

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**  
**Faculdade de Engenharia e Ciências – Câmpus de Guaratinguetá**

**PEDRO ALVES DE CARVALHO REIS**

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ANÁLISE FÍSICA-MECÂNICA-  
HIDRÁULICA DE SOLO MADURO NÃO SATURADO DE UMA ÁREA DE RISCO  
NO MUNICÍPIO DE SANTOS (SP)**

Guaratinguetá (SP)

2024



**PEDRO ALVES DE CARVALHO REIS**

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ANÁLISE FÍSICA-MECÂNICA-  
HIDRÁULICA DE SOLO MADURO NÃO SATURADO DE UMA ÁREA DE RISCO  
NO MUNICÍPIO DE SANTOS (SP)**

Trabalho de graduação apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Mariana Ferreira Benessiuti Motta

Guaratinguetá (SP)

2024

R375c	<p>Reis, Pedro Alves de Carvalho</p> <p>Caracterização geotécnica e análise física-mecânica-hidráulica de solo maduro não saturado de uma área de risco no município de Santos (SP) / Pedro Alves de Carvalho Reis - Guaratinguetá, 2024.</p> <p>69 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 66-69</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.</p> <p>Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mariana Ferreira Benessiuti Motta</p> <p>1. Solos não saturados. 2. Engenharia geotécnica. 3. Cisalhamento dos solos. I. Título.</p> <p>CDU 624.13</p>
-------	--

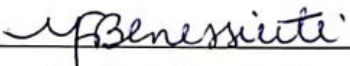
**PEDRO ALVES DE CARVALHO REIS**

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ANÁLISE FÍSICA-MECÂNICA-  
HIDRÁULICA DE SOLO MADURO NÃO SATURADO DE UMA ÁREA DE RISCO  
NO MUNICÍPIO DE SANTOS (SP)**

Trabalho de Graduação apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Data da defesa: 14/11/2024

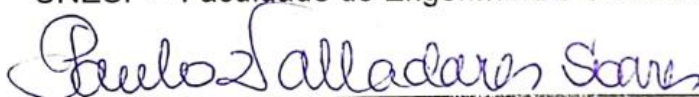
Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_

Profa. Dra. Mariana Ferreira Benessiuti Motta (Orientadora)  
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Gabriel Orquizas Mattiello Pedroso  
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Paulo Valladares Soares  
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

Para o meu avô Eustáquio, pedreiro de profissão. Que com as próprias mãos construiu a casa onde eu passei todos os meus natais.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha extensa família. Peça fundamental da minha vida, e fonte de todo o incentivo para que os desafios da graduação fossem superados. Aos meus pais, Heraldo e Denise, que nunca deixaram faltar recurso ou motivação para que a faculdade fosse possível; obrigado por não deixarem de acreditar em mim quando eu queria desistir; e obrigado por terem me dado o presente mais precioso que há. Ao meu irmão Gabriel, meu primeiro e melhor amigo, por toda intuição jornalística que evitou que este texto se tornasse um desastre; e por ter me escutado falar sobre engenharia durante horas a fio, mesmo que não estivesse entendendo nada sobre. À minha madrinha Dadi, minha “irmã” mais velha e segunda mãe, por ter sido a minha maior companheira durante minha estadia no Vale do Paraíba. Aos meus tios, Maza e Dito, que durante as tribulações de uma nova fase, me acolheram como filho e me deram todo o suporte possível e impossível. Ao meu tio, Kalu, por todos os ensinamentos de fraternidade e de galhardia. Aos meus primos (todos mais velhos), de sangue e de coração, por me ensinarem o que é a vida, e como ser adulto. Ao meu tio José Oliveira, pelo orgulho que sempre fez questão de demonstrar, e por todas as conquistas que fez questão de comemorar comigo. Aos Carvalhos, aos Reis, e aos nossos agregados. A todos vocês, meu profundo e sincero, obrigado.

Agradeço aos moradores da República Susexo, que durante toda graduação me acompanharam por todos os momentos bons e ruins, e me proporcionaram em Guaratinguetá uma verdadeira família. Vocês são os responsáveis por tornarem a jornada leve e possível.

Agradeço ao Guilherme Pagni de Aquino, que esteve presente comigo desde o dia um, sendo meu braço direito na FEG e fora dela. Por todos os estudos, trabalhos e provas que fizemos juntos. Por todas as paranoias compartilhadas. Sem o Guilherme, tudo teria sido mais difícil.

Agradeço à Júlia dos Santos Oliva, companheira de congresso e colega de laboratório. Por todas as vezes que pesou minhas amostras da estufa quando eu não estava em Guaratinguetá, e por todas as vezes que me ouviu reclamar da vida.

Agradeço aos demais amigos (e irmãos) conquistados durante a faculdade. Pelo apoio em cada matéria. Pelas explicações cruciais na véspera de toda prova.

Pelas ajudas durante o desenvolvimento e a escrita desse trabalho. Pelos conselhos recebidos. Obrigado pela companhia, sozinho não se vai a lugar algum.

Agradeço à Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Mariana Ferreira Benessiuti Motta, por ter despertado em mim a paixão pela geotecnia, e por ter proporcionado a oportunidade de realizar uma iniciação científica, um artigo e por fim, este trabalho. Por toda orientação e por toda ajuda, muito obrigado.

Agradeço ao técnico Flávio Augusto Bernardes da Silva, que com muita disposição me guiou através dos ensaios de laboratório que a pandemia inicialmente não me permitiu praticar.

Agradeço ao apoio fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), com a concessão do Projeto de Pesquisa Regular, processo nº 2023/04461-4. Também agradeço ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) pela parceria nesta pesquisa, e em conjunto ao Projeto REDEGEO pelo apoio, através da Carta Convite MCTI/FINEP/FNDCT 01/2016, Instrumento contratual código N° 0.1.16.0068.00.

Agradeço à CEG Engenharia pela oportunidade oferecida quanto à realização dos ensaios de cisalhamento que foram parte crucial deste estudo. Em especial à equipe de laboratório, que me auxiliou desde à operação dos equipamentos, até a interpretação dos resultados.

Por fim, gostaria de agradecer especialmente às minhas avós, Vi e Cida, ao meu padrinho Orlando, e à minha tia Ana Lúcia. Foi com muita felicidade que vocês me viram começar essa jornada, e a presença de vocês faz muita falta hoje. Muitíssimo obrigado por todas as memórias que pudemos criar, e que hoje guardo de recordação. Saudade é o amor que fica.

“It turns out life isn’t a puzzle that can just be solved one time and it’s done. You wake up every day, and you solve it again.”

Michael Schur, *The Good Place*.

## RESUMO

O comportamento geomecânico dos solos não-saturados é um tradicional campo de estudo da geotecnia e da engenharia civil. A compreensão da composição do solo e dos seus parâmetros de resistência é de extrema importância não só para a engenharia (no âmbito de projetos de fundações, contenções, rodovias, entre outros), mas também para a segurança pública e para o meio-ambiente, uma vez que obras de geotecnia quando mal elaboradas, podem resultar em falhas que são capazes de causar grandes impactos socioambientais, além de causar prejuízos financeiros e de vida humana. Nesse contexto, a água entra como fator chave. É a presença de água no solo que pode alterar o seu comportamento e comprometer o funcionamento de estruturas à ele projetadas. Além disso, a ocorrência de chuvas em zonas de morros pode ocasionar deslizamentos de terra e outros movimentos de massa, resultando nos problemas mencionados anteriormente. Neste trabalho, foi estudado uma amostra de solo areno-argiloso de Santos (SP), próxima uma plataforma de coleta de dados do CEMADEN. Foi realizado o ensaio do papel filtro, da porosimetria de mercúrio, e ensaios de cisalhamento para duas condições de umidade (umidade natural e amostras saturadas). A partir da combinação dos resultados obtidos, foi possível traçar uma envoltória de resistência estendida que correlaciona a presença de água no solo com a sua capacidade de resistência, e que permite, portanto, compreender melhor o comportamento da amostra coletada.

**Palavras-chave:** solos não-saturados; curva de retenção; papel-filtro; cisalhamento direto.

## **ABSTRACT**

The geomechanical behavior of unsaturated soils is a traditional study field in geotechnic and civil engineering. The comprehension of the soil's composition and its strength parameters is of extreme importance not only for engineering (in the context of foundations, retaining structures, highway projects, and others), but also for the public safety and the environment, since geotechnical projects, when poorly designed, can result in failures that are capable of causing great socio-environmental impacts, in addition to financial and human life losses. In this context, water acts as a key factor. It is the presence of water in the soil that can alter its behavior and compromise the functioning of structures designed for it. In addition, the occurrence of rainfall in hilly areas may cause landslides and other mass movements, resulting in the problems mentioned above. In this work, a sample of sandy-clay soil from Santos (SP), near a CEMADEN data collection platform, was studied. The filter paper method test, the mercury porosimetry test and direct shear tests for two moisture conditions (natural moisture and saturated samples) were carried out. From the combination of the obtained results, it was possible to trace an extended strength envelope that correlates the presence of water in the soil with its resistance capacity, and therefore, allow a better understanding of the behavior of the collected sample.

**Keywords:** unsaturated soils; retention curve; filter-paper; direct shear.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de fases do solo. ....	19
Figura 2 – Disposição das partículas de solo. ....	21
Figura 3 – Envoltória de Mohr-Coulomb. ....	22
Figura 4 – Envoltória estendida de Mohr-Coulomb. ....	23
Figura 5 – Parâmetros de uma curva de retenção. ....	25
Figura 6 – Equações de ajuste para curvas de retenção ....	26
Figura 7 – Exemplo de curva de retenção bimodal. ....	27
Figura 8 – Princípio do ensaio MIP ....	28
Figura 9 – Curva de porosimetria para diferentes materiais. ....	28
Figura 10 – Morro do José Menino, com destaque para a estação da SABESP. ....	30
Figura 11 – Local de coleta da amostra. ....	31
Figura 12 – Peneiras durante o ensaio de peneiramento fino. ....	32
Figura 13 – Determinação do limite de liquidez. ....	32
Figura 14 – Corpos de prova durante o período de saturação. ....	33
Figura 15 – Corpos de prova durante o período de secagem. ....	34
Figura 16 – Corpos de prova embalados e identificados. ....	35
Figura 17 – Molde durante obtenção do corpo de prova. ....	37
Figura 18 – Corpo de prova talhado. ....	38
Figura 19 – Corpos de prova durante o período de saturação. ....	39
Figura 20 – Diferença entre dados tratados e dados brutos. ....	40
Figura 21 – Critério de Campos e Carillo. ....	41
Figura 22 – Curva granulométrica do solo estudado. ....	43
Figura 23 – Processo de classificação SUCS do solo. ....	44
Figura 24 – Curva de retenção preliminar. ....	46
Figura 25 – Curva de retenção ajustada para a proposta Dual Van Genuchten. ....	47
Figura 26 – Distribuição do diâmetro dos poros. ....	48
Figura 27 – Curvas de retenção pelos dois métodos estudados. ....	49
Figura 28 – Determinação de $\Psi_B$ e $\Psi_{RES}$ . ....	50
Figura 29 – Resultados da etapa de adensamento com umidade natural. ....	51
Figura 30 – Resultados dos ensaios de cisalhamento com umidade natural. ....	51
Figura 31 – Envoltória de ruptura para umidade natural. ....	52

Figura 32 – Novos resultados da etapa de adensamento com umidade natural.....	53
Figura 33 – Novos resultados dos ensaios de cisalhamento com umidade natural. .	53
Figura 34 – Nova envoltória de ruptura para umidade natural. ....	54
Figura 35 – Tensões de ensaio na curva de retenção. ....	55
Figura 36 – Resultados dos ensaios de adensamento com amostras inundadas. ....	56
Figura 37 – Resultados dos ensaios de cisalhamento com amostras inundadas. ....	56
Figura 38 – Envoltória de ruptura para umidade saturada .....	57
Figura 39 – Obtenção dos valores de sucção. ....	58
Figura 40 – Envoltória estendida de Mohr-Coulomb. ....	59
Figura 41 – Estudos da variação de $\phi_b$ em relação à sucção. ....	60
Figura 42 – Envoltória não-linear de Caso (2014) para o solo residual jovem. ....	61
Figura 43 – Envoltória não-linear de Caso (2014) para o solo colúvio. ....	62
Figura 44 – Representação gráfica do parâmetro $\phi_b$ . ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tamanho das partículas de solo. ....	20
Tabela 2 - Composição granulométrica (ABNT) do solo estudado.....	43
Tabela 3 - Limites de Atterberg do solo estudado. ....	44
Tabela 4 - Índices físicos do solo estudado.....	45
Tabela 5 – Ajuste pelo modelo Bimodal de Van Genuchten. ....	46
Tabela 6 – Distribuição dos poros no solo estudado.....	48
Tabela 7 – Valores de Porosidade. ....	48
Tabela 8 – Comparação dos valores de $\Psi_B$ e $\Psi_{RES}$ . ....	50
Tabela 9 – Sucção aparente das amostras com umidade natural.....	54
Tabela 10 – Resumo dos ensaios realizados.....	58
Tabela 11 - Comparação com demais estudos. ....	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	14
1.2	OBJETIVOS GERAIS .....	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.4	JUSTIFICATIVA.....	16
<b>2</b>	<b>LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>18</b>
2.1	ESTADO DOS SOLOS .....	18
2.1.1	Formação.....	18
2.1.2	Composição e Estrutura .....	18
2.1.3	Caracterização e Classificação.....	20
2.2	RESISTÊNCIA DOS SOLOS.....	21
2.3	CURVA DE RETENÇÃO .....	23
2.3.1	Sucção.....	23
2.3.2	Ensaio do Papel Filtro.....	24
2.3.3	Ensaio da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio.....	27
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
3.1	AMOSTRA DE SOLO .....	30
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	31
3.3	ENSAIO DO PAPEL FILTRO.....	33
3.4	ENSAIO DA POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO .....	36
3.5	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO .....	36
3.5.1	Preparação e configuração.....	36
3.5.2	Condições de Umidade .....	38
3.5.3	Tratamento e ajuste de dados experimentais.....	39
3.5.4	Critério de Ruptura .....	41
3.5.5	Cálculo da envoltória estendida.....	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA.....	43
4.2	CURVA DE RETENÇÃO .....	45
4.2.1	Papel Filtro.....	45
4.2.2	Porosimetria de Mercúrio.....	47
4.3	ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA .....	50

4.3.1	Ensaio com umidade natural.....	50
4.3.2	Ensaio em amostras inundadas.....	55
4.3.3	Envoltória Estendida.....	57
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>64</b>
	REFERÊNCIAS .....	66

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O solo é a camada mais superficial da crosta terrestre, e constitui um elemento de extrema importância para todas as atividades humanas. Resultado de longos processos de intemperismo, é um material complexo, a partir do qual se desenvolvem as atividades agrícolas, e de onde se extrai os recursos minerais utilizados em diversos campos da indústria.

No campo da engenharia civil, a compreensão do solo é a primeira etapa antes de que se pense em qualquer projeto ou construção. São realizadas sondagens, coleta de amostras, análise de perfis e execução de uma infinidade de ensaios de laboratório; com o objetivo final de entender como essa estrutura geológica se comporta, e como é possível utilizá-la para construção das estruturas humanas. Porém, quando esse material não é devidamente estudado, a sociedade como um todo fica sujeita a um grande número de reveses, que se manifestam na forma de deslizamentos, recalques, rupturas de fundações e de contenções; e que eventualmente podem levar a prejuízos ambientais, financeiros, e de vida humana (Castro *et al.*, 2005).

Durante o estudo de um solo, previamente às etapas de dimensionamento da construção, uma das informações mais essenciais são os parâmetros de resistência. São eles os responsáveis por traduzir a capacidade do material de resistir a acréscimos ou redução de esforços, e, portanto, prever o seu comportamento em uma situação real de solicitação. Uma das maneiras de expressar essa característica é através do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, que relaciona a tensão solicitante de um solo com a sua capacidade de resistência, e pode ser obtida através de diversos ensaios. Dentre eles o ensaio de cisalhamento direto se destaca pela sua simplicidade de execução (Gonçalves e Monteiro, 2018), e pela produção de resultados relativamente satisfatórios.

Sabe-se também, que a presença de água no solo pode alterar as suas características geofísicas e, portanto, influenciar o seu comportamento de resistência. A importância dessa relação água/solo é tamanha, que se divide a Mecânica dos Solos em dois campos de estudo: a mecânica dos solos saturados e a mecânica dos solos não saturados (Fredlund *et al.*, 2012). Buscando compreender melhor o

comportamento da relação entre esses dois materiais, uma das possibilidades de estudo é a Curva de Retenção, que consiste em associar o potencial mátrico de um solo com o seu teor de umidade. Esta pode ser obtida através do ensaio do papel filtro, notório pela facilidade na montagem e execução (Marinho *et al.*, 2023) e pela técnica da porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP).

Essas duas abordagens podem ser combinadas, conforme demonstrado por Fredlund *et al.* (2012), ao se relacionar a capacidade de retenção de água de um solo com a sua capacidade de resistência, o que acaba por formar uma envoltória estendida para o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Esse método permite uma compreensão mais detalhada sobre o comportamento de um solo não saturado, quando este for solicitado à determinada carga e estiver condicionado a determinada umidade; ou quando ocorre uma variação no estado de tensões ou de saturação. É possível - portanto - antever o que pode acontecer com um solo após um período de chuvas, por exemplo, onde se passa de uma condição menos saturada para mais saturada.

A combinação desses dois estudos é de extrema importância quando associada ao contexto de estabilidade de encostas, visto que o monitoramento interdisciplinar dos parâmetros e do comportamento do solo são essenciais para a produção de previsões mais assertivas (Rodrigues, 2019); e, conseqüentemente, para a mitigação dos impactos decorrentes de desastres relacionados à movimentos de massa (Carvalho e Bernardinho, 2023).

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

Realizar estudos para compreender a relação entre a sucção matricial e os parâmetros de resistência de um solo maduro de uma área de risco no município de Santos, São Paulo.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização da amostra de solo.
- Determinar a curva de retenção de umidade do solo através do método do papel filtro.

- Determinar a curva de retenção de umidade do solo através do método da porosimetria de mercúrio.
- Determinar os parâmetros de resistência do solo através do ensaio de cisalhamento direto em duas condições de umidade: natural e saturado.
- Buscar correlacionar o comportamento das curvas de retenção com a resistência do solo nas diferentes situações de saturação.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

A sociedade contemporânea vive adstrita do processo global de mudanças climáticas. As alterações globais observadas a partir da revolução industrial durante o século XVIII, resultam em impactos socioambientais cada vez mais significativos. Estudos publicados nas últimas décadas evidenciam mudanças nos ecossistemas de todo mundo, variações extremas de temperatura, mudança no comportamento de chuvas e ocorrência de eventos climáticos extremos (IPCC, 2023). E, por consequência, todas essas alterações no comportamento do clima terrestre têm repercussões em aspectos sociais, como: aumento de migrações e refugiados climáticos, crises econômicas, crescimento no número de desastres “naturais”, entre outros.

Nesse contexto, é possível observar também, que a ocorrência de eventos climáticos extremos impacta diretamente sob deslizamentos de terra e outros tipos de movimento de massa. A presença de água na estrutura dos grãos é responsável por alterar os índices físicos de um solo, o que por consequência muda a sua condição de saturação, e afeta o seu comportamento geotécnico (Pinto, 2006).

Então, é correto afirmar que o aumento da pluviosidade em determinadas regiões pode ser associado com o aumento na ocorrência de desastres naturais relacionados a movimentos de massa, conforme estudado por Bustamante (2010). A região da Baixada Santista, no estado de São Paulo, é notoriamente impactada por tais desastres. O município de Santos, especificamente, passou por um processo intenso de adensamento populacional durante o século XX. A ausência de espaços planos acabou por condicionar a população mais pobre a se concentrar sua ocupação em zonas de morros e encostas, caracterizadamente sujeitas a deslizamentos de terra. Esse contexto motivou o estudo das ocorrências de movimentos de massa por

parte do CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), que visam implementar na cidade, sistemas de monitoramento ambiental e geotécnico (Gobbi, 2017), que através da coleta de dados que podem colaborar para o monitoramento preciso do processo de escorregamento na região. O Centro emite comunicados de alerta direcionados conforme a climatologia local em função de eventos climáticos atípicos ou extremos. Existe, porém, um interesse por parte do CEMADEN em aprimorar a qualidade dos avisos através do melhor entendimento do solo e o seu comportamento perante à presença de água; entendo assim, portanto, quais as dimensões reais de risco de deslizamento na região monitorada.

Esse estudo visa, portanto, realizar a caracterização física, hidráulica e mecânica de uma amostra de solo coletada na região da Baixada Santista, através dos ensaios clássicos de caracterização (granulometria com sedimentação, massa específica dos grãos e limites de Atterberg), dos ensaios pelo método do Papel Filtro e pela Porosimetria de Mercúrio. Além de se obter os parâmetros de resistência do solo através de ensaios de cisalhamento direto. Em posse dos dados, será estudada a relação entre a Curva de Retenção e as Envoltórias de Mohr-Coulomb obtidas, através da proposta de Fredlund, *et al.* (2012), buscando determinar a Envoltória Estendida para o critério de ruptura.

Trabalhos semelhantes foram desenvolvidos na área da geotecnia. Rodrigues (2019) estudou o comportamento de solos não saturados em Santos (SP), através de curvas de retenção e do ensaio com permeâmetro de Gelphi; concluindo que a monitoração de umidade por sensores deve ser feita de forma constante. Bugs (2015), determinou as envoltórias de ruptura e a curva de retenção para duas amostras de solo no município de São Gabriel (RS), coletadas de um trecho de via não pavimentada; desenvolvendo a partir destas a envoltória estendida de Mohr-Coulomb; além de avaliar o comportamento dos materiais estudados em situações práticas de engenharia.

## 2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

### 2.1 ESTADO DOS SOLOS

#### 2.1.1 Formação

O solo é um material proveniente do processo de decomposição de rochas, processo esse que se dá através da atuação de condições climáticas (tempo e intempéries) sob o material rochoso ao longo de milhares de anos. Essa dinâmica é considerada um fenômeno geológico natural, através do qual a estrutura da rocha é gradativamente alterada pelo ambiente ao seu redor (Conciani *et al.*, 2023).

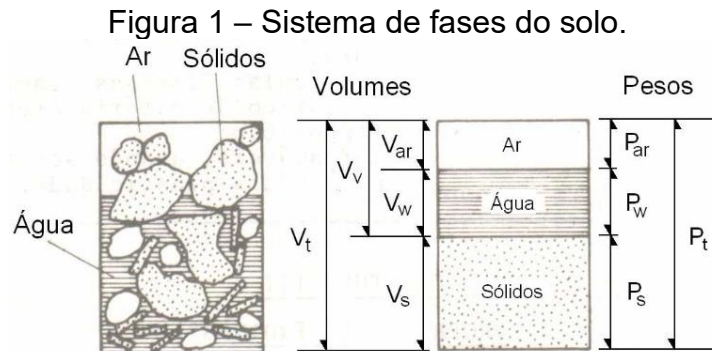
Esse conjunto de processos pode ser dividido em duas categorias principais: físicos (relacionados principalmente com a fragmentação proveniente de variação de temperatura e outros mecanismos de fissuração) e químicos (decorrentes de reações químicas relacionadas sumariamente com a penetração de água – que acaba por transportar outros materiais – no espaço entre agregados rochosos); esses dois grupos se complementam e frequentemente interagem entre si, a presença e forma de atuação de cada um deles é responsável pela variedade de solos encontrados ao redor do planeta. Alguns autores ainda consideram a existência de uma terceira categoria: o intemperismo biológico (resultado da ação de microrganismos e outros elementos protistas, que alteram a composição da rocha através da extração de nutrientes e da ocorrência de reações químicas) mostrando, mais uma vez, a interação entre os diferentes processos de meteorização (Sodré, 2012).

#### 2.1.2 Composição e Estrutura

Confirma-se, portanto, que a composição e as características de um solo são fruto da composição mineralógica da rocha-matriz e dos processos de decomposição ao qual ela foi sujeita; conforme as elaborações de Pinto (2006) e Conciani *et al.* (2023).

A variabilidade de tipos de solos influi na necessidade de adoção de métodos para estudo e categorização desses materiais. Uma das formas de se analisar esse material é a partir da sua composição, consistindo em entender o solo como um

conjunto de três fases distintas: fase ar, fase água e fase sólida. A composição desse sistema trifásico pode ser melhor compreendida a partir da Figura 1.



Fonte: Viana, 2016.

A presença e o comportamento desses elementos vão permitir o cálculo dos índices físicos de uma amostra de solo, que podem ser interpretados como “indicadores” da composição do material, e são essenciais para a interpretação de ensaios e para a elaboração e projetos na engenharia geotécnica. O principal índice físico é o teor de umidade, que indica o quanto de água está presente em uma amostra de solo, e pode ser expressado em termos de volume (umidade volumétrica –  $\theta$ ) e de massa (umidade gravimétrica –  $w$ ), sendo calculado conforme as seguintes equações:

$$\theta_{[\%]} = \frac{V_w}{V_s} \quad (1)$$

$$w_{[\%]} = \frac{M_w}{M_s} \quad (2)$$

Onde:  $V_w$  é o volume de água,  $V_s$  é o volume de sólidos,  $M_w$  é a massa de água e  $M_s$  é a massa dos sólidos. É a partir do teor de umidade – aliado de outras características determinadas experimentalmente, como a massa específica natural e a massa específica dos sólidos - que é possível calcular os demais índices físicos de um solo, e garantir assim um bom entendimento sobre a estrutura do material.

Tomando novamente como referência a Figura 1, em uma situação em que todo o espaço de vazios esteja preenchido com água, considera-se que este solo esteja numa condição saturada. Nesse caso, o sistema trifásico (solo-água-ar) passa a ser considerado como bifásico (solo-água). As propriedades químicas da água ocasionam uma interação peculiar com as partículas de solo, e a sua presença parcial nas estruturas do solo implicam em um comportamento que difere do esperado para

solos completamente preenchidos com água. Esse fenômeno será abordado de forma mais aprofundada no capítulo seguinte.

### 2.1.3 Caracterização e Classificação

Tratando da fase sólida especificamente, uma das classificações fundamentais é a referente ao tamanho das partículas, chamada de granulometria. A fase sólida de um solo é subdividida essencialmente em quatro grupos: fração pedregulho, fração areia, fração silte e fração argila. Esses grupos são definidos pelo tamanho diametral dos grãos (ABNT, 1995), que podem ser observados na Tabela 1. A fração areia pode ainda ser subdividida em: grossa, média e fina.

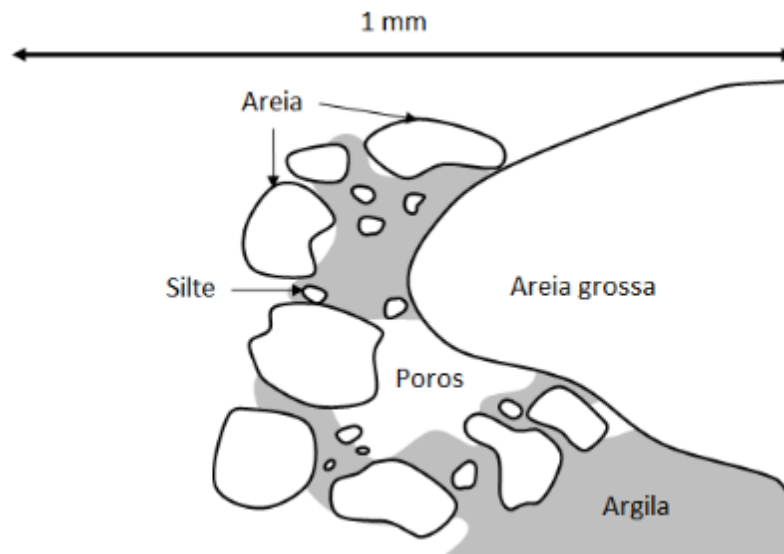
Tabela 1 - Tamanho das partículas de solo.

Fração	Diâmetro $\phi$ [mm]
Pedregulho	$60 > \phi > 2$
Areia	$2 > \phi > 0,06$
Silte	$0,06 > \phi > 0,002$
Argila	$0,002 > \phi$

Fonte: Elaborado pelo autor (2024) a partir de dados da ABNT (1995).

Cada uma dessas frações tem aspectos característicos que definem o comportamento do solo como um todo. Em função do maior diâmetro, os grãos de areia interagem fisicamente entre si, proporcionando ao solo uma resistência por atrito. Já as partículas de argila, devido ao diâmetro reduzido, reagem eletronicamente com as moléculas de água, garantindo ao solo um aspecto coesivo (que também garante determinada resistência). O tamanho e a disposição das frações podem ser vistos na Figura 2, que segue.

Figura 2 – Disposição das partículas de solo.



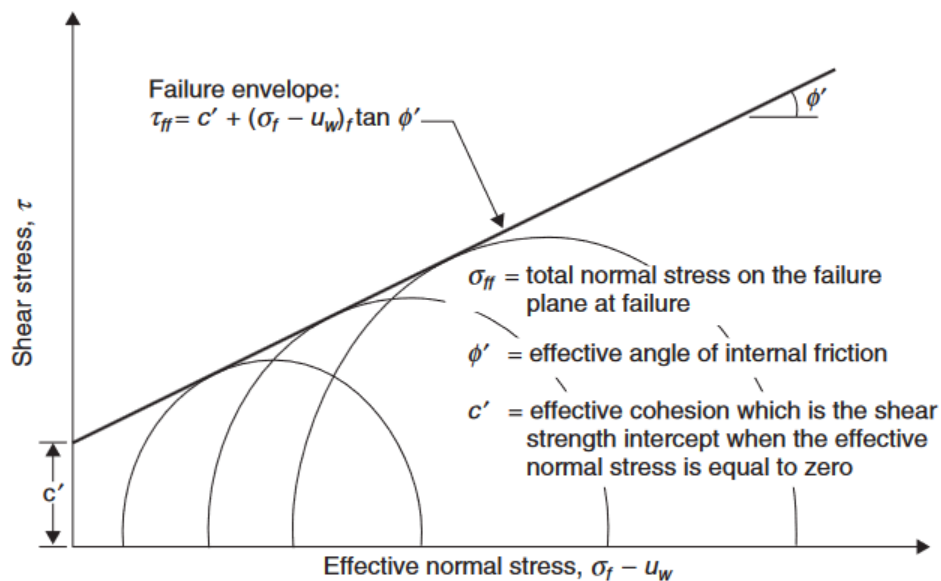
Fonte: Rowell (1994) *apud* Sodré (2012).

Para fins acad micos, a mecânica dos solos convencionada a divisão dos solos em dois grandes grupos: solos arenosos (pedregulhos, areias e siltes) e solos argilosos (argilas e siltes); a fra o silte acaba sendo considerada como um elemento secundário de transi o entre as duas principais. Para solos mais arenosos, observa-se um comportamento principalmente friccional, e seu estado (compacidade) varia de “fofo” é “compacto”. Por sua vez, solos argilosos apresentam um comportamento mais coesivo, porém o estado (consistência) varia com a umidade (Lima e Rodrigues, 2023); portanto, o conhecimento dos limites de Atteberg é fundamental para a compreensão do seu comportamento.

## 2.2 RESISTÊNCIA DOS SOLOS

O comportamento mecânico de um solo se caracteriza principalmente pela grandeza de varia o de volume e pela sua resistência ao cisalhamento. Esse comportamento é condicionado   uma série de variáveis de tensão combinadas, que juntas configuram o estado de tensão do solo (Fredlund e Rahardjo, 1993). Fredlund *et al.* (2012) enfatizam a importância do estudo da capacidade que um solo tem de resistir a forças de cisalhamento. O comportamento de resistência do solo quando submetido a um estado de tensões é frequentemente expresso na forma da envoltória de Mohr-Coulomb (Tian e Zheng, 2023), que tem seus parâmetros representados na Figura 3.

Figura 3 – Envoltória de Mohr-Coulomb.



Fonte: Fredlund *et al.*(2012).

Na figura acima representada, são apresentados alguns termos importantes no estudo da resistência dos solos. A tensão normal no plano de ruptura é dada por: " $\sigma_{ff}$ ". O ângulo de atrito interno é representado por: " $\phi'$ ". E por fim, " $c'$ " a coesão sob a qual o solo está sujeito. Como abordado anteriormente, solos com maior parcela arenosa tem uma proeminência do ângulo de atrito; e os solos argilosos por sua vez, contam com uma maior contribuição do aspecto coesivo.

No contexto de solos saturados (quando os vazios estão completamente preenchidos por água), a resistência ao cisalhamento é descrita em termos de tensões efetivas (Terzaghi, 1936; *apud* Fredlund *et al.*, 2012). Essa consideração é feita ao se desprezar os efeitos da poropressão (pressão neutra relativa à presença de água).

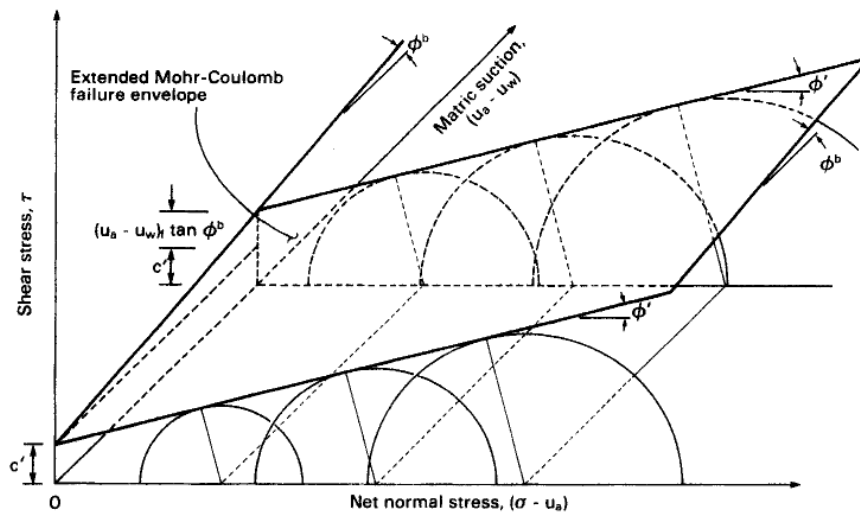
Porém, quando se estuda o mesmo comportamento com solos não-saturados (sistema trifásico: solo, água e ar), há uma considerável dificuldade em se definir critérios mais precisos (Fredlund e Rahardjo, 1993). Fredlund (1973) *apud* Campos e Motta (2023) demonstrou que o estado de tensões do solo poderia ser definido pelas seguintes variáveis:

- $(\sigma - u_a)$ , sendo a tensão normal total menos a pressão do ar nos vazios.
- $(\sigma - u_w)$ , sendo a tensão normal total menos a pressão da água nos vazios.
- $(u_a - u_w)$ , sendo a sucção mátrica atuante nos vazios.

Sendo assim, a variação da poropressão influencia apenas na variável de sucção matricial; e, uma vez saturado, as variáveis  $u_a$  e  $u_w$  se igualam (anulando os efeitos da sucção), voltando às considerações iniciais de Terzaghi para solos saturados (Campos e Motta, 2023).

Considerando o exposto, Fredlund e Rahardjo (1993) propuseram uma versão estendida do critério de Mohr-Coulomb para o estudo da resistência de solos não-saturados. Em contraste com a envoltória original (de representação bidimensional), a envoltória estendida é uma abordagem em três dimensões, que considera – portanto – o efeito de três variáveis: tensões normais efetivas, tensões de cisalhamento na ruptura, e sucção mátrica. Dessa forma, a equação de linha que define os parâmetros de resistência de um solo passa a ser uma “superfície de resistência”. O comportamento dessa envoltória estendida (obtida a partir de diferentes círculos de Mohr) pode ser melhor compreendido com o esquema apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Envoltória estendida de Mohr-Coulomb.



Fonte: Fredlund e Rahardjo (1993).

## 2.3 CURVA DE RETENÇÃO

### 2.3.1 Sucção

A sucção é uma propriedade que indica a capacidade do solo de reter água na sua estrutura. Pode ser dividida em: sucção matricial, em decorrência do fenômeno

de capilaridade; e sucção osmótica, consequência da difusão de diferentes concentrações de sais na água (tendo menor relevância no estudo de situações práticas) (Gitirana Júnior *et al.*, 2023). Somando-se a parcela matricial e a parcela osmótica, obtém-se a sucção total. Por representar a quantidade de força para o desprendimento da água (Bugs, 2015), a sucção é expressa em termos de tensão (sendo normalmente dada em kPa). A correlação entre os valores de umidade e a sucção pode ser expressa através de uma curva de retenção, que representa também a quantidade de energia (na forma de tensão) necessária para remover a água presente na estrutura do solo (Motta, 2016).

Para determinar a sucção – e consequentemente a curva de retenção -, existe uma variedade de métodos que pode ser empregada, porém, três técnicas se destacam, sendo elas: a da placa de sucção (também conhecido como funil de Haines), a da placa de pressão, e a do papel filtro. Esses procedimentos são de fácil aplicação, uma vez que exigem equipamentos consideravelmente mais simples quando comparado a outras técnicas (Reis *et al.*, 2024). O método do papel filtro, por sua vez, detém ainda mais notoriedade, uma vez que apresenta relativamente menos contratempos para a sua aplicação, e.g., não demanda amplo espaço físico, não exige controle de temperatura rigoroso e não faz necessidade de uma precisão de leitura minuciosa (Marinho *et al.*, 2023).

Nesse estudo, foram empenhadas a técnica do papel filtro, assim como a da porosimetria por intrusão de mercúrio - outra possibilidade existente, além das citadas anteriormente. O princípio e o funcionamento de ambas serão explicitados à seguir.

### 2.3.2 Ensaio do Papel Filtro

O ensaio do papel filtro constitui-se em uma técnica indireta para inferir a capacidade de sucção de um solo. O procedimento é baseado na hipótese de que as sucções do papel e do solo se igualam após um período em contato (Lucas *et al.*, 2011). A sucção por sua vez, é determinada a partir do teor de umidade de cada elemento através de uma curva de calibração pré-determinada (Bicalho *et al.*, 2007). A norma que rege o procedimento de ensaio é a D5298-03 (ASTM, 2010).

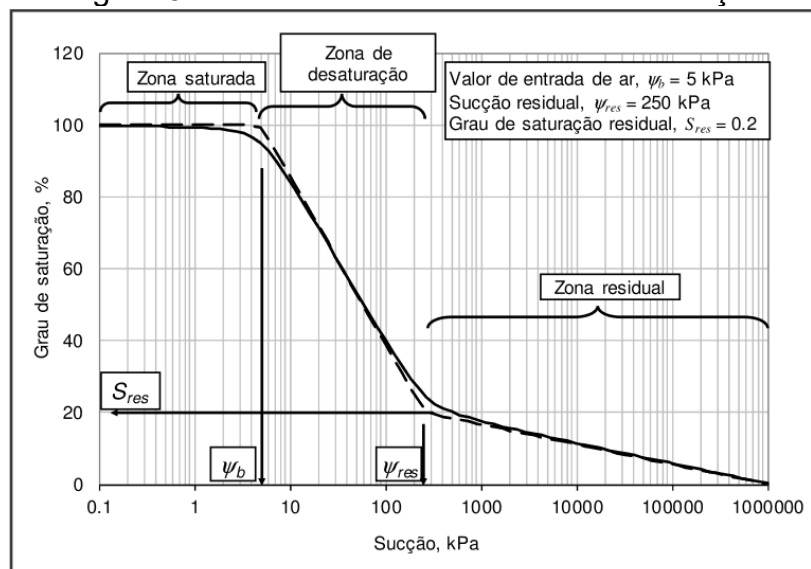
Para a elaboração da curva de retenção, determina-se a sucção para diversos valores de umidade. A forma da curva é diferente a depender da trajetória

adotada para o condicionamento das amostras: secagem ou umedecimento (Motta, 2016). Ao adentrar os poros, ao longo do tempo a água é capaz de preencher a grande maioria dos vazios. Porém, ao ser retirada da estrutura do solo através da evaporação, moléculas de água podem permanecer aderidas a partículas menores.

Na construção da curva, a umidade pode ser expressa através do grau de saturação, grau de saturação efetivo (quando se considera os efeitos da sucção no comportamento da água presente no solo) ou do teor de umidade volumétrico; e é representada no eixo das ordenadas. A sucção é atribuída no eixo das abcissas e usualmente expressa em quilopascal (kPa), porém, pode ser demonstrada na escala natural ou na escala logarítmica (Gitirana Júnior *et al.*, 2023).

Neste último caso, representado na Figura 5, Gitirana Júnior *et al.* (2023) propõem algumas interpretações: o primeiro patamar representa a zona saturada, que quantifica a máxima sucção que poros maiores conseguem reter (delimitado pelo “valor de entrada de ar”); no trecho seguinte a água é drenada com o aumento da sucção; no ponto de transição para o último trecho (chamado zona residual), há a sucção residual e o grau de saturação residual, a partir daqui, a água restante está “menos livre”, e são necessários valores significativos de sucção para permitir a drenagem.

Figura 5 – Parâmetros de uma curva de retenção.



Fonte: Gitirana Júnior *et al.* (2023)

A curva obtida a partir dos pontos experimentais deve ser ajustada matematicamente. O trabalho elaborado por Motta (2016) reúne uma série de

possíveis correções, sendo algumas: Gardner (1958), Brooks e Corey (1964), Van Genuchten (1980), e Fredlund e Xing (1994). A Figura 6 reúne as equações de ajuste e suas respectivas variáveis de entrada.

Figura 6 – Equações de ajuste para curvas de retenção

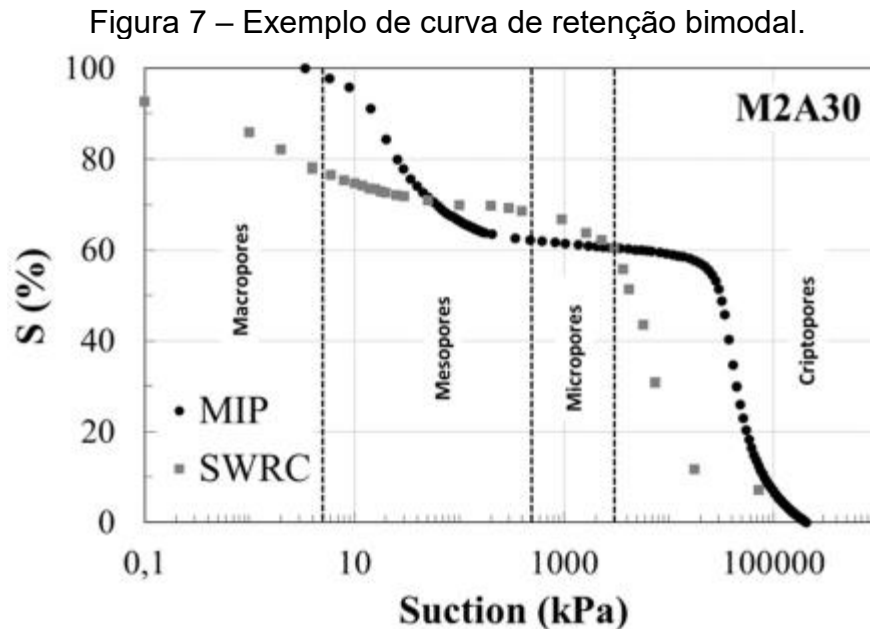
Referência	Equação	Variáveis
Gardner (1958)	$\theta = \frac{1}{1 + q \cdot \Psi^n}$ <p>Sendo: <math>\theta = \frac{(\theta - \theta_s)}{(\theta_s - \theta_r)}</math></p>	$\theta$ : teor de umidade normalizado; $\theta, \theta_r, \theta_s$ : teores de umidade volumétrico, residual e saturado; $\Psi$ : sucção; $n$ e $q$ : parâmetros de ajuste
Brooks e Corey (1964)	$\theta = \left( \frac{\Psi_b}{\Psi} \right)^\lambda$ <p>Sendo: <math>\theta = \frac{(\theta - \theta_s)}{(\theta_s - \theta_r)}</math></p>	$\theta$ : teor de umidade normalizado; $\theta, \theta_r, \theta_s$ : teores de umidade volumétrico, residual e saturado; $\Psi$ : sucção; $\lambda$ : índice de distribuição de diâmetro de vazios; $\Psi_b$ : sucção correspondente ao valor de entrada de ar;
Van Genuchten (1980)	$\theta = \left( \frac{1}{1 + (p \cdot \Psi)^n} \right)^m$	$\theta$ : teor de umidade normalizado; $\Psi$ : sucção; $p, m$ e $n$ : parâmetros de ajuste;
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = C_\Psi \cdot \frac{\theta_s}{\left[ \ln \left[ e + \left( \frac{\Psi}{a} \right)^n \right] \right]^m}$ <p>Sendo: <math>C_\Psi = \frac{-\ln\left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r}\right)} + 1</math></p>	$\theta$ : teor de umidade normalizado; $\Psi_0 = 10^6$ kpa; $\Psi_r$ : sucção no ponto de saturação residual; $e = 2,718$ ; $a = \Psi_i$ $m = 3,67 \cdot \ln\left(\frac{\theta_s}{\theta_i}\right)$ $n = \frac{1,31^{m+1}}{m \cdot \theta_s} \cdot 3,72 \cdot s \cdot \Psi_i$ $s = \frac{\theta_i}{\Psi_p - \Psi_i}$

Fonte: Bugs (2015) *apud* Fredlund e Xing (1994).

É possível, ainda, a ocorrência de curvas com o comportamento denominado bimodal, onde é possível compreender dois valores de entrada de ar e dois trechos de saturação (Gitirana Júnior *et al.*, 2023). A divisão em dois modais é fruto da distribuição granulométrica característica do material, onde o primeiro valor é relacionado com os poros maiores (macroporos), e o segundo é relacionado com os poros menores (microporos). Esse fenômeno é típico de solos com granulometria descontínua, que por sua vez, é fruto do processo de formação do solo e da sua composição mineralógica (Motta 2016).

Além disso, solos com curvas de retenção bimodal vão fazer uso de outras equações de ajuste, mais eficazes para o seu comportamento intrínseco. Diferente do apresentado anteriormente na Figura 7, para as curvas denominadas unimodais. A

Figura 7, que segue, mostra um exemplo de comportamento bimodal de duas curvas de retenção (obtidas através de diferentes métodos de ensaio).

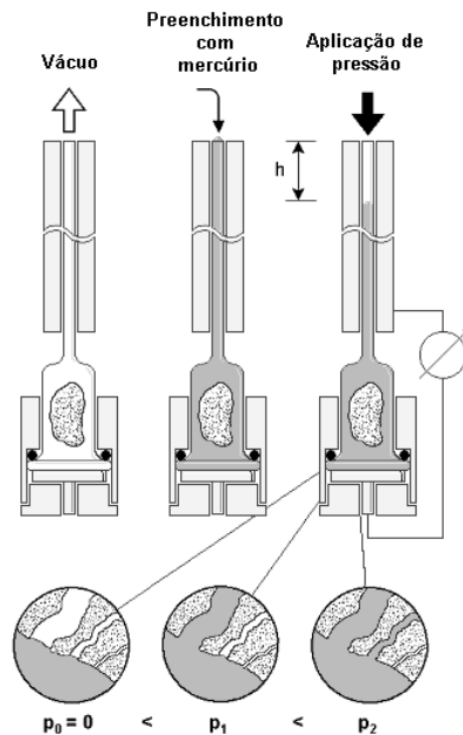


Fonte: Adaptado de Mendes e Marinho (2020).

### 2.3.3 Ensaio da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

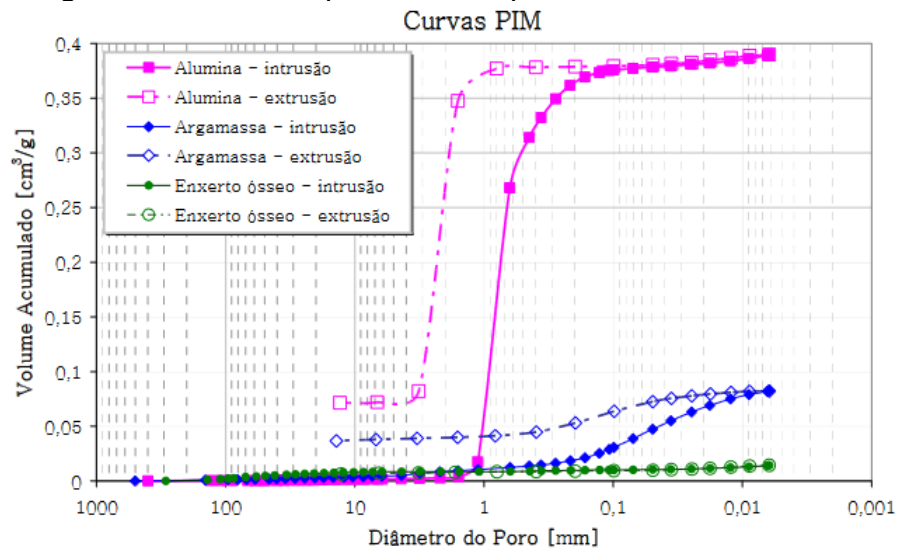
A técnica da porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM, ou MIP - em inglês) consiste na injeção de mercúrio no solo através de uma determinada pressão aplicada (Rodrigues, 2019). O procedimento se desenvolve a partir da propriedade não-molhante do elemento, o que garante que este não penetre nos poros do solo de forma natural (Oliveira, 2006). Dessa forma, à medida em que se aumenta a pressão aplicada ao fluido, maior é a penetração na estrutura do solo. O mercúrio adentra primeiramente os poros maiores, e por fim, os menores (Schmitt, 2009), tal processo pode ser compreendido com apoio da Figura 8. É feita a leitura da redução de mercúrio (líquido introduzido na amostra), relativo a cada pressão aplicada, obtendo-se assim a curva de porosimetria (representada na Figura 9).

Figura 8 – Princípio do ensaio MIP



Fonte: Oliveira (2006).

Figura 9 – Curva de porosimetria para diferentes materiais.



Fonte: Schmitt (2009).

Schmitt (2009) também aponta que, uma vez que os poros sejam totalmente preenchidos pelo mercúrio após a intrusão, o ponto máximo da curva formada indica a porosidade total do material.

A aplicação de MIP foi objeto de estudo de Mendes e Marinho (2020), que estudaram a distribuição do tamanho de poros em diferentes horizontes de solo da Serra do Mar (SP). Na ocasião, afirmou-se que a curva de retenção obtida através da porosimetria se aproximou com aquela obtida pela SWRC (técnica do papel filtro), apesar de um pequeno deslocamento à direita. Também foi possível perceber um aumento no volume introduzido conforme o aumento da profundidade estudada.

Mais recentemente, Crippa *et al.* (2024) também estudaram a técnica em solos reforçados com fibras recicladas, com o objetivo de entender qual seria o seu impacto na distribuição do diâmetro dos poros e na permeabilidade do material.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 AMOSTRA DE SOLO

A amostra de solo estudada foi coletada no município de Santos (SP), no bairro “José Menino”. e pode ser vista na Figura 10. De acordo com imagens de satélite (Google Earth, 2024), o local abriga há décadas uma comunidade e uma estação da SABESP, além de fazer fronteira com o município vizinho de São Vicente (SP).

Figura 10 – Morro do José Menino, com destaque para a estação da SABESP.



Fonte: Google Earth (2024).

Esse ponto foi escolhido por ser uma encosta próxima à uma plataforma de coleta de dados de geotecnia (PCD-Geo, que conta com sensores para leitura da umidade no solo) monitorada pelo CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais). Coletou-se uma amostra deformada (armazenada em um saco de algodão próprio), e um bloco indeformado de aproximadamente 60 x 60 cm (envolto em plástico filme e guardado em uma caixa de madeira, para preservar a integridade e a umidade natural). A partir destas, foram realizados todos os ensaios de caracterização, os dois métodos de ensaio para obtenção da curva de retenção e

os ensaios de cisalhamento direto. O local exato da coleta pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Local de coleta da amostra.



Fonte: Autor (2023).

### 3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para a realização dos ensaios de caracterização, foi separado cerca de 1 kg da amostra deformada, que foi submetida à secagem e preparada de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016). Desta, foram separadas as amostras para a determinação da Granulometria (mostrado na Figura 12), dos Limites de Atterberg e da Massa Específica dos Grãos.

Figura 12 – Peneiras durante o ensaio de peneiramento fino.



Fonte: Autor (2023).

A granulometria foi obtida através dos ensaios de peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação; realizados conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016). O limite de plasticidade e o limite de liquidez foram determinados – respectivamente - de acordo com a NBR 7187 e a NBR 6459 (ABNT, 2016), o procedimento pode ser observado na Figura 13. Por fim, a Massa Específica dos Grãos foi definida a partir das instruções da NBR 6508 (ABNT, 2016).

Figura 13 – Determinação do limite de liquidez.



Fonte: Autor (2023).

Os demais índices físicos do solo (massa específica seca, umidade volumétrica, umidade gravimétrica, grau de saturação, índice de vazios e porosidade) foram determinados a partir dos corpos de prova utilizados no ensaio do Papel Filtro

### 3.3 ENSAIO DO PAPEL FILTRO

Para a realização deste ensaio, foi seguido o procedimento normatizado na D5298-03 (ASTM, 2010). Do bloco indeformado, com o auxílio de anéis metálicos biselados de dimensões na ordem de 20 mm de altura e 30 mm de diâmetro, foram talhados dez corpos de prova. Do material residual da retificação do topo e base dos CP's, foram coletadas cápsulas para a determinação da umidade, conforme diretrizes da NBR 16097 (ABNT, 2012). Com a determinação das dimensões e da massa, foi possível obter os demais índices físicos do solo e complementar os ensaios de caracterização.

Buscando compreender o comportamento do solo para diferentes níveis de saturação, foram estipulados pontos para determinação dos valores de sucção, definindo assim o formato da curva de retenção. Conhecendo então o teor de umidade real de cada CP e o teor estipulado, foi possível calcular a massa que cada anel deveria ter para atingir a umidade desejada. Foi decidido seguir a trajetória de secagem: todos os anéis foram saturados por capilaridade durante três dias, com o auxílio de placas porosas e protegidos com papel filtro, conforme demonstrado na Figura 14.

Figura 14 – Corpos de prova durante o período de saturação.



Fonte: Autor (2024).

Ao final desse período, os corpos de prova foram submetidos à secagem ao ar (demonstrada na Figura 15), em temperatura ambiente, e foram monitorados até que cada um atingisse a massa estipulada para cada teor de umidade determinado. Conforme os CP's foram atingindo as massas determinadas, colocou-se o papel filtro em contato com o solo pelo topo e pela base dos anéis (cada círculo foi previamente cortado no tamanho exato dos anéis biselados). Em seguida, o papel foi levemente pressionado contra a superfície do solo, para garantir que toda a área de ambos estivesse em contato.

Figura 15 – Corpos de prova durante o período de secagem.



Fonte: Autor (2024).

Por fim, as amostras foram envoltas em camadas alternadas de plástico filme e papel alumínio, de modo a garantir que fossem isoladas por completo do ambiente (assim, evita-se interferências no processo de transferência de umidade). Cada anel foi identificado e guardado por sete dias (Figura 16). Para esse ensaio, foi utilizado o papel filtro modelo Whatman nº42. É importante evidenciar que durante todo o procedimento, os papéis foram manipulados com o auxílio de pinças e luvas, uma vez que o contato com a pele prejudica a sua capacidade de adsorção; e, portanto, comprometeria a integridade do ensaio.

Figura 16 – Corpos de prova embalados e identificados.



Fonte: Autor (2024).

Ao final do período de contato, cada CP foi aberto, e os papéis filtro foram pesados. Como esse material é muito sensível à perda de água, foram realizadas cinco leituras da massa de cada papel, em intervalos equidistantes de dez segundos. Além disso, utilizou-se de uma balança analítica com capacidade de leitura de quatro casas decimais. Assim, foi possível determinar a regressão linear de variação de massa de cada papel, e obter o valor para o tempo zero, instante logo após a abertura dos CP's. Em seguida os papéis foram levados à estufa e pesados mais uma vez, obedecendo a mesma técnica. Com todos esses valores, foi possível determinar a umidade de cada um dos papéis utilizados.

Chandler *et al.* (1992) propôs um conjunto de equações que correlaciona a sucção do solo com duas faixas de umidade do papel filtro. Essas equações estão expressas a seguir.

$$W_{pf} \leq 47\% \rightarrow \Psi = 10^{[4,84 - 0,0622 \times W_{pf}]} \quad (3)$$

$$W_{pf} > 47\% \rightarrow \Psi = 10^{[6,05 - 2,48 \times \log(W_{pf})]} \quad (4)$$

Onde  $W_{pf}$  representa a umidade aferida para cada papel filtro (expressa em decimal), e  $\Psi$  representa a sucção matricial (expressa em kPa).

Realizando os cálculos para a umidade de cada anel, foi possível plotar um gráfico de dispersão que esboça a curva de retenção do solo (considerando ambos os valores para topo e base). A partir destes pontos experimentais, foi utilizado o

software “SWRC Fit” para fazer o ajuste dos dados e determinar qual o comportamento característico do solo ensaiado (unimodal ou bimodal).

### 3.4 ENSAIO DA POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

Para a realização do ensaio de porosimetria, foi talhado um CP de cerca de 5 cm de dimensão. O equipamento utilizado foi o Poresizer 9320 da Micromeritics Instrument Corporation, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), com capacidade de análise de poros de 0,7 até  $6,0 \times 10^{-6}$  mm de diâmetro, operando na faixa de pressão aplicada entre  $1,7 \times 10^{-3}$  e 212 MPa. Do corpo de prova original, foi coletada uma amostra de cerca de 1 cm de diâmetro, que foi submetida à secagem ao ar. Uma vez seco, o material foi posicionado dentro do penetrômetro que em seguida foi adequadamente vedado. O conjunto foi então inserido no equipamento para aplicação da sequência de pressões e leitura do diâmetro dos poros e do volume injetado de mercúrio.

### 3.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

#### 3.5.1 Preparação e configuração

A máquina utilizada no desenvolvimento destes ensaios foi a Owntec MS-101. Um equipamento semiautomático, onde as leituras são feitas de forma quase instantânea e os pesos devem ser trocados manualmente.

Foram realizados ensaios com corpos de prova indeformados em duas situações de saturação: solo em umidade natural e solo após saturação. Os CP's foram talhados a partir do bloco indeformado (conforme demonstrado na Figura 17), com o auxílio de moldes biselados quadrados de dimensão na ordem de 60 mm.

Figura 17 – Molde durante obtenção do corpo de prova.



Fonte: Autor (2024).

Após obtenção do CP, o conjunto foi pesado, e foram tomadas duas cápsulas para a obtenção de umidade (a partir do material residual da retificação do corpo). Assim, foi possível determinar os índices físicos da amostra antes e após o rompimento, e controlar a umidade volumétrica de cada ensaio – a fim de correlacionar os resultados com a capacidade de sucção do solo. A Figura 18 traz um exemplo do corpo de prova após ser talhado e retificado.

Figura 18 – Corpo de prova talhado.



Fonte: Autor (2024).

Adotou-se três tensões confinantes para a determinação da envoltória de ruptura de cada ensaio: 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. Para a etapa de adensamento, aplicou-se a carga até a estabilização das leituras no sensor vertical, garantindo o desenvolvimento por no mínimo 50 minutos. Após a consolidação da amostra, iniciou-se a etapa de cisalhamento; o ensaio é executado até que se observe um pico bem definido no gráfico de “Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal”, com um bom desenvolvimento de tensão residual; ou até que a curva de ruptura apresente uma taxa de crescimento constante.

Para a realização da etapa de cisalhamento, adotou-se uma velocidade de ruptura de 0,1 mm/min, caracterizando o ensaio como “lento”. De acordo com Gonçalves e Monteiro (2018), esse valor é suficiente para garantir uma condição drenada para o corpo de prova, evitando o surgimento de pressões neutras. Sendo assim, as tensões obtidas podem ser consideradas tensões efetivas.

### 3.5.2 Condições de Umidade

Nos ensaios para a condição natural de umidade, os CP's foram colocados na máquina sem água na caixa de ensaio. Entre o momento da moldagem e o início do ensaio, o conjunto foi mantido envolto em plástico filme, de modo a vedar a superfície do solo e garantir a conservação da umidade.

Para os ensaios com as amostras inundadas, seguiu-se procedimento semelhante ao utilizado para saturar as amostras no ensaio do Papel Filtro: os CP's foram submetidos a saturação por capilaridade (com o auxílio de placas porosas e folhas de papel filtro, demonstrado na Figura 19) durante um período de três a quatro dias. Em seguida, deu-se início aos ensaios; o procedimento permaneceu o mesmo adotado para as amostras com umidade natural, porém nesta etapa inundou-se a caixa de ensaio com água, até que o corpo de prova ficasse submerso. Após a conclusão de cada ensaio, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa para determinação da sua umidade final.

Figura 19 – Corpos de prova durante o período de saturação.



Fonte: Autor (2024).

### 3.5.3 Tratamento e ajuste de dados experimentais

Ao final de cada ensaio, obteve-se da máquina um conjunto de dados: força de cisalhamento (FC), tensão de cisalhamento (TC), deslocamento horizontal (DH), deslocamento vertical (DV) e tensão normal aplicada (TN). A tensão de cisalhamento é calculada automaticamente, porém, o equipamento utilizado não realiza a correção de área nesse processo. Sendo assim, foi necessário recalcular os valores obtidos a

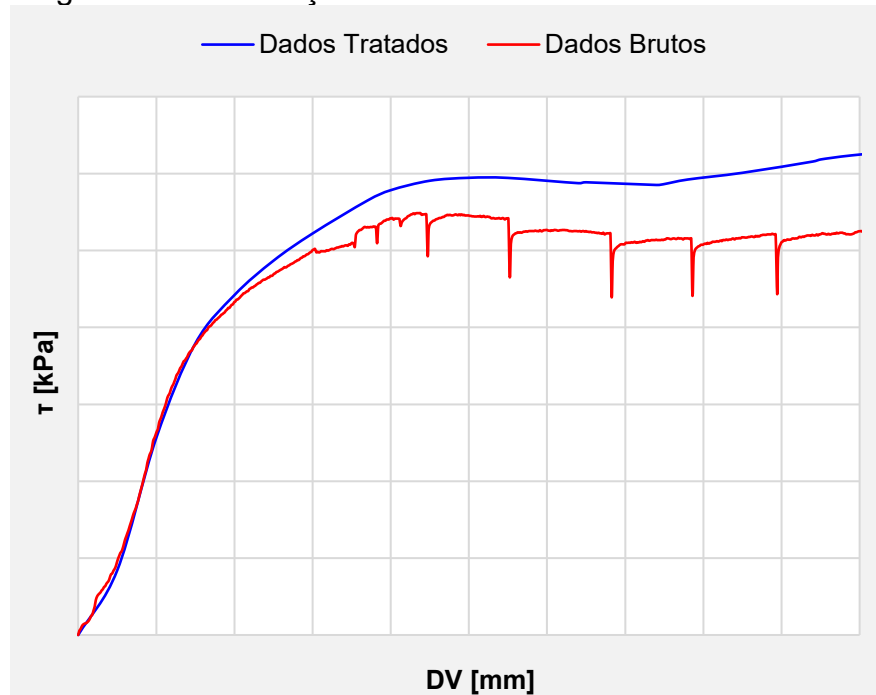
partir do ajuste dos dados experimentais. A correção foi realizada para todos os pontos de leitura, a partir a seguinte equação:

$$TC_c = \frac{FC}{L \times (L - DV)} \quad (5)$$

Onde “ $TC_c$ ” é a tensão de cisalhamento corrigida, e “ $L$ ” é a dimensão do lado da caixa de ensaio.

A máquina utilizada realiza leituras a aproximadamente cada 300 milissegundos, e os sensores são capazes de detectar as flutuações mais irrisórias nos dados coletados. Dessa forma, os dados brutos podem apresentar algumas variações decorrentes da natureza do material (presença de rochas, por exemplo), ou até mesmo devido a oscilações mecânicas (do próprio equipamento, ou devido a vibrações próximas aos sensores). Buscando melhorar a qualidade dos resultados, as variações bruscas foram descartadas, proporcionando um gráfico de cisalhamento mais coerente. A Figura 20, abaixo, demonstra a diferença entre uma curva plotada a partir de dados puramente experimentais (Dados Brutos), e a curva com correção de área e remoção de oscilações na leitura (Dados Tratados).

Figura 20 – Diferença entre dados tratados e dados brutos.

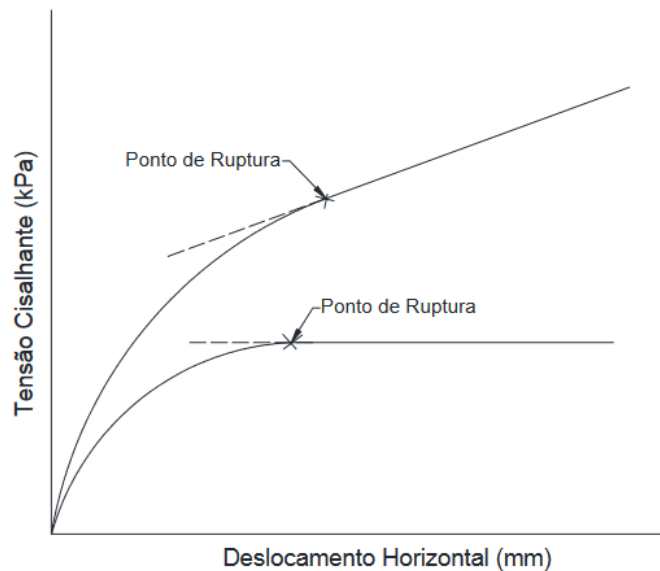


Fonte: Autor (2024).

### 3.5.4 Critério de Ruptura

Para adoção do critério de ruptura, foi adotado a técnica desempenhada por Carrillo (1995 *apud* Caso, 2014); para tal, define-se como ponto de ruptura o ponto da curva tensão versus deslocamento onde desenvolve um comportamento constante. Tal abordagem foi escolhida devido ao comportamento observado na maioria dos ensaios, onde a resistência ao cisalhamento continuou aumentando com o deslocamento horizontal, sem apresentar pico de ruptura bem definido. A Figura 21 exemplifica o processo de obtenção da tensão de resistência que foi aplicado em cada ensaio.

Figura 21 – Critério de Campos e Carillo.



Autor: Caso (2014).

### 3.5.5 Cálculo da envoltória estendida

Para a obtenção da equação que caracteriza a envoltória estendida de Mohr-Coulomb, os resultados dos ensaios de cisalhamento e as informações referentes à curva de retenção foram submetidos ao software “LAB Fit”, que disponibiliza ferramentas para o ajuste matemático de dispersões de dados tridimensionais. O programa permite ajustar funções personalizadas, além de fornecer os coeficientes e o valor de  $R^2$  da equação obtida.

Em seguida, os pontos e a função de ajuste foram plotados através do software “Grapher”, para melhor representação gráfica dos dados e da envoltória.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

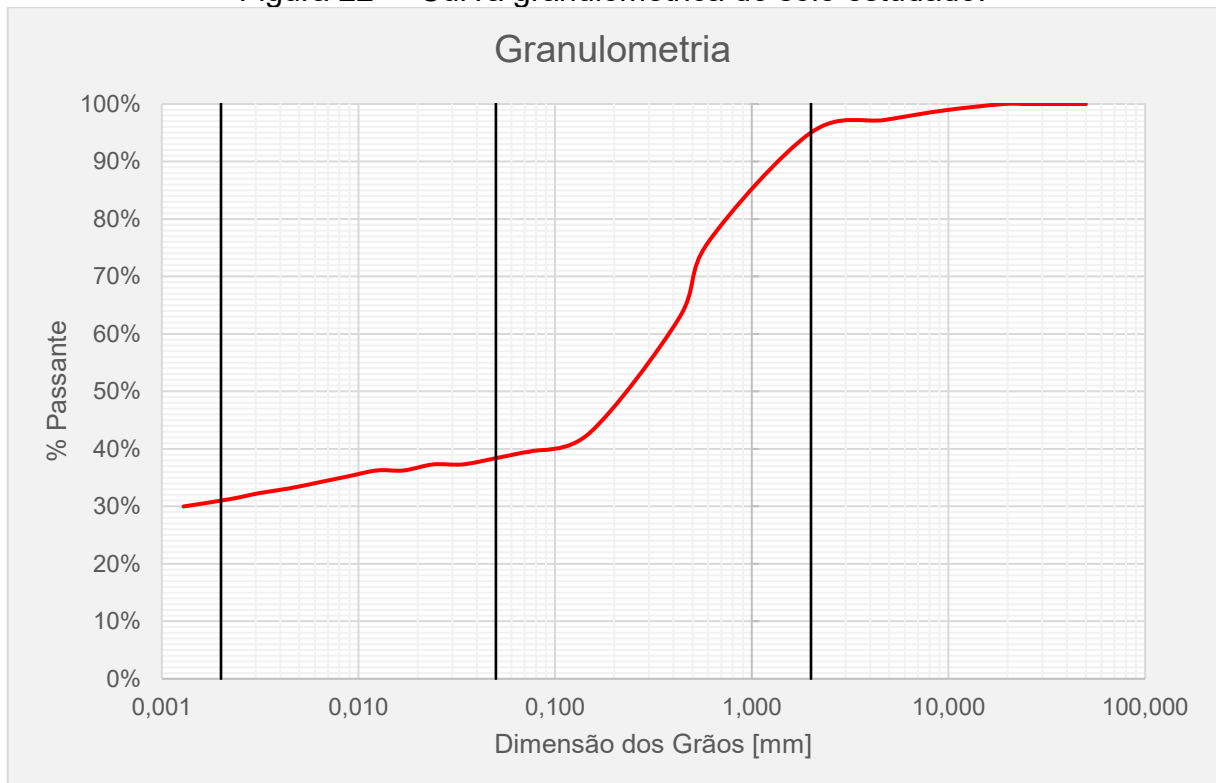
Com a realização dos ensaios de caracterização, foi possível compreender a composição e comportamento da amostra estudada. Na Tabela 2 estão expressos os dados da análise granulométrica, que, de acordo com as determinações da ABNT, acabam por identificar o solo como uma areia argilosa. O perfil granulométrico do solo pode ser observado na Figura 22.

Tabela 2 - Composição granulométrica (ABNT) do solo estudado.

Fração	Composição
Pedregulho	5%
Areia	57%
Silte	7%
Argila	31%

Fonte: Autor (2024).

Figura 22 – Curva granulométrica do solo estudado.



Fonte: Autor (2024).

Na Tabela 3, estão expressos os resultados para os Limites de Atterberg, que classificam o solo como “de alta plasticidade”.

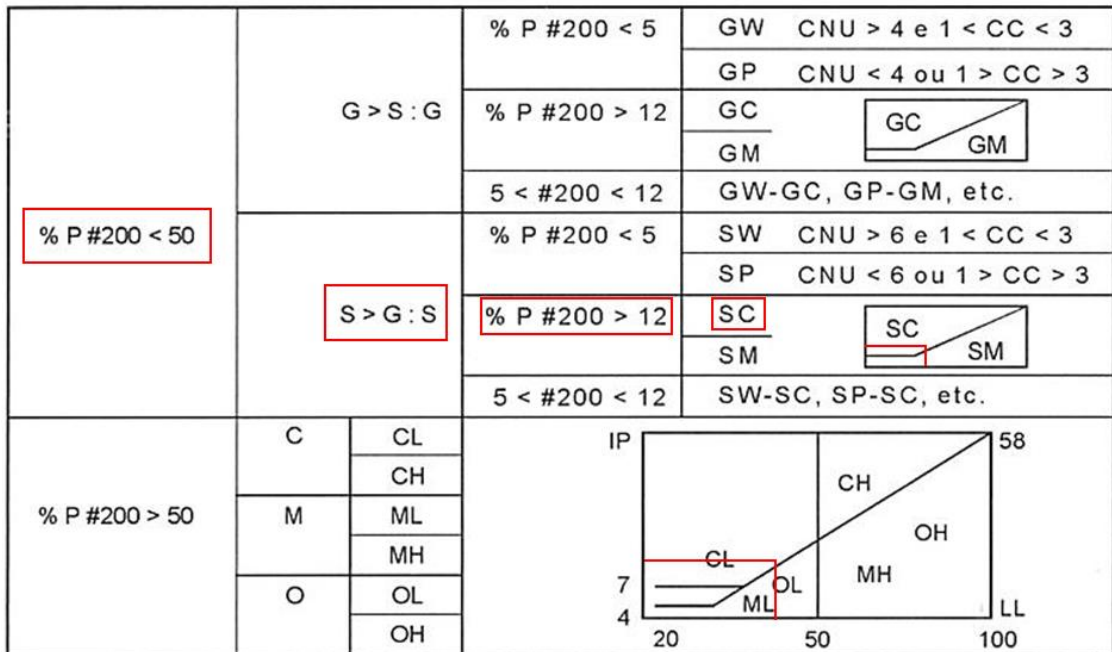
Tabela 3 - Limites de Atterberg do solo estudado.

Propriedade	Valor
LL	38%
LP	22%
IP	16%

Fonte: Autor (2024).

Em posse desses dados, determinou-se a classificação SUCS para a amostra de solo estudada. E seguindo as instruções do sistema de classificações, demonstrado na Figura 23, foi possível definir o solo como “SC”, ou seja, uma areia argilosa; assim como a classificação encontrada na classificação ABNT.

Figura 23 – Processo de classificação SUCS do solo.



Fonte: Adaptado de Pinto (2006).

Através do ensaio de massa específica dos grãos, dos dados das amostras indeformadas utilizadas na determinação da curva de retenção, e de correlações; foi possível calcular os demais índices físicos do solo, através das médias dos índices

individuais de cada amostra. Os valores obtidos para cada propriedade é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Índices físicos do solo estudado.

Propriedade	Símbolo	Valor
Umidade Gravimétrica	w	20,8%
Índice de Vazios	e	0,79
Porosidade	n	0,44
Grau de Saturação	S	70,0%
Umidade Volumétrica	$\Theta$	30,8%
Massa Específica dos Grãos	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,63
Massa Específica	$\rho_t$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,77
Massa Específica Aparente Seca	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,47

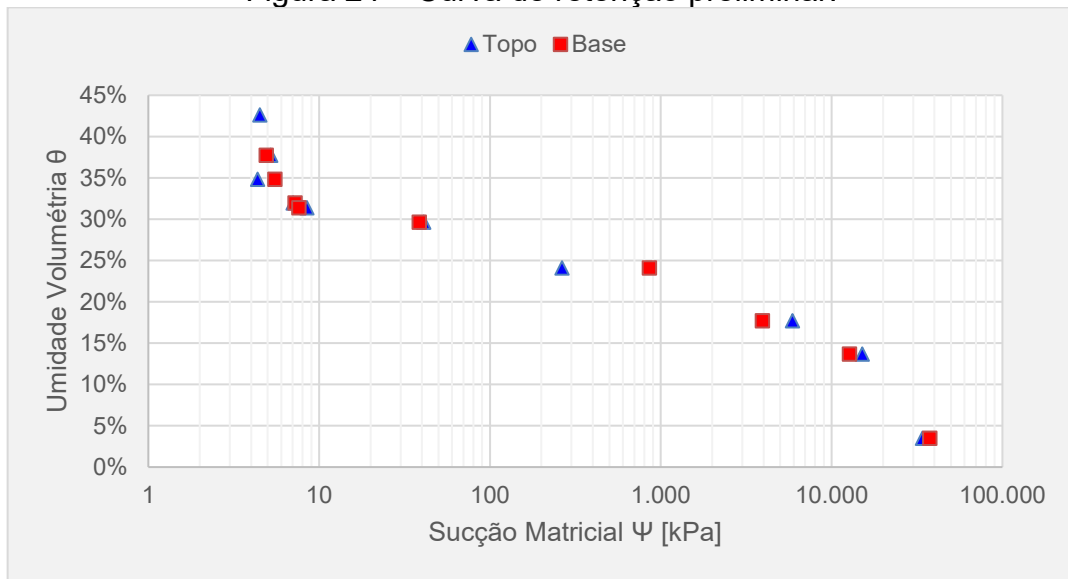
Fonte: Autor (2024).

## 4.2 CURVA DE RETENÇÃO

### 4.2.1 Papel Filtro

Após a realização do ensaio, obteve-se os pares de pontos que correlacionam a sucção matricial com a umidade volumétrica, tanto para os papéis aplicados no topo quando na base dos corpos de prova. Plotando ambos em um gráfico onde a sucção é expressa em escala logarítmica, foi possível traçar o gráfico da Figura 24.

Figura 24 – Curva de retenção preliminar.



Fonte: Autor (2024).

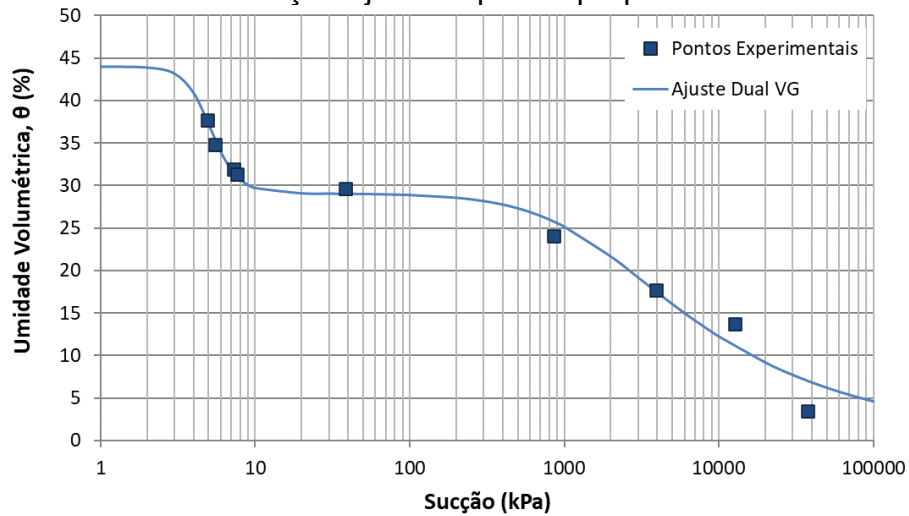
A curva de retenção preliminar já permite prever um comportamento bimodal para este solo. Com a submissão dos dados experimentais para os pontos de base ao software “SWRC Fit”, foi possível determinar o melhor ajuste e definir qual o comportamento da curva para a amostra estudada. Dentre as opções disponíveis, a equação que melhor ajustou os dados foi a bimodal de Van Genuchten. A equação, os seus parâmetros de ajuste calculados e o valor de  $R^2$  estão expressos na Tabela 5. A Figura 25 por sua vez, apresenta a envoltória ajustada matematicamente e os pontos experimentais que foram utilizados (foram considerados apenas os pontos de base, uma vez que estes apresentaram uma melhor distribuição e um melhor valor de  $R^2$ ).

Tabela 5 – Ajuste pelo modelo Bimodal de Van Genuchten.

Equação	Parâmetros	$R^2$
$S_e = w_1 \times [1 + (\alpha_1 \times h)^{n_1}]^{-m_1} + (1 - w_1) \times [1 + (\alpha_2 \times h)^{n_2}]^{-m_2}$ $m_i = 1 - 1/n_i$	$\theta_s = 0,44031$	0,9829
	$w_1 = 0,33842$	
	$\alpha_1 = 0,20286$	
	$n_1 = 5,4119$	
	$\alpha_2 = 0,00071226$	
	$n_2 = 1,4298$	

Fonte: Autor (2024).

Figura 25 – Curva de retenção ajustada para a proposta Dual Van Genuchten.



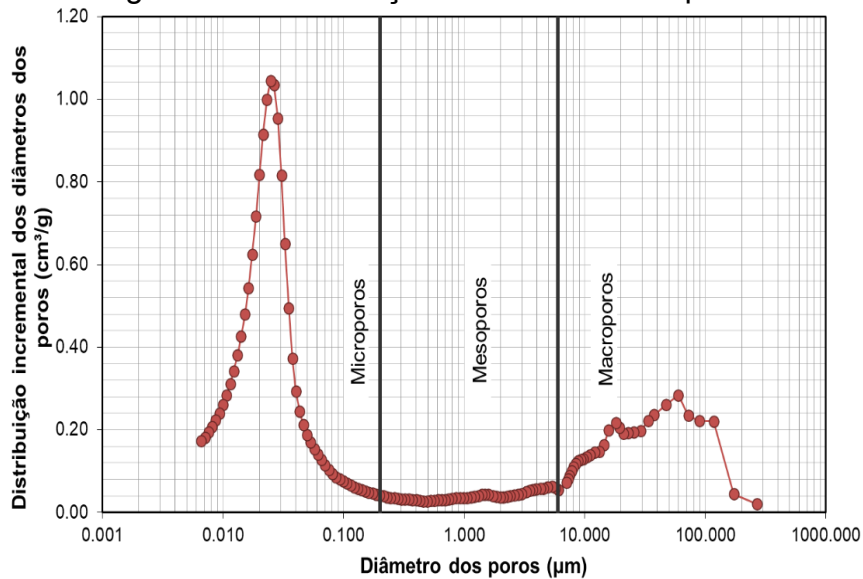
Fonte: Autor (2024).

O ajuste confirma o comportamento bimodal já premeditado com a análise dos dados experimentais. Este fenômeno é esperado quando se trata de solos tropicais intemperizados (Carvalho e Gitirana Júnior, 2021; Mendes e Marinho, 2020).

#### 4.2.2 Porosimetria de Mercúrio

Finalizada a leitura de pressão aplicada e volume introduzido, obtém-se a distribuição da estrutura dos poros, na forma da Figura 26. Conforme adotado por Motta (2016), Delcourt *et al.* (2022), e Gomes e Motta (2023), associa-se os microporos à fração de argila do solo, os mesoporos com a fração silte, e os macroporos com a fração areia. A distribuição apresenta uma incidência predominante de microporos e macroporos, corroborando os resultados da etapa de caracterização, que mostrou que o solo estudado tem grandes parcelas de areia e de argila. A distribuição exata do volume dos poros está explicitada na Tabela 6.

Figura 26 – Distribuição do diâmetro dos poros.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 6 – Distribuição dos poros no solo estudado.

Classe	Tamanho	Composição
Microporos	$\varphi < 0,2\text{mm}$	59,6%
Mesoporos	$0,2\text{mm} < \varphi < 6\text{mm}$	7,1%
Macroporos	$\varphi > 6\text{mm}$	33,4%

Fonte: Autor (2024).

A Tabela 7, apresenta o valor encontrado para a porosidade ( $n$ ) a partir da intrusão de mercúrio, e, também, o valor determinado pelos ensaios de caracterização. A diferença entre os dois é um comportamento esperado, conforme estudos de Motta (2016), Delcourt *et al.* (2022), e Gomes e Motta (2023), que observaram a ocorrência do mesmo fenômeno.

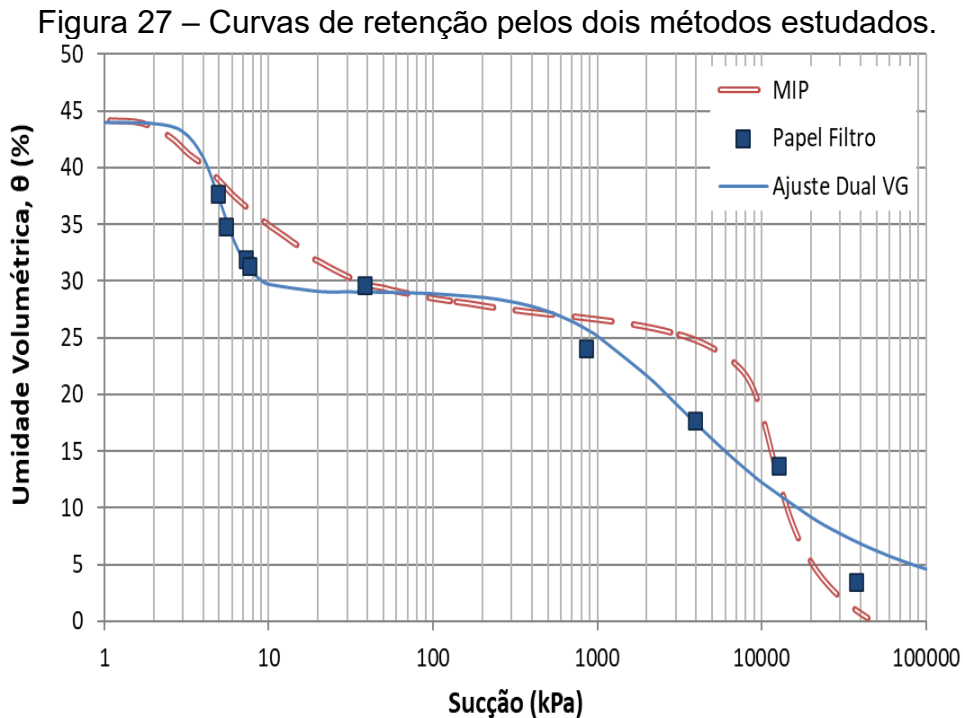
Tabela 7 – Valores de Porosidade.

Ensaio	Porosidade ( $n$ )
Caracterização	0,44
MIP	0,37

Fonte: Autor (2024).

O ensaio de porosimetria pode ainda ser expresso na forma de uma curva de retenção, complementando as informações obtidas através do ensaio do papel

filtro. A Figura 27 apresenta as curvas para os dois métodos estudados e permite comparar os dois resultados.



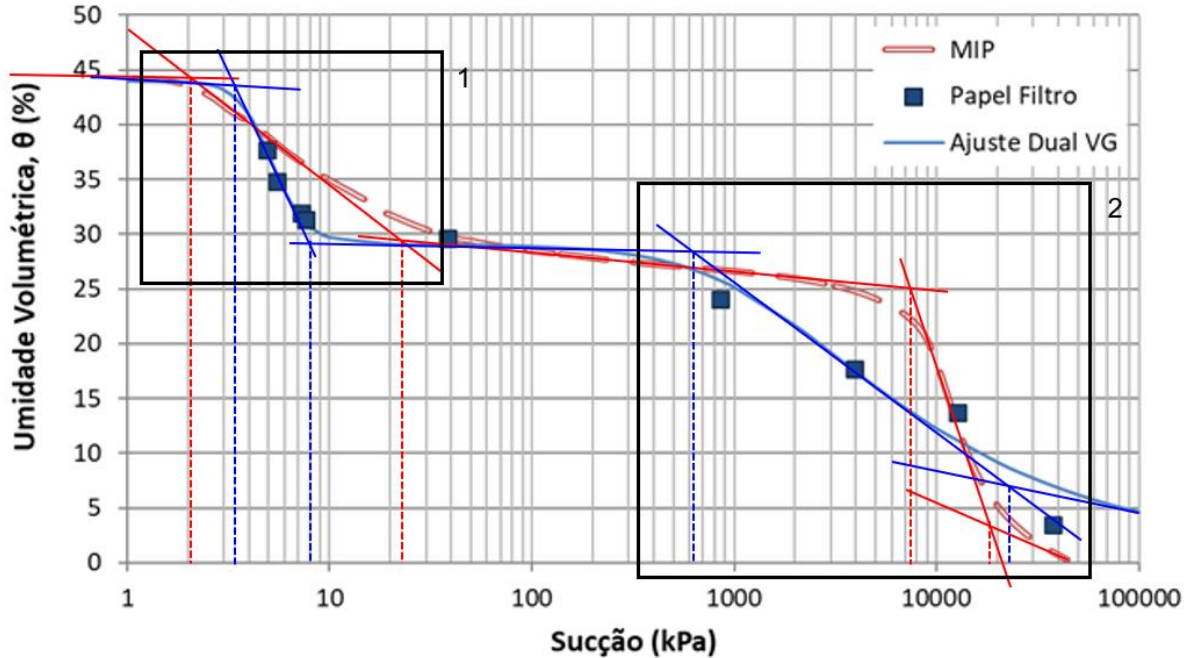
Fonte: Autor (2024).

Ambas as curvas apresentam um comportamento bimodal semelhante. A primeira inflexão ocorre na faixa de 45 a 40 % de umidade, e a segunda inflexão se manifesta entre 30 e 20 %. A forma das curvas evidencia os resultados obtidos na Figura 26, onde fica claro a presença de duas famílias predominantes de poros no material. A primeira inflexão se correlaciona com a presença dos macroporos (fração areia), aqui, altos teores de umidade não resultam em altos potenciais mátricos; o “patamar” entre as duas inflexões se relaciona com a ausência de mesoporos (fração silte); a segunda inflexão está associada com os microporos (fração argila), que devido às pequenas dimensões, têm maior capacidade de reter umidade, ocasionando os altos valores de sucção apresentados. O deslocamento à direita da curva obtida pela porosimetria de mercúrio é um comportamento esperado para esse tipo de ensaio, resultado semelhante foi observado por Mendes e Marinho (2020).

Aplicando as considerações de Gitirana Júnior *et al.* (2023) para as curvas de retenção obtidas (Figura 28), é possível determinar os valores de entrada de ar ( $\Psi_B$ ) e de sucção residual ( $\Psi_{RES}$ ) para as duas zonas de desaturação, expressos

Tabela 8. Apesar da diferença característica entre o formato das curvas, os valores obtidos são relativamente próximos e apresentam a mesma ordem de grandeza.

Figura 28 – Determinação de  $\Psi_B$  e  $\Psi_{RES}$ .



Fonte: Autor (2024).

Tabela 8 – Comparação dos valores de  $\Psi_B$  e  $\Psi_{RES}$ .

Propriedade	Papel-Filtro	MIP
$\Psi_{1B}$ (kPa)	3,5E+00	2,0E+00
$\Psi_{1RES}$ (kPa)	8,0E+00	2,1E+01
$\Psi_{2B}$ (kPa)	6,5E+02	8,0E+03
$\Psi_{2RES}$ (kPa)	2,2E+04	1,9E+04

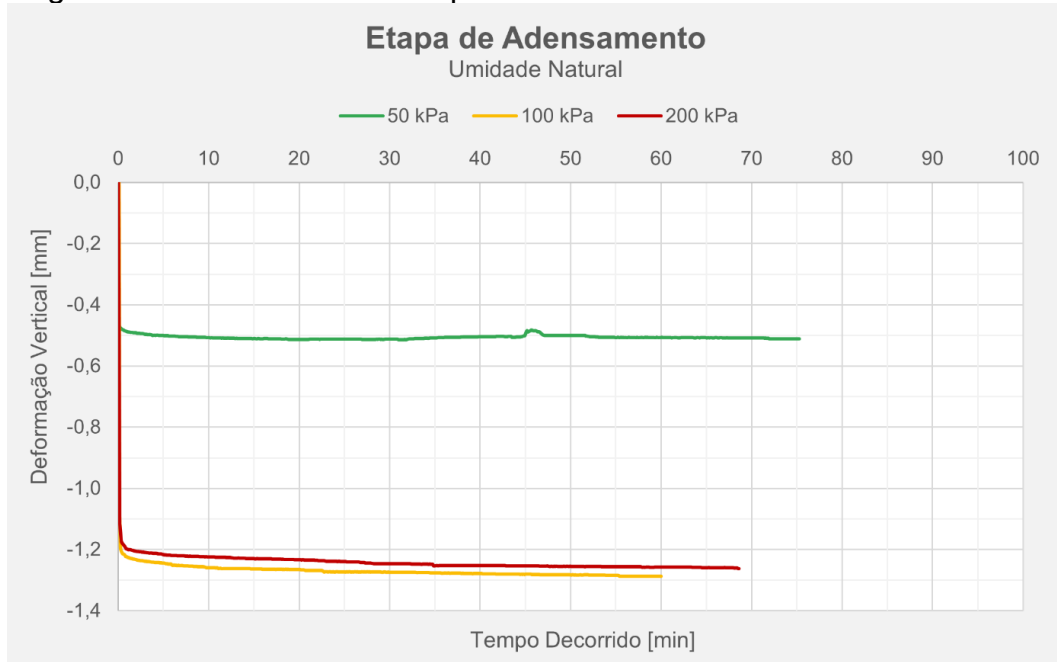
Fonte: Autor (2024).

### 4.3 ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA

#### 4.3.1 Ensaios com umidade natural

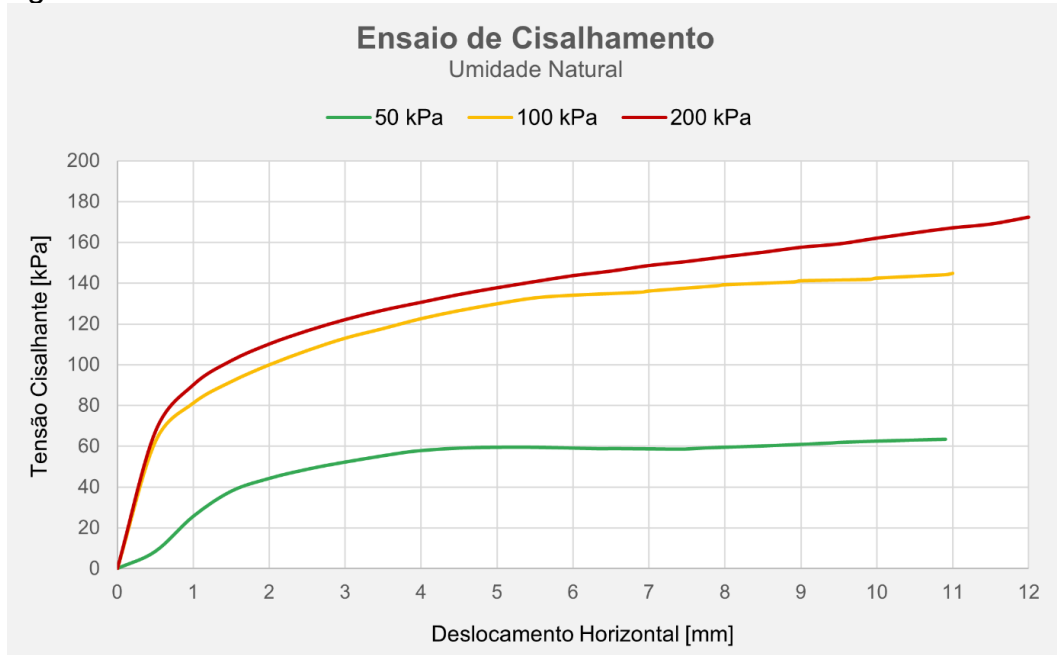
Para a primeira rodada de ensaios, foram rompidos CP's nas tensões de 50, 100 e 200 kPa. Porém, como evidenciado nas Figuras 29 e 30, os comportamentos divergiram com o esperado para esse tipo de ensaio. A amostra ensaiada com 200 kPa, quando comparada com a de 100 kPa, apresentou uma trajetória de resistência muito semelhante, e, paralelamente, desenvolveu um deslocamento vertical menor.

Figura 29 – Resultados da etapa de adensamento com umidade natural.



Fonte: Autor (2024).

Figura 30 – Resultados dos ensaios de cisalhamento com umidade natural.

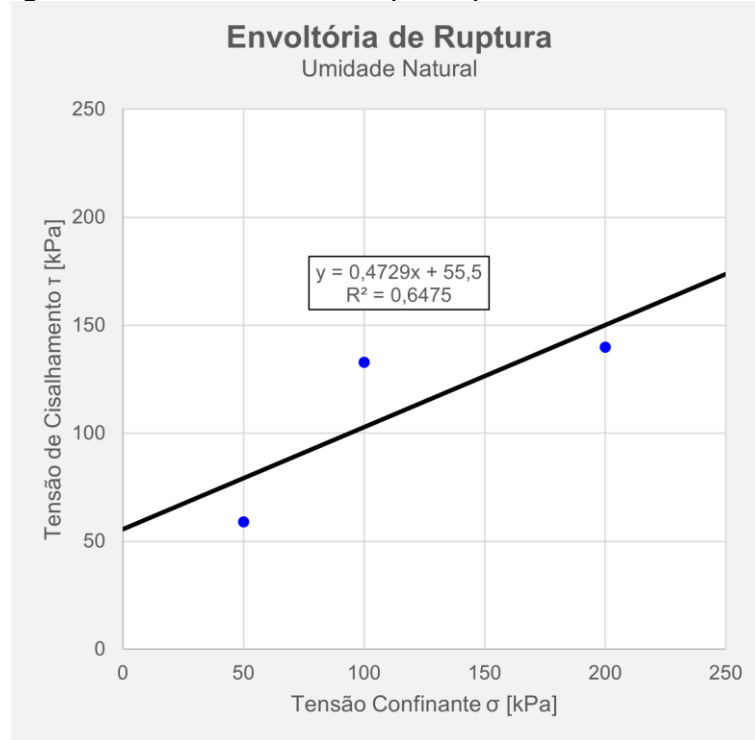


Fonte: Autor (2024).

Com esses dados, a determinação de uma envoltória de resistência foi inconclusiva. A Figura 31 atesta que os dados se encontram muito dispersos e a linha de tendência ajustada matematicamente apresenta um valor para  $R^2$  de 0,6475, o que

é considerado muito baixo, e, conseqüentemente, não representativo; além de evidenciar mais uma vez a proximidade dos ensaios nas duas maiores tensões.

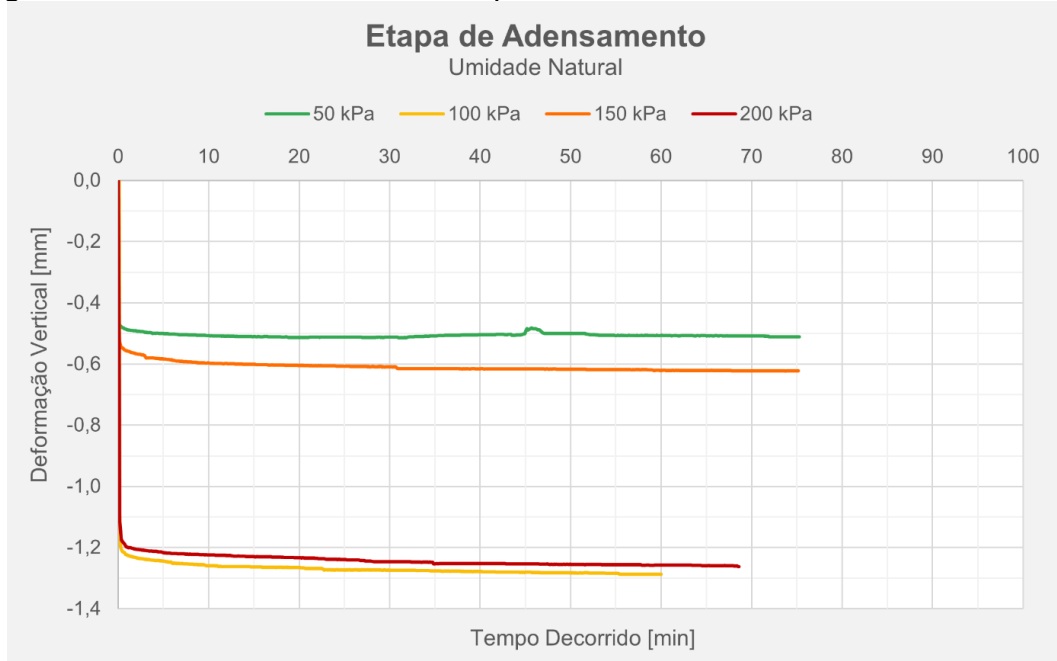
Figura 31 – Envoltória de ruptura para umidade natural.



Fonte: Autor (2024).

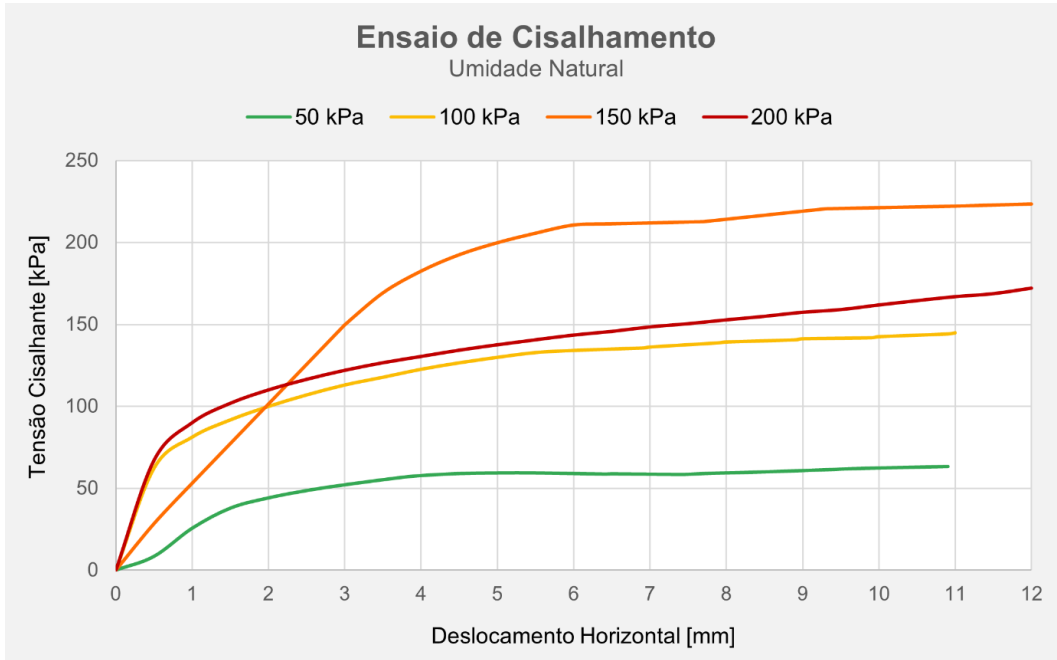
Diante dos resultados obtidos, a fim de se obter uma envoltória satisfatória, realizou-se um quarto ensaio nesta condição de umidade, agora com tensão confinante de 150 kPa. Contudo, problemas semelhantes foram observados. A quarta amostra adensou menos que as que foram ensaiadas com 100 e 200 kPa, porém apresentou a maior curva de resistência que as demais amostras. As Figuras 32 e 33 trazem os resultados anteriores aderidos dos ensaios com 150 kPa.

Figura 32 – Novos resultados da etapa de adensamento com umidade natural.



Fonte: Autor (2024).

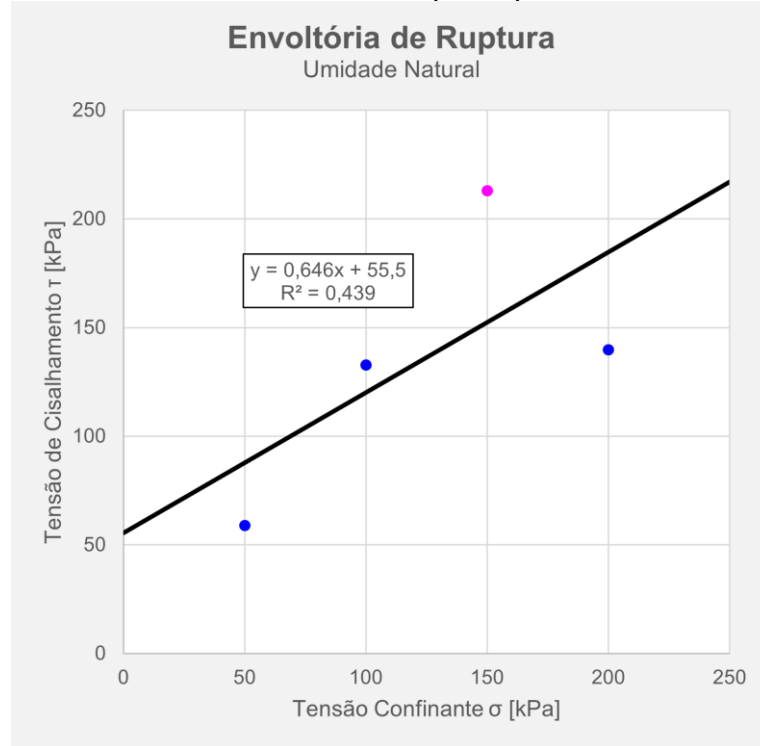
Figura 33 – Novos resultados dos ensaios de cisalhamento com umidade natural.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 34 mostra que mesmo com a adição de um novo ponto, não foi possível traçar nenhuma envoltória satisfatória, mesmo com a exclusão de alguma das tensões.

Figura 34 – Nova envoltória de ruptura para umidade natural.



Fonte: Autor (2024).

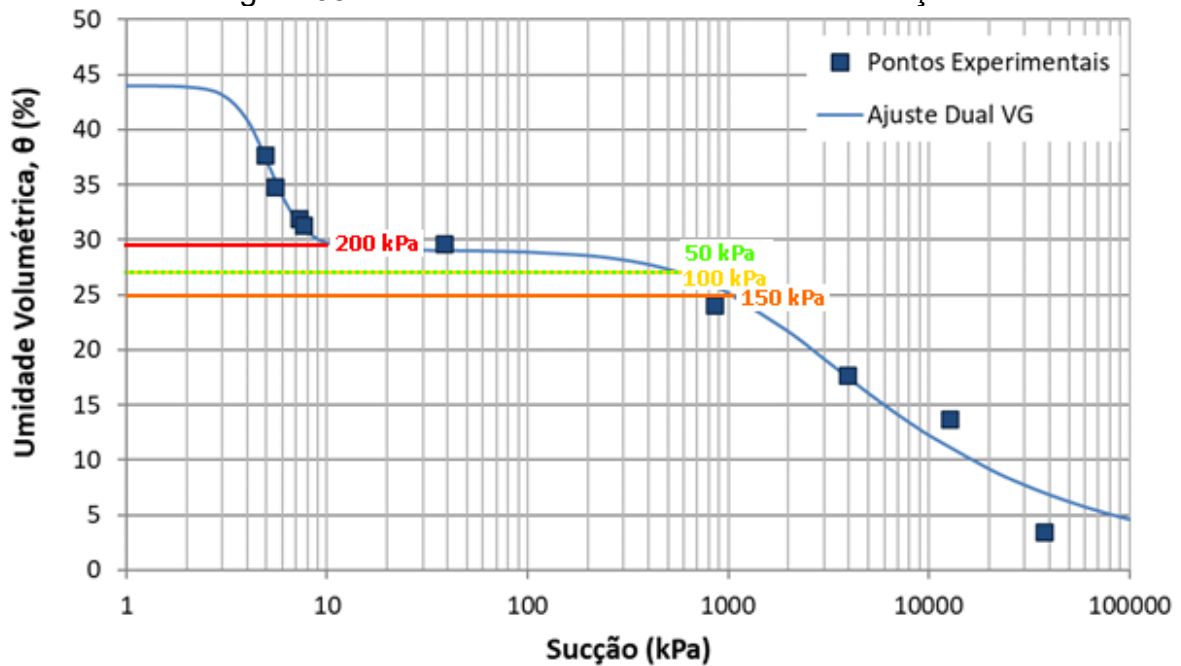
Ao se atentar às umidades de cada corpo de prova ensaiado, foi possível observar qual o comportamento de cada amostra perante a curva de retenção. Ficou evidente que os quatro ensaios apresentaram variações significativas quanto à sucção do solo. Apesar de próximas, as umidades aferidas se localizam no “patamar” da curva de retenção, onde, conforme previamente mencionado, a variação de tensão é muito significativa, mesmo com pequenas variações de umidade. A Tabela 9 exhibe os valores de umidade e de sucção encontrados em cada uma das amostras, e a Figura 35 permite compreender melhor a situação de cada ensaio à vista da curva de retenção.

Tabela 9 – Sucção aparente das amostras com umidade natural.

Tensão [kPa]	Umidade $\Theta$	Sucção [kPa]
50	27%	550,00
100	27%	550,00
150	25%	1000,00
200	29%	15,00

Fonte: Autor (2024).

Figura 35 – Tensões de ensaio na curva de retenção.



Fonte: Autor (2024).

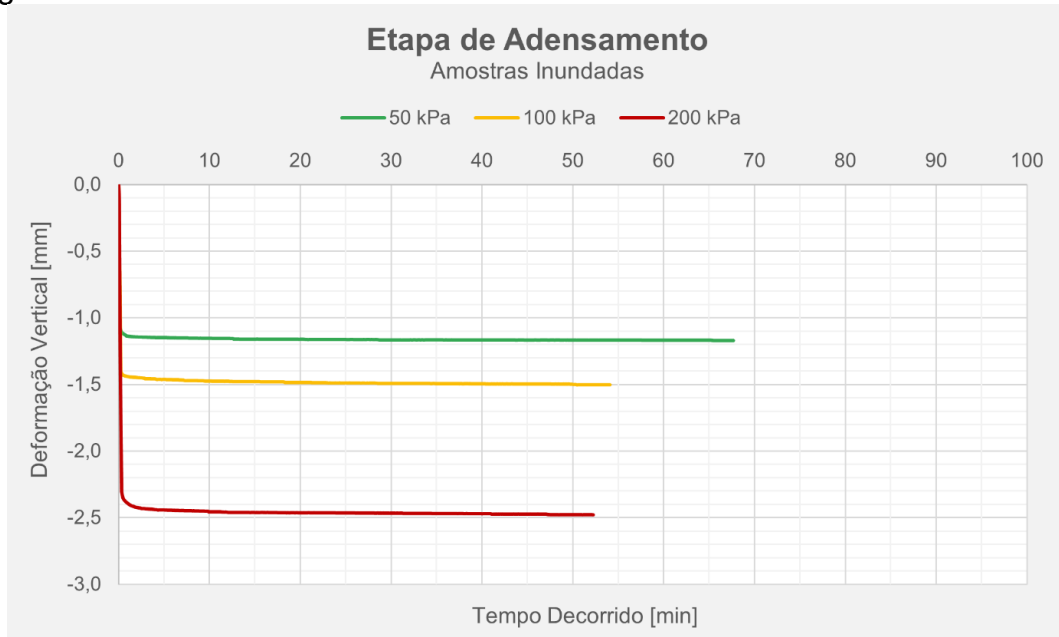
Considerando o exposto, é possível justificar o comportamento observado na amostra de 200 kPa, tendo em vista que esta possui a menor tensão de sucção dentre as demais; assim como a alta resistência desenvolvida durante o ensaio de 150 kPa, já que conta com uma tensão de sucção de cerca de 1000 kPa.

Por fim, optou-se por não traçar envoltória para estes pontos. Devido a característica do solo estudado, as pequenas variações no seu teor de umidade natural (razoáveis e esperadas) estão intrinsecamente conexas com a grande amplitude de variação da sucção. Considerando, portanto, a envoltória estendida de Fredlund, uma vez que os pontos estejam distantes em termos de sucção, eles não estariam no mesmo plano, o que como vimos, impossibilita a determinação de uma envoltória linear tradicional sem a realização de controle de sucção das amostras durante o desenvolvimento dos ensaios.

#### 4.3.2 Ensaios em amostras inundadas.

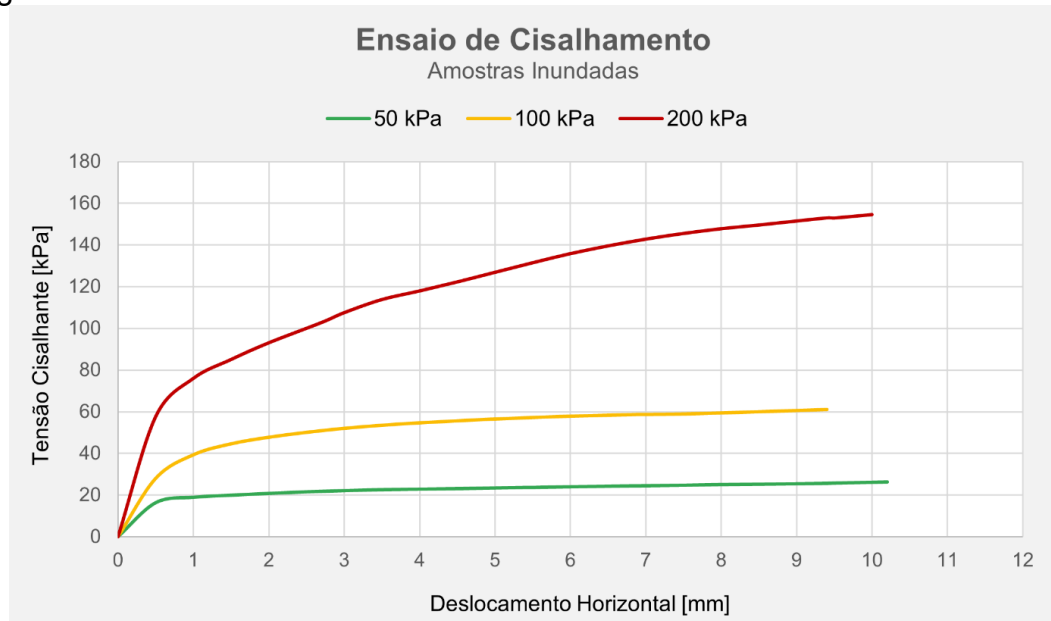
Os ensaios com umidade saturada se desenvolveram nas mesmas tensões confinantes que o lote anterior (desconsiderando o ponto de 150 kPa). Seus resultados estão expressos nos gráficos das Figuras 36 e 37.

Figura 36 – Resultados dos ensaios de adensamento com amostras inundadas.



Fonte: Autor (2024).

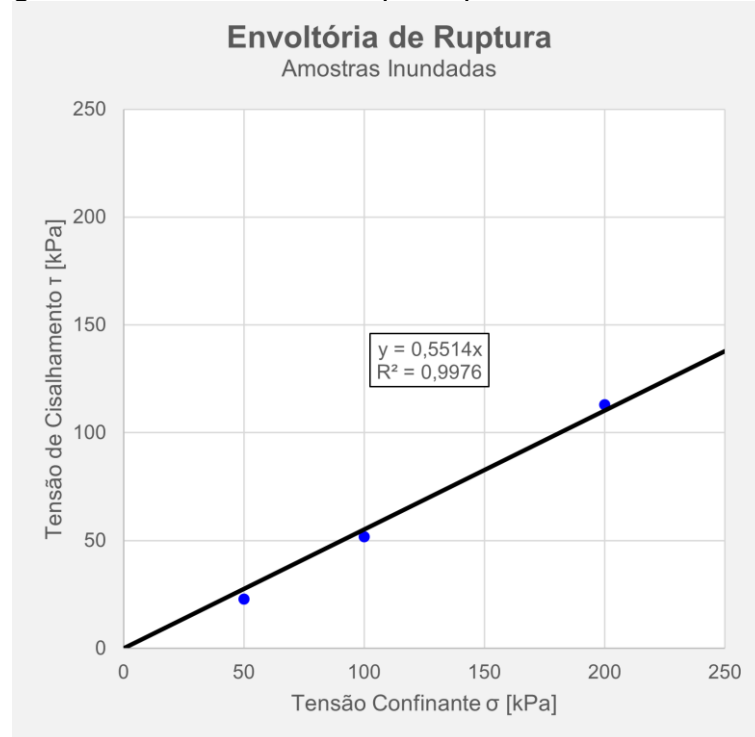
Figura 37 – Resultados dos ensaios de cisalhamento com amostras inundadas.



Fonte: Autor (2024).

Devido à condição de saturação, os valores para sucção nos corpos de prova se tornam irrisórios, evitando o surgimento de situação parecida com os ensaios em umidade natural. Dessa forma, foi possível traçar a envoltória de ruptura presente na Figura 38. De acordo com essa envoltória, o solo quando saturado apresenta uma coesão ( $c'$ ) próximo de zero, e um ângulo de atrito ( $\phi'$ ) na ordem de  $29^\circ$ .

Figura 38 – Envoltória de ruptura para umidade saturada

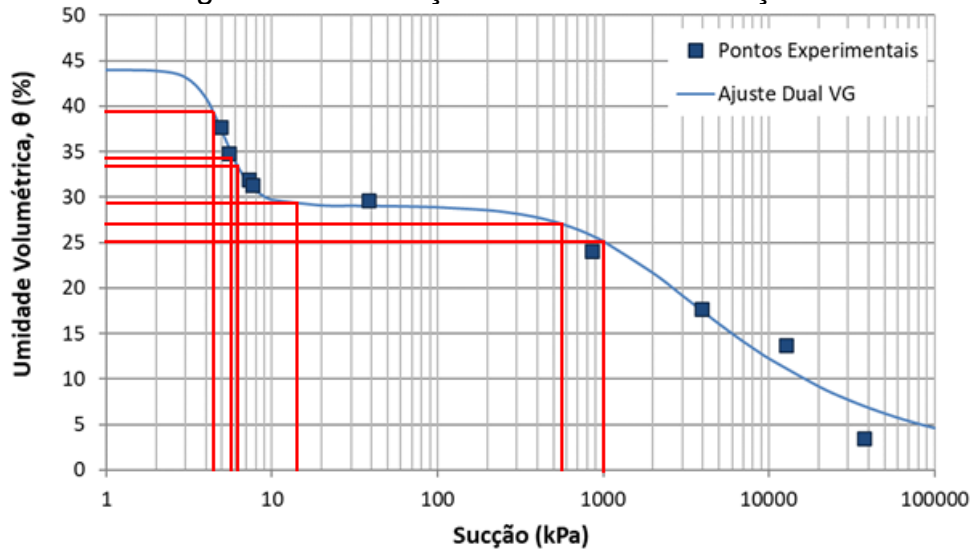


Fonte: Autor (2024).

#### 4.3.3 Envoltória Estendida

Em posse dos dados obtidos com os ensaios de cisalhamento direto, calculou-se as respectivas umidades volumétricas de cada corpo de prova após a ruptura. Assim, foi possível obter os valores de sucção para cada condição de umidade, conforme demonstrado na Figura 39. A Tabela 10 por sua vez, reúne os dados de tensão confinante líquida, tensão de cisalhamento, condição e grau de umidade, e sucção.

Figura 39 – Obtenção dos valores de sucção.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 10 – Resumo dos ensaios realizados.

Ensaio	Condição	Tensão Normal [kPa]	Tensão Cisalhante [kPa]	Umidade $\theta$	Sucção [kPa]
1	Umidade Natural	50	59	27%	550,00
2	Umidade Natural	100	133	27%	550,00
3	Umidade Natural	200	140	29%	15,00
4	Umidade Natural	150	213	25%	1000,00
5	Saturado	50	23	39%	4,40
6	Saturado	100	52	34%	5,80
7	Saturado	200	113	33%	6,10

Fonte: Autor (2024).

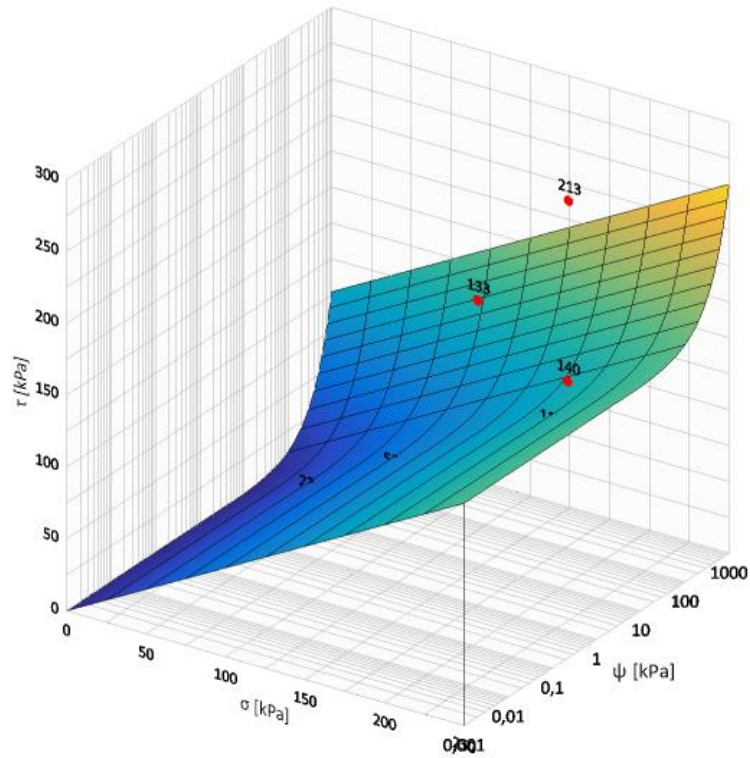
A partir do apresentado na Tabela 10, plotou-se os dados em um plano tridimensional, adotando: tensão normal ( $\sigma$ ) no eixo X, em escala linear; tensão cisalhante ( $\tau$ ) no eixo Y, em escala linear; e sucção ( $\psi$ ) no eixo Z, em escala logarítmica.

Considerando a equação linear (6) proposta por Fredlund (2012), onde:  $\tau_{ff}$  é a tensão de cisalhamento não-saturada na ruptura,  $c'$  é o intercepto coesivo (ou coesão efetiva);  $\sigma'_f$  é a tensão normal líquida (efetiva);  $\phi'$  é o ângulo de atrito interno;  $\psi_f$  é a sucção na ruptura; e  $\phi^b$  é a representação da taxa de ganho de resistência em relação à sucção; foi determinada uma equação de ajuste para os dados experimentais. A função obtida (7), apresentou um  $R^2$  de 0,9634, sendo considerado um ajuste satisfatório. A Figura 40 traz a representação gráfica dos pontos experimentais e da curva de ajuste obtida.

$$\tau_{ff} = c' + \sigma'_f \times \phi' + \psi_f \times \phi^b \quad (6)$$

$$\tau_{ff} = \sigma'_f \times 0,6189 + \psi_f \times 0,1020 \quad (7)$$

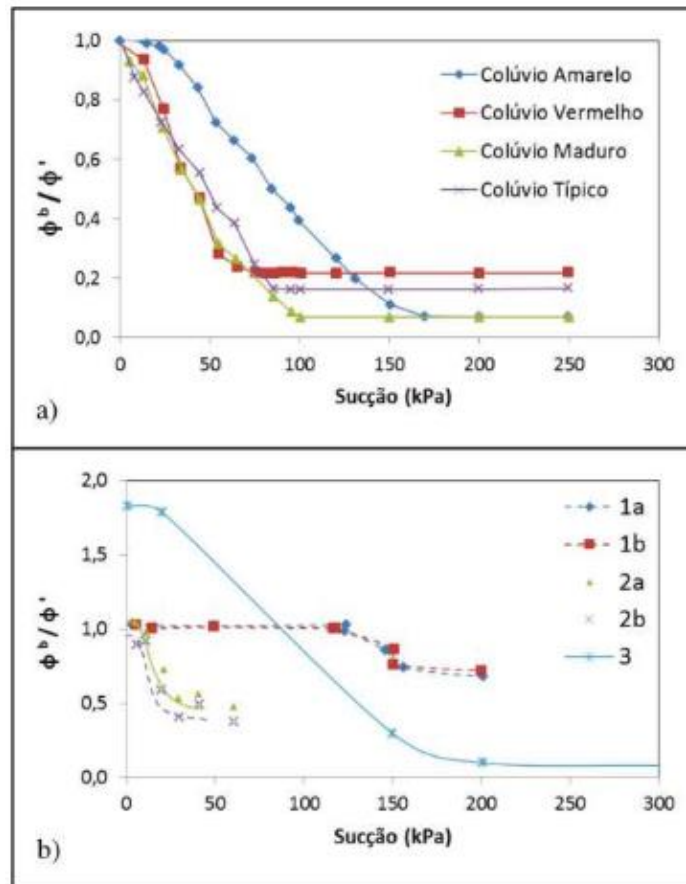
Figura 40 – Envoltória estendida de Mohr-Coulomb.



Fonte: Autor (2024).

Com os coeficientes atribuídos à equação X, é possível obter os valores em grau para  $\phi'$  e  $\phi^b$ , que são, respectivamente:  $31,8^\circ$  e  $5,8^\circ$ .

Para o ajuste adotado, o parâmetro  $\phi^b$  é considerado de comportamento linear. Porém, existem estudos que demonstram que esta variável apresenta variações para valores menores de sucção, com tendência de estabilização conforme o aumento de  $\psi$ . A Figura 41, de Campos e Motta (2023), reúne estudos de Campos e Carrillo (1995), Rohm e Vilar (1995), Fonseca (1991), e Abramento e Carvalho (1989); que demonstram esse comportamento através da relação  $\phi^b/\phi'$ .

Figura 41 – Estudos da variação de  $\phi^b$  em relação à sucção.

Fonte: Campos e Motta (2023).

Fazendo o cálculo da razão  $\phi^b/\phi'$  para os parâmetros obtidos, obtém-se para o solo maduro estudado, o valor de 0,1834, que é coerente para os valores dos solos coluvionares apresentados em Campos e Motta (2023), onde variação do parâmetro se estabiliza entre aproximadamente 0,0 e 0,5. A Tabela 11, reúne alguns dos estudos realizados pelos autores mencionados anteriormente. Percebe-se que, apesar de algumas variações, os resultados obtidos para  $\phi^b/\phi'$  se aproximam dos demais em ordem de grandeza, principalmente para o solo residual de biotita de Carillo (1993).

Tabela 11 - Comparação com demais estudos.

Material	Autoria	IP	$c'$ [kPa]	$\phi'$ [°]	$\phi^b$ [°]	$\phi^b/\phi'$
Solo maduro de Santos-SP (colúvio)	Reis (2024)	16%	0,0	31,8	5,8	0,1834
Residual de migma-tito arenoso	Abramento e Carvalho (1989)	14%	0,0	40,0	11,5	0,2875

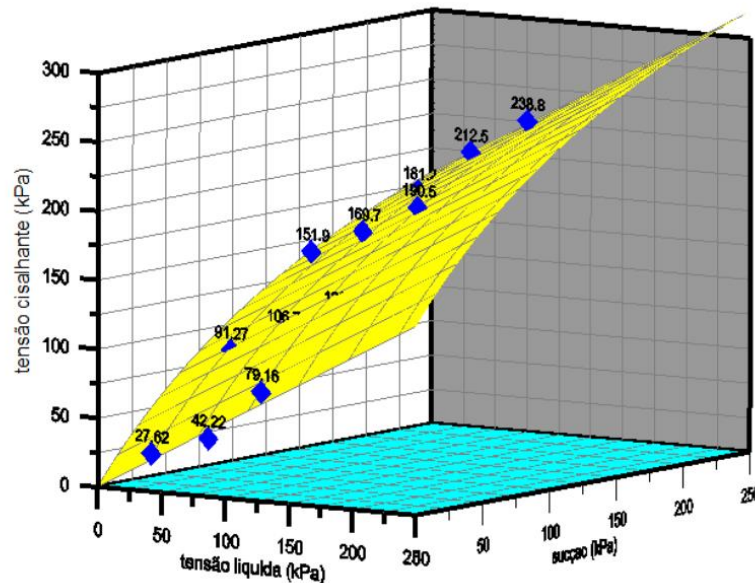
Colúvio amarelo, areno-argiloso	Carrillo (1993)	23%	0,0	26,4	6,7	0,2538
Residual de biotita gnaïsse, areia argilo-siltosa	Carrillo (1993)	18%	8,6	32	6,8	0,2125

Fonte: Adaptado de Campos e Motta (2023).

Existe também a possibilidade de se ajustar uma envoltória não-linear, através da consideração de outros critérios de ruptura. Tal cenário foi estudado por Caso (2014), para um solo coluvionar e um solo saprolítico na região do Tinguá (RJ). Na ocasião, também foram realizados ensaios de cisalhamento direto, porém foi empregado o controle de sucção para as amostras. Os resultados do trabalho foram as envoltórias ajustadas na forma das Equações 8 e 9 (onde  $(\sigma - u_a)$  é a tensão normal líquida, e  $(u_a - u_w)$  é a sucção mátrica), expressas graficamente nas Figuras 42 e 43; respectivamente para os solos “residual jovem” e “colúvio”.

$$\tau = (\sigma - u_a) \times \operatorname{tg}(27,9^\circ) + \frac{(u_a - u_w)}{0,694 + 0,0027 \times (u_a - u_w)} \quad (8)$$

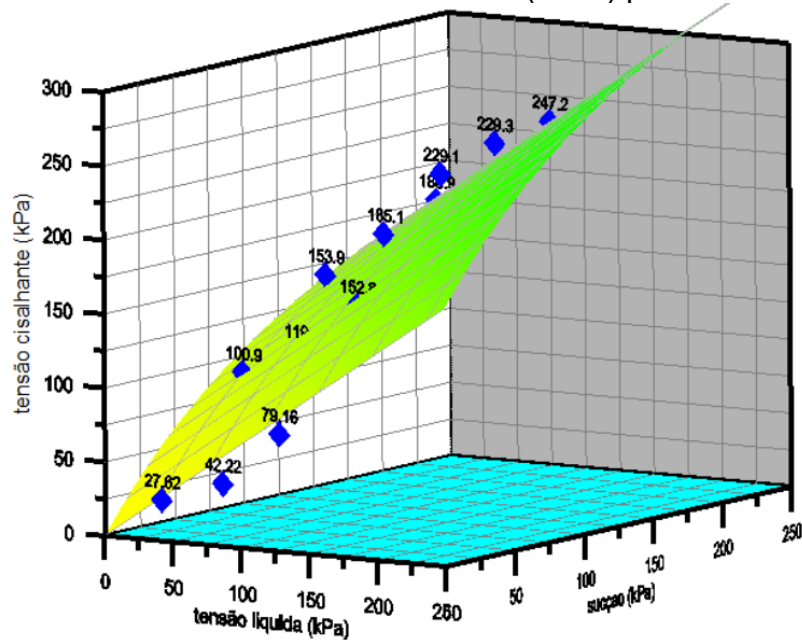
Figura 42 – Envoltória não-linear de Caso (2014) para o solo residual jovem.



Fonte: Caso (2014).

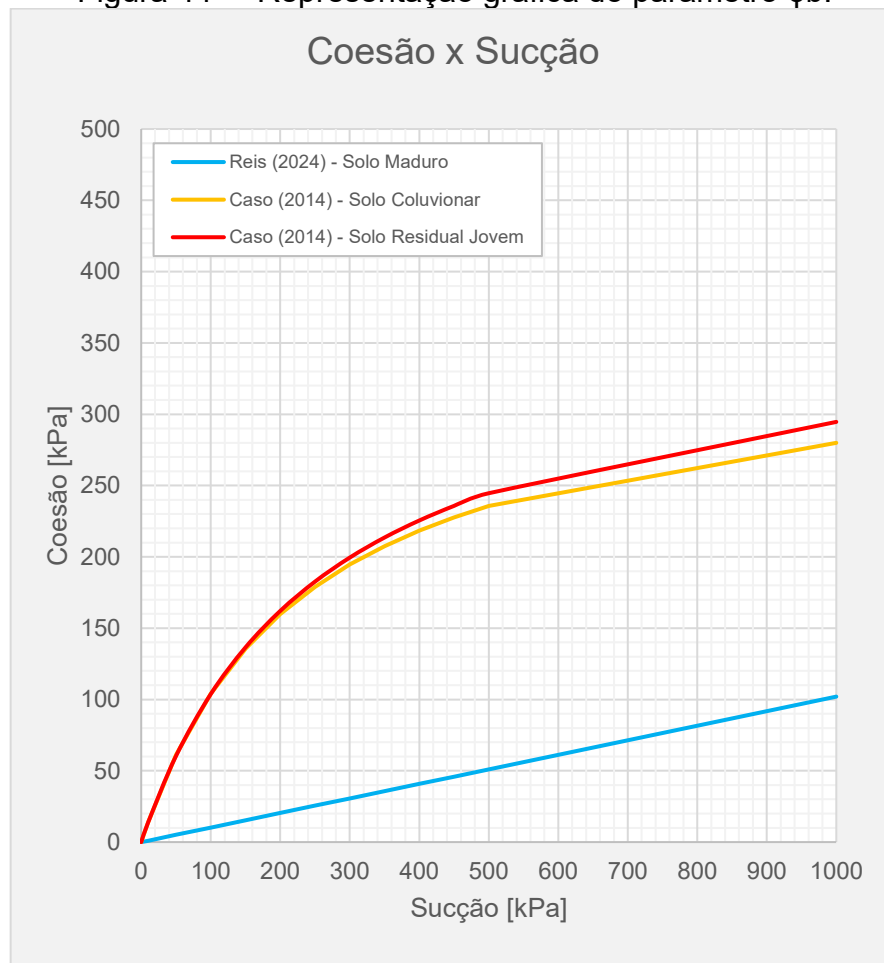
$$\tau = (\sigma - u_a) \times \operatorname{tg}(34,8^\circ) + \frac{(u_a - u_w)}{0,672 + 0,0029 \times (u_a - u_w)} \quad (9)$$

Figura 43 – Envoltória não-linear de Caso (2014) para o solo colúvio.



Fonte: Caso (2014).

Realizando a projeção da equação de envoltória no plano YZ, é possível obter uma representação gráfica do parâmetro  $\phi^b$ , e, portanto, melhor compreender o comportamento da coesão conforme variações no grau de saturação (aqui expresso na grandeza de sucção). A Figura 44 reúne os resultados obtidos por este trabalho e pelos estudos de Caso (2014) para o solo de Tinguá. Percebe-se que nas envoltórias não-lineares apresentadas, o valor de  $\phi^b$  inicialmente varia e desenvolve um comportamento assintótico conforme o aumento da sucção). O solo de Santos (objeto de estudo deste trabalho) tem uma envoltória onde  $\phi^b$  é considerado constante, o que resulta numa reta crescente. Apesar da divergência no trecho inicial, todos os solos apresentados tendem a apresentar incrementos de coesão de forma constante em tensões de sucção maiores.

Figura 44 – Representação gráfica do parâmetro  $\phi_b$ .

Fonte: Autor (2024).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As atividades desempenhadas durante este estudo foram cruciais para a compreensão do solo coletado no Morro do José Menino, em Santos (SP). Os ensaios de caracterização evidenciaram a amostra como uma areia argilosa, fato que foi posteriormente revalidado com a análise da distribuição dos poros obtidas como resultado da porosimetria de mercúrio.

Através da própria MIP, juntamente dos ensaios com papel filtro, foi possível compreender ainda mais o comportamento hidráulico do solo ao se associar o teor de umidade das amostras com a sucção matricial à qual estão sujeitos. O solo de Santos apresentou um comportamento bimodal, característico de solos tropicais intemperizados. Além disso, ficou evidente a composição do solo, que se dá principalmente por micro e macro poros (que são relacionados, respectivamente, com as frações de argila e areia do solo). De forma paralela, a aplicação de dois métodos de ensaio para a determinação da curva de retenção expôs a diversidade de opções para o estudo desse comportamento, apesar das diferenças observadas entre cada uma das abordagens.

Os ensaios de cisalhamento direto, por sua vez, proporcionaram um panorama sobre a sua capacidade de resistência físico-mecânica. A execução de ensaios em amostras com diferentes umidades permitiu compreender a influência da sucção na resistência ao cisalhamento. Isso fica evidente ao perceber que as variações observadas dentre os resultados para as amostras com umidade natural são devidas justamente ao formato da curva de retenção: a umidade volumétrica nessa condição corresponde ao patamar da curva bimodal obtida, e as pequenas variações de umidade nas amostras se refletiram em grandes variações de sucção, o que acabou por influenciar esses ensaios e impossibilitar a determinação de uma envoltória de resistência para o solo em umidade natural.

Ao fazer enfim a combinação de todos esses resultados, a junção das informações obtidas com a curva de retenção e os ensaios de cisalhamento toma a forma da envoltória estendida de Mohr-Coulomb, onde a correlação entre a SWRC e os ensaios de resistência é representada graficamente. Os parâmetros  $\phi'$  e  $\phi^b$  obtidos, quantificam o plano da envoltória de resistência, e permitem que se compreenda o comportamento do solo de Santos em diferentes situações de solicitação e saturação.

Vale ressaltar, ainda, que os resultados aqui apresentados podem ser refinados em trabalhos futuros. A realização de ensaios de cisalhamento com as amostras secas (com um grau de saturação mais baixo) forneceria mais dados para a determinação da equação de ajuste da envoltória; a aplicação de um número maior de tensões confinantes também pode contribuir para a qualidade do espaço amostral de dados. Além disso, existe a possibilidade de realizar ensaios com controle de sucção, o que refinaria ainda mais os dados obtidos experimentalmente. Também é possível interpretar os dados coletados aqui através de outros ajustes não-lineares, onde a variação de  $\phi^b$  não é constante e representa melhor o comportamento do solo.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Solos e Rochas: Terminologia. São Paulo: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16097**: Solo: determinação do teor de umidade. São Paulo: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo: Determinação do Limite de Liquidez. São Paulo: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo: Determinação do Limite de Plasticidade. São Paulo: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: Análise Granulométrica. São Paulo: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica. São Paulo: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Solos: Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. São Paulo: ABNT, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **STM D5298-03**: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. West Conshohocken: ASTM, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS . **D3080/D3080M**: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken: ASTM, 2011.

BUGS, C. A. L. **Avaliação da influência da variação da umidade na resistência ao cisalhamento de solos**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2015.

BUSTAMANTE, T. G. C. **Impactos da chuva na ocorrência de deslizamento de terra e inundações no estado de São Paulo**. 2010. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

CAMPOS, T. M. P.; MOTTA, M. F. B. Resistência ao cisalhamento de solos não-saturados. *In*: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR. G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA M. M. A.; SILVA FILHO, F. C.; RODRIGUES, R. A. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2023.

CARVALLHO, E. S.; BERNARDINO, D. C. S. Mudanças climáticas, eventos climáticos extremos e movimentos de massa no Brasil: Uma revisão sistemática. *In*:

ANDRADE, J. **Desafios globais, soluções locais**: avanços em ciências agrárias e ambientais. Campina Grande: Editora Licuri, 2023.

CARVALHO, J. C.; GIRATINA JÚNIOR, G. F. N. Unsaturated soils in the context of tropical soils. **Soils and Rocks**, Rio de Janeiro, v. 44, n. 3, 2021.

CASO, J. E. M. **Características de resistência não saturada de um solo coluvionar e um solo saprolítico de Tinguá, RJ**. 2014. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2014.

CASTRO, C. M.; PEIXOTO, M. N. O.; RIO, G. A. P. Riscos ambientais e geografia: Conceituações, abordagens e escalas. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 28, n. 2, p. 11-30, 2005.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Civil Engineering**, London, v. 2, p. 82-89, 1992.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023 - Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2023.

CONCIANI W.; BURGOS P. C.; BEZERRA R. L. Origem e formação dos solos, perfis de intemperismo. *In*: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR. G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA M. M. A.; SILVA FILHO, F. C.; RODRIGUES, R. A. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2023.

CRIPPA, M. T.; FERNANDES, J. M.; FERREIRA, J. W. S.; ANDRELLO, A. C.; TEIXEIRA, R. S. Permeabilidade de solos arenosos do sul do Brasil reforçados com fibra de polietileno tereftalato (PET). *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 21., 2024, Balneário Camboriu. **Anais [...]**. São Paulo: ABMS, 2024.

DELCOURT, R. T.; CAMPOS, T. M. P.; ANTUNES, F. S. Interrelationship among weathering degree, pore distribution and water retention in an unsaturated gneissic residual soil. **Engineering Geology**, Amsterdã, v. 299, 2022.

FREDLUND, D. G. **Soil mechanics for unsaturated soils**. Hoboken: John Wiley and Sons, 1993.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. **Unsaturated soil mechanics in engineering practice**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2012.

GITIRANA JÚNIOR, G. F. N.; MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. A curva de retenção de água de materiais poroso. *In*: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR. G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA M. M. A.; SILVA FILHO, F. C.; RODRIGUES, R. A. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2023.

GOBBI, E. S. **Variação do manto intempérico nas encostas dos morros residuais em Santos – SP**. 2017. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

GOMES, F. S.; MOTTA, M. F. B. Influence of coconut fiber on the microstructural, mechanical and hydraulic behavior of unsaturated compacted soil. **Soils and Rocks**. São Paulo, v. 46, n. 2, 2023

GONÇALVES, R. A.; MONTEIRO, V. E. D. **Mecânica dos solos experimental**. Campina Grande: EDUEFCG, 2018.

GOOGLE LLC. **Google Earth Pro**. Google Earth, Mountain View, 2024. Disponível em: [https://earth.google.com/web/@-23.96093654,-46.35366436,-23221.64951902a,30893.92578952d,35y,0.0004h,0t,0.0024r/data=CgRCAggBOgMKATBCAggASg0I\\_\\_\\_\\_\\_ARAA?utm\\_source=earth7&utm\\_campaign=vine&hl=pt-BR](https://earth.google.com/web/@-23.96093654,-46.35366436,-23221.64951902a,30893.92578952d,35y,0.0004h,0t,0.0024r/data=CgRCAggBOgMKATBCAggASg0I_____ARAA?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=pt-BR). Acesso em: 10 Set. 2024.

LIMA, A.; RODRIGUES, R. A. Terminologia e simbologia. *In*: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA M. M. A.; SILVA FILHO, F. C.; RODRIGUES, R. A. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2023.

LUCAS, J. F. R. **Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2011.

MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A.; GITIRANA JÚNIOR. G. F. N. Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção. *In*: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR. G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA M. M. A.; SILVA FILHO, F. C.; RODRIGUES, R. A. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2023.

MENDES, R. M.; MARINHO, F. A. M. Soil water retention curves for residual soils using traditional methods and MIP. **Geotechnical and Geological Engineering**, Amsterdã, v.38, 2020.

MOTTA, M. F. B. **Caracterização físico-hídrico-estrutural e efeito do aumento da pressão do ar na resistência de solos tropicais não saturados**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2016.

OLIVEIRA, E. P. **Caracterização bio-físico-químico-mineralógica e micromorfológica de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2006.

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

REIS, P. A. C.; MOTTA, M. F. B.; ANDRADE, M. R. M.; METODIEV, D. Curva de retenção de um solo coluvionar a partir da técnica do papel filtro e de porosimetria de mercúrio. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 21, 2024, Balneário Camboriu. **Anais** [...], São Paulo: ABMS, 2024.

RODRIGUES, M. C. **Análise física e hidráulica de solo não saturado em áreas de risco a deslizamentos em Santos - SP**. Lorena: Centro Universitário Salesiano de São Paulo, 2019.

SCHMITT, M. **Caracterização do sistema poroso de rochas selantes combinando-se adsorção de nitrogênio e intrusão de mercúrio**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina . Florianópolis, 2009.

SODRÉ, F. F. **Química de solos**: uma introdução. Grupo de Automação, Quimiometria e Química Ambiental do Instituto de Química. Brasília: Universidade de Brasília, 2012.

TIAN, D.; ZHENG, H. The generalized Mohr-Coulomb failure criterion. **Applied Sciences**, Tokyo, 2023.

VIANA, H. M. F. **Índices físicos do solo**. Faculdade de Tecnologia e Ciências (FTC), [2016]. Notas de aulas de Mecânica dos Solos I (parte 5). Disponível em: <https://engcivil20142.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/08/notas-de-aulas-parte-5-mec-solos-i.pdf> . Acesso em: 21 set. 2024.