar o comportamento geomecânico e sua aplicação por meio da análise da estabilidade de taludes de uma barragem de terra. Para isso, utilizou-se ensaios laboratoriais, como análise granulométrica, os limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade), com o uso do Sistema de Unificado de Classificação (SUCS) para classificar o solo, densidade real dos grãos, parâmetros de resistência através do ensaio triaxial, compactação, permeabilidade e por fim, a análise da estabilidade de taludes de uma pequena barragem, através do software GeoStudio2020. Os resultados demonstraram que, no teste de limite de liquidez, a umidade encontrada foi de 18,21%, e no limite de plasticidade foi de 11%. Na análise granulométrica, de acordo com o SUCS, o solo apresentou característica SC, ou seja, uma areia argilosa. A densidade dos grãos foi de  $2,66\text{g/cm}^3$ , a umidade ótima da amostra de solo ( $w_{ótima}$ ) foi de 9,5% e o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_d$ ) foi de  $1,702\text{g/cm}^3$ . A permeabilidade verificada foi de  $1,10 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ , e a resistência pelo ensaio triaxial demonstrou parâmetros de coesão e ângulo de atrito iguais a 14,4kPa e  $29^\circ$ . Por fim, a análise da estabilidade de taludes evidenciou que o fator de segurança do talude de jusante foi de 1,844 e do de montante foi de 3,406. É possível concluir que o solo estudado no presente trabalho, apresentou os critérios físicos desejáveis, além de margem de segurança para sua possível aplicabilidade em barragens, que são obras comuns na região, pela questão da escassez de água.

**Palavras-chave:** Solo. Análise geomecânica. Estabilidade de taludes

## ABSTRACT

The soil is a strictly necessary element for civil construction. It is important to know its physicochemical characteristics and their applications, such as in the construction of dams. Characterizing and qualifying the soil of a region that has a socioeconomic impact is of fundamental importance in the field of civil engineering. Thus, the goal of this work is to characterize the soil of a deposit located in the city of Russas, in the inland of Ceará, and to qualitatively analyze its application through the analysis of the slope stability of an earth dam. For that, laboratory tests were used, such as granulometric analysis, the Atterberg limits (liquidity limit and plasticity limit), using the Unified Classification System (UCSS), to classify the soil, real grain density, parameters of resistance through the triaxial test, compaction, permeability and finally, the slope stability analysis of a small dam, using the GeoStudio2020 software. The results showed that, in the liquidity limit test, the humidity found was 18,21%, and the plasticity limit was 11%. In the granulometric analysis, according to the UCSS, the soil showed characteristic SC, that is, a clayey sand. The grain density was  $2,66\text{g/cm}^3$ , the optimum moisture of the soil sample ( $w_{otima}$ ) was 9,5% and the maximum apparent dry weight ( $\gamma_d$ ) was  $1,702\text{g/cm}^3$ . The verified permeability was  $1,10 \times 10^{-4}$  cm/s, and the triaxial test resistance showed the cohesion parameters and angle of attrition at 14.4kPa and  $29^\circ$ . Finally, the analysis of the slope stability showed that the downstream slope safety factor was 1,844 and the upstream slope was 3,406. It is possible to conclude that the soil studied in this current work presented the desirable physical and qualitative criteria, as well as a safety margin for its possible applicability in dams, which are common construction in the region, due to water scarcity issue.

**Keywords:** Soil. Qualitative analysis. Slope stability

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Três fases do solo . . . . .	21
Figura 2 – Perfil do solo em camadas . . . . .	22
Figura 3 – Escala granulométrica da ABNT . . . . .	23
Figura 4 – Terminologia da Classificação SUCS . . . . .	24
Figura 5 – Exemplo de graduações . . . . .	25
Figura 6 – Carta de Plasticidade . . . . .	26
Figura 7 – Esquema para a classificação pelo Sistema Unificado . . . . .	27
Figura 8 – Barragens de terra homogêneas e zoneadas . . . . .	28
Figura 9 – Elementos Fundamentais de Barragens . . . . .	29
Figura 10 – Semiárido brasileiro . . . . .	30
Figura 11 – Número de estabelecimentos agropecuários no Brasil . . . . .	31
Figura 12 – Distribuição dos empregos no Ceará . . . . .	32
Figura 13 – Exportações na Região do Vale do Jaguaribe . . . . .	33
Figura 14 – Distribuição de empregos nas microrregiões do Vale do Jaguaribe . . . . .	34
Figura 15 – Empregos dos municípios da microrregião do Baixo Jaguaribe . . . . .	35
Figura 16 – Principais setores de empregos em Russas . . . . .	35
Figura 17 – Desenho experimental . . . . .	36
Figura 18 – Localização da jazida . . . . .	37
Figura 19 – Coleta da amostra na jazida . . . . .	37
Figura 20 – Destorroamento da amostra . . . . .	38
Figura 21 – Amostra representativa do material . . . . .	39
Figura 22 – Etapas do Ensaio de Sedimentação . . . . .	41
Figura 23 – Conjunto de peneiras utilizadas no peneiramento fino. . . . .	42
Figura 24 – Preparação da amostra para o ensaio de LL. . . . .	43
Figura 25 – Preparação da amostra para o golpeamento . . . . .	43
Figura 26 – Retirada da amostra representativa no ponto de união . . . . .	44
Figura 27 – Cilindro moldado fragmentado e gabarito . . . . .	45
Figura 28 – Cápsulas do ensaio de LP . . . . .	45
Figura 29 – Índice de plasticidade . . . . .	46
Figura 30 – Densidade real dos grãos por meio do picnômetro . . . . .	47
Figura 31 – Resumo do ensaio de compactação . . . . .	48

Figura 32 – Etapas do ensaio de permeabilidade . . . . .	49
Figura 33 – Montagem da célula triaxial . . . . .	51
Figura 34 – Montagem do corpo de prova na câmara triaxial . . . . .	52
Figura 35 – Curva Granulométrica . . . . .	54
Figura 36 – peneiramento grosso . . . . .	55
Figura 37 – Peneiramento fino . . . . .	55
Figura 38 – Gráfico de Liquidez . . . . .	56
Figura 39 – Curva de compactação . . . . .	57
Figura 40 – Curvas de compactação . . . . .	58
Figura 41 – Faixas de permeabilidade . . . . .	58
Figura 42 – Deformação específica axial X Tensão desvio . . . . .	59
Figura 43 – Envoltória de Tensões Efetivas . . . . .	60
Figura 44 – Modelagem da barragem . . . . .	60
Figura 45 – Superfície crítica de ruptura - Talude de jusante . . . . .	61
Figura 46 – Fator de segurança crítico - Talude de jusante . . . . .	62
Figura 47 – Superfície crítica de ruptura - Talude de montante . . . . .	62
Figura 48 – Fator de segurança crítico - Talude de montante . . . . .	63
Figura A.1 – Propriedades da malha . . . . .	67
Figura A.2 – Malha de Elementos Finitos . . . . .	67
Figura A.3 – Diagrama da fatia e poligono de forças - Talude de jusante . . . . .	68
Figura A.4 – Superfícies de Ruptura - Talude de jusante . . . . .	68
Figura A.5 – Diagrama da fatia e poligono de forças - Talude de montante . . . . .	69
Figura A.6 – Superfícies de Ruptura - Talude de montante . . . . .	69
Figura AN.1 Propriedades dos tipos de solos - Aspectos qualitativos . . . . .	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peneiras do peneiramento grosso . . . . .	40
Tabela 2 – Peneiras do peneiramento fino . . . . .	41
Tabela 3 – Características da barragem . . . . .	53
Tabela 4 – Composição do solo . . . . .	54
Tabela 5 – Resultados obtidos para os limites de Atterberg (em %) . . . . .	56

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FS	Fator de Segurança
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SUCS	Sistema Unificado de Classificação
UFC	Universidade Federal do Ceará

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma_s$	Peso específico real
$\gamma_d$	Peso específico seco máximo
$W_{ótima}$	Umidade ótima
$k$	Coefficiente de permeabilidade
$a$	Área interna do tubo de carga
$L$	Altura do corpo de prova
$A$	Área da seção do corpo de prova
$h_i$	Altura da carga no instante inicial
$h_f$	Altura da carga no instante final
$t$	Tempo de percolação de água pelo corpo de prova
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\sigma$	Tensão Normal
$\sigma_1$	Tensão principal
$\sigma_3$	Tensão confinante
$\phi$	Ângulo de atrito
$c$	Coesão

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	17
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	18
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	19
<b>3.1</b>	<b>Objetivo geral</b>	19
<b>3.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	19
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	20
<b>4.1</b>	<b>Definição e gênese dos solos</b>	20
<b>4.2</b>	<b>Classificação dos solos</b>	21
<b>4.2.1</b>	<i>Classificação SUCS</i>	23
<b>4.3</b>	<b>Barragens</b>	27
<b>4.3.1</b>	<i>Barragens de Terra</i>	28
<b>4.4</b>	<b>Importância das barragens no semiárido</b>	30
<b>4.4.1</b>	<i>Semiárido nordestino</i>	31
<b>4.4.1.1</b>	<i>Estado do Ceará</i>	31
<b>4.4.1.1.1</b>	<i>Vale do Jaguaribe</i>	32
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	36
<b>5.1</b>	<b>Coleta da amostra</b>	36
<b>5.2</b>	<b>Preparo da amostra</b>	38
<b>5.3</b>	<b>Ensaio experimentais</b>	39
<b>5.3.1</b>	<i>Análise Granulométrica</i>	39
<b>5.3.1.1</b>	<i>Peneiramento grosso</i>	40
<b>5.3.1.2</b>	<i>Sedimentação</i>	40
<b>5.3.1.3</b>	<i>Peneiramento fino</i>	41
<b>5.3.2</b>	<i>Limites de Atterberg</i>	42
<b>5.3.2.1</b>	<i>Limite de Liquidez (LL)</i>	42
<b>5.3.2.2</b>	<i>Limite de Plasticidade (LP)</i>	44
<b>5.3.2.3</b>	<i>Índice de Plasticidade (IP)</i>	45
<b>5.3.3</b>	<i>Densidade real dos grãos por meio do picnômetro</i>	46
<b>5.3.4</b>	<i>Compactação</i>	47
<b>5.3.5</b>	<i>Permeabilidade</i>	48

5.3.6	<i>Ensaio Triaxial</i> . . . . .	49
5.4	<b>Utilização do programa GeoStudio 2020(SLOPE/W) para a modelagem de uma barragem de terra genérica</b> . . . . .	53
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> . . . . .	54
6.1	<b>Análise granulométrica</b> . . . . .	54
6.2	<b>Limites de Atterberg</b> . . . . .	55
6.3	<b>Densidade real dos grãos por meio do picnômetro</b> . . . . .	56
6.4	<b>Compactação</b> . . . . .	57
6.5	<b>Permeabilidade</b> . . . . .	58
6.6	<b>Ensaio Triaxial</b> . . . . .	59
6.7	<b>Modelagem da Barragem de Terra</b> . . . . .	60
7	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	64
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	65
	<b>APÊNDICES</b> . . . . .	67
	<b>APÊNDICE A – Dados de entrada da modelagem</b> . . . . .	67
	<b>ANEXOS</b> . . . . .	70
	<b>ANEXO A – Propriedades dos solos</b> . . . . .	70

## 1 INTRODUÇÃO

O solo é um elemento primordial em construções de engenharia civil. Dessa forma, é necessário que suas propriedades sejam estudadas por engenheiros civis a fim de que se possa entender este complexo material. Essa complexidade se dá principalmente devido a heterogeneidade do solo, pois estes mostram variações consideráveis em poucos metros de diferença (DAS; SOBHAN, 2019).

Caputo e Caputo (2015) discorre que as obras realizadas com solos têm origem nos tempos mais remotos, sendo tão antigas quanto a civilização. Assim, foram fundamentais para o desenvolvimento humano.

Castro (2014) classificou o perfil do solo como o conjunto de horizontes, situados em uma seção vertical que vai da superfície até o material originário. Estes perfis representam as características do solo em profundidade. Isto é a base para os estudos como: morfologia do solo, amostragem de material para análises físicas, químicas, biológicas e mineralógicas do solo. Uma das aplicações do solo é na construção de barragens. Massad (2010), afirma que as barragens de terra são as mais utilizadas no Brasil. Isso se dá pela ocorrência topográfica de vales muito abertos e pela grande disponibilidade de material terrosos.

As barragens têm grande importância social, principalmente em locais que apresentam a pluviosidade irregular, como o semiárido brasileiro. Inserido nesse contexto está o município de Russas, que se localiza próximo à capital do Estado do Ceará.

As barragens são estruturas que, apesar da sua importância, têm elevados potenciais de risco intrínsecos à sua utilização. Visto que, possíveis acidentes podem ocasionar perdas ambientais, econômicas e de vidas. Neste sentido, é importante o conhecimento das propriedades geomecânicas dos solos, a fim de se prever o comportamento dessas estruturas e evitar possíveis acidentes.

## 2 JUSTIFICATIVA

A escolha do solo é uma etapa crucial para as construções de engenharia civil. A sua utilização se dá através da ampla aplicação nas obras, como material de construção, como também dá suporte às estruturas, recebendo as cargas através das fundações, e dissipando-as.

O conhecimento das características de um solo desejável é de extrema importância para o profissional da engenharia civil, visto que pretende-se obter os melhores resultados nas obras para evitar possíveis patologias decorrentes da escolha equivocada, garantindo assim a qualidade da obra. É interessante ressaltar a importância do estudo qualitativo do solo através de ensaios físicos e suas aplicações, como por exemplo em uma barragem.

A escolha da jazida do presente trabalho se deu através de critérios de localização. A proximidade do centro do município de Russas e da BR-116 ressalta a larga utilização deste solo em pequenos barramentos encontrados na região. Assim, justifica-se o interesse em estudar tal solo e apontar as suas aplicações.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

- Analisar a aplicabilidade do solo de uma jazida do município de Russas, no interior do Ceará, na utilização da construção de uma barragem de terra.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar o solo de uma jazida localizada no município de Russas, no interior do Ceará;
- Obter as propriedades geotécnicas do solo;
- Classificar o solo por meio do Sistema Unificado de Classificação (SUCS);
- Analisar a estabilidade de taludes de uma barragem de terra genérica executada com este solo através do *software* GeoStudio2020;

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Definição e gênese dos solos

Ortigão (2007) define o solo para a engenharia civil, como o conjunto de partículas originárias da decomposição de rochas, que não necessitam de explosivos para serem escavados.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 6502 (1995), define os solos da seguinte forma: “material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica.”.

A concentração dos tipos de partículas de um solo está diretamente ligada às propriedades químicas da rocha que o originou (PINTO, 2006). A deterioração da rocha ocorre por meio de intemperismo, que está relacionado com processos ligados à ação do tempo. Assim, os diversos tipos de intemperismo são classificados em dois grupos principais: mecânico e químico.

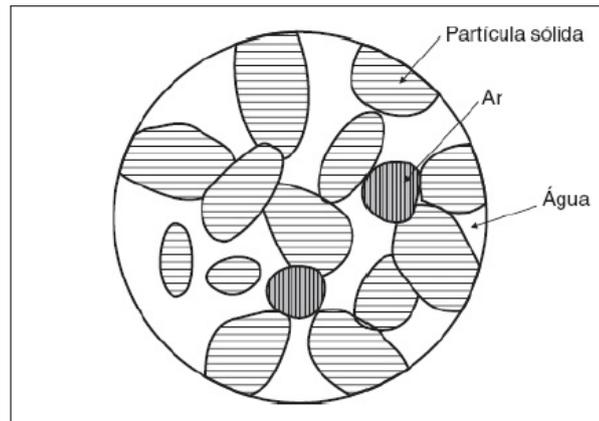
O intemperismo mecânico é ocasionado pela ação mecânica de agentes externos como: a água, o vento e a variação de temperatura. O intemperismo químico está relacionado com os processos químicos que alteram, solubilizam e depositam os minerais da rocha. Para Caputo e Caputo (2015), a água é um agente fundamental da decomposição química das rochas, pois promove mecanismos de ataque como: oxidação, hidratação e carbonatação. É observada também a ação conjunta de todos esses agentes.

Com os fenômenos de decomposição e desintegração das rochas de origem, são formados os diferentes solos encontrados na natureza, como: pedregulhos, areias, siltes e argilas. As argilas, as partículas mais finas, são o produto final destes processos (CAPUTO; CAPUTO, 2015).

Nos solos existem três fases: sólida, líquida e gasosa, como visto na Figura 1. A fase sólida ocupa apenas uma parte do volume. Gon (2011) afirma que esta fase possui características específicas como: tamanho, forma, textura, composição mineralógica, configuração cristalográfica, etc.

O restante do volume, chamado de volume de vazios, é composto por água e ar, constituindo as fases líquida e gasosa, respectivamente. Há ainda casos em que apenas existe água em seus vazios, sendo chamados de solos saturados.

Figura 1 – Três fases do solo



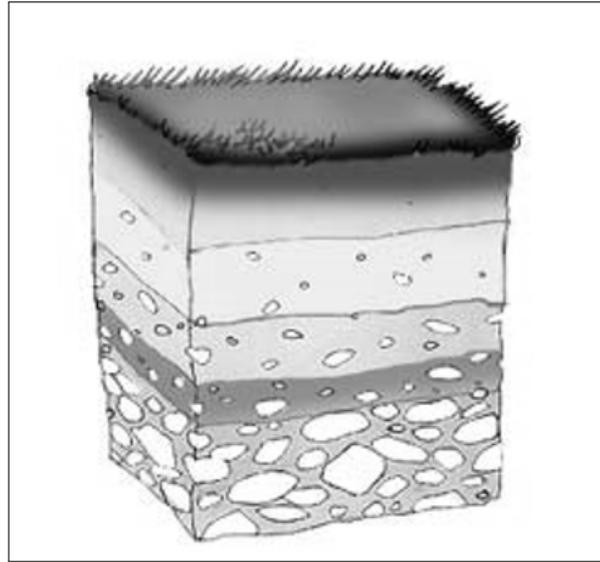
Fonte: Caputo e Caputo (2015)

## 4.2 Classificação dos solos

O agrupamento em conjuntos foi gerado pela variedade do comportamento dos diferentes tipos de solo ante as solicitações da engenharia. A partir disso, são atribuídas propriedades para cada um destes conjuntos. Pode-se classificar o solo levando em consideração diversos parâmetros como: origem, evolução, presença ou não de matéria orgânica, estrutura e preenchimento dos vazios. Para a engenharia, é fundamental prever o comportamento do solo para que se possa fazer análises dos problemas (PINTO, 2006).

Os sistemas de classificação foram elaborados com a intenção de enquadrar em grupos, os diferentes tipos de solo encontrados na natureza, conforme suas características, propriedades e comportamentos geotécnicos (OLIVEIRA *et al.*, 2020). Segundo a Santos *et al.* (2018), os solos estão organizados em horizontes, como vistos na Figura 2, que também são chamados de camadas. Estas estendem-se da superfície até o material inalterado.

Figura 2 – Perfil do solo em camadas



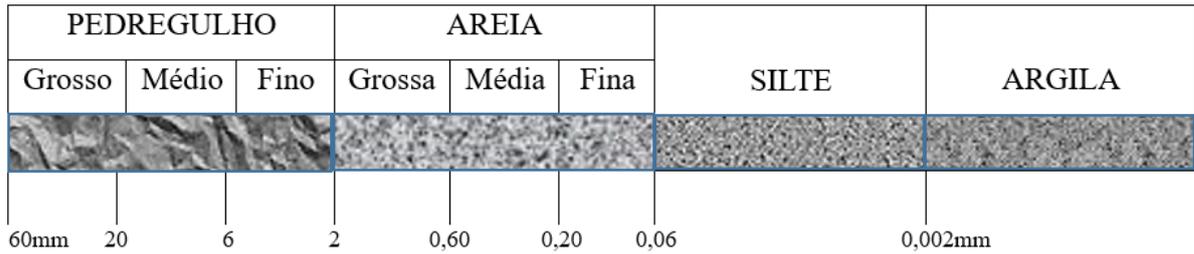
Fonte: [http://www.educacaopublica.rj.gov.br/oficinas/geografia/pedologia/ppp/03\\_todo\\_solo.html](http://www.educacaopublica.rj.gov.br/oficinas/geografia/pedologia/ppp/03_todo_solo.html)

A ocorrência desses processos de decomposição acontece de forma heterogênea e descontínua. Isso se dá pois em certas áreas das rochas, existem minerais mais resistentes à decomposição (CHIOSSI, 2013). Assim, devido à heterogeneidade na ação e na intensidade destes processos, é possível diferenciar os tipos de solos existentes na natureza. Em síntese, os horizontes de um perfil de solo são formados através de processos de adições, perdas, translocações e transformações (PEREIRA *et al.*, 2019).

Em um mesmo solo é normal a coexistência de partículas de tamanhos diferentes. Então, o tamanho das partículas é uma característica primordial para a diferenciação do solo. Para isto, é necessário a análise da granulometria e índices de consistência. Para a realização da análise granulométrica é necessário fixar os valores limites para classificá-lo em faixas. Com isso, separando as partículas mais finas, as intermediárias e as maiores.

É possível encontrar diferentes escalas granulométricas com intervalos que diferem entre si, como por exemplo, a escala pertencente à ABNT, descrita na NBR 6502/95 (1995) (Figura 3).

Figura 3 – Escala granulométrica da ABNT



Fonte: Adaptado de NBR 6502/95 (1995), 2020

Os sistemas de classificação apresentam limitações. Mas segundo Caputo e Caputo (2015), a identificação dos solos por meio desses sistemas torna-se mais prática, bem como pode ser utilizada como ferramenta de transmissão de conhecimento. Além disso, é um meio menos passível à interpretação errônea do profissional.

Das e Sobhan (2019) aponta que os sistemas de classificação promovem uma linguagem comum. Com isso, permite a expressão concisa das características dos diversos tipos de solos que existem. O presente trabalho terá ênfase no Sistema Unificado de Classificação (SUCS). Segundo Das e Sobhan (2019), classificação muito utilizada para fins geotécnicos em geral.

#### 4.2.1 Classificação SUCS

A classificação SUCS, Sistema Unificado de Classificação, também chamado de Unified Classification System (U.S.C.), foi originalmente proposto por Casagrande, em 1942, para utilização em obras de aeroportos. Esse sistema promove a classificação sistemática por meio de simplificações (DAS; SOBHAN, 2019). Pinto (2006) afirma que esse sistema é largamente empregado por geotécnicos, principalmente em barragens de terra.

A classificação se dá pelo conjunto de duas letras, como apresentado na Figura 4. A primeira letra significa o tipo principal de solo e a segunda, a característica do mesmo. Se a porcentagem de finos for inferior a 50%, o solo é de granulação grossa, representado por: G ou S. Se maior que 50%, tem-se então um solo de granulação fina, representado pelas letras: M, C ou O.

Figura 4 – Terminologia da Classificação SUCS

G	pedregulho
S	areia
M	silte
C	argila
O	solo orgânico
W	bem graduado
P	mal graduado
H	alta compressibilidade
L	baixa compressibilidade
Pt	turfas

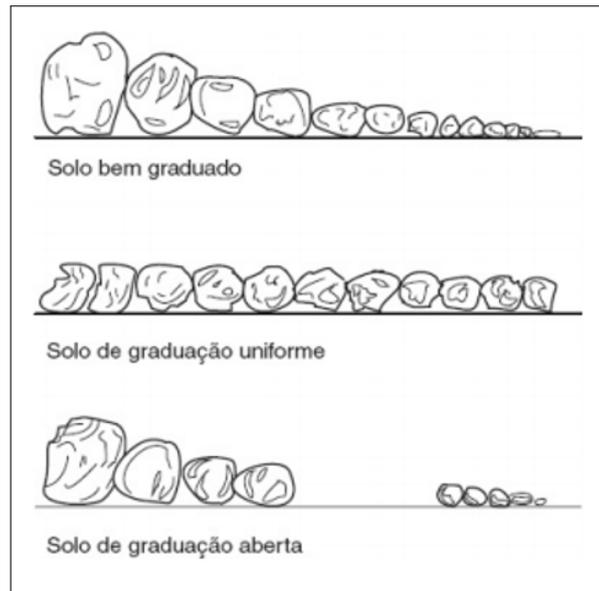
Fonte: Pinto (2006)

Os solos de granulação grossa têm como característica a distribuição da graduação dos grãos. Ou seja, podem ser “bem graduados” ou “mal graduados”.

A existência de solos ditos “bem graduados” pode ser traduzida, no âmbito da engenharia, como melhor comportamento. Pois com a existência de grãos de diversos tamanhos é possível obter melhores resultados nos quesitos resistência e menor compressibilidade. Isso ocorre pelo fato de as partículas menores ocuparem os vazios correspondentes às maiores (PINTO, 2006).

Já nos “mal graduados” há a predominância de um tamanho peculiar, conforme a Figura 5. O que confere uma curva granulométrica bem menos extensa, ao longo de diâmetros variados.

Figura 5 – Exemplo de graduações

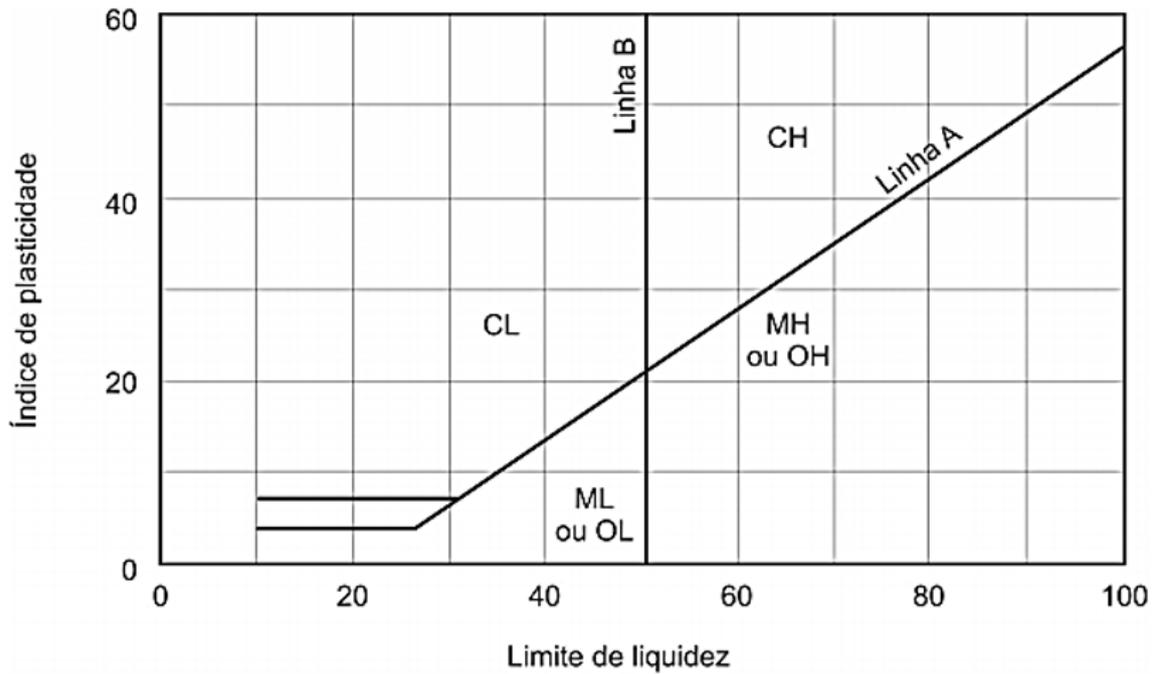


Fonte: Caputo e Caputo (2015)

Nos solos de granulação fina, a característica secundária é a compressibilidade, que está relacionada com os índices de consistência. Pinto (2006) afirma que normalmente solos são mais compressíveis quanto maior o valor de Limite de Liquidez. Com isso, os solos finos são classificados secundariamente como alta compressibilidade ou baixa compressibilidade.

Assim, com os valores de Índice de Plasticidade e Limite de Liquidez é possível localizar na Carta de Plasticidade, apresentada na Figura 6, a classificação correspondente ao solo.

Figura 6 – Carta de Plasticidade

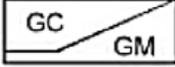
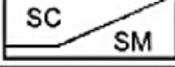
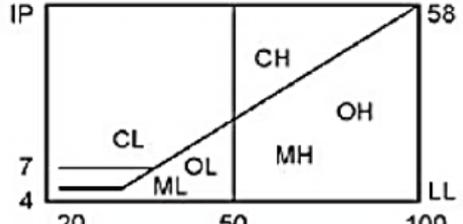


Fonte: Pinto (2006)

A linha A separa os solos argilosos dos siltosos e orgânicos. Segundo Pinto (2006), os solos orgânicos diferem dos siltosos pela cor, pois aqueles apresentam coloração mais escura. A linha B faz a divisão dos solos de baixa compressibilidade dos de alta compressibilidade.

Na Figura 7 é representado o esquema para tornar mais intuitiva a classificação pelo Sistema Unificado de Classificação.

Figura 7 – Esquema para a classificação pelo Sistema Unificado

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3	
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3	
		% P #200 > 12	GC GM 	
	S > G : S	5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.	
		% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3	
		% P #200 > 12	SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3	
		SC SM 		
		5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.	
% P #200 > 50	C	CL		
		CH		
	M	ML		
		MH		
	O	OL		
		OH		

Fonte: Pinto (2006)

### 4.3 Barragens

Chiossi (2013) define barragem como um elemento estrutural que é construído transversalmente à direção do escoamento de um curso d'água. Assim, retendo esta água, é criado um reservatório artificial com destinação ao armazenamento. Além de reter água, as barragens também podem ser construídas para o reter outros líquidos. Como rejeitos e detritos, para fins de armazenamento ou controle (CAMPOS, 2020).

Existem diversos tipos de barragens, como: 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.

Cada um desses tipos deve ser escolhido com o devido cuidado de analisar alguns aspectos. Como por exemplo: geológico-geotécnico, hidrológico-hidráulico, topográfico; materiais de empréstimo, custo, prazo, clima e construtivo (MASSAD, 2010).

As barragens são construídas com diversos objetivos, tais como: geração de energia, regularização de vazões, abastecimento, controle de inundações e irrigação. Esses objetivos podem ser pensados individualmente ou em conjunto.

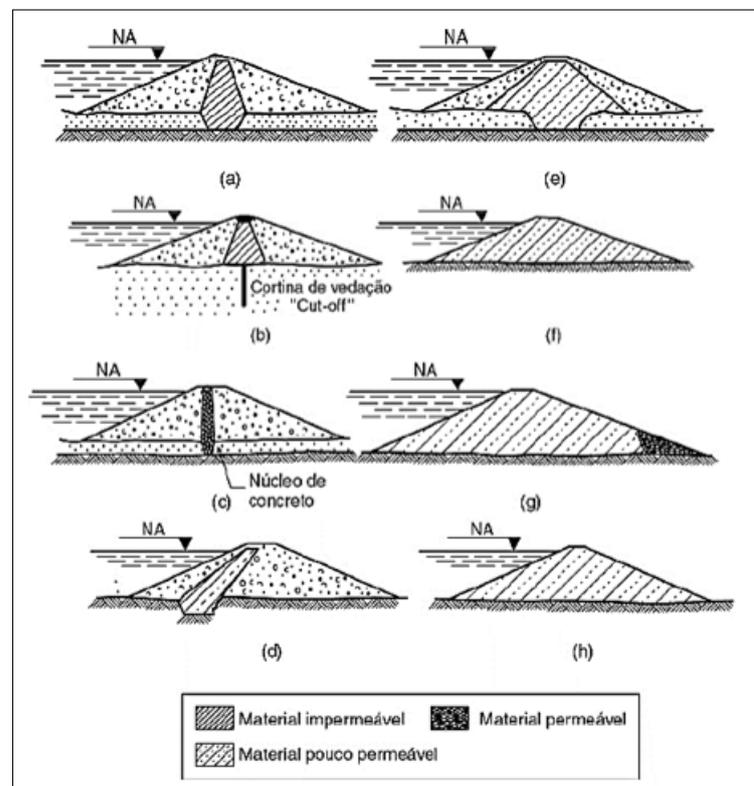
### 4.3.1 Barragens de Terra

Inicialmente as barragens eram compactadas por pisoteamento, seja por meio de animais ou ação humana. Além disso, eram homogêneas e tinham seu material transportado manualmente. Em 1820 foi introduzido por Telford a aplicação de núcleos argilosos que garantem a estanqueidade (MASSAD, 2010). A ocorrência de barragens de terra no Brasil é datada do início do século XX, no Nordeste pelo plano de obras de combate à seca (VARGAS, 1977).

A classificação delas, para Caputo e Caputo (2015), se dá diante de dois fatores: método de construção e tipo de seção. Assim, podem ser construídas de terra compactada ou pelo método hidráulico. E quanto ao tipo de seção, classificam-se em homogênea ou zoneada como observado na Figura 8 .

As barragens são homogêneas quando construídas de um único material. Já as zoneadas são constituídas por um núcleo de terra impermeável, limitado por zonas permeáveis de diferentes materiais, que promovem a estabilidade e protegem o núcleo. As zonas permeáveis podem ser feitas de areia, de cascalho, ou de uma mistura desses materiais (CHIOSSI, 2013).

Figura 8 – Barragens de terra homogêneas e zoneadas



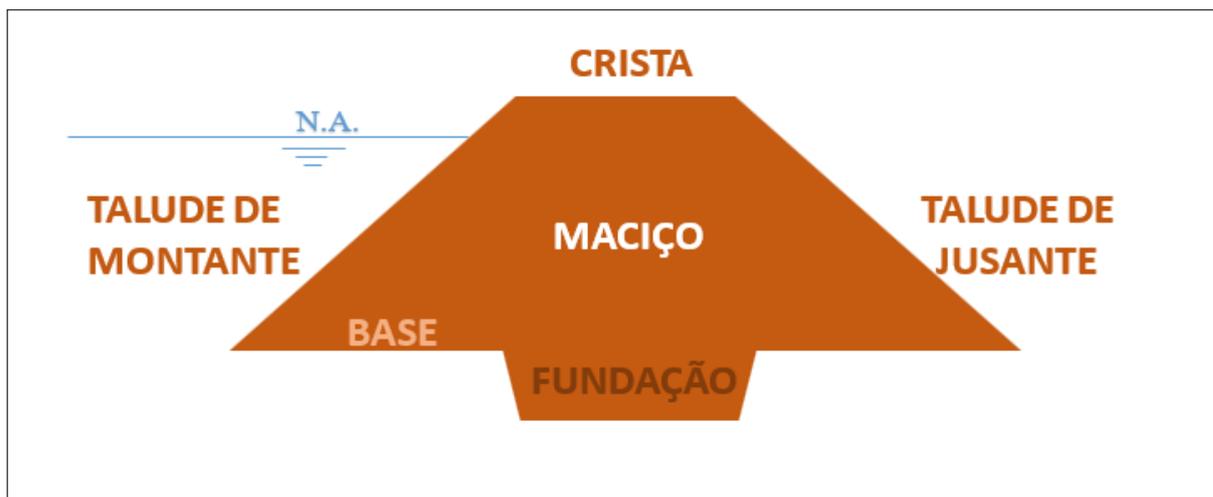
Fonte: Caputo e Caputo (2015)

Os elementos fundamentais de uma barragem são: maciço, crista, fundação, os

taludes de jusante e montante e base. O maciço é o próprio “corpo” da barragem, que é construído transversalmente ao curso d’água. A crista é o topo do maciço, sendo possível o trânsito de pessoas e/ou veículos em alguns casos.

Os taludes são representados pelas faces laterais com certa inclinação. Esta é determinada, de forma que garanta a estabilidade durante a vida útil da barragem. Principalmente em específicas situações, tais como: final de construção, em operação e em situações de rebaixamento rápido do reservatório. O talude de montante fica em contato direto com a água que foi barrada. Já o talude de jusante fica do lado seco e não tem acesso à água barrada (MASSAD, 2010). A base corresponde à área do terreno sobre a qual está a barragem, assim, pode ser representada como a projeção da crista e dos taludes sobre a superfície do terreno. A fundação é a superfície inferior, por onde se transfere as cargas da barragem ao solo bem como minimiza o fluxo por baixo desta obra. Os elementos supracitados podem ser visualizados na Figura 9.

Figura 9 – Elementos Fundamentais de Barragens



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Castro (2014) aponta vantagens em construir pequenos barramentos de terra. Algumas destas vantagens são as seguintes:

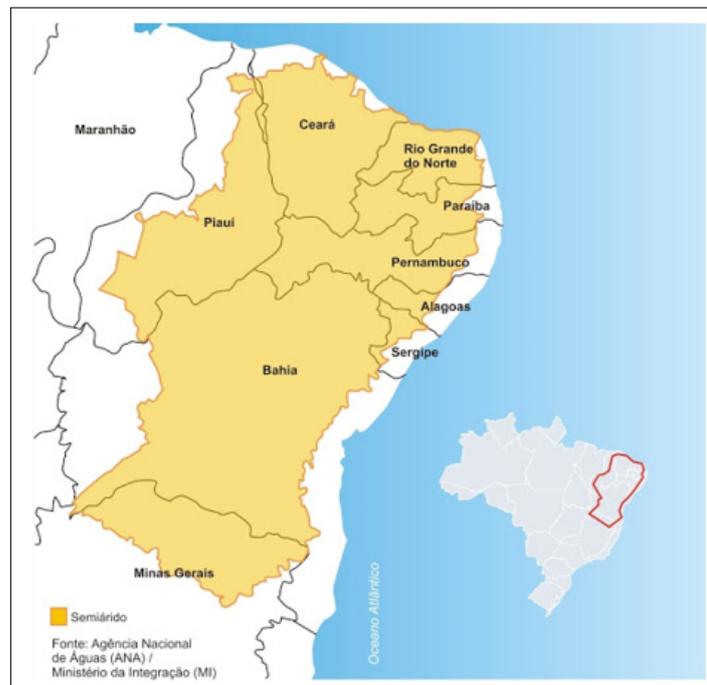
- a) a utilização de materiais naturais locais;
- b) a simplicidade dos procedimentos de projeto;
- c) as fundações são mais simples, pois a base larga contribui para a distribuição da carga;
- d) são mais adequadas para áreas onde há movimentação de solo. Isso por serem

- mais resistentes, ao assentamento e movimentos, do que estruturas mais rígidas. No entanto, existem desvantagens que precisam ser consideradas. Listadas a seguir:
- a) a facilidade de ser danificada ou até mesmo destruída pela água corrente, que passa sobre ou bate contra ela. Sendo necessário um descarregador/vertedor e proteção adequada à montante;
  - b) o projeto e construção desses descarregadores/vertedores é tecnicamente difícil;
  - c) a contínua manutenção, no intuito de evitar erosão, crescimento de árvores, sedimentação, infiltração e danos provocados por insetos e animais.

#### 4.4 Importância das barragens no semiárido

O semiárido brasileiro, mostrado na Figura 10, tem como característica a pluviosidade irregular. Ou seja, existem secas periódicas e precipitações pluviométricas concentradas em um período do ano. Além disso, a elevada evaporação, ocasionada pelas altas temperaturas, prejudica a região, provocando a escassez de água. Esta se agrava diante do uso irracional e o desperdício da água, além da crescente poluição dos corpos hídricos.

Figura 10 – Semiárido brasileiro

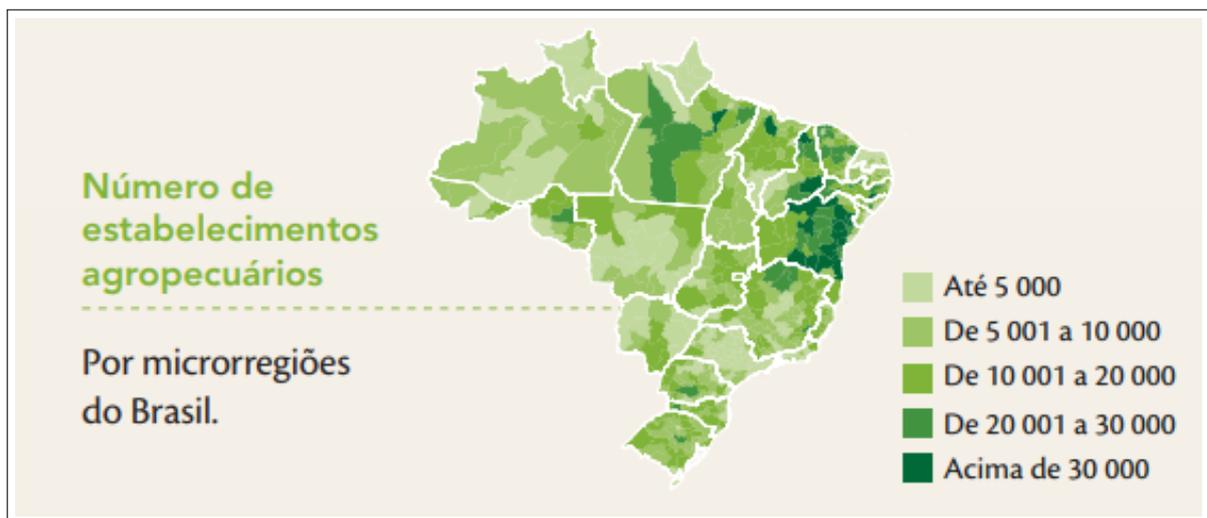


Fonte: <http://www.ihu.unisinos.br/78-noticias/592171-o-ainda-desconhecido-semiarido-brasileiro>

#### 4.4.1 Semiárido nordestino

No Nordeste brasileiro, onde o semiárido é predominante, o segmento primário do agronegócio destaca-se como uma das principais atividades econômicas, tendo portanto um maior peso na distribuição de postos de trabalho. Isto promove a geração de empregos e desenvolvimento. No entanto, esta atividade econômica depende mais fortemente dos recursos hídricos disponíveis. Observa-se na Figura 11 a importância desta atividade no contexto econômico nordestino no ano de 2017.

Figura 11 – Número de estabelecimentos agropecuários no Brasil



Fonte: IBGE (2017)

Dessa forma, a construção de novas barragens e o fortalecimento das existentes nesta região, são vistos como um caminho para solucionar o problema da escassez de água. Pois com isso, é viável o suprimento de água, tanto para o abastecimento humano quanto para o desenvolvimento da produção econômica, especialmente a agrícola, durante todo o ano, sobretudo nos períodos de estiagem, onde a ocorrência de chuvas é mais rara. Assim, constituindo um alicerce para queda do êxodo rural e a interiorização do desenvolvimento.

##### 4.4.1.1 Estado do Ceará

No âmbito cearense, a situação da distribuição de empregos acompanha o cenário Nordestino de forma que há muitos trabalhadores em atividades ligadas ao campo e à pecuária, direta ou indiretamente. Este é o caso de trabalhadores engajados em atividades econômicas ligadas às indústrias de transformação que dependem de produtos oriundos da agricultura e

pecuária. Como mostrado na Figura 12, a atividade agropecuária é responsável por 2,1% dos empregos cearenses.

Figura 12 – Distribuição dos empregos no Ceará

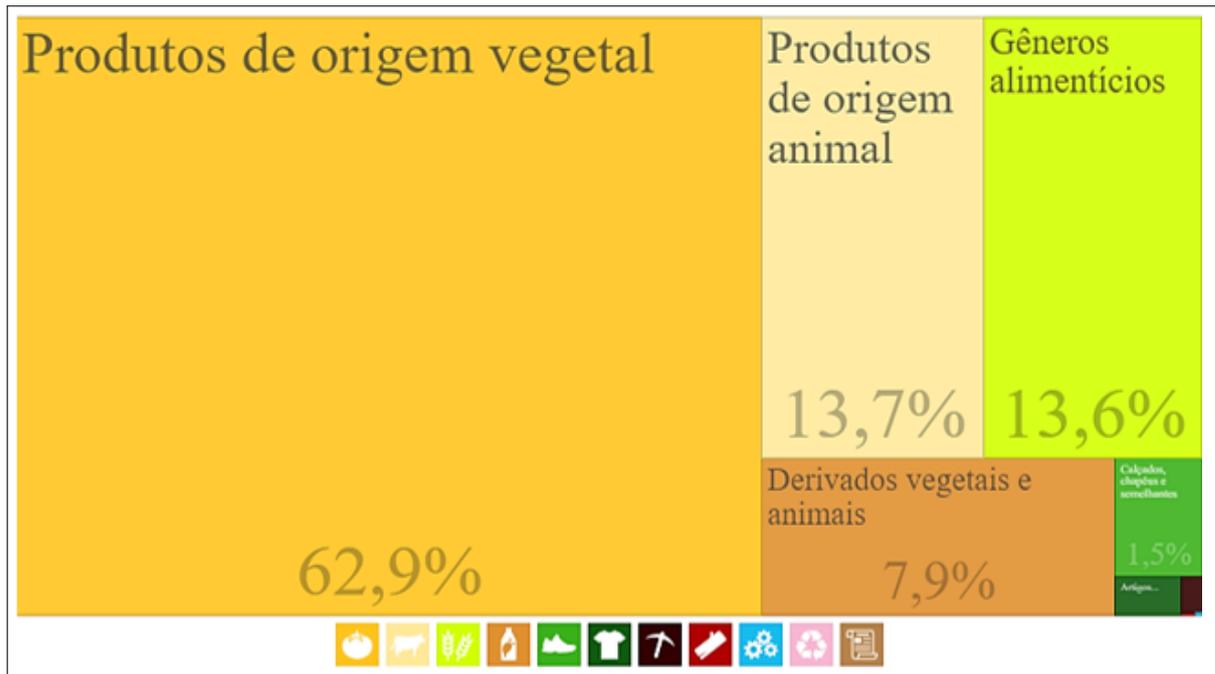


Fonte: <http://dataviva.info/pt/ZZ19ME>

#### 4.4.1.1.1 Vale do Jaguaribe

Uma das 7 subdivisões do estado do Ceará é a mesorregião do Vale do Jaguaribe. É de grande relevância econômica devido os altos índices de exportação. Os produtos são, em sua maioria, ligados ao campo e de origem animal como mostrado na Figura 13. Portanto têm uma íntima ligação com a disponibilidade de recursos hídricos.

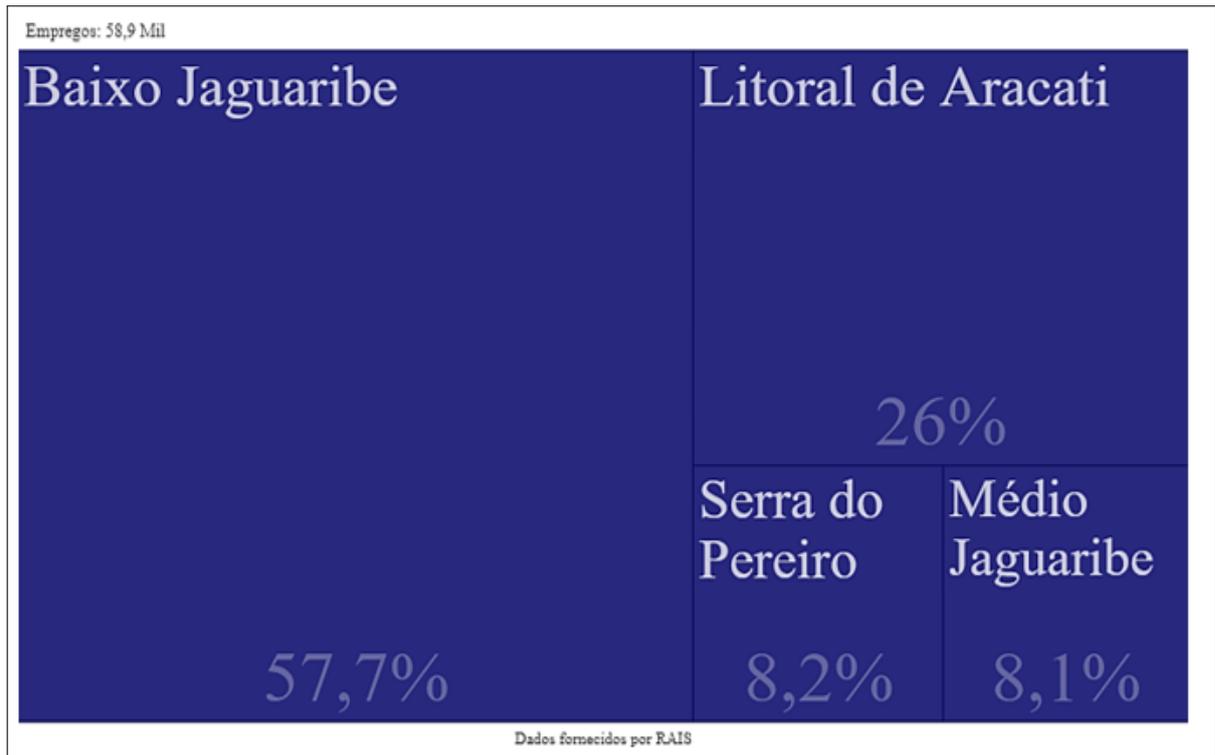
Figura 13 – Exportações na Região do Vale do Jaguaribe



Fonte: <http://dataviva.info/pt/WRECUW>

Destacam-se ainda 4 microrregiões que compõem o vale do Jaguaribe, são elas: Baixo Jaguaribe, Médio Jaguaribe, Serra do Pereiro e Litoral do Aracati. Estão estas destacadas quanto à questão de empregos na Figura 14.

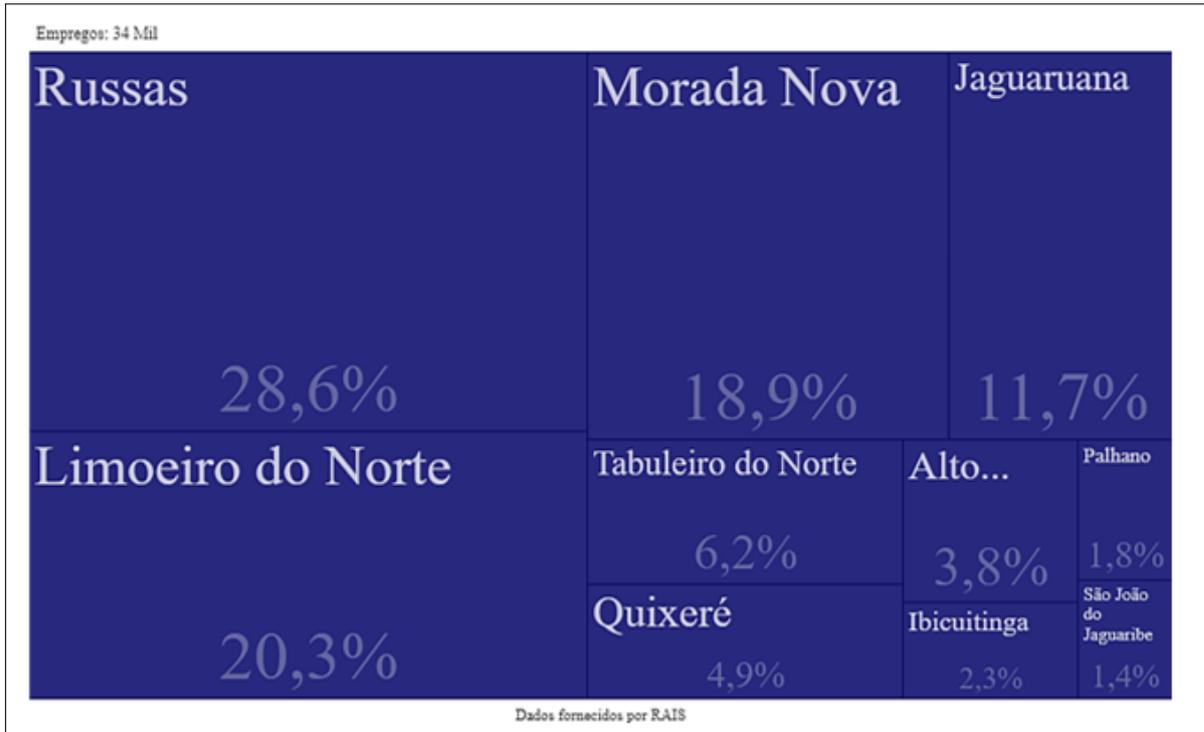
Figura 14 – Distribuição de empregos nas microrregiões do Vale do Jaguaribe



Fonte: <http://dataviva.info/pt/11GN74>

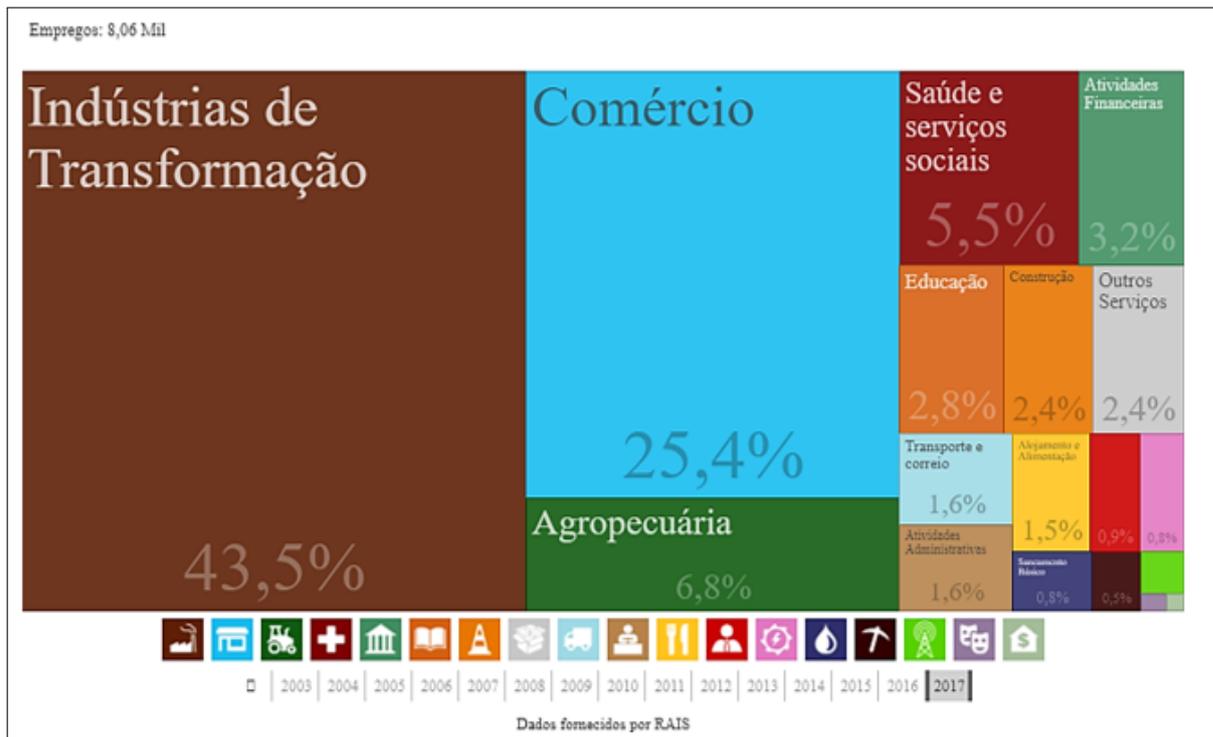
A Figura 15 detalha os empregos desta microrregião separada por municípios. Consta-se que o município que possui mais destaque é o município de Russas. Este município se localiza a 162km da capital do estado, Fortaleza, e em 2017 abrangia quase 30% dos empregos de toda esta microrregião, o que confere grande relevância regional. Russas tem suas atividades laborais divididas como mostra a Figura 16. Pode-se visualizar que o setor de agropecuária é o terceiro maior gerador de empregos.

Figura 15 – Empregos dos municípios da microrregião do Baixo Jaguaribe



Fonte: <http://dataviva.info/pt/EI91IQ>

Figura 16 – Principais setores de empregos em Russas



Fonte: <http://dataviva.info/pt/EFEN3O>

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada baseia-se na execução das etapas explicitadas abaixo. Segue abaixo o resumo das etapas, e o desenho experimental conforme a Figura 17.

- a) Coleta da amostra deformada do solo;
- b) Realização de ensaios em laboratório;
- c) Modelagem de barragem de terra genérica utilizando o programa GeoStudio2020;
- d) Análise e interpretação dos resultados obtidos;
- e) Qualificação do solo.

Figura 17 – Desenho experimental



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

### 5.1 Coleta da amostra

A amostra foi retirada de uma jazida que possui as seguintes coordenadas  $4^{\circ}58'05.0''S$   $38^{\circ}00'28.5''W$ , e localiza-se a uma distância de aproximadamente 5km do centro do município de Russas, no estado do Ceará, como observado na Figura 18. A entrada principal da jazida fica às margens da rodovia BR-116.

Figura 18 – Localização da jazida



Fonte: Google Earth

A coleta da amostra deformada, como mostra a Figura 19, foi realizada em janeiro de 2020, utilizando instrumentos como pás e picaretas, em 4 pontos da jazida. Em seguida, a amostra, pesando aproximadamente 30 quilogramas, foi inserida em sacos e, posteriormente, em baldes fechados para facilitar o transporte até o Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação - LMSP da Universidade Federal do Ceará (UFC), situado em Fortaleza – CE, para seguir com o preparo e ensaios.

Figura 19 – Coleta da amostra na jazida



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

## 5.2 Preparo da amostra

A amostra foi preparada, anteriormente aos ensaios, conforme a NBR 6457/16 (2016). A preparação teve início na secagem prévia do material, até a umidade higroscópica. Em seguida, foi submetida à exposição do sol para secagem.

Posteriormente, foi realizada a etapa de homogeneização do material para o desmanche dos torrões (Figura 20). Além disso, foi feito o quarteamento com a finalidade de dividir o solo e obter uma amostra representativa do material para a realização posterior dos ensaios (Figura 21).

Figura 20 – Destorroamento da amostra



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Figura 21 – Amostra representativa do material



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

### 5.3 Ensaios experimentais

Os ensaios experimentais realizados no período entre 27 de janeiro à 11 de fevereiro de 2020, no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Ceará (UFC), que se encontra sob coordenação do Professor Dr. Francisco Chagas da Silva Filho, localizado no Departamento de Transportes – DET, foram os seguintes:

- a) Análise granulométrica com sedimentação;
- b) Limites de Atterberg;
- c) Densidade real dos grãos por meio do picnômetro;
- d) Compactação;
- e) Permeabilidade por carga variável;
- f) Ensaio de resistência por compressão triaxial.

#### 5.3.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada conforme a NBR 7181/18 (2018) da ABNT, com a finalidade de obter a curva granulométrica. A escala granulométrica utilizada para a classificação dos solos seguiu a norma da ABNT (NBR 6502/95, 1995). A granulometria dividiu-se em duas fases: sedimentação e peneiramento.

Como os maiores grãos da amostra representativa eram de diâmetro menor que

5mm, foi utilizado 1,5 kg de material para a execução do ensaio de granulometria, seguindo a determinação da norma. Esse material foi passado na peneira de número 10, com abertura de 2mm.

Os grãos retidos foram lavados em água corrente e de baixa pressão, a fim de eliminar os finos aderidos às partículas de solo. Após a lavagem, colocou-se na estufa a 105°C – 110°C, até a constância da massa, para secar o material. Após esse processo, foi realizado peneiramento grosso. Os grãos passantes foram utilizados no processo de sedimentação.

#### 5.3.1.1 *Peneiramento grosso*

O peneiramento caracteriza-se pela passagem do material em uma série de peneiras, com tamanhos de malha diferentes, colocadas umas sobre as outras em ordem decrescente de abertura. Portanto, tem como propósito, obter o valor das massas retidas em cada peneira. Este processo se inicia com a etapa chamada de peneiramento grosso, onde se trabalha com os grãos de diâmetro maior que 2mm.

Após a retirada do material grosso da estufa, ele foi submetido à uma série de peneiras com diâmetros detalhados na 1.

Tabela 1 – Peneiras do peneiramento grosso

<b>Peneiras</b>	
<b>Polegadas/numeração</b>	<b>Milímetros</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: Elaborado pela autora, 2020.

#### 5.3.1.2 *Sedimentação*

Para a etapa da sedimentação utilizou-se 120g do material passante na peneira Nº 10. Essa amostra foi inserida, durante 24 horas, em um vidro de laboratório contendo a solução de hexametáfosfato de sódio (Figura 22A). Em seguida, a amostra foi vertida para o copo dispersor, durante 15 minutos (Figura 22B). Posteriormente, a mistura foi transferida para uma proveta e adicionou-se água destilada até completar o volume de 1.000 ml. Feito isto, agitou-se

manualmente, por meio de movimentos de rotação durante 1 minuto, observado na Figura 22C. Imediatamente após este procedimento foram realizadas leituras, durante 24 horas, por meio de um densímetro, demonstrado na Figura 22D. Terminado o procedimento de sedimentação, o material presente na proveta foi vertido em uma peneira de abertura de 0,075m, de número 200, e seco em estufa, onde foi utilizado na etapa do peneiramento fino.

Figura 22 – Etapas do Ensaio de Sedimentação



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

### 5.3.1.3 Peneiramento fino

O peneiramento fino se dá de maneira similar ao peneiramento grosso. No entanto, o conjunto de peneiras utilizado possui malhas de aberturas menores. Os diâmetros destas aberturas estão detalhados na 2.

Tabela 2 – Peneiras do peneiramento fino

Peneiras	
Numeração	Milímetros
Nº 30	0,60
N 40	0,42
N 50	0,30
N 100	0,15
N 200	0,075

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Após a secagem do material fino, utilizado na etapa de sedimentação, o mesmo foi passado na série de peneiras mostrada na Figura 23. Com isso, foi possível obter o valor das massas retidas em cada peneira.

Figura 23 – Conjunto de peneiras utilizadas no peneiramento fino.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

### 5.3.2 *Limites de Atterberg*

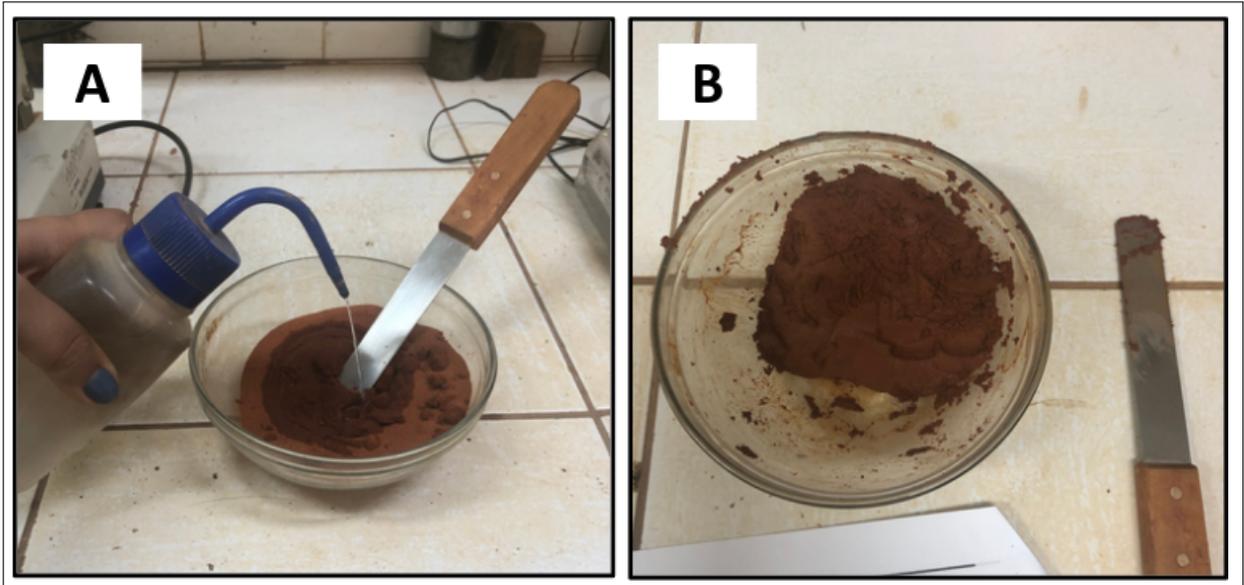
Os ensaios pertinentes aos limites de Atterberg são: Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade. Ambos foram realizados de acordo com as especificações das normas ABNT, NBR 6459/17 (2017) e NBR 7180/16 (2016), respectivamente. Esses ensaios tiveram como finalidade a obtenção do Índice de Plasticidade.

#### 5.3.2.1 *Limite de Liquidez (LL)*

O Limite de Liquidez (LL), é definido simplificada e como o teor de umidade do solo que, com uma ranhura, feita por meio do cinzel, utilizando o aparelho de Casagrande, requer 25 golpes para se fechar.

A determinação iniciou-se com a colocação de uma porção da amostra representativa em uma cápsula de vidro, e a adição de pequenas porções de água, conforme a Figura 24A. Esse material foi amassado e revolvido, até que se atingiu a homogeneidade, como se observa na Figura 24B.

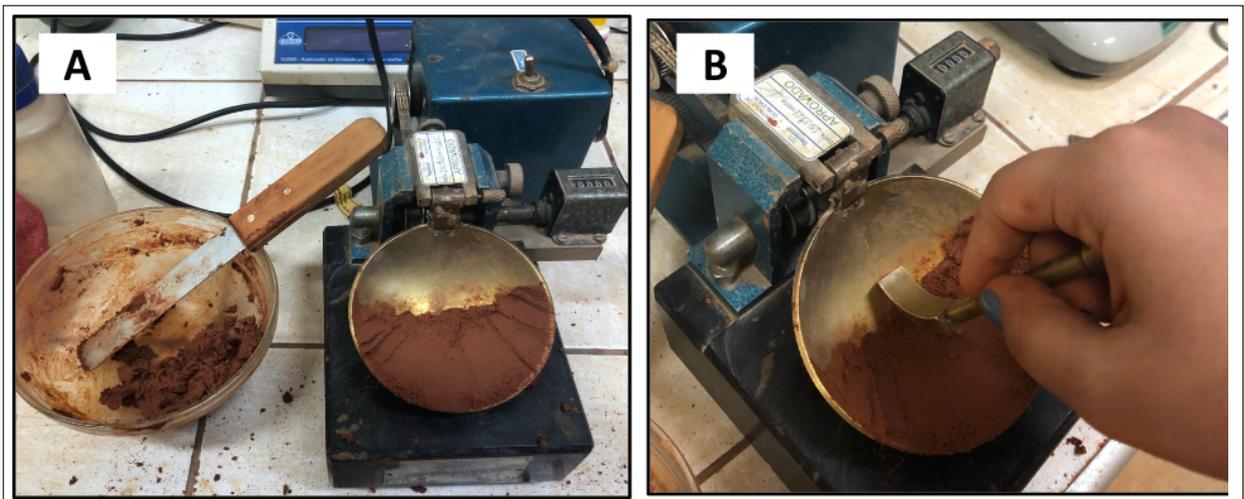
Figura 24 – Preparação da amostra para o ensaio de LL.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Esse material foi transferido para o aparelho de Casagrande e moldada para que a parte central da concha tivesse uma espessura de aproximadamente 10 mm, ilustrado na Figura 25A. Com o uso do cinzel, foi feita uma ranhura no centro da concha dividindo a massa de solo em duas partes, como se observa na Figura 25B.

Figura 25 – Preparação da amostra para o golpeamento



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Após esse processo, foi realizada a etapa de golpeamento, no qual foi aferida a quantidade de golpes necessária para que a massa de solo se unisse nas bordas inferiores. No ponto de união, uma amostra foi retirada para a determinação da umidade, como se vê na Figura

26. Esse processo foi repetido quatro vezes, aumentando a quantidade de água em cada uma delas. Com isso, obteve-se o gráfico de liquidez, por onde determina-se o valor de LL.

Figura 26 – Retirada da amostra representativa no ponto de união



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

#### 5.3.2.2 *Limite de Plasticidade (LP)*

O Limite de Plasticidade (LP), é a faixa que delimita a transição entre o estado plástico e o semi-plástico ou quebradiço. Assim, esse limite pode ser 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 de 10 cm de comprimento, manualmente.

O ensaio iniciou com uma pequena quantidade da amostra representativa, cerca de 50g, onde se adicionou água destilada até a obtenção de uma pasta homogênea. De maneira similar ao processo inicial do ensaio de LL.

Com esse material moldou-se uma esfera pequena, que foi rolada com a palma da mão em uma placa de vidro a fim de formar um cilindro nas dimensões do gabarito. Essa modelagem manual foi feita até que o cilindro se fragmentou, como na Figura 27, ocasionado pela perda de umidade. Esses fragmentos foram transferidos para uma cápsula e esta foi levada à

estufa, a fim que se determinasse a umidade. Esse processo foi repetido três vezes, mostrado na Figura 28.

Figura 27 – Cilindro moldado fragmentado e gabarito



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Figura 28 – Cápsulas do ensaio de LP



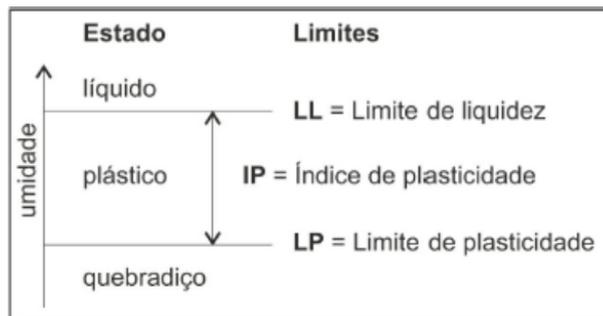
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

### 5.3.2.3 Índice de Plasticidade (IP)

O Índice de Plasticidade (IP), é definido como a diferença entre o LL e LP, expressa em porcentagem. Este valor representa a faixa em que o solo se apresenta com características plásticas.

O solo, de maneira generalizada, comporta-se como um líquido quando seu teor de umidade está muito alto. Quando ocorre a perda de parte desta água se tem comportamento plástico, chegando ao LL. Neste estado ainda é capaz a moldagem do solo. Quando mais seco ele chega ao limite de plasticidade e então tem comportamento característico do estado semi-sólido, ou seja, começa a fragmentar-se quando moldado. Este processo é exemplificado na Figura 29.

Figura 29 – Índice de plasticidade



Fonte: Pinto (2006)

### 5.3.3 Densidade real dos grãos por meio do picnômetro

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma do DNER-ME 093/94 (1994) com a finalidade de obter a densidade real, também chamada de peso específico real. Sendo definida como a razão entre o peso dos sólidos e o volume das partículas sólidas, de modo a desconsiderar os vazios existentes.

O ensaio iniciou com a pesagem de três picnômetros vazios, que consiste na variável P1. Em seguida, colocou-se aproximadamente 10g da amostra, sendo esta composta de material passante na peneira de número 10, em cada um deles e aferiu-se massa (P2). Feito isto, acrescentou-se água nos picnômetros, que até então se encontravam no estado seco, de modo a cobrir a amostra de solo. Os mesmos foram aquecidos por 20 a 30 minutos, a fim de eliminar os vazios existentes e após esfriarem até atingir a temperatura ambiente, completados com água destilada, de modo que esta escorresse pela parede dos picnômetros. Após isso realizou-se a pesagem do conjunto (P3). Para a finalização do ensaio, foi realizada ainda a pesagem do picnômetro cheio apenas de água destilada, sendo esta, a variável P4. Com todas essas variáveis foi possível, através da Fórmula 5.1, encontrar o valor da densidade real do solo. Este procedimento

descrito acima é mostrado na Figura 30.

$$DT = \frac{P2 - P1}{P4 - P1 - P3 - P2} \quad (5.1)$$

Figura 30 – Densidade real dos grãos por meio do picnômetro



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

#### 5.3.4 Compactação

O ensaio se sucedeu conforme está descrito na NBR 7182/20 (2020). Inicialmente, adicionou-se água em 3 kg da amostra de solo, até que este começasse a se unir. Feito isso, ocorreu a compactação dessa amostra, em três camadas, dentro de um cilindro, com volume de 997 cm<sup>3</sup>. Neste processo utilizou-se a energia de Proctor Normal. Assim, para alcançar a compactação de cada camada de solo foram realizados 26 golpes com o auxílio de um soquete, com peso de 2,5 kg que caía a uma altura aproximada de 30 cm, de acordo com a Figura 31.

Figura 31 – Resumo do ensaio de compactação



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Esse processo foi repetido por cinco vezes, com reuso do solo, até que a massa do conjunto de solo e cilindro começasse a diminuir. A cada nova compactação foi acrescentado 2% de água. Desse modo, determinou-se o peso específico aparente seco em cada caso.

Com essas informações de massa e umidade, é possível realizar a curva de compactação. Esta, relaciona a umidade de cada uma das repetições do ensaio: o eixo das abcissas; e o peso específico: eixo das ordenadas. A análise desse gráfico possibilita a obtenção dos valores de umidade ótima e densidade seca máxima.

### 5.3.5 Permeabilidade

O ensaio normatizado pela NBR 14545/2000 (2000), visa determinar o coeficiente de permeabilidade por meio de uma carga variável. Este coeficiente verifica a facilidade com que um fluido consegue passar através de um meio poroso e é influenciado pelo tipo do solo, temperatura ambiente e índice de vazios. O ensaio de carga constante não foi utilizado, pois se aplica a solos granulares, ou seja, que apresentam alta permeabilidade.

Inicialmente o solo foi compactado na sua umidade ótima, de acordo com os resultados obtidos no ensaio de compactação. Após esta etapa, o solo foi para o cilindro de permeabilidade e colocado sobre pedras porosas. Feito isso, ocorreu a saturação durante 24 horas, assim iniciou-se a percolação de água. Adotou-se um tempo de 180 segundos para que se fizesse cada leitura da carga. Repetiu-se o processo de percolação de água por quatro vezes, para que se pudesse obter uma média dos valores das leituras de carga. Esse procedimento está resumido na Figura 32.

Figura 32 – Etapas do ensaio de permeabilidade



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Com este ensaio foi possível obter as variáveis necessárias para calcular o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) através da Equação 5.2.

$$k = 2,3 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \log \frac{h_i}{h_f} \quad (5.2)$$

Onde:

$k$ : Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

$a$ : Área interna do tubo de carga (bureta) (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 de percolação de água pelo corpo de prova (s).

### 5.3.6 Ensaio Triaxial

Este ensaio não apresenta uma norma brasileira específica, no entanto é um dos métodos mais eficientes à disposição para se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Das e Sobhan (2019), evidencia sua importância tanto em ensaios convencionais quanto ensaios de pesquisa.

De acordo com as condições de drenagem da amostra, os ensaios triaxiais são classificados em três: adensado e drenado (CD), adensado não drenado (CU) e não drenado e não adensado (UU).

O ensaio realizado, explanado a seguir, foi feito sob a condição de adensado e drenado (CD). Assim, foi possível a dissipação das poropressões em todas as fases do ensaio, ou seja, tanto no adensamento quanto no cisalhamento.

A moldagem dos três corpos 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, na umidade ótima. Os dados necessários para esta moldagem, ou seja, os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima, foram obtidos no ensaio de compactação. A compactação foi feita em três camadas, de modo que, com o auxílio do paquímetro, a primeira medida foi de um valor de 108 mm, a segunda de 75 mm e a terceira de 43 mm, sendo necessário realizar ranhuras entre as camadas de modo a facilitar a aderência.

Após a moldagem, deu-se início na preparação do corpo de prova. Esse processo ocorreu na seguinte ordem: colocou-se uma pedra porosa, previamente saturada, sobre a base da célula; posicionou-se um papel filtro sobre a pedra porosa inferior; colocou-se cuidadosamente o corpo de prova sobre o papel filtro inferior seguido de papel filtro e pedra porosa superiores. Desse modo, sucedeu-se com a colocação do cabeçote, acima da pedra porosa, papel filtro na lateral do corpo de prova e envolveu-se o conjunto em membranas de látex. Para a fixação do conjunto envolvido pela membrana na célula, foi utilizado ligas de látex. Essa preparação está demonstrada na Figura 33. E então o sistema foi fechado para que se desse início ao procedimento.

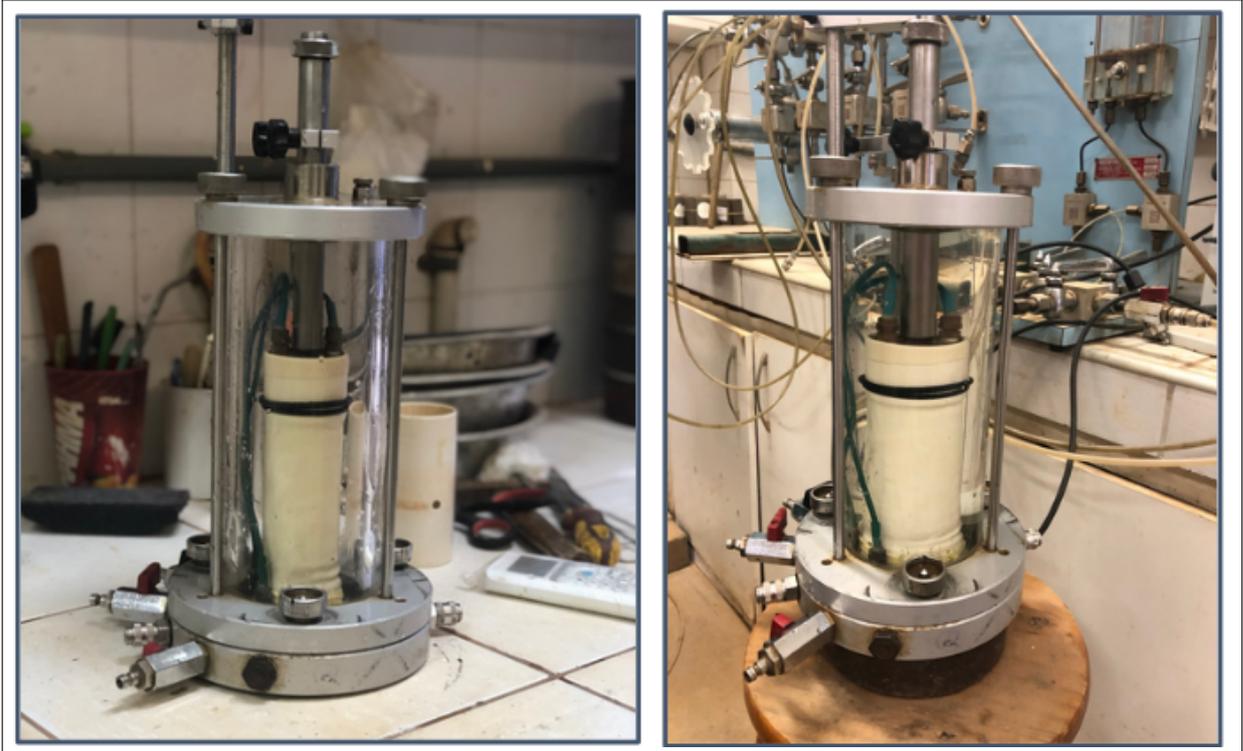
Figura 33 – Montagem da célula triaxial



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Feita a montagem do corpo de prova na câmara triaxial, como se vê na Figura 34, ocorreu a saturação do corpo de prova por percolação simples e por contrapressão, a consolidação ou adensamento e, por fim, o rompimento.

Figura 34 – Montagem do corpo de prova na câmara triaxial



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A primeira etapa do procedimento, ou seja, a saturação, foi realizada em duas fases: por percolação de água na amostra, que se trata da percolação simples, e pela aplicação de incrementos de pressão confinante e contrapressão de maneira alternada.

Na saturação por percolação simples foi aplicada uma pressão confinante de 10 kPa e uma contrapressão na base com valor de 5 kPa. E então o conjunto permaneceu saturando por um período de 24 horas. Após isso, foi feita a saturação pela aplicação de incrementos da pressão confinante e da contrapressão alternadamente. Esse processo foi repetido até a saturação do corpo de prova atingir cerca de 90%.

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 sua porosidade de maneira gradual e evolutiva. As tensões efetivas de confinamento utilizadas no ensaio foram de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, respectivamente.

#### 5.4 Utilização do programa GeoStudio 2020(SLOPE/W) para a modelagem de uma barragem de terra genérica

A barragem se trata de uma barragem de terra fictícia, que apresenta seção transversal trapezoidal, com as dimensões mostradas na Tabela 3. Estas sendo dimensões típicas de pequenas barragens de terra construídas na região.

Tabela 3 – Características da barragem

<b>CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM</b>	
Altura	7 metros;
Comprimento do talude de montante	20,5 metros
Comprimento do talude de jusante	16,5 metros
Largura da crista	3,5 metros
Inclinação talude de montante	35%, 20 ou 3:1
Inclinação talude de jusante	45%, 25 ou 2,5:1
Diferença entre a cota máxima da barragem e do sangradouro	1 metro

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A análise de estabilidade dos taludes foi feita com o auxílio do *software* SLOPE/W, que faz parte de um pacote de produtos denominado GeoStudio, desenvolvido pela GeoSlope.

A ferramenta SLOPE/W, foi desenvolvida visando a análise da estabilidade de estruturas de terra. Nesta modelagem foi utilizado o método de Morgenstern-Price, que considera tanto o esforço normal quanto o cisalhamento entre as fatias, sendo o fator de segurança (FS) obtido por meio de equações de equilíbrio das forças e dos momentos. Além disso, considerou-se o regime de operação da barragem em nível máximo e a situação de regime permanente.

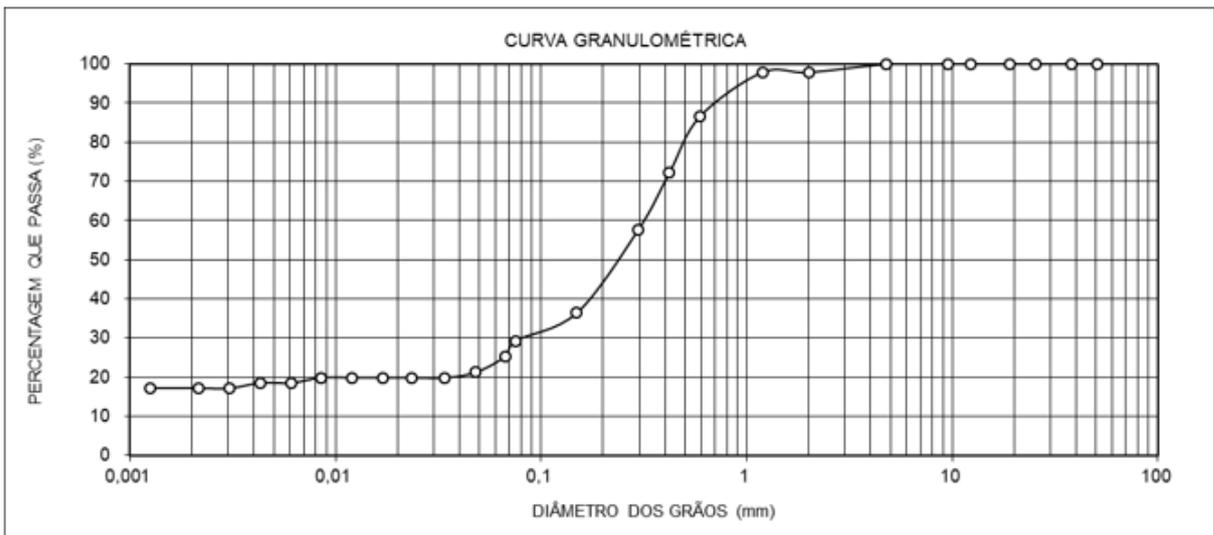
A realização da modelagem foi possível devido aos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, assim criando parâmetros de entrada, tais como: coeficiente de permeabilidade, peso específico, ângulo de atrito e coesão.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Análise granulométrica

Pela combinação dos ensaios de peneiramento e sedimentação anteriormente descritos, foi possível obter a distribuição granulométrica do material estudado, expressa na Figura 35.

Figura 35 – Curva Granulométrica



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

A partir da Curva Granulométrica da amostra estudada, foi discriminada a composição do solo, de acordo com o diâmetro dos grãos. Esta composição está mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição do solo

Composição do solo		
Material	Diâmetro (mm)	Quantidade de material (%)
PEDREGULHO	Acima de 4,8	0,11
AREIA GROSSA	2,00 - 0,60	2,06
AREIA MÉDIA	0,60 - 0,20	25,70
AREIA FINA	0,20 - 0,06	50,92
SILTE	0,06 - 0,002	2,69
ARGILA	Abaixo de 0,002	18,51

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

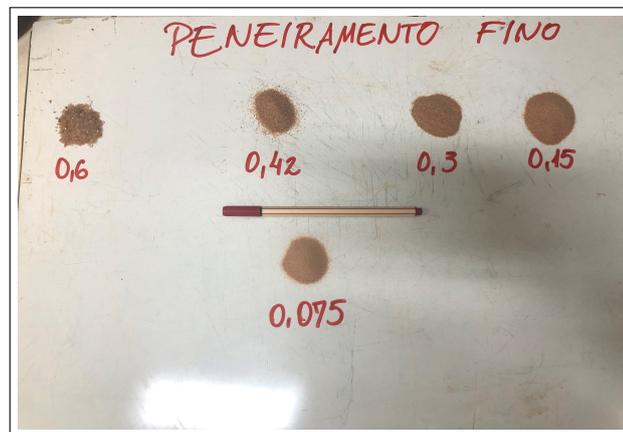
A Figura 36 expõe os resultados de peneiramento grosso e Figura 37 de peneiramento fino, obtidos em laboratório.

Figura 36 – peneiramento grosso



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Figura 37 – Peneiramento fino

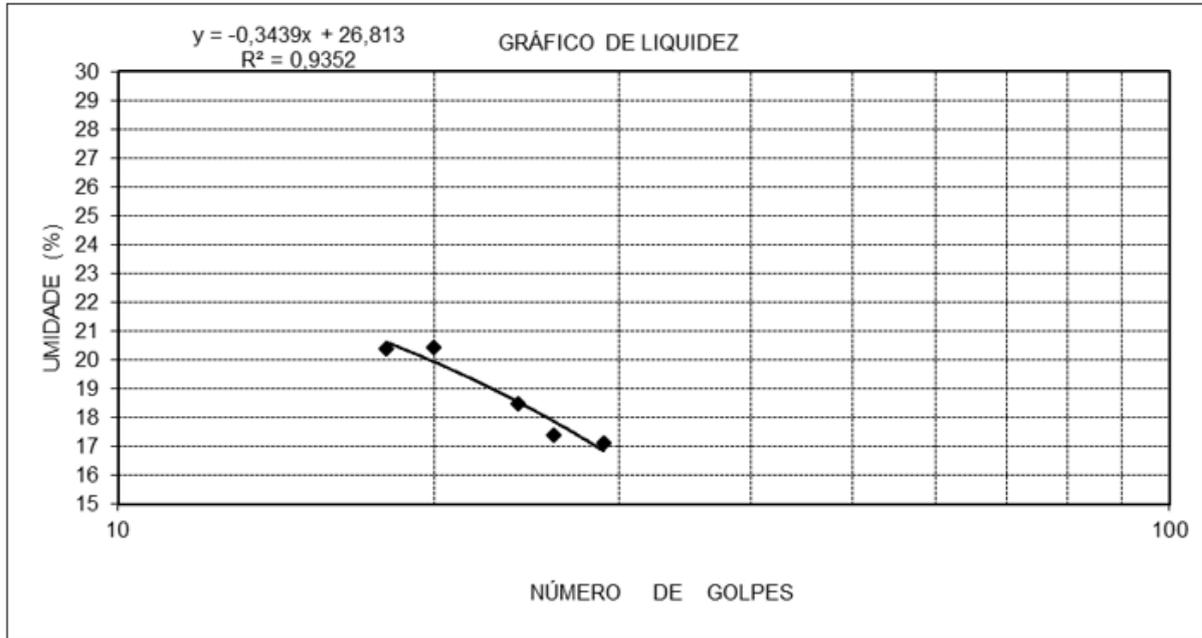


Fonte: Elaborado pela autora, 2020

## 6.2 Limites de Atterberg

O limite de liquidez (LL) foi obtido a partir da Figura 38, que mostra a relação entre o número de golpes e a umidade. No ponto referente a 25 golpes, a umidade encontrada é de 18%. Já o limite de plasticidade (LP) da amostra foi de 11%. Estes dados possibilitaram encontrar o Índice de Plasticidade (IP), pela subtração destes valores. Estes valores estão resumidos na Tabela 5.

Figura 38 – Gráfico de Liquidez



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Tabela 5 – Resultados obtidos para os limites de Atterberg (em %)

Limites de Atterberg		
Limite de Liquidez	(LL)	18
Limite de Plasticidade	(LP)	11
Índice de Plasticidade	(IP)	7

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

A partir destes dados foi possível realizar a classificação do solo pelo Sistema Unificado de Classificação (SUCS). Assim constatou-se que a amostra se trata de um solo SC, ou seja, uma areia argilosa. A partir da Figura A.1 do ANEXO foi possível observar a boa trabalhabilidade deste solo na utilização em barragens de terra.

### 6.3 Densidade real dos grãos por meio do picnômetro

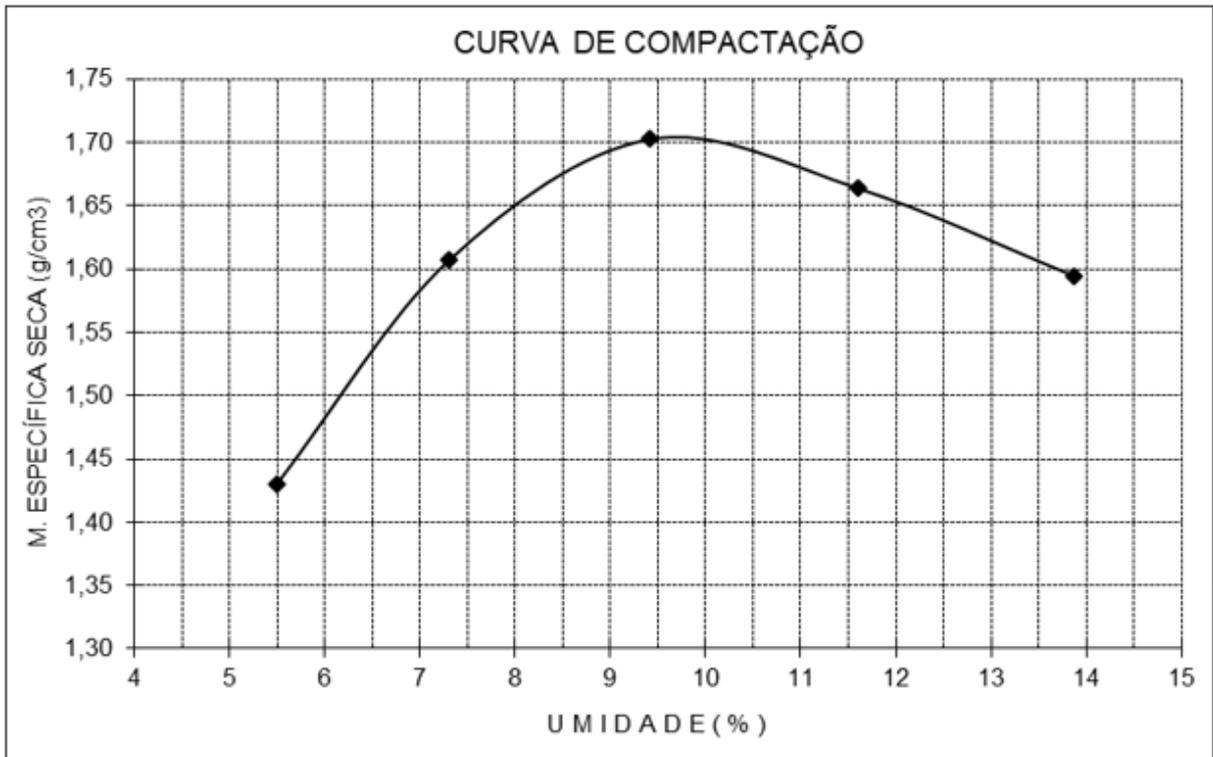
A densidade real dos grãos foi determinada por meio do ensaio do picnômetro. Realizou-se três ensaios e, em seguida feito a média. Assim se obteve o valor  $2,66 \text{ g/cm}^3$ .

Segundo Pinto (2006), a densidade real varia pouco entre os tipos de solo, portanto não permite identificar o solo em análise, entretanto é necessário para cálculos de outros índices. De maneira geral, os valores de referência situam-se em torno de  $27 \text{ kN/m}^3$ , inclusive esse é o valor adotado quando não se dispõe do valor específico.

## 6.4 Compactação

A partir dos dados de compactação, a curva de compactação foi elaborada, como se vê na Figura 39. Esta visa determinar a umidade ótima da amostra de solo ( $w_{otima}$ ) e o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_d$ )

Figura 39 – Curva de compactação

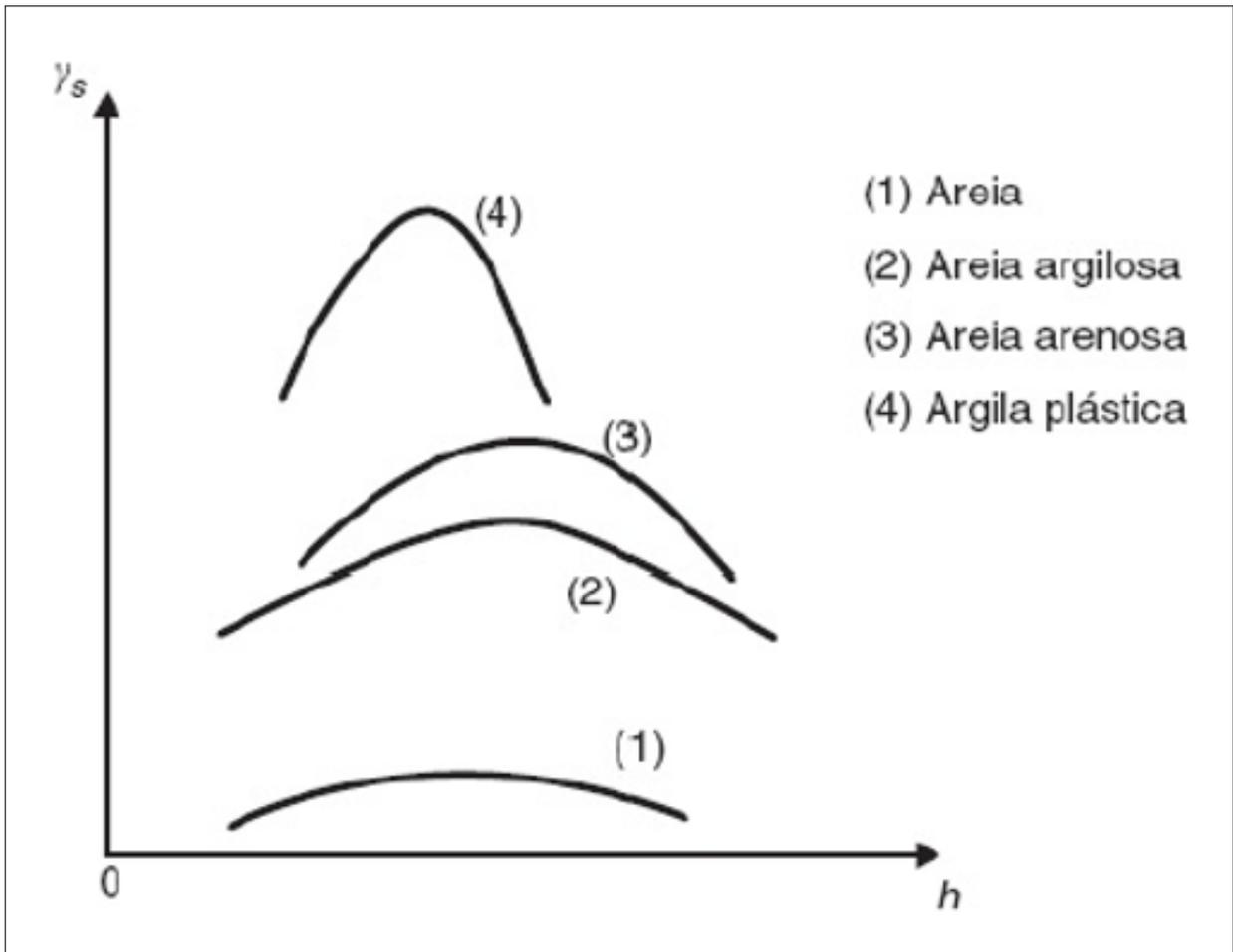


Fonte: Elaborado pela autora, 2020

As curvas de compactação, diferem para cada tipo de solo. No entanto, se assemelham quanto à forma considerando uma mesma energia de compactação (CAPUTO; CAPUTO, 2015). Como se observa na Figura 40, a curva encontrada se assemelha à curva característica própria de areias argilosas. Ratificando a classificação anteriormente mencionada.

Pinto (2006), discorre que os solos argilosos apresentam densidades secas baixas. Já umidades ótimas baixas, são representativas de areias. O solo apresentou valores típicos de solos arenoargilosos. Visto que a umidade ótima da amostra de solo ( $w_{otima}$ ) foi de 9,5% e o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_d$ ) foi de 1,702 g/cm<sup>3</sup>.

Figura 40 – Curvas de compactação

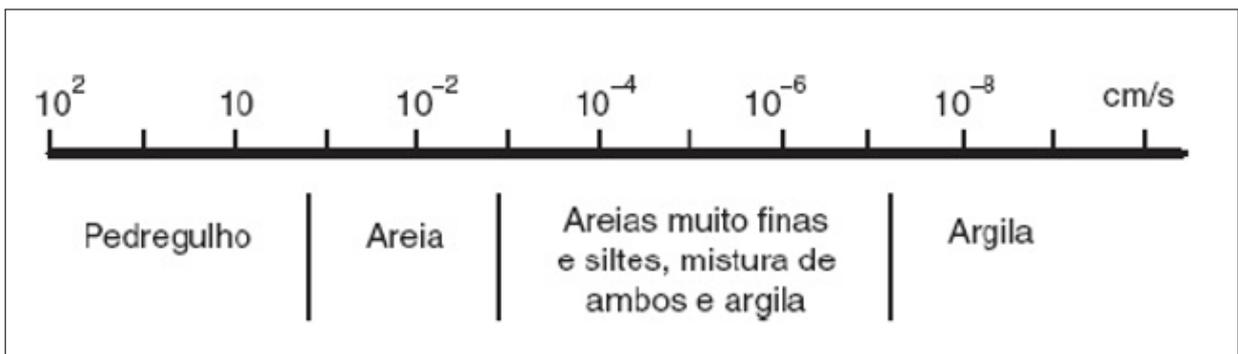


Fonte: Caputo e Caputo (2015)

## 6.5 Permeabilidade

Pelo ensaio de permeabilidade, executado utilizando carga variável, foi encontrado o valor de  $1,10 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ . Mostrando assim, estar dentro da faixa correspondente para um solo que apresenta misturas de areia e argila, conforme se observa na Figura 41.

Figura 41 – Faixas de permeabilidade

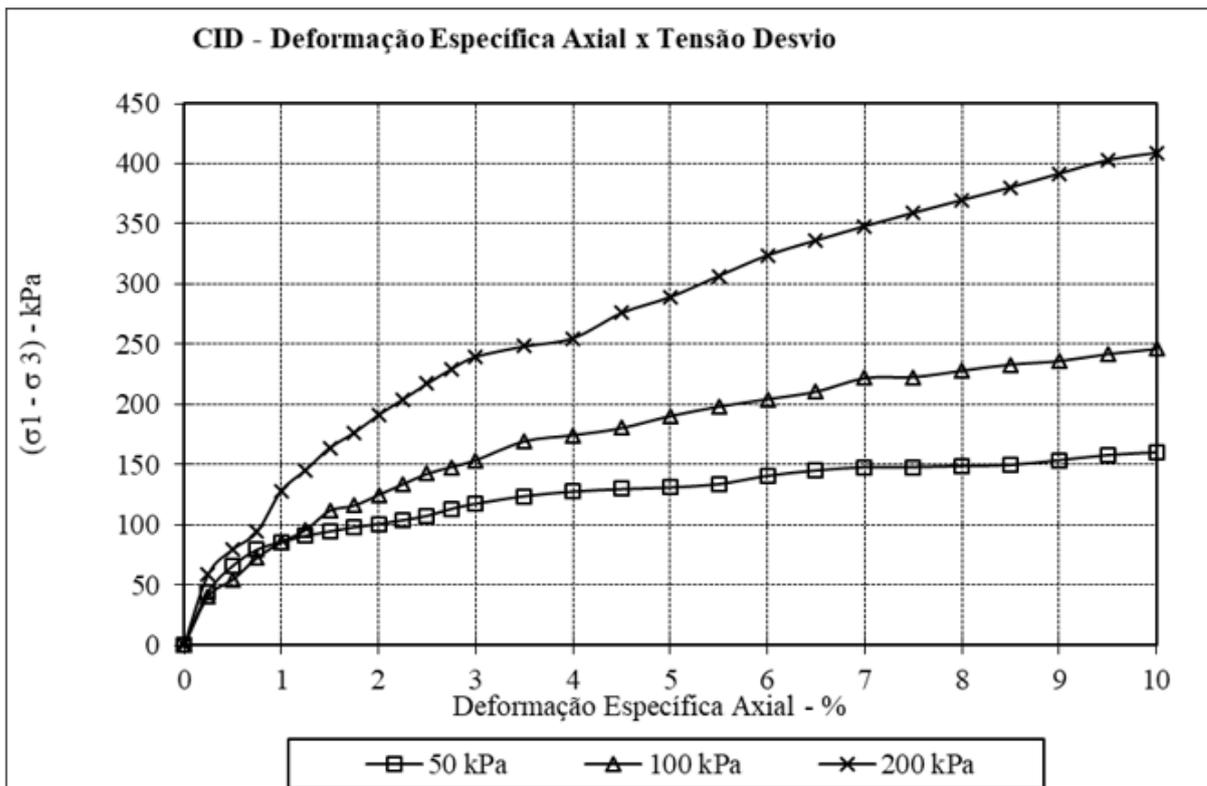


Fonte: Caputo e Caputo (2015)

## 6.6 Ensaio Triaxial

No decorrer do ensaio, durante o carregamento houve a medição do acréscimo da tensão axial atuante e o deslocamento vertical do corpo de prova. Isto possibilitou executar os gráficos de tensão desvio X deformação específica axial, como se vê na Figura 42, indicando assim o valor máximo, ou seja, o valor onde ocorre ruptura.

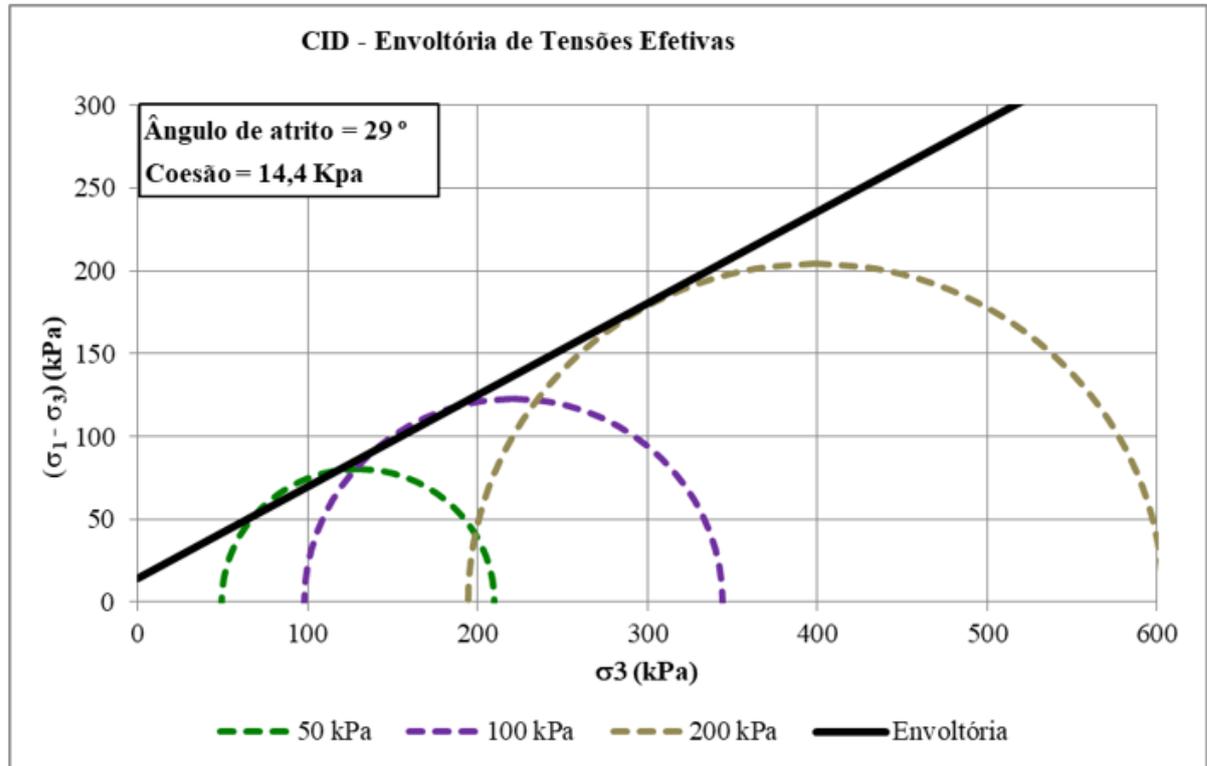
Figura 42 – Deformação específica axial X Tensão desvio



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Pela figura nota-se que quanto maior a tensão confinante, maior o valor da tensão desviadora que ocasiona ruptura. A situação de ruptura é determinada através do círculo de Mohr. A Figura 43 apresenta tanto os círculos de Mohr, referentes a cada tensão confinante (50,100 e 200 kPa), e envoltória de Mohr – Coulomb, quanto os parâmetros de resistência ao cisalhamento da amostra.

Figura 43 – Envoltória de Tensões Efetivas

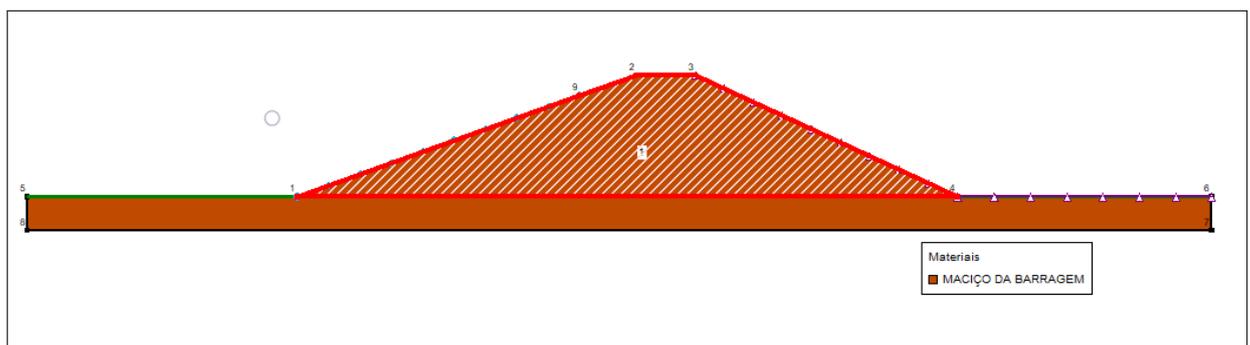


Fonte: Elaborado pela autora, 2020

## 6.7 Modelagem da Barragem de Terra

A seção da barragem modelada no programa com as características e parâmetros de resistência do solo, formou-se a partir de 9 pontos. Por meio disto, a malha de elementos finitos formada era constituída de 1305 nós e 1170 elementos, dados estes retirados da ferramenta SEEP/W, conforme se observa na Figura B.1 do Apêndice. Na Figura 44, tem-se a modelagem da barragem.

Figura 44 – Modelagem da barragem

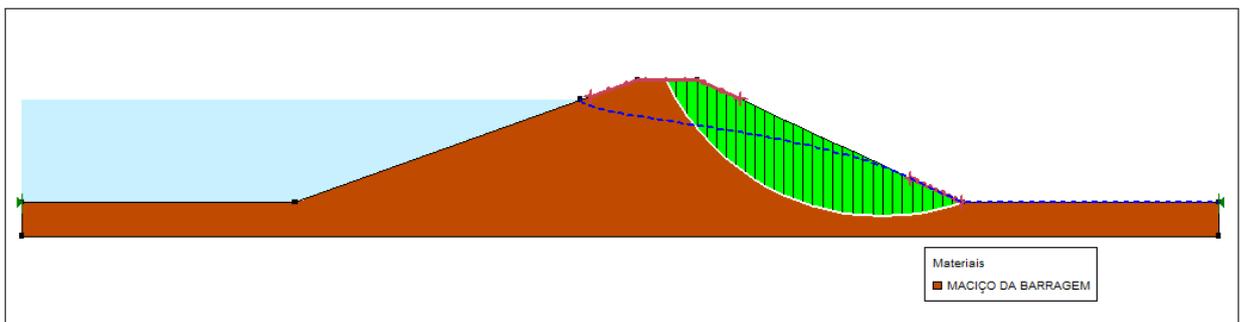


Fonte: Elaborado pela autora, 2020

A análise da estabilidade em regime permanente enfatiza a avaliação da segurança da barragem na condição de operação em nível máximo. Essa análise é possível por meio do Fator de Segurança (FS) e superfície crítica de ruptura. Sabendo que as forças de percolação agem a favor da estabilidade no talude de montante e promovem uma maior instabilidade no talude de jusante, realizou-se a análise da segurança apenas para este. Para a modelagem, foi considerado o peso específico saturado, devido à escolha da opção de saturado na realização da análise, pois entende-se que a maior parte do maciço está em contato direto com a água.

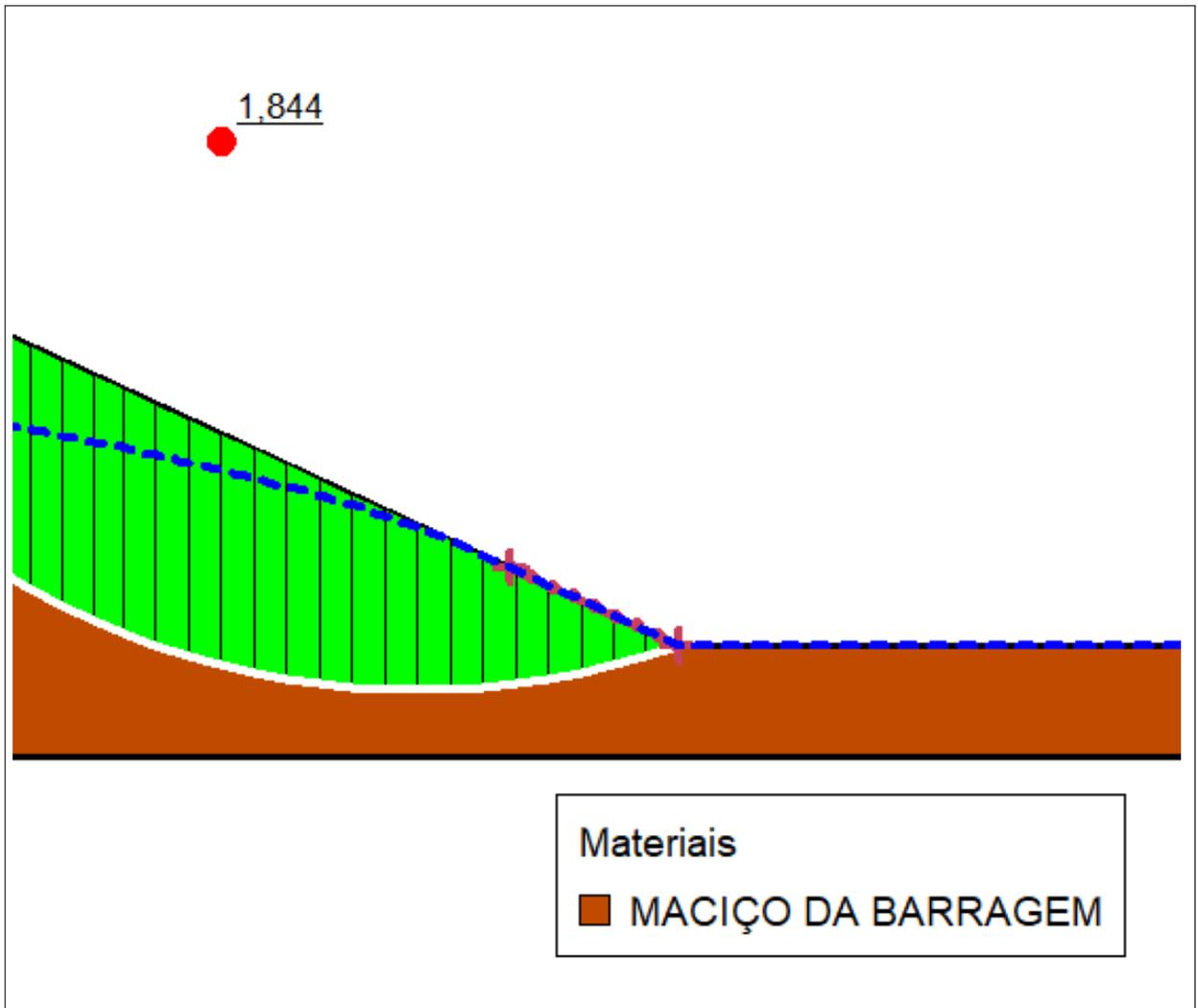
Assim, ao executar o *software* SLOPE/W, encontrou-se a determinação das superfícies críticas de ruptura e do Fator de Segurança (FS) crítico dos taludes de jusante e de montante como se vê nas figuras abaixo. Figura 45 e na Figura 46, para jusante e Figura 47 e Figura 48, para montante. As informações adicionais referentes à modelagem encontram-se no Apêndice.

Figura 45 – Superfície crítica de ruptura - Talude de jusante



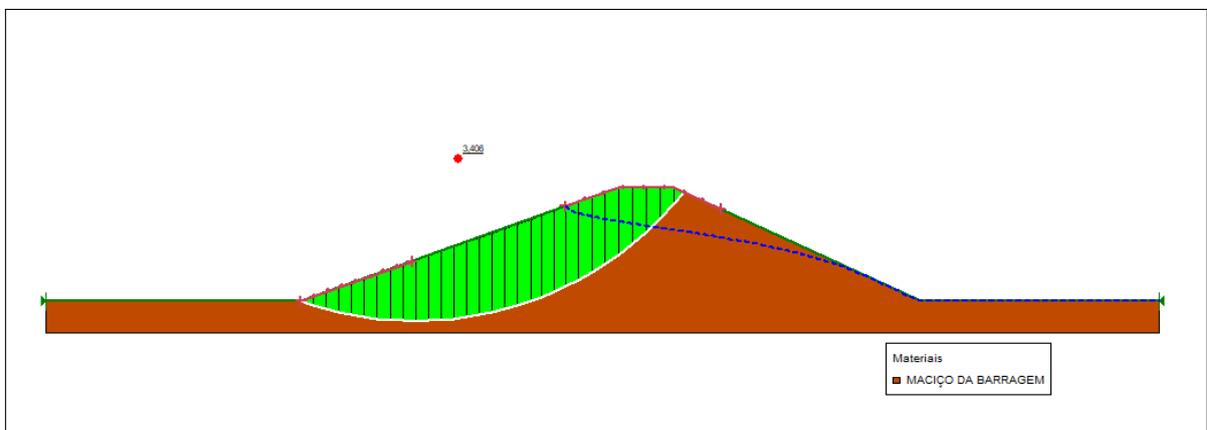
Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Figura 46 – Fator de segurança crítico - Talude de jusante



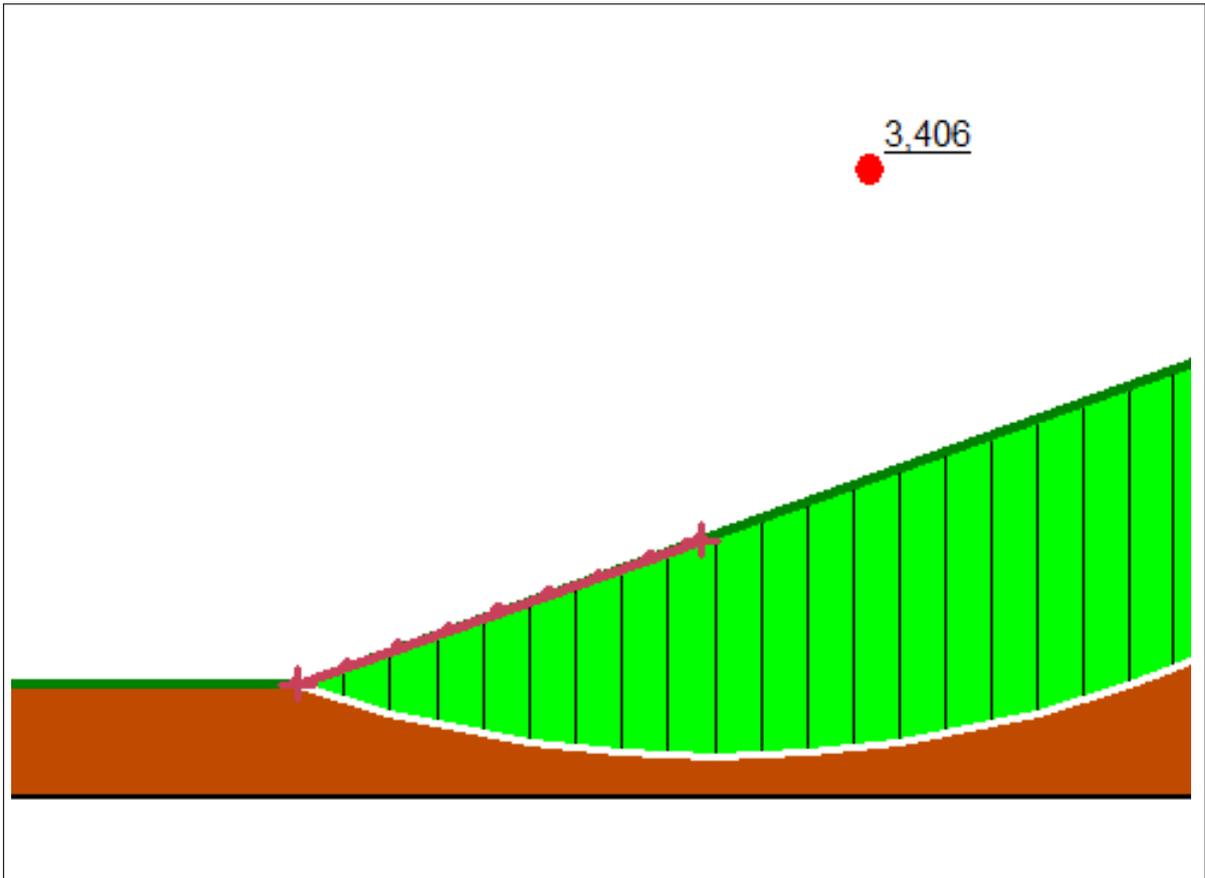
Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Figura 47 – Superfície crítica de ruptura - Talude de montante



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Figura 48 – Fator de segurança crítico - Talude de montante



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Nota-se que os fatores de segurança encontrados, tanto de jusante quanto de montante, encontram-se acima do mínimo estipulado na literatura clássica, isto é, 1,5.

## 7 CONCLUSÃO

Os resultados do presente trabalho indicam que a caracterização do solo coletado no município de Russas apresenta critérios desejáveis e margem de segurança para aplicabilidade em barragens, nos permitindo levantar as seguintes considerações:

- Pela Classificação pelo Sistema Unificado (SUCS) a amostra se trata de um solo SC, ou seja, areia argilosa. Que apresenta trabalhabilidade de boa a regular na construção de pequenos barramentos de terra;
- Limite de Liquidez apresentou valor de 18% e Limite de Plasticidade de 11%, logo o Índice de Plasticidade foi igual a 7;
- A densidade real dos grãos foi de  $2,66 \text{ g/cm}^3$ ;
- A umidade ótima da amostra de solo e o peso específico aparente seco máximo foram de 9,5% e de  $1,702 \text{ g/cm}^3$  respectivamente;
- A permeabilidade demonstrou o valor de  $1,10 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ;
- A coesão apresentou valor de 14,4kPa e ângulo de atrito de  $29^\circ$ ;
- O coeficiente de segurança crítico do talude de jusante mostrou o valor de 1,844 e do de montante o valor de 3,406. Estes, representam resultados além do satisfatório de acordo com a literatura clássica consolidada, ou seja, valor de 1,5.

Mesmo com todos esses resultados, ainda há a necessidade de estudos posteriores, tais como análises químicas e geológicas, para verificar outras aplicações em nível de Construção civil.

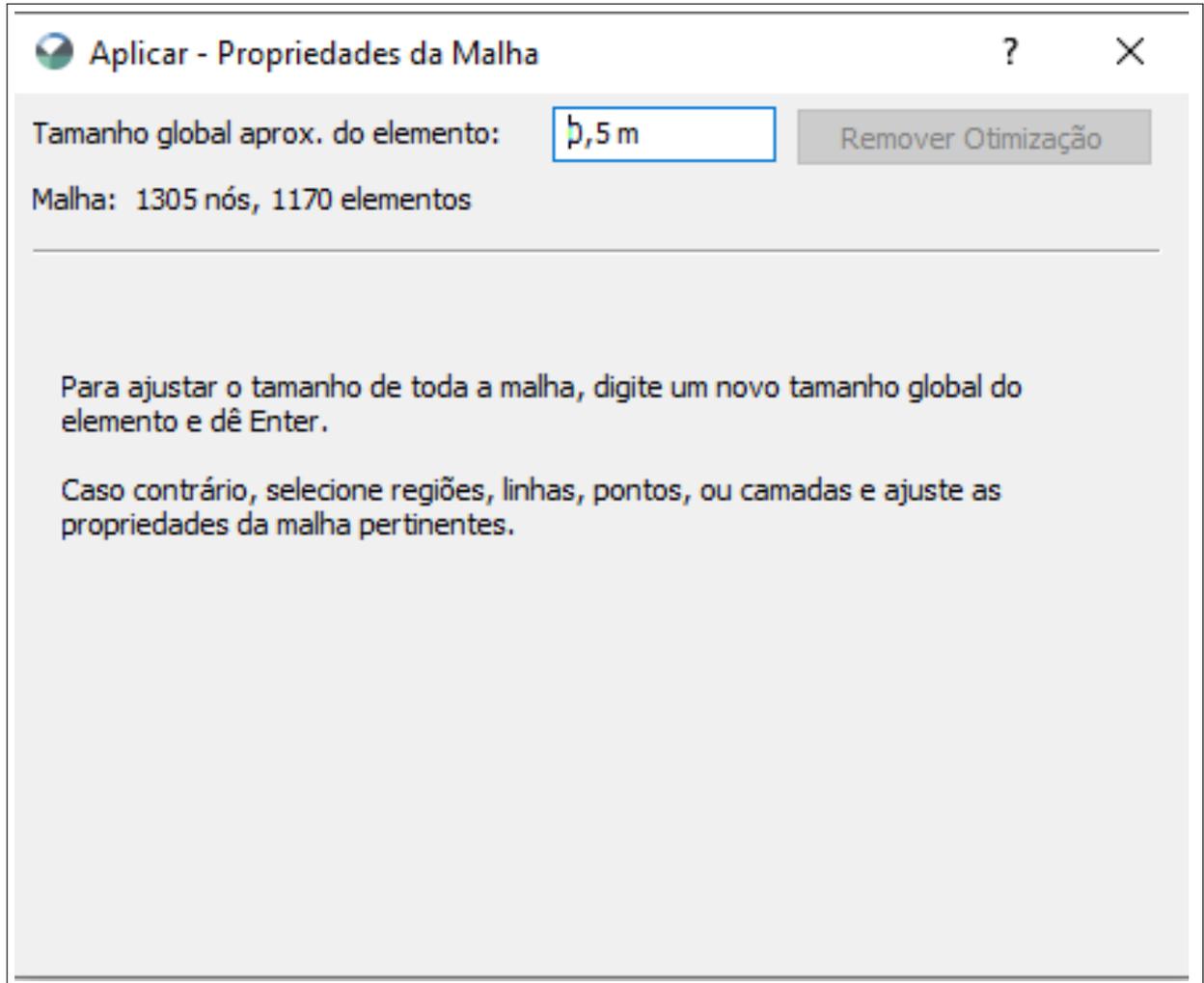
## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos: terminologia. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2020.
- CAMPOS, M. I. d. S. Uma análise quali-quantitativa das barragens do estado do Pará com dados do sistema nacional de informações sobre segurança de barragens (snisb). **Technology Sciences.**, v. 2, n. 1, p. 58–61, 2020.
- CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. [S.l.]: LTC, 2015. v. 1.
- CASTRO, M. A. d. **UTILIZAÇÃO DE SOLOS SAPROLÍTICOS NA CONSTRUÇÃO DE PEQUENAS BARRAGENS DE TERRA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil. Área de Concentração: Geotecnia) — Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- CHIOSSI, N. **Geologia de Engenharia**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2013. v. 3.
- DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. [S.l.]: Cengage, 2019. v. 9.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 093**: Solos: determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.
- GON, F. d. S. **Caracterização geotécnica através de ensaios de laboratórios de um solo de diabásio da região de Campinas/SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) — Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- MASSAD, F. **Obras de Terra**: Curso básico de geotecnia. [S.l.]: Oficina de Textos, 2010. v. 2.
- OLIVEIRA, J. C.; CUNHA, L. L. da; MARQUES, S. C.; NEVES, J. P. Estudo do comportamento de quatro solos argilosos do município de goiânia com base na classificação expedita mct/behavior study of four clay soils of goiânia county based on the expedite mct. **Brazilian Journal of Development.**, v. 6, n. 1, p. 1642–1650, 2020.

- ORTIGÃO, J. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. [S.l.]: Terratek, 2007. v. 3.
- PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. d.; JUNIOR, C. R. P.; PINTO, L. A. d. S. R.; NETO, E. C. d. S.; FONTANA, A. **Formação e caracterização de solos**. [S.l.]: Embrapa Solos-Capítulo em livro científico (ALICE), 2019.
- PINTO, C. **Curso básico de mecânica dos solos**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2006. v. 3.
- SANTOS, H. G. d.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. d.; OLIVEIRA, V. d.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. d.; FILHO, J. C. d. A.; OLIVEIRA, J. B. d.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. [S.l.]: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 2018. v. 5.
- VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos: segunda parte, hidráulica dos solos**. [S.l.]: Mcgraw-Hill, 1977.

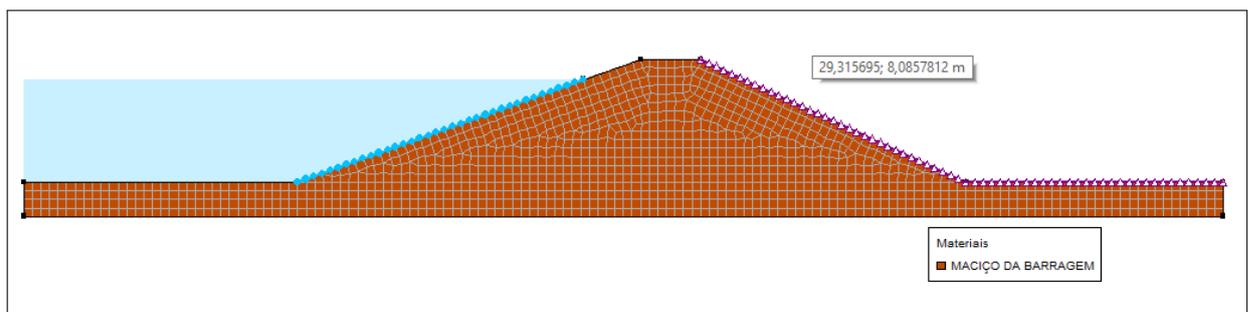
**APÊNDICE A – DADOS DE ENTRADA DA MODELAGEM**

Figura A.1 – Propriedades da malha



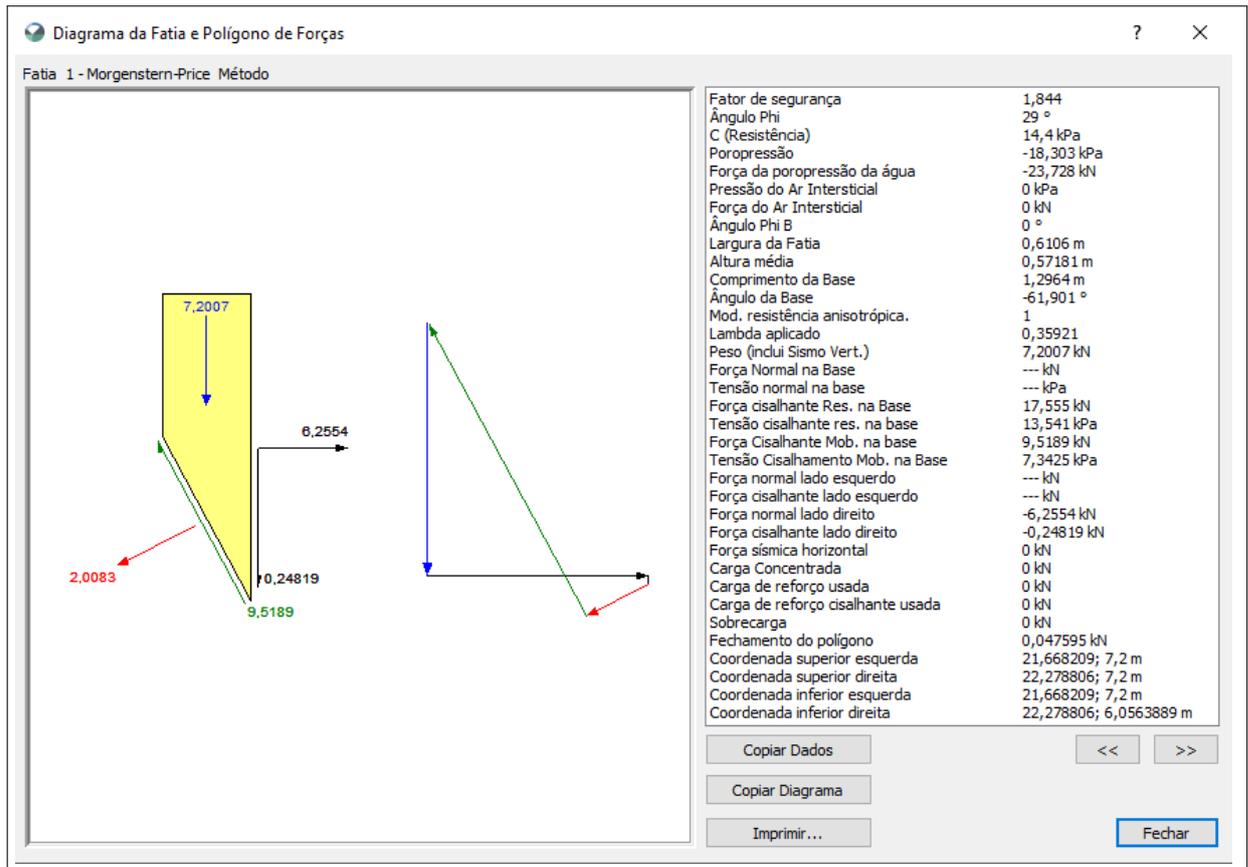
Fonte: Autoria própria, 2020

Figura A.2 – Malha de Elementos Finitos



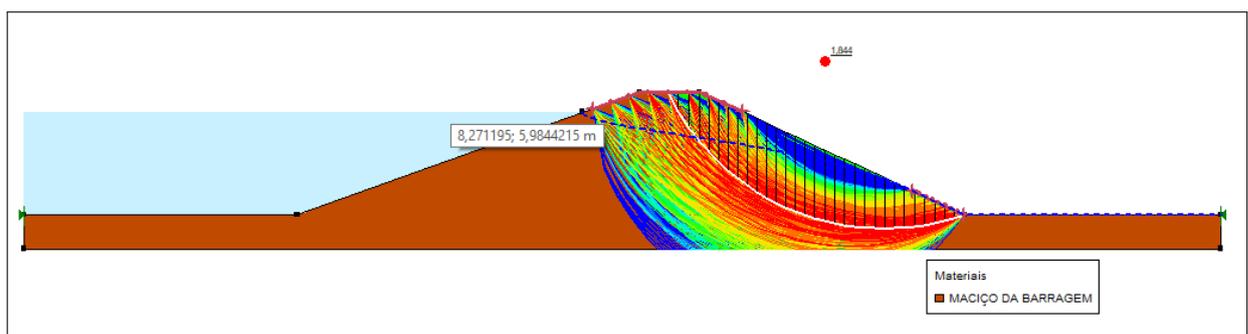
Fonte: Autoria própria, 2020

Figura A.3 – Diagrama da fatia e polígono de forças - Talude de jusante



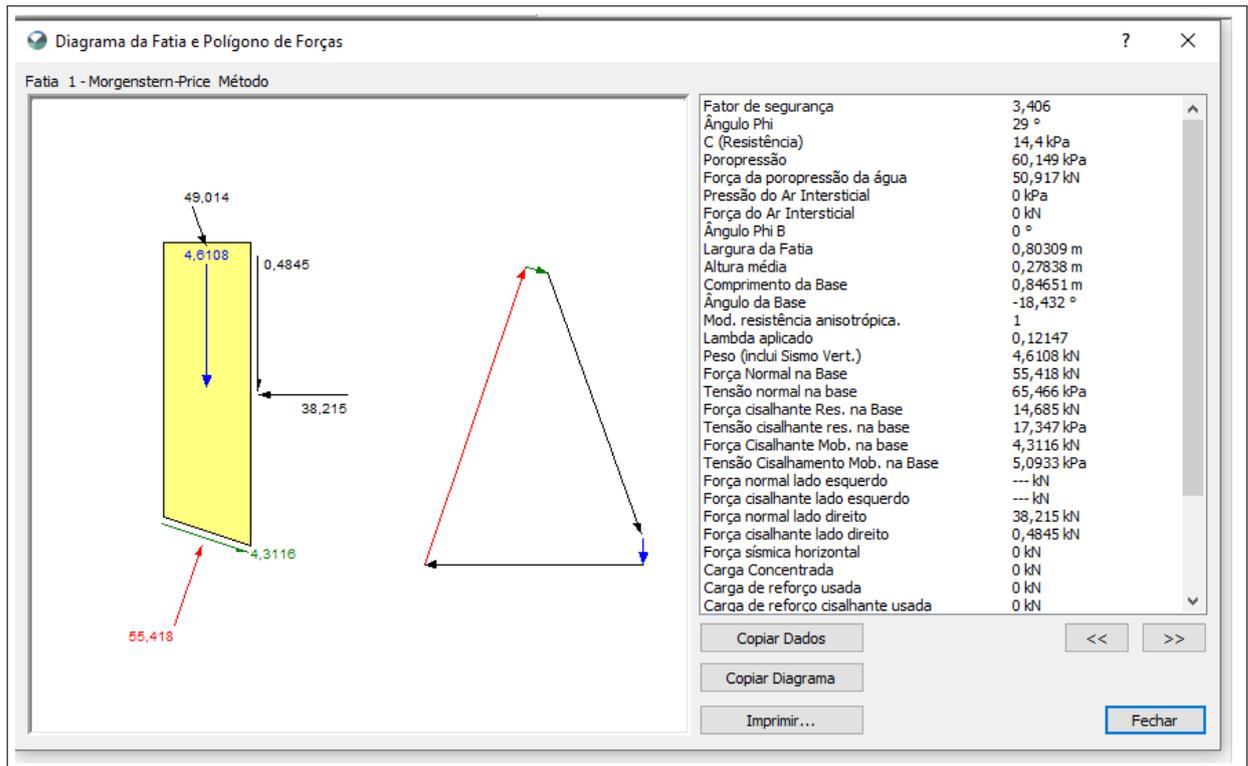
Fonte: Autoria própria, 2020

Figura A.4 – Superfícies de Ruptura - Talude de jusante



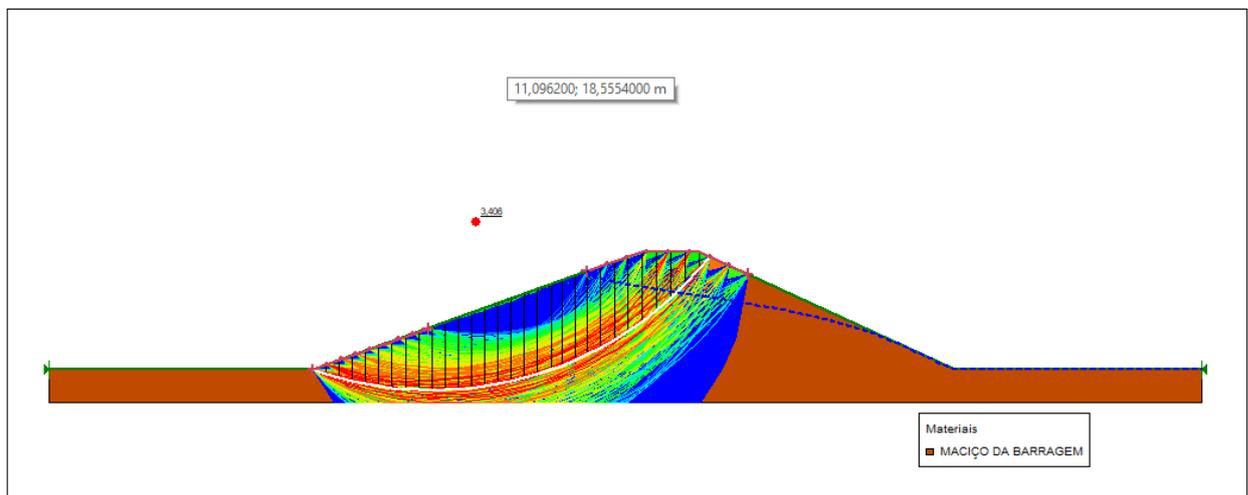
Fonte: Autoria própria, 2020

Figura A.5 – Diagrama da fatia e polígono de forças - Talude de montante



Fonte: Autoria própria, 2020

Figura A.6 – Superfícies de Ruptura - Talude de montante



Fonte: Autoria própria, 2020

## ANEXO A – PROPRIEDADES DOS SOLOS

Figura AN.1 – Propriedades dos tipos de solos - Aspectos qualitativos

Propriedades Médias dos Solos				
Tipo de Solo	Permeabilidade	Resistência ao "Piping"	Resistência ao Cisalhamento	Trabalhabilidade
GW	Permeável	Alta	Muito alta	Muito boa
GP	Permeável a muito permeável	Alta a média	Alta	Muito boa
GM	Semi-permeável	Alta a média	Alta	Muito boa
GC	Impermeável	Alta a média	Alta	Muito boa
SW	Permeável	Alta	Muito alta	Muito boa
SP	Permeável a semi-permeável	Baixa a muito baixa	Alta	Boa a regular
SM	Semi-permeável a impermeável	Média a baixa	Alta	Boa a regular
SC	Impermeável	Alta	Alta a média	Boa a regular
ML	Impermeável	Baixa a muito baixa	Média a baixa	Regular a muito má
CL	Impermeável	Alta	Média	Boa a regular
OL	Impermeável	Média	Baixa	Regular a má
MH	Muito impermeável	Média a alta	Baixa	Má a muito má

Fonte: Vieira et. al. (1996)