

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

MURILO ANDRÉ ROESLER SABKA

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO SATURADA DE AREIAS DESCARTADAS  
DE FUNDIÇÃO

Joinville

2022

MURILO ANDRÉ ROESLER SABKA

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO SATURADA DE AREIAS DESCARTADAS  
DE FUNDIÇÃO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Heidemann

Joinville

2022

MURILO ANDRÉ ROESLER SABKA

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO SATURADA DE AREIAS DESCARTADAS  
DE FUNDIÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 14 de março de 2022.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Marcelo Heidemann  
Orientador/Presidente  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dra. Helena Paula Nierwinski  
Membra da banca  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Rodrigo Carreira Weber  
Membro da banca  
Universidade do Vale do Taquari

Dedico este trabalho à minha família e amigos

“Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado” (J.R.R. Tolkien, 1954).

## RESUMO

Um dos grandes problemas da indústria de fundição nos dias de hoje é a geração de resíduos sólidos industriais, sendo o principal a areia descartada de fundição (ADF). Atualmente, grande parte da ADF é destinada para aterros industriais, se tornando uma prática de elevado custo e problemática do ponto de vista ambiental, além de representar um desperdício de potencial matéria prima. Diante do exposto, uma alternativa para o reaproveitamento da areia descartada de fundição é a sua aplicação em obras geotécnicas, situações que envolvem a utilização de grandes volumes desse material. Entretanto, há pequena quantidade de informação sobre o comportamento geomecânico deste material e por exemplo, inexitem trabalhos que avaliem o efeito da sucção sobre a resistência ao cisalhamento. Para este fim, o objetivo do presente trabalho é analisar resistência ao cisalhamento não saturada das areias descartadas de fundição. O propósito consiste em compreender o comportamento geotécnico da ADF a partir da correlação entre os níveis de coesão aparentes alcançadas nos ensaios de cisalhamento direto, com os níveis de sucção representados pela curva característica da areia descartada de fundição e avaliar os impactos do estado não saturado sobre a estabilidade de um aterro executado com esse material. Para isto, foram compactados corpos de prova na umidade ótima com energia normal de compactação. Após compactados, alguns corpos de prova foram submetidos aos processos de umedecimento e secagem, variando a umidade +2%, +4%, -2% e -4% em relação a umidade ótima. Com isso, foram executados ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova de ADF na umidade ótima e nas condições +2% +4% (umedecimento) e -2% e -4% (secagem). A curva característica da ADF foi obtida através do método do papel filtro. Para avaliação da contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento, foram comparados os resultados da umidade ótima com as demais condições. As amostras submetidas a secagem apresentaram valores mais elevados de coesão total e ângulo de atrito interno em relação a umidade ótima, com valores de coesão total e ângulo de atrito interno variando de 11,25kPa para 13,185 e 17,217 kPa e 32,509° para 36,405° e 36,431°, respectivamente. O aumento no teor de umidade nas amostras umedecidas (+2% e +4%) ocasionou uma redução na resistência ao cisalhamento, com os parâmetros variando de 11,25kPa para 5,762 e 3,015 kPa e 32,509° para 32,464° e 31,237°. Para relacionar os níveis de coesão aparente e de sucção, foi proposto um modelo de equação de resistência ao cisalhamento não saturada através da correlação entre as variáveis de tensão normal, cisalhante e sucção. Observou-se uma boa relação entre as variáveis tensão normal e cisalhante, no entanto, constatou-se uma dificuldade em relacionar a contribuição da sucção por meio de uma correlação linear. Através das análises de estabilidade, observou-se que os fatores de segurança aumentam à medida que ocorre a diminuição no teor de umidade do material devido o acréscimo de resistência gerado pela sucção. Os valores variaram de 1,095 na condição crítica sem coesão, para 2,255 na condição de secagem -4%. Este estudo pode contribuir para um melhor entendimento das potencialidades e limitações da areia descartada de fundição em condição não saturada, o que visa oferecer subsídio para que este material possa ser reaproveitado em aplicações geotécnicas, bem como para a gestão da segurança dos aterros de disposição de ADF existentes.

**Palavras-chave:** Areia descartada de fundição. Resistência ao cisalhamento não saturada. Sucção. Aplicações geotécnicas. Fatores de segurança

## ABSTRACT

One of the major problems of the foundry process nowadays is the generation of industrial solid waste, the main one being waste foundry sand (WFS). Today, a large part of the WFS is sent for industrial landfills, becoming a practice of high cost and problematic from an environmental point of view, besides representing a waste of raw material. An alternative reuse of waste foundry sand is in geotechnical works, which lead to the use of large volumes of this material. However, there is a small amount of information about the geomechanical behavior of this material, mainly under unsaturated condition. The objective of the present work is to analyze unsaturated shear strength of waste foundry sand under different degrees of saturation. The purpose is to understand the geotechnical behavior of the WFS from the correlation between the apparent cohesion levels achieved in the direct shear tests, with the suction levels represented by the characteristic curve of the waste foundry sand. In addition, it aims to evaluate the impacts of the apparent cohesion on the stability of a landfill built with this material. For this, specimens were compacted in the optimal moisture content with normal compaction energy. After compacted, some specimens were submitted to wetting and drying processes, varying the moisture content +2%, +4%, -2% and -4% in relation to the optimal moisture content. Direct shear tests were carried out on WFS specimens at optimal moisture content and conditions +2% +4% for wetting and -2% and -4% for drying. The WFS characteristic curve was determined using the filter paper method. The results of optimal moisture content were compared with the other conditions to evaluate the contribution of suction on shear strength. The specimens submitted to drying showed higher values of total cohesion and internal friction angle in relation to optimal moisture content, with values ranging from 11.25kPa to 13.185 and 17.217 kPa and 32.509° to 36.405° and 36.431°, respectively. The increase in the moisture content in the wetted samples (+2% and +4%) caused a reduction in shear strength, with parameters ranging from 11.25kPa to 5.762 and 3.015 kPa and 32.509° to 32.464° and 31.237°. To describe the relationship between apparent cohesion and suction, an unsaturated shear strength equation was proposed through the correlation of the variables of normal, shear and suction stress. A good relationship between the variables normal and shear stress was found. However, relating the contribution of suction through a linear correlation was difficult. Through stability analyses, it was observed that safety factors increase as the moisture content of the material decreases due to the increase in resistance generated by suction. The values ranged from 1.095 in the critical condition without cohesion, to 2.25 in the condition of drying -4%. This study can contribute to a better understanding of the potential and limitations of waste foundry sand in unsaturated condition, which aims to provide support for this material to be reused in geotechnical applications, as well as for the safety management of existing WFS landfills.

**Keywords:** Waste foundry sand. Unsaturated shear strength. Suction. Geotechnical application. Safety factors.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Envoltória de resistência dos ensaios de cisalhamento direto com tensões normais de 30, 60, 120, 240 e 480 kPa.....	24
Figura 2 - Envoltória de resistência dos ensaios triaxiais com tensões confinantes de 30, 60, 120, 240 e 480 kPa. ....	25
Figura 3 - Curvas tensão-deformação e deslocamento vertical contra horizontal para diferentes energias de compactação. ....	26
Figura 4 - – Envoltória de resistência nas condições de pico e pós-pico. ....	27
Figura 5 - Curva característica da ADF compactada sob energia normal. ....	28
Figura 6 - Elemento de solo não saturado com uma fase contínua. ....	29
Figura 7 - Classificação do solo não saturado. ....	30
Figura 8 - Curva característica unimodal com as zonas de dessaturação.....	33
Figura 9 - Curvas características de solos com composição granulométrica diferente. ....	34
Figura 10 - Relação entre a curva característica e a resistência ao cisalhamento não saturada. ....	35
Figura 11 - Esquemas de medição da sucção matricial e total: a) sem contato; e b) com contato .....	37
Figura 12 - Calibração do papel filtro Whatman N° 42.....	38
Figura 13 - Equações de ajuste para a curva característica. ....	39
Figura 14 - Variáveis do estado de tensão para um solo não saturado.....	41
Figura 15 - Envoltória de resistência para diferentes níveis de sucção. ....	44
Figura 16 - Envoltória de resistência ao cisalhamento estendida para solos não saturados. ....	45
Figura 17 - Interseção da reta no plano $\tau \times ua - uw$ . ....	45
Figura 18 - Possíveis envoltórias de resistência para solos não saturados. ....	46
Figura 19 - Areia descartada de fundição (ADF). ....	48
Figura 20 - Distribuição granulométrica da ADF.....	51
Figura 21 - Imagens MEV (a) grãos de areia com aproximação de 40 vezes, (b) finos aderidos a superfície das partículas de areia com aproximação de 350 vezes e (c) aglomerados de pequenas partículas de areia com aproximação de 65 vezes. ....	53
Figura 22 - Corpo de prova no processo de umedecimento. ....	57
Figura 23 - Corpo de prova no processo de secagem. ....	58
Figura 24 - (a) corpo de prova embrulhado e (b) corpos de prova dispostos na caixa de PVC. ....	59



Figura 25 - Fluxograma dos processos de umedecimento e secagem. ....	60
Figura 26 - Equipamento de cisalhamento direto. ....	61
Figura 27 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto. ....	62
Figura 28 - Caixa de cisalhamento aberta após ensaio. ....	63
Figura 29 - Superfície de cisalhamento no corpo de prova ....	63
Figura 30 - Etapas do método do papel filtro. ....	65
Figura 31 - Pesagem e determinação da umidade do papel filtro. ....	66
Figura 32 – Grades e raios para a análise de estabilidade do aterro executado com ADF na condição de umidade ótima. ....	68
Figura 33 – Análise realizada para a condição na umidade ótima. ....	69
Figura 34 - Curva de compactação sob energia normal. ....	72
Figura 35 - Valores de sucção obtidos no método do papel filtro plotados no gráfico. ....	75
Figura 36 - Curva característica da ADF. ....	76
Figura 37 - Curva tensão x deformação e curva de deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras de secagem -4% em relação a umidade ótima. ....	79
Figura 38 - Curva tensão x deformação e curva de deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras de secagem -2% em relação a umidade ótima. ....	80
Figura 39 - Curva tensão x deformação e curva de deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras na umidade ótima. ....	81
Figura 40 - Curva tensão x deformação e curva de deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras de umedecimento +2 em relação a umidade ótima. ....	82
Figura 41 - Curva tensão x deformação e curva de deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras de umedecimento +4% em relação a umidade ótima. ....	83
Figura 42 - Envoltórias de resistência das amostras secas -4% em relação a umidade ótima. ....	85
Figura 43 - Envoltórias de resistência das amostras secas -2% em relação a umidade ótima. ....	86
Figura 44 - Envoltórias de resistência das amostras na umidade ótima. ....	86
Figura 45 - Envoltórias de resistência das amostras umedecidas +2% em relação a umidade ótima. ....	87
Figura 46 - Envoltórias de resistência das amostras umedecidas +4% em relação a umidade ótima. ....	87
Figura 47 - Envoltórias de resistência de pico à diferentes níveis de sucção. ....	89
Figura 48 - Envoltória de resistência tensão cisalhante x sucção matricial. ....	91
Figura 49 - Coesão total x sucção matricial. ....	92
Figura 50 – Envoltória de resistência plana para ADF. ....	96

Figura 51 - Valores de tensão cisalhante e tensão normal para o ajuste da equação proposta.	97
Figura 52 – Valores de tensão cisalhante e sucção matricial para o ajuste da equação proposta. .....	97
Figura 53 - Modelo geomecânico para análise de estabilidade .....	100
Figura 54 - Análise de estabilidade para condição de secagem -4%.....	100
Figura 55 - Análise de estabilidade para condição de secagem -2%.....	101
Figura 56 - Análise de estabilidade para condição de umidade ótima. ....	101
Figura 57 - Análise de estabilidade para condição de umedecimento +2%.....	102
Figura 58 - Análise de estabilidade para condição de umedecimento +4%. ....	102
Figura 59 - Análise de estabilidade para a condição crítica (sem coesão). ....	103
Figura 60 - Variação do fator de segurança da encosta natural em função da coesão total. ..	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização e os respectivos valores limites. ....	49
Tabela 2 - Composição química da areia descartada de fundição .....	50
Tabela 3 - Propriedades geotécnicas básicas da ADF. ....	52
Tabela 4 - Ensaio propostos e respectivas normas.....	55
Tabela 5 - Valores de sucção matricial obtidos através do método do papel filtro.....	74
Tabela 6 - Índices físicos das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto. ....	78
Tabela 7 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento. ....	88
Tabela 8 – Dados de entrada para análise de estabilidade.....	99

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Código argumentado em R.....	94
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADF - Areia descartada de fundição

AFS - *American Foundry Society*

ABIFA - Associação Brasileira de Fundição

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$(u_a - u_w)$  - Sucção matricial

$u_a$  - Poropressão de ar

$u_w$  - Poropressão de água

$\pi$  - Sucção osmótica

$(\sigma - u)$  - Tensão efetiva

$(\sigma_y - u_a)$  - Tensão normal líquida na direção y

$(\sigma - u_a)$  - Tensão normal líquida

$\sigma'$  - Tensão efetiva

$\chi$  - Parâmetro de Bishop relacionado ao grau de saturação do solo

$c'$  - Intercepto coesivo

$\varphi'$  - Ângulo de atrito interno

$\varphi^b$  - Ângulo de atrito que quantifica a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento

$\psi$  - Sucção matricial

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1. OBJETIVOS .....	16
<b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>17</b>
1.2. ESTRUTURA DA MONOGRAFIA .....	17
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
2.1. AREIA DE FUNDIÇÃO .....	19
<b>2.1.1. Geração do resíduo de areia descartada de fundição</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.2. Reaproveitamento das areias descartadas de fundição</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1.3. Aplicações geotécnicas da areia descartada de fundição</b> .....	<b>23</b>
2.2. SOLOS NÃO SATURADOS .....	28
2.3. SUCCÃO .....	30
<b>2.3.1. Curva característica</b> .....	<b>32</b>
<b>2.3.2. Métodos para medição da sucção</b> .....	<b>36</b>
<b>2.3.2.1. Método do papel filtro</b> .....	<b>36</b>
<b>2.3.3. Equações de ajuste para a curva característica</b> .....	<b>38</b>
2.4. ESTADO DE TENSÃO DO SOLO NÃO SATURADO .....	40
2.5. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS NÃO SATURADOS .....	41
<b>2.5.1. Envoltória de resistência ao cisalhamento de solos não saturados</b> .....	<b>43</b>
<b>3. MATERIAL E METODOLOGIA</b> .....	<b>47</b>
3.1. MATERIAL .....	47
<b>3.1.1. Classificação do resíduo de areia descartada de fundição</b> .....	<b>48</b>
<b>3.1.2. Caracterização físico-química</b> .....	<b>50</b>
3.2. METODOLOGIA .....	54
<b>3.2.1. Ensaio de compactação Proctor</b> .....	<b>55</b>
<b>3.2.2. Umedecimento e secagem</b> .....	<b>56</b>
<b>3.2.3. Ensaio de resistência ao cisalhamento</b> .....	<b>60</b>
<b>3.2.4. Método do papel-filtro</b> .....	<b>63</b>
<b>3.2.5. Análise de estabilidade e modelagem da equação de resistência ao cisalhamento não saturada</b> .....	<b>67</b>
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	<b>71</b>
4.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR .....	71

4.2. CURVA CARACTERÍSTICA .....	72
4.2.1. Obtenção dos valores de sucção matricial.....	72
4.2.2. Obtenção da curva característica da ADF através da equação de ajuste proposta	75
4.3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO .....	77
4.3.1. Envoltórias de resistência ao cisalhamento no plano $\tau$ x ( $\sigma$ - $\mu$ a).....	85
4.3.2. Contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento .....	90
4.4. ESTABILIDADE DE UM ATERRO EXECUTADO COM AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO COMPACTADA .....	98
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>105</b>
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	107
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>108</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A indústria de fundição é responsável pela fabricação de peças fundidas que podem ser acabadas ou utilizadas como matéria prima em outros setores, como o automotivo, ferroviário e de máquinas e equipamentos. Segundo a *American Foundry Society* (AFS, 2019), em 2018 foram gerados, no mundo, cerca de 112,74 milhões de toneladas de fundidos. De acordo com a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA, 2020), no Brasil, a produção totalizou cerca de 2,28 milhões de toneladas em 2019, apresentando um crescimento de 0,8% em relação a 2018.

Um dos maiores problemas do processo de fundição é a geração de resíduos sólidos industriais, sendo o principal, a areia descartada de fundição (ADF). No processo de fundição as areias são utilizadas como moldes que dão formato às peças fundidas. Segundo Casotti, Bel Filho e Castro (2011), o consumo de areia depende do tipo de peça produzida, podendo variar entre 0,8 e 1 tonelada para cada tonelada de fundido. Nesse contexto, estima-se no Brasil uma produção anual de 3 milhões de toneladas de ADF (ABIFA, 2012).

Atualmente, grande parte da areia descartada de fundição gerada ainda é destinada para aterros industriais. Segundo Chegatti (2012), quando a ADF provém de moldes produzidos com ligantes químicos, em particular resinas tóxicas, a disposição em aterros industriais se torna problemática do ponto de vista ambiental. Alves (2012) comenta que a disposição das ADF em aterros industriais é uma alternativa de elevado custo em função das questões ambientais, além de representar um desperdício de matéria prima que poderia ser reutilizada em outros processos, cooperando na redução em emissões de gases de efeito estufa.

Em virtude dos impactos ambientais gerados uma alternativa para o reaproveitamento da areia descartada de fundição é sua aplicação geotécnica, já que em geral são situações que envolvem a utilização de grandes volumes desse material. De acordo com Yin et al. (2016), a aplicação em situações que envolvem elevados volumes estruturais de preenchimento, como aterros de rodovias, seria viável para o uso da maioria das areias de fundição produzidas.

Existem inúmeras aplicações geotécnicas em que o solo compactado se encontra em condição não saturada, como barragens, aterros e estabilização de taludes. De acordo com Vivian (2008), diferente dos solos saturados, que são constituídos por partículas sólidas e líquido intersticial, os solos não saturados são caracterizados por um sistema multifásico, composto pelas fases sólida, líquida e gasosa. No entanto, alguns autores como Fredlund e

Rahardjo (1993), defendem a existência de uma quarta fase formada pela interface ar-água, denominada de membrana contráctil.

Na condição não saturada ocorre a geração de poropressões negativas que conferem ao solo uma parcela de coesão denominada de sucção ou coesão aparente. Esse acréscimo de tensão, junto à coesão verdadeira e o ângulo de atrito, influencia significativamente a resistência do solo. Para Benevelì (2002) a sucção é uma variável de tensão necessária para definição do comportamento mecânico dos solos não saturados, pois sua resistência e deformabilidade são dependentes da pressão negativa da água intersticial.

As teorias desenvolvidas pela Mecânica dos Solos Clássica não englobam os solos em condições não saturadas e os efeitos da sucção na resistência ao cisalhamento. Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), a condição não saturada associada à diferenciação estrutural dos solos residuais, faz com que o comportamento geomecânico dos solos não saturados, não seja detalhado pelos parâmetros geotécnicos convencionais, tornando uma descrição pouco realista.

Diante do exposto, este trabalho apresenta uma pesquisa que teve como objetivo analisar a resistência ao cisalhamento não saturada das areias descartadas de fundição. Para isto, foram executados ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova de ADF compactadas na umidade ótima e em corpos de prova com teores de umidade + 2%, + 4%, - 2% e - 4% em relação a umidade ótima. O propósito foi compreender o comportamento geotécnico desse material a partir da correlação entre os níveis de coesão aparente atingidas nos ensaios de cisalhamento direto, com os níveis de sucção descritos pela curva característica do material investigado. Avaliou-se os impactos da coesão aparente sobre a estabilidade de um aterro executado com areia descartada de fundição compactada. Acredita-se que os resultados possam contribuir, com pesquisas que propõem o reaproveitamento das areias descartas de fundição em aplicações geotécnicas e para a gestão da segurança de aterros de armazenagem de ADF já existentes.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Analisar a resistência ao cisalhamento de areias descartadas de fundição em condição não saturada.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Executar ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova não saturados de areias descartadas de fundição compactadas na umidade ótima e em corpos de prova com teores de umidade + 2%, + 4%, - 2% e - 4% em relação a umidade ótima;
- Definir uma curva característica para a areia descartada de fundição;
- Estabelecer uma envoltória de ruptura da areia descartada de fundição em função das tensões efetivas e da sucção;
- Determinar os parâmetros que quantificam a contribuição da sucção para a resistência ao cisalhamento não saturada do material investigado;
- Correlacionar os níveis de coesão aparente atingidas nos ensaios de cisalhamento direto com os níveis de sucção descritos pela curva característica do material investigado;
- Avaliar os efeitos da coesão aparente sobre a estabilidade de um aterro executado com areia descartada de fundição compactada.

## 1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está estruturado em 5 capítulos e apresenta os ensaios, resultados e discussões realizadas para analisar a resistência ao cisalhamento não saturada das areias descartadas de fundição. No primeiro capítulo, apresenta-se uma introdução, o problema, a justificativa e os objetivos do presente estudo.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica a respeito dos assuntos e definições relacionados ao tema estudado e que servem de base para o desenvolvimento da pesquisa. Essa revisão inicialmente aborda uma contextualização geral a respeito da areia descartada de fundição, sua produção, geração e reaproveitamento e também apresenta trabalhos anteriores referente ao comportamento da ADF em aplicações geotécnicas. Após é realizada uma revisão a respeito dos conceitos básicos e fundamentais para a compreensão do comportamento dos solos não saturados, como sucção, curva característica, estado de tensão e resistência ao cisalhamento.

O capítulo 3 descreve o material e os procedimentos utilizados no desenvolvimento do trabalho durante a fase experimental da pesquisa. Apresenta a classificação e caracterização

físico-química da areia descartada de fundição. Além de demonstrar como foram realizados o ensaio de compactação, cisalhamento direto e do método do papel-filtro.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos dos ensaios realizados no capítulo 3. São demonstradas as modelagens da curva de compactação, a curva característica, as envoltórias de resistência e equação proposta para o presente estudo. Além disso, são apresentadas as análises de estabilidade para um caso real de um aterro executado com ADF compactada. E por fim, o capítulo 5 descreve as principais conclusões do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os assuntos e definições relacionados ao tema estudado e que servem de base para o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, será apresentada uma contextualização geral a respeito da areia descartada de fundição, sua produção, geração e reaproveitamento. Também serão apresentados estudos do comportamento da ADF em aplicações geotécnicas. Em seguida, a fundamentação aborda os conceitos essenciais para a compreensão do comportamento dos solos não saturados, como, as fases que envolvem um elemento de solo na condição não saturada, a sucção e a curva característica. Por fim, é realizada uma revisão sobre o estado de tensão, a resistência ao cisalhamento, o critério e a envoltória de ruptura de um solo não saturado.

### 2.1. AREIA DE FUNDIÇÃO

De acordo com Casotti, Bel Filho e Castro (2011), o processo de fundição consiste na fabricação de peças metálicas por meio do preenchimento, com metal líquido, de uma cavidade que apresenta dimensões aproximadas às da peça que se deseja fabricar. Ainda segundo os autores, no Brasil, o método mais tradicional de fundição envolve o uso de moldes confeccionados em areia. Conforme Carey (2002), apesar de existir uma grande variedade de tipos de areia que são utilizadas pela indústria de fundição, como sílica, cromita, olivina e zirconita, a mais utilizada é a areia de Sílica, devido sua larga disponibilidade e custo relativamente baixo.

Segundo Alves (2012), além da areia base, para dar forma às areias de fundição são utilizados ligantes. De acordo com o tipo de ligante utilizado, as areias de fundição podem ser divididas em dois tipos: as areias verdes, que utilizam sistemas ligantes à base de argila, e as areias quimicamente ligadas (ou resinadas ou de macharia) que são feitas com sistema à base de resinas sintéticas. De acordo com Rossetto (2010), a moldagem em areia a verde foi e continua sendo o processo mais barato de obtenção de peças fundidas, além de ser menos prejudicial à saúde e ao ambiente. Conforme Romanus (1991), mais de 50 % da produção mundial de fundidos é obtida em areia verde, e acredita-se, que no Brasil, esse número deve situar-se acima de 80%.

A areia verde é constituída principalmente por argila bentonítica (aproximadamente 10%), pó de carvão (aproximadamente 5%), água (entre 2 a 5%) e o restante de areia de sílica.

Empregada em menor escala, a areia ligada quimicamente utiliza sistema ligante baseado em um ou mais aglutinantes orgânicos misturados com catalisadores e endurecedores. De maneira geral, as areias quimicamente ligadas são tipicamente 97% de areia de sílica em peso e o restante de sistema de ligante químico (WINKLER; BOL'SHAKOV, 2000).

Em relação aos componentes das areias verdes e suas propriedades, segundo Alves (2012), as argilas (bentonita) fornecem coesão e plasticidade ao estado úmido e alta resistência quando seco. A autora comenta também que a característica principal da água na mistura da areia verde é tornar possível a propriedade coesiva dos elementos da mistura através do aumento da umidade. Segundo Romanus (1991), o pó de carvão quando misturado confere um melhor acabamento superficial das peças. O termo “verde” que está relacionado a areia verde de fundição não é referente a sua coloração ou uma geração mais limpa, mas sim por causa da adição da água na mistura que fornece a “resistência verde”. De acordo com Siddique *et al* (2010), a resistência verde é a capacidade que um material parcialmente curado possui quando é submetido à remoção do molde, podendo ser manuseado sem distorção.

### **2.1.1. Geração do resíduo de areia descartada de fundição**

Dentro do processo de fundição, as areias são recuperadas por vários ciclos. No entanto, existe um número limitado de vezes que as areias podem ser reinseridas no processo de maneira efetiva, pois os seus grãos perdem o formato angular necessário para formação dos moldes, além de ficarem finos e degradados em função do calor. Chega um momento em que as areias não podem ser mais reintroduzidas no processo de fundição. Por esse motivo, as areias são descartadas e recebem o nome de areias descartadas de fundição (JAVED; LOVELL; WOOD, 1994).

Os resíduos de ADF variam conforme as areias que são utilizadas no processo de moldagem. O resíduo proveniente de uma areia de moldagem (areia verde) compreende uma mistura que contém basicamente areia (sílica), argila (bentonita), pó de carvão e material fino. Em geral, esses materiais não possuem potencial à lixiviação de componentes tóxicos ou perigosos. No entanto, os resíduos procedentes das areias quimicamente ligadas (resinadas ou de macharia) contém ligantes à base de resinas que possuem toxicidade, e possivelmente pode afetar a qualidade do solo e de águas subterrâneas. De acordo com Silva (2007) apud Rosetto (2010), com base na ABNT NBR 10.004/2004, a areia de fundição pode ser classificada como resíduo perigoso (Classe I) ou não inerte (Classe II-A). Essa classificação varia conforme o

processo de moldagem ou macharia. Estima-se que mais de 95% das areias de fundição de ferro são classificadas como resíduos de Classe II-A

De acordo com Costa (2008), em 2006, foram produzidos no Brasil aproximadamente 2,6 milhões de peças fundidas. Ainda segundo o autor, toda essa produção exige que a indústria de fundição processe anualmente entre 8 e 9 milhões de toneladas de areia verde e de macharia, das quais 7 e 8 milhões de toneladas são recicladas diretamente no processo e a diferença de aproximadamente 1 milhão de toneladas torna-se um excedente que precisa ser descartado. A maior parte destes resíduos é destinada para aterros industriais. Sendo que, segundo Carnin *et al* (2010), as areias ligadas quimicamente são separadas das areias verdes e dispostas em aterros sanitários controlados devido a composição da mistura.

A disposição da ADF em aterros colabora de maneira significativa para o agravamento dos problemas ambientais, principalmente nos grandes centros urbanos, constituindo uma tarefa potencialmente poluidora para o solo, subsolo e para águas superficiais. Devido sua composição química e do volume gerado, a ADF se torna potencialmente tóxica ao meio ambiente se disposta de maneira irregular em aterros não controlados. Em virtude da intensa fiscalização dos órgãos ambientais e da pressão da comunidade, a indústria de fundição se vê na obrigação de encontrar soluções para o reaproveitamento dos seus rejeitos, além de repensar nas suas estratégias de produção industrial (COSTA, 2008).

### **2.1.2. Reaproveitamento das areias descartadas de fundição**

O custo de geração das ADF já afeta a economia das empresas brasileiras e a situação tende a piorar devido a fatores como, o aumento dos custos para disposição dos resíduos, a gradual carência de áreas adequadas para depositá-los e a exigência de adequação às normas ambientais internacionais. Desse modo, se utilizada de maneira correta, a areia descartada de fundição pode contribuir para o aumento da vida útil dos aterros sanitários e industriais, assim como a preservação dos recursos naturais, como areia e argila, por exemplo (ROSETTO, 2010).

Segundo Regan *et al* (1997) apud Bonet (2002), mais de 90% de toda a areia de fundição é disposta em aterros sanitários, o que ocasiona um custo elevado para as empresas. Dessa forma, as empresas de fundição têm buscado alternativas para a geração e disposição dos seus resíduos. Segundo Neto (2004), o reaproveitamento da areia de fundição pode ser realizado dentro do próprio processo (reciclagem primária) ou externamente (reciclagem secundária), quando o resíduo serve como matéria-prima para outra tarefa que não seja o processo de fundição. De acordo com Quissini (2009), para o reuso interno da ADF é necessário que ocorra

a retirada de material de granulometria fina e grosseira (torrões), pois são prejudiciais para a aglutinação da mistura, além da retirada do resíduo gerado pelos caroços de machos introduzidos no processo.

Os resíduos de ADF resultantes de moldes produzidos com ligantes químicos, principalmente resinas tóxicas, acabam se tornando uma problemática mesmo quando dispostos em aterros industriais, sendo a solução técnica ideal, o seu reciclo por meio da regeneração térmica. Entretanto, o reciclo das ADF requer equipamentos sofisticados e elevados investimentos, o que aumenta o custo das areias de fundição. Por esse motivo, as empresas possuem dificuldade para implantação de sistemas eficientes, limitando-se a destorroar mecanicamente parte de suas areias já utilizadas para reciclo (CASTRO, 2001 apud CHEGATTI, 2012).

Para que a ADF possa ser reaproveitada externamente, deve ocorrer um tratamento primário com a remoção de restos metálicos (torrões) existentes. Além disso, antes de se realizar a reciclagem secundária, é necessário realizar um estudo ambiental do local no seu estado virgem, com o intuito de comparar com os estudos ambientais após a deposição do resíduo de ADF e avaliar o efeito da sua reutilização no meio ambiente. Caso o reuso do resíduo seja feito de maneira rotineira, deve ser realizada uma reanálise sempre que houver mudança no processo de fundição, pois essas mudanças podem influenciar na classificação do resíduo (KLINSKY, 2013).

De acordo com Chegatti (2012), a aprovação das atividades que envolvem o reuso de ADF mediante órgãos ambientais deve ser executada individualmente para cada fundição, de forma a garantir que as propriedades funcionais dos produtos obtidos a partir dos resíduos não sejam alteradas durante sua vida útil e que não causem impactos ambientais negativos. Rossetto (2010) comenta que, no Brasil, a norma NBR 15702/2009 normatiza a aplicação de ADF em aterros sanitários e asfalto. Segundo a autora, em Santa Catarina, a utilização da ADF é regulamentada pela Resolução Normativa CONSEMA que fornece instruções quanto às definições e aos procedimentos para o licenciamento ambiental do uso da ADF de materiais ferrosos na produção de concreto asfáltico e artefatos de concreto sem função estrutural.

Diante do apresentado, o reaproveitamento das ADF em atividades externas tende a não ser apenas ambientalmente seguro quanto pode ser economicamente viável, devido seu baixo custo, alta disponibilidade e desempenho satisfatório. Para Klinsky (2013), por apresentar excelentes propriedades mecânicas, a ADF pode ser reaproveitada na área de construção civil. Segundo Walden (2012) apud Chegatti (2012), as areias de fundição são reaproveitadas em atividades como, base e sub-base, fundações, concreto, implementos do solo, cimento Portland,



camadas e coberturas de aterros. Neto (2004) comenta que a ADF pode ser reutilizada em atividades como: confecção de tijolos, concreto, aterros para construção de rodovias, agregado fino em misturas asfálticas e pavimentação asfáltica armada.

### **2.1.3. Aplicações geotécnicas da areia descartada de fundição**

Grande parte do reaproveitamento das areias descartadas de fundição são destinadas para atividades que consomem poucas quantidades desse resíduo se comparada com a parcela que é gerada pela indústria de fundição. Uma alternativa para o reaproveitamento da areia descartada de fundição é sua aplicação geotécnica, principalmente, em situações que envolvem a utilização de grandes volumes desse material. No entanto, segundo Heidemann *et al* (2021), apesar da ADF apresentar características que atendem aos requisitos ambientais para serem usadas como material de construção, um dos principais impedimentos para o reaproveitamento benéfico desse material em grandes volumes é a falta de informações e incertezas a respeito do seu comportamento geotécnico.

Dessa maneira, muitos estudos vêm sendo realizados com o objetivo de avaliar as propriedades geotécnicas das areias descartadas de fundição compactadas em aplicações como, aterros reforçados com ADF, camadas de cobertura de aterros e barreiras hidráulicas, camadas de base e sub-base em pavimentos e estabilização de solos.

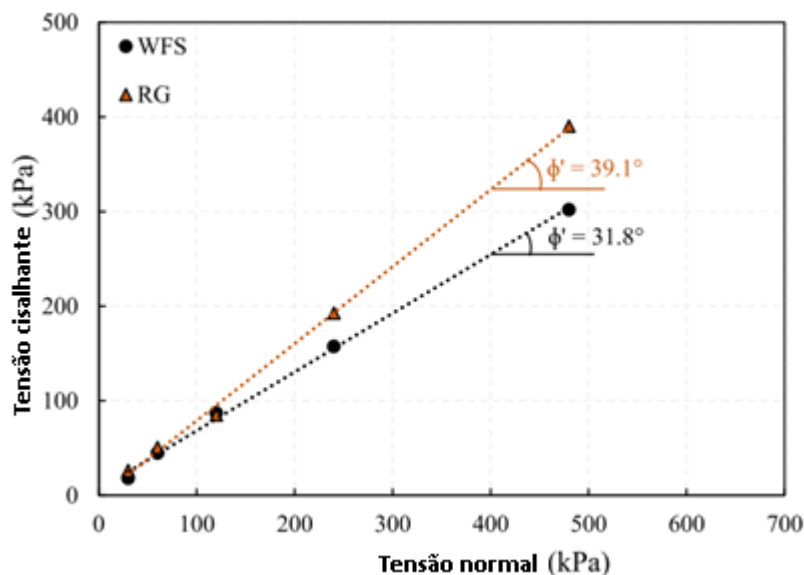
Yin *et al* (2016) comenta que as areias descartadas de fundição podem apresentar deformações permanentes e excessivas sob carregamento a longo prazo devido à presença de bentonita. A partir dessa premissa, os pesquisadores avaliaram a compressibilidade da ADF de cinco locais diferentes do estado de Wisconsin através de ensaios de compressão unidimensionais e tridimensionais. Os resultados obtidos mostraram que as areias de fundição compactadas são mais compressíveis do que as areias naturais. A compressibilidade das areias de fundição é, ao mesmo tempo, dependente da tensão e do tempo de carregamento, sendo fortemente influenciada pelo teor de bentonita. Os autores finalizam o estudo comentando que os parâmetros que foram apresentados podem ser utilizados para análises numéricas para estimar deformações por fluência em aterros construídos com ADF em diferentes níveis de tensão, teor de bentonita e tempo desde a construção.

Soleimanbeigi e Edil (2015) avaliaram a compressibilidade de vários materiais reciclados, incluindo as areias descartadas de fundição, quando aplicados em aterros rodoviários. Através de ensaios odométricos, os pesquisadores concluíram que a ADF compactada tem maior compressibilidade do que as areias naturais e outros materiais não

betuminosos, como por exemplo, cinza residual e escória de fundição (exceto para tensão vertical de 800kPa). Segundo os autores, a compressibilidade da ADF está atribuída principalmente à compressão da bentonita e dos finos no corpo de prova. No entanto, as areias descartadas de fundição são menos compressíveis do que os materiais reciclados betuminosos utilizados na pesquisa.

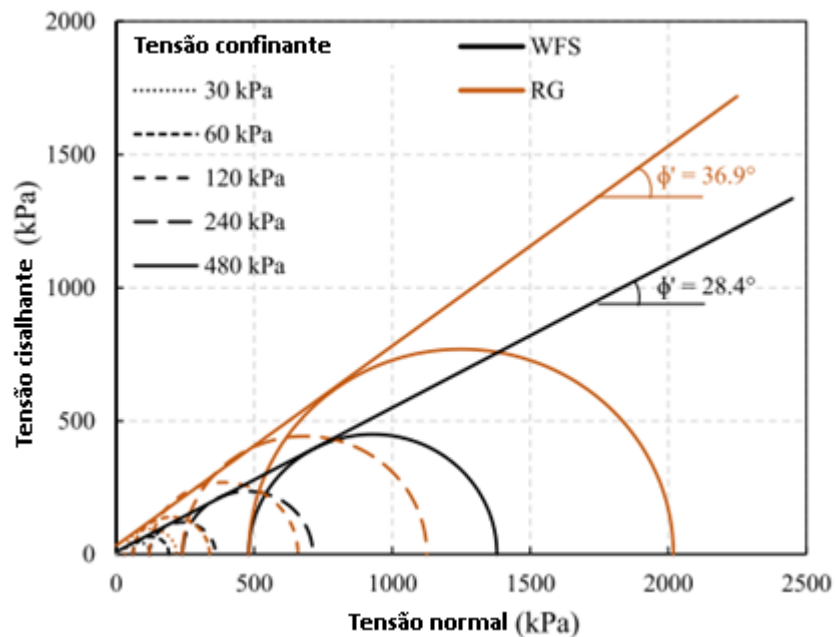
Yaghoubi et al (2020) avaliaram as propriedades de resistência ao cisalhamento e o comportamento tensão-deformação dos resíduos de areia de fundição (ADF). Na pesquisa, foram realizados ensaios de fluorescência de raio-X, valor de pH, distribuição granulométrica, CBR, cisalhamento direto e ensaios triaxiais em condição consolidada e drenada. Para fins de comparação, os pesquisadores realizaram os mesmos ensaios em um resíduo que já é um material de construção aceito para projetos geotécnicos e de construção de pavimentos, denominado vidro reciclado de resíduos (RG). A Figura 1 e a Figura 2 apresentam as envoltórias de resistência e os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos ensaios de cisalhamento direto e triaxiais, respectivamente.

Figura 1 - Envoltória de resistência dos ensaios de cisalhamento direto com tensões normais de 30, 60, 120, 240 e 480 kPa.



Fonte: adaptado de Yaghoubi *et al* (2020, p. 5).

Figura 2 - Envoltória de resistência dos ensaios triaxiais com tensões confinantes de 30, 60, 120, 240 e 480 kPa.



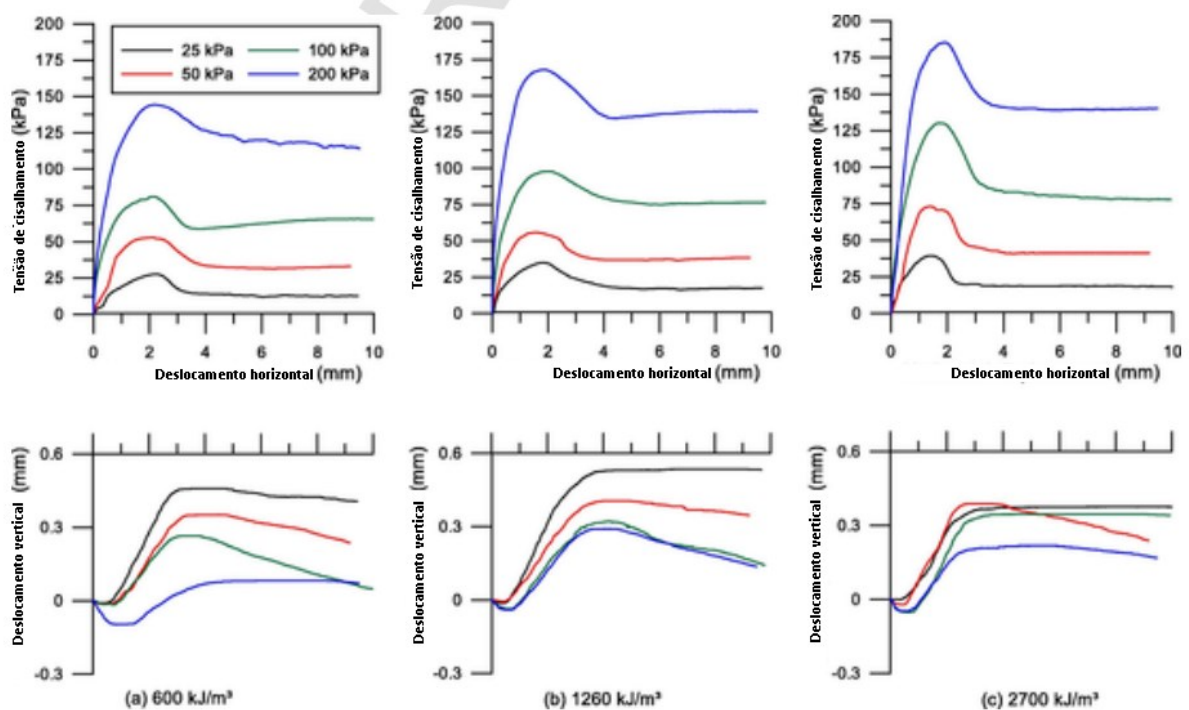
Fonte: adaptado de Yaghoubi *et al* (2020, p. 6).

Segundo os pesquisadores, com base nos ensaios de cisalhamento direto, a areia de fundição teve uma menor resistência ao cisalhamento em relação ao resíduo de vidro reciclado. No entanto, os pesquisadores concluíram que embora as propriedades de resistência da ADF fossem menores que a do resíduo de vidro reciclado (RG), as areias descartadas de fundição podem atender a características exigidas para serem usadas em aplicações como aterros de engenharia e rodoviários.

Arulrajah *et al* (2016) realizaram ensaios geotécnicos e ambientais para analisar as propriedades e viabilidade do uso da ADF em projetos de engenharia civil. Além disso, foram realizados os mesmos ensaios no resíduo de vidro reciclado para fins de comparação. Os resultados dos ensaios geotécnicos, incluindo a determinação da densidade seca máxima e do teor de umidade, CBR e permeabilidade indicam que a ADF pode ser usada satisfatoriamente em aterros (subleito) e em aplicações de assentamentos de tubos. A comparação dos resultados dos testes geotécnicos da ADF com o resíduo de vidro reciclado indica que as propriedades da ADF são inferiores. No entanto, as propriedades de engenharia das areias descartadas de fundição, como valores de compactação e CBR, as tornam aceitáveis para aplicações de preenchimento em aterros. Os resultados dos ensaios de composição química e análise de lixiviados foram comparados com os requisitos das autoridades reguladoras. Os resultados indicaram que não há riscos ambientais para usar as ADF em aplicações rodoviárias.

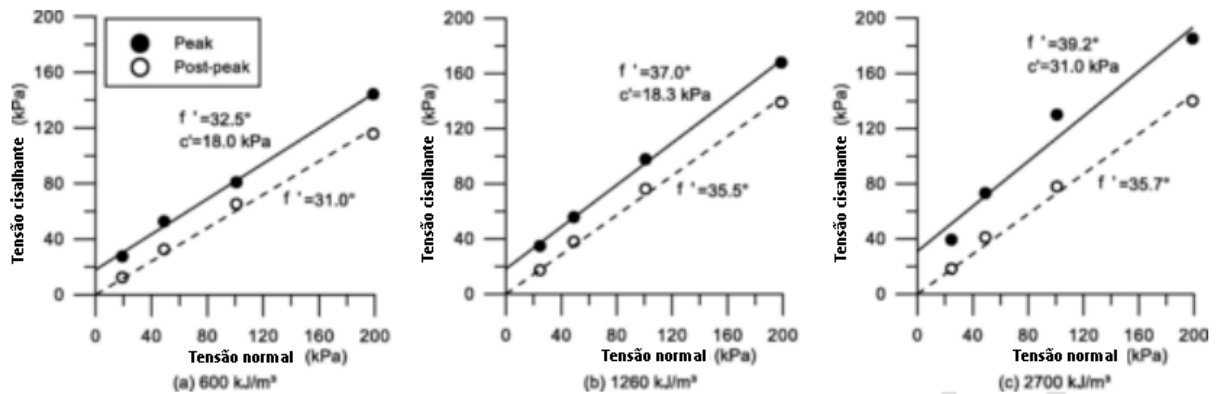
Heidemann *et al* (2021) investigaram o efeito do esforço de compactação no comportamento geotécnico da ADF considerando sua aplicação como material de construção em obras geotécnicas. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras compactadas com diferentes energias de compactação. As Figura 3 e Figura 4 apresentam os ensaios de cisalhamento direto e as envoltórias de resistência para as condições de pico e pós-pico das amostras de ADF compactadas sob diferentes energias de compactação, respectivamente.

Figura 3 - Curvas tensão-deformação e deslocamento vertical contra horizontal para diferentes energias de compactação.



Fonte: adaptado de Heidemann *et al* (2021, p. 7).

Figura 4 - – Envoltória de resistência nas condições de pico e pós-pico.

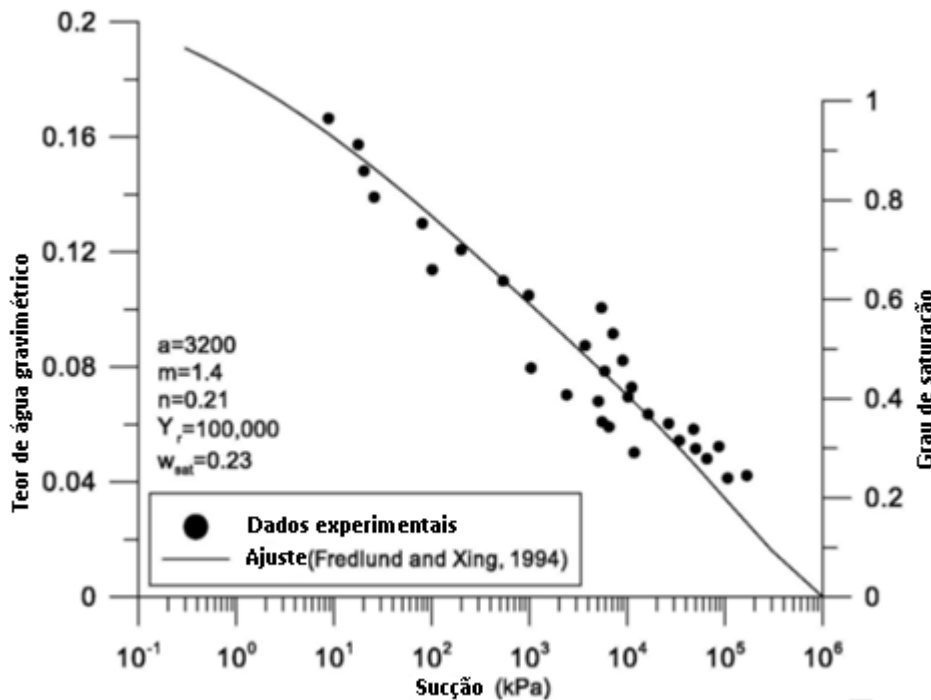


Fonte: adaptado de Heidemann *et al* (2021, p. 8).

Através dos ensaios de cisalhamento direto, Heidemann *et al* (2021) concluíram que a ADF compactada apresenta picos de tensão de cisalhamento relacionados ao comportamento dilatante. Além disso, a energia de compactação aumenta o pico de resistência ao cisalhamento da ADF, e após grandes deslocamentos o comportamento da ADF sob as três energias de compactação é bem semelhante. O ângulo de atrito e o intercepto coesivo aumentam de acordo com a energia de compactação. Os autores também realizaram ensaios de cisalhamento direto com ADF em condição seca até a umidade higroscópica para analisar a influência da sucção. Os resultados obtidos apontaram um intercepto coesivo de aproximadamente 440 kPa e um ângulo de atrito de 35,9°. Por fim, concluíram que a sucção tem uma grande influência na resistência ao cisalhamento da ADF em condição seca.

Heidemann *et al* (2021) também avaliaram a influência da umidade na sucção matricial por meio do método do papel-filtro. Através do ensaio, foram medidos níveis de sucção em torno de 100 a 200kPa em amostras na umidade ótima e compactadas sob energia normal. Com teores de umidade abaixo de 5%, os níveis de sucção chegaram a valores superiores a 50000kPa. Quando o material está saturado, a sucção tende a zero. A Figura 5 apresenta a curva característica da ADF compactada segundo o método do papel filtro.

Figura 5 - Curva característica da ADF compactada sob energia normal.



Fonte: adaptado de Heidemann *et al* (2021, p. 6).

## 2.2. SOLOS NÃO SATURADOS

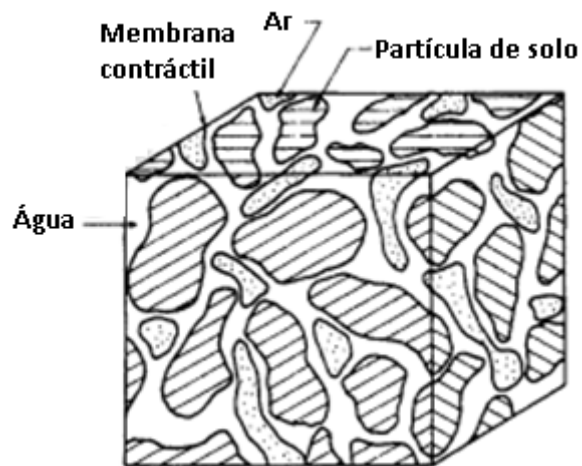
Existem inúmeros materiais encontrados na prática da engenharia, cujo comportamento não é consistente com os conceitos da mecânica clássica dos solos. Solos não saturados formam a maior categoria de materiais que não aderem ao comportamento da mecânica clássica de solos saturados. A diferenciação entre solos saturados e não-saturados torna-se necessária devido a diferenças básicas em sua natureza e comportamento. Um solo não saturado tem mais de duas fases e a pressão da água nos poros é negativa em relação à pressão do ar nos poros. Qualquer solo próximo da superfície terreno, presente em um ambiente relativamente seco, será submetido a poropressões negativas e possível dessaturação (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Uma teoria que compreenda os solos na condição não saturada é de extrema importância, visto que esses materiais são encontrados principalmente em países de clima árido e semiárido (mais de 60% dos países do mundo). Em regiões de clima tropical, com longos períodos de estiagem, a ocorrência de solos não saturados é significativa. Nessas regiões, muitos problemas geotécnicos envolvem solos na condição não saturada, como estabilidade de taludes, construção de rodovias, fundações superficiais e profundas, barragens de terra, estruturas de

contenção e instalações para resíduos industriais. Além do que, o comportamento de solos compactados, remoldados, expansivos, colapsíveis residuais e sedimentares, também são exemplos de solos não saturados (FEUERHARMEL, 2007).

Um solo não saturado é comumente referido como um sistema trifásico, com as fases ar, água e a presença das partículas sólidas. No entanto, mais recentemente, a compreensão do importante papel da interface ar-água denominada de membrana contráctil tem garantido sua inclusão como uma fase adicional ao considerar certos mecanismos físicos. Quando a fase de ar é contínua, a membrana contráctil interage com as partículas de solo e fornece influência sobre o comportamento mecânico do solo. Quando a fase de ar consiste em bolhas de ar obstruídas, o fluido se torna compressível. Um elemento de solo insaturado com uma fase de ar contínua é apresentado na Figura 6 (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Figura 6 - Elemento de solo não saturado com uma fase contínua.

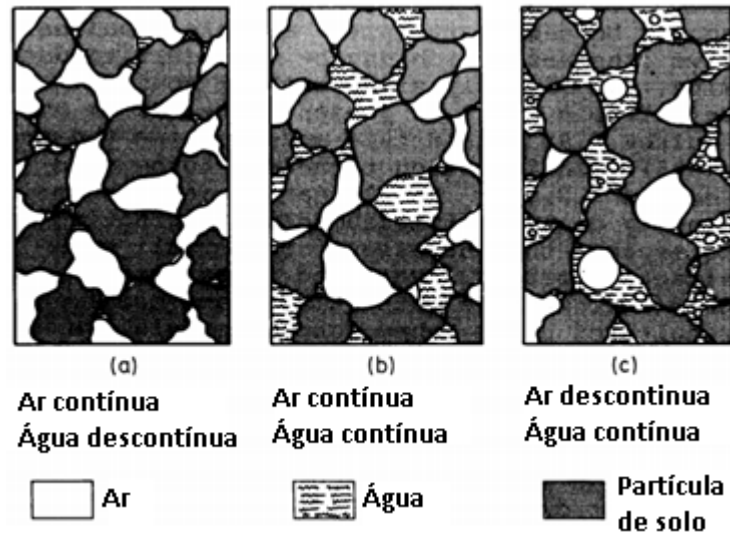


Fonte: adaptado de Fredlund e Rahardjo (1993, p. 20).

A interface ar-água tem um papel destacado no que se refere a compreensão do comportamento de solos não saturados. No que se refere à resistência ao cisalhamento, esse menisco pode ser considerado como se fosse uma membrana unindo grãos ou grumos de partículas, contribuindo para um aumento da resistência do solo. Dessa maneira, quanto maior a área relativa de influência da interface ar-água, maior deve ser a influência da sucção na resistência do solo (CAMPOS; MOTTA, 2015).

Wroth e Houlsby (1985) classificaram o solo não saturado em três categoriais em função da forma e da continuidade das fases ar e água na estrutura de solo, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Classificação do solo não saturado.



Fonte: adaptado de Wroth e Houlsby, (1985, p. 7).

O primeiro caso (a) ocorre em solos com baixos teores de saturação. Nesse caso, a fase ar é contínua e a fase água é descontínua. O ar se encontra na forma de canais e a água está retida no interior do solo, formando meniscos nos pontos de contato entre as partículas sólidas. O caso (b) ocorre em solos com grau de saturação intermediário e as fases ar e água são contínuas. No caso (c) a fase ar é descontínua e a fase água é contínua. Nesse caso o grau de saturação é elevado, a água preenche quase todos os vazios e o ar encontra-se isolado por bolhas envoltas por água. Segundo Vivian (2008), o conhecimento da constituição e distribuição de cada uma das fases na estrutura do solo é essencial para entender o comportamento desses solos em termos de resistência ao cisalhamento, variação volumétrica, condutividade hidráulica e erodibilidade.

### 2.3. SUCCÃO

De acordo com Vivian (2008), além das tensões geostáticas que são comuns aos solos saturados, na condição não saturada tem-se uma pressão isotrópica derivada da interação entre o líquido e o gás nos poros do solo, denominada de sucção. Marinho (1997) comenta que os fenômenos envolvidos na condição não saturada geram uma pressão, na água do solo, abaixo da pressão atmosférica, sendo esta pressão chamada de sucção.

A sucção é a pressão isotrópica da água intersticial que faz com que o sistema água/solo absorva ou perca água dependendo das condições ambientais, conforme aumenta ou reduz o grau de saturação. Pode ser dividida em dois componentes, o matricial que está



relacionado com a matriz do solo, basicamente com o tipo e arranjo estrutural das partículas de solo, e o osmótico, relacionado com a concentração química da água do solo. A sucção total é a soma da sucção matricial e da sucção osmótica. (MARINHO, 1997).

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), a sucção do solo quantificada em termos de umidade relativa é usualmente denominada de sucção total, sendo formada por outros dois componentes, a sucção matricial e osmótica. A sucção matricial está associada ao fenômeno de capilaridade decorrente da tensão superficial da água, e pode ser definida como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água ( $u_a - u_w$ ). Já a sucção osmótica ( $\pi$ ) está relacionada com o teor de sais presentes na água dos poros do solo, podendo ocorrer tanto em solos saturados quanto não saturados. A sucção total ( $\psi$ ) pode ser descrita pela Equação (1).

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (1)$$

Onde:

$(u_a - u_w)$  = sucção matricial;

$u_a$  = pressão de ar dos poros;

$u_w$  = pressão de água dos poros;

$\pi$  = sucção osmótica.

A contribuição da sucção osmótica no comportamento mecânico de um solo pode ou não ser da mesma magnitude que a função desempenhada pela sucção matricial. Muitos dos problemas de engenharia envolvendo solos não saturados estão associados a resultados de mudanças ambientais. Essas mudanças ocasionam uma variação do conteúdo de água nos solos e afetam principalmente a componente da sucção matricial, já as mudanças de sucção osmótica são geralmente menos expressivas. No entanto, nos casos em que o teor de sais do solo é alterado por contaminação química, o efeito da sucção osmótica na mudança do comportamento do solo pode ser significativo. (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Conforme Mendes (2008), a sucção é uma variável de tensão necessária para definir o comportamento mecânico dos solos não saturados. Parte da resistência destes solos é controlada pela pressão negativa da água intersticial. Desta forma, a medição da sucção matricial em solos não saturados é de grande relevância para entender o comportamento desses solos. Marinho (1997) também afirma que as características mecânicas dos solos não saturados, como

resistência e deformabilidade, são controladas em parte pela poropressão negativa, denominada sucção matricial.

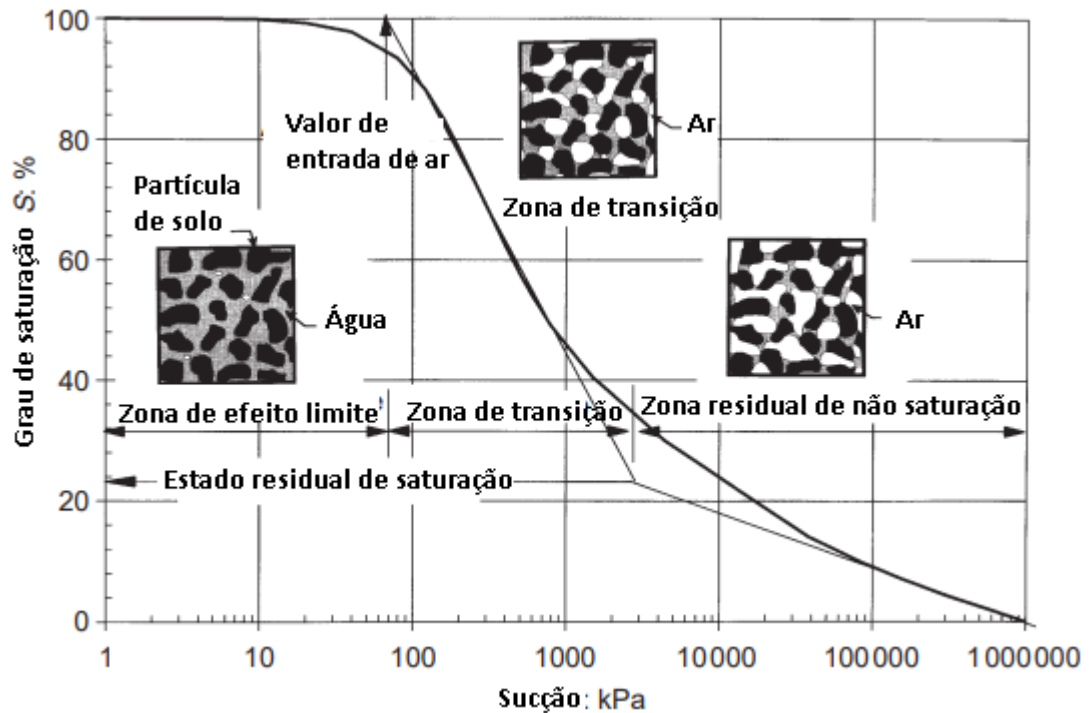
Ainda sobre a importância da sucção, Cintra (2004) comenta que baixos valores de teor de umidade correspondem a altos valores de sucção matricial, gerando uma coesão adicional denominada de coesão aparente e, portanto, aumentando significativamente a resistência ao cisalhamento do solo. Ainda segundo o autor, a inundação dos solos provoca a dissipação da sucção matricial, anulando a coesão aparente e reduzindo a valores expressivos a resistência ao cisalhamento, o que pode provocar o colapso da estrutura do solo.

### **2.3.1. Curva característica**

O efeito da sucção, ou poropressão negativa, no comportamento mecânico dos solos não saturados é primordial, sendo necessário o conhecimento da sua magnitude e da quantidade de água existente no solo. De acordo com Gitirana Junior, Marinho e Soto (2015), o comportamento dos solos não saturados exige a compreensão da distribuição, retenção e liberação da água nas situações ambientais e mecânicas em que o solo pode estar submetido. A forma como o solo controla a presença de água no seu interior pode ser representada pela curva de retenção de água, ou curva característica. Essa curva consiste na relação entre a quantidade de água presente no material poroso e a energia necessária para removê-la (sucção). Conforme Fredlund e Rahardjo (1993), a curva característica é a relação entre o conteúdo de água e a sucção de um solo não saturado.

De acordo com Feuerharmel (2007) curvas características podem apresentar de forma geral, duas formas: unimodal ou bimodal. A curva unimodal constitui um formato mais comum (formato S) e exibe três zonas de dessaturação: zona de efeito limite de entrada de ar, zona de transição e zona residual de não saturação. A Figura 8 apresenta uma curva característica unimodal com a provável variação de água em cada um dos trechos.

Figura 8 - Curva característica unimodal com as zonas de dessaturação.



Fonte: adaptado de Vanapalli (1999, p. 145).

Uma breve definição das características e das zonas da curva de retenção de água será apresentada a seguir, segundo análises feitas por Feuerharmel (2007) e Vanapalli (1999).

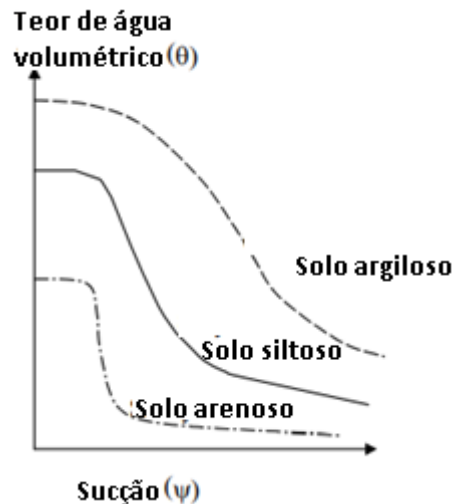
Na zona de efeito limite de entrada de ar, todos os poros estão preenchidos por água e não há redução de água, apresentando valores de sucção próximos a zero até o valor de entrada de ar do solo (VEA). Este valor identifica o ponto em que o ar entra nos maiores vazios do solo. O comportamento do solo nesse estágio pode ser descrito pela mecânica clássica dos solos saturados. O VEA é obtido da intersecção entre o segmento inicial da curva e a reta ajustada no estágio intermediário.

A zona de transição inicia após o valor de entrada de ar (VEA). Nessa fase, o solo começa a sua dessaturação e o grau de saturação reduz significativamente com o aumento da sucção. O fluxo de água se encontra na fase líquida e à medida que a sucção aumenta o solo seca rapidamente, reduzindo a quantidade de água à medida que a dessaturação continua. Nessa fase, a área dos meniscos de água em contato com as partículas de solo perde sua forma contínua e começa a reduzir. O estágio de transição termina quando é atingido o grau de saturação residual. O comportamento do solo nessa fase deve ser analisado com base nas teorias da mecânica dos solos não saturados.

A zona residual de não saturação começa quando se atinge grau de saturação residual. Nessa fase, a conectividade da água nos vazios continua a diminuir com o aumento da sucção. Segundo Fredlund e Xing (1994), a secagem do solo conduz a elevados níveis de sucção, chegando aproximadamente 1000000 kPa quando a umidade tende a zero. Nesse estágio, grandes aumentos nos valores de sucção levam a variações muito pequenas no grau de saturação, já que água se encontra aderida à matriz de solo e sua dessaturação ocorre na forma de vapor.

O formato da curva característica depende da mineralogia do solo e da distribuição granulométrica, relacionado com o tamanho dos poros. Solos arenosos apresentam uma perda acentuada de água (teor de umidade) para valores de sucção do solo relativamente baixos. Os solos argilosos geralmente apresentam um comportamento mais suave, com uma curvatura menos acentuada. Já solos siltosos apresentam um comportamento intermediário. Solos uniformemente graduados tem uma curva característica semelhante a solos arenosos, enquanto solos bem graduados podem ser comparados a solos argilosos. Na Figura 9 são apresentadas curvas características para solos com diferentes composições granulométricas (GERSCOVICH; SAYÃO, 2002).

Figura 9 - Curvas características de solos com composição granulométrica diferente.



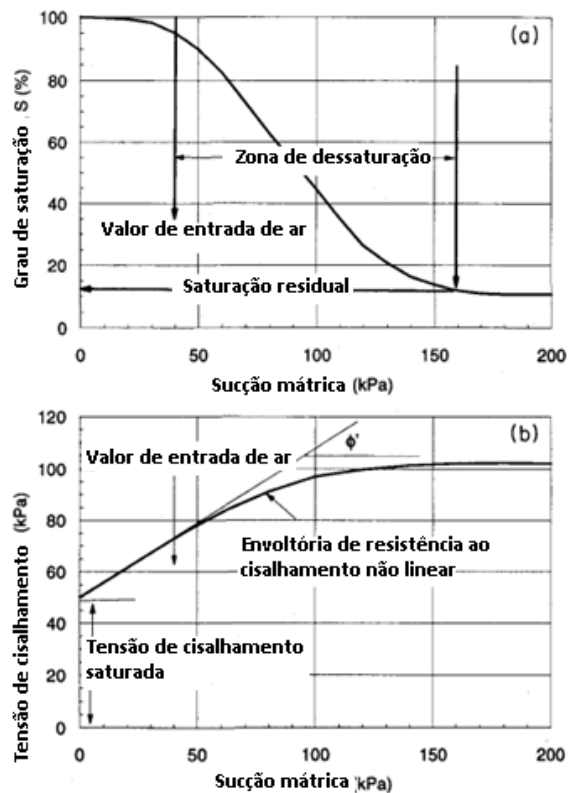
Fonte: adaptado de Gerscovich e Sayão (2002, p. 296).

Segundo Vivian (2008), com a curva característica é possível estabelecer as variações do comportamento do solo não saturado em diferentes condições de umidade. Essas variações podem ocorrer em relação à condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento e variação volumétrica, conforme as trajetórias de secagem e umedecimento do solo. De acordo com

Oliveira (2004), a curva de retenção auxilia na compreensão da mecânica dos solos não saturados, pois as propriedades de resistência ao cisalhamento e fluxo podem ser obtidas através da utilização de modelos que utilizam a curva de retenção.

A relação entre a resistência ao cisalhamento e a curva característica é apresentada na Figura 10. É possível perceber um aumento linear na resistência ao cisalhamento até o valor de entrada de ar. A taxa de dessaturação em relação a um aumento na sucção matricial é maior na zona de dessaturação (estágio de transição). Nessa região, ocorre um aumento não linear na resistência ao cisalhamento. No entanto, além das condições de saturação residual, a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado pode aumentar, diminuir ou permanecer relativamente constante. Em solos que dessaturam relativamente rápido (por exemplo, areias e lodos), na maioria das vezes, a força de cisalhamento diminui. O teor de água em areias e lodos em condições de saturação residual pode ser bastante baixo, dessa forma, a sucção não é transmitida de maneira eficaz para a partícula de solo nos pontos de contato. Assim, mesmo com grandes aumentos na sucção não ocorre um acréscimo significativo na resistência ao cisalhamento (VANAPALLI *et al*, 1996).

Figura 10 - Relação entre a curva característica e a resistência ao cisalhamento não saturada.



Fonte: adaptado de Vanapalli *et al* (1996, p. 382).

### 2.3.2. Métodos para medição da sucção

Ferreira, Oliveira e González (2015) comentam que a relação sucção e umidade pode ser obtida através de técnicas de ensaios para gerar a curva característica. A sucção matricial pode ser controlada e medida, ao passo que a sucção osmótica é determinada de forma indireta, sendo sua magnitude obtida através da diferença entre a sucção total e matricial. A sucção no solo pode ser medida através de métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos são: placa de sucção, tensiômetros, centrífuga e membrana de pressão, e os métodos indiretos: dessecador de vácuo, célula de gesso, psicrometro, papel filtro, condutividade térmica e condutividade elétrica. Segundo Feuerharmel (2007), um método direto é aquele em que a sucção é medida diretamente. No entanto, quando a sucção é estimada por correlações empíricas com as propriedades ou parâmetros do solo, o método é considerado indireto.

A seguir será apresentada a descrição do método do papel filtro, o qual foi utilizado para determinação da sucção no presente trabalho.

#### 2.3.2.1. Método do papel filtro

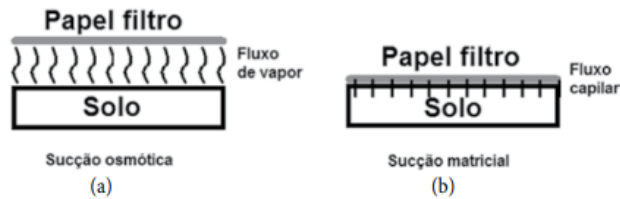
De acordo com Marinho, Soto e Gitirana (2015), a técnica do papel filtro é a mais simples e econômica de todas as outras técnicas para se medir a sucção em uma faixa de 10 a 10000kPa. Segundo Leong, He e Rahardjo (2002), as vantagens do método incluem sua simplicidade, seu baixo custo e a capacidade de medir uma ampla faixa de sucções.

O princípio do método é baseado na condição de equilíbrio energético. Quando dois materiais porosos são colocados em contato em um ambiente fechado, eles trocarão água entre si até atingir a condição de equilíbrio. Dessa maneira, quando um solo úmido é colocado em contato com o papel filtro seco, o papel tende a absorver água até que o sistema entre em equilíbrio de sucção. Quando o estado de equilíbrio é atingido, o fluxo de água cessa e o valor de sucção é considerado como sendo igual para os dois materiais, mesmo que seus teores de umidade sejam diferentes. A água absorvida pelo papel filtro é utilizada como parâmetro da sucção do sistema. (FEUERHARMEL, 2007).

O fluxo de água (umidade) entre o papel e o solo pode ocorrer através de fluxo capilar ou de vapor, e dependendo do tipo de fluxo que ocorre, o método medirá a sucção total ou matricial. Conforme Marinho, Soto e Gitirana (2015), a sucção matricial é medida quando o fluxo ocorre por capilaridade devido o contato direto das partículas de solo e o papel, já que apenas tensões capilares são vencidas nesse processo. Ainda segundo os autores, a sucção total

é medida se o fluxo ocorre em forma de vapor sem contato entre o solo e o papel, já que as forças osmóticas e capilares são vencidas. A Figura 11 apresenta os dois arranjos utilizados para medição da sucção matricial e total.

Figura 11 - Esquemas de medição da sucção matricial e total: a) sem contato; e b) com contato



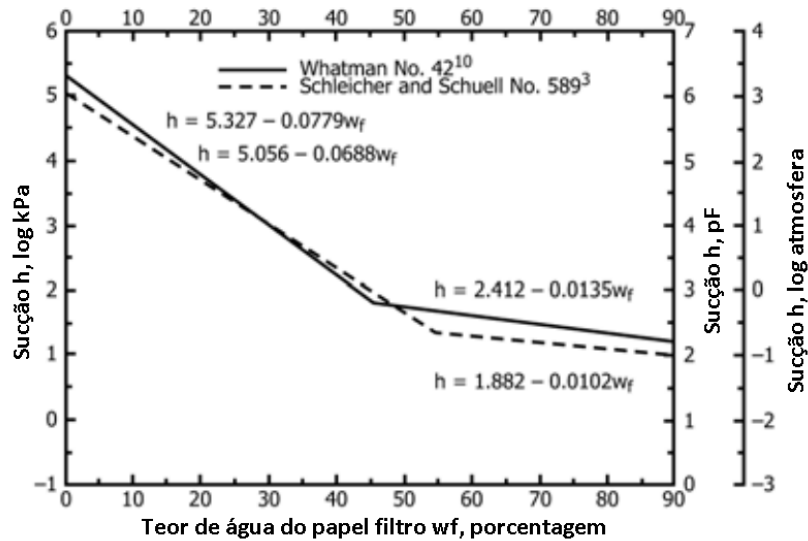
Fonte: Marinho, Soto e Gitirana (2015, p. 242).

Durante a execução da técnica, muitos cuidados devem ser tomados. Uma medida eficiente da sucção depende do tipo de contato entre o papel filtro e o solo, do tempo de equalização da sucção, da correta medida de umidade do papel filtro, do número de papéis utilizados, da histerese das trajetórias de umedecimento e secagem e da oscilação da temperatura. Além disso, o papel filtro não pode apresentar perda significativa de água ao ser retirado da amostra. Da mesma forma, o papel filtro seco não deve absorver umidade. Outro cuidado que se deve ter é com a não contaminação do papel filtro utilizado na amostra (Feuerharmel, 2007; Vivian, 2008; Marinho, Soto e Gitirana, 2015).

De acordo com a ASTM D5298-10/2010, norma que será utilizada para determinação da sucção neste trabalho, os seguintes cuidados devem ser necessários: tempo mínimo de equalização de 7 dias para determinação da sucção matricial, independentemente do nível de sucção a ser medido; o tempo de remoção do papel da amostra e sua colocação em um recipiente fechado para pesagem deve estar entre 3 e 5 segundos, e por fim, a temperatura padrão deve estar entre  $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ .

Segundo Vivian (2008), os papéis filtro possuem sensibilidades de acordo com a faixa de sucção que está sendo medida. Atualmente os mais utilizados são os papéis filtro quantitativos do tipo II, o Whatman N° 42 e o Schleicher & Schuell N° 589. Muitos autores realizaram e apresentaram a calibração do papel filtro Whatman N° 42. Neste estudo, será utilizado as equações de calibração que estão apresentadas na norma ASTM D5298-10/2010. Essas equações variam de acordo com a umidade do papel filtro após o tempo de equilíbrio, fornecendo o valor de sucção matricial após a aplicação do valor de umidade na equação. As equações de calibração estão apresentadas abaixo.

Figura 12 - Calibração do papel filtro Whatman N° 42.



Fonte: adaptado de ASTM D5298-10 (2010, p. 4).

### 2.3.3. Equações de ajuste para a curva característica

Com os valores de sucção determinados, é necessário representar a relação entre a quantidade de água presente no material poroso e a sucção. Segundo Marinho, Soto e Gitirana (2015), a curva característica é representada utilizando-se equações de ajuste pré-definidas e dados obtidos experimentalmente. De acordo com Gerscovich (2001), grande parte dos modelos são baseados na correlação entre a forma da curva característica e a distribuição do tamanho dos poros. Nestes casos as equações são formuladas com base em curvas de regressão de resultados experimentais. Ainda segundo a autora, há outros modelos que buscam estabelecer a curva característica com base nas propriedades básicas do solo, como distribuição granulométrica e porosidade. A Figura 13 apresenta algumas equações propostas na literatura para representar a curva característica.



Figura 13 - Equações de ajuste para a curva característica.

Referência	Equação	Definição de variáveis
Gardner (1858)	$\Theta = \frac{1}{1 + q\psi^\eta}$	$\Theta$ = teor de umidade normalizado $\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ; $\theta$ , $\theta_r$ e $\theta_s$ , respectivamente os teores de umidade volumétrico, residual e saturado. $\eta$ e $q$ = parâmetros de ajuste
Brooks e Corey (1964)	$\Theta = \left( \frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda$	$\Theta$ = teor de umidade normalizado: $\lambda$ = índice de distribuição de diâmetro de vazios
Visser (1966)	$\psi = a(\theta_s - \theta)^b / \theta^c$	$a$ e $b$ e $c$ = parâmetros de ajuste $\theta_s$ = teor de umidade saturado (= porosidade)
Farrel e Larson (1972)	$\psi = \psi_b e^{\alpha(1-\Theta)}$	$\alpha$ = parâmetro de ajuste
Roger e Hornberger (1978)	$\psi = a(S_s - b)(S_s - 1)$	$S_s = \theta / \theta_s$ : $a$ e $b$ = parâmetros de ajuste correção do modelo de Brooks & Corey.(1964), na faixa de baixos valores de sucção
Van Genuchten (1980)	$\Theta = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m$	$\Theta$ = teor de umidade normalizado: $\alpha$ , $m$ e $n$ = parâmetros de ajuste
Gosh (1980)	$\psi = \psi_b \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-\beta}$ $\beta = 2,619 \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{0,2822} (\lambda_4 + 0,7)^{0,0625} \lambda_4^{0,1250} \left( 5,91 \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_3} + 1,1 \right)^{0,0625}$	$\theta_s$ = teor de umidade saturado (= porosidade) $\lambda_1$ = porcentagem da fração areia $\lambda_2$ = porcentagem da fração silte $\lambda_3$ = porcentagem da fração argila $\lambda_4 = 6,2 \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} - 5,91 \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_3}$
McKee e Bumb (1987)	$\Theta = \frac{1}{1 + e^{(v-a)/b}}$	$\Theta$ = teor de umidade normalizado $a$ e $b$ = parâmetros de ajuste
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = C_v \frac{\theta_s}{\left[ \ln \left[ e + (\psi/a)^n \right] \right]^m}$ $C_v = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + \psi_o/\psi_r)}$	$a$ , $m$ e $n$ = parâmetros de ajuste $e$ = base log neperiano ( $e=2,718$ ) $\psi_o = 10^6$ kPa $a = \psi_i$ $m = 3,67 \ln \left( \frac{\theta_s}{\theta_i} \right)$ $n = \frac{1,31^{m+1}}{m\theta_s} 3,72s\psi$ 
Aubertin et al (1998)	$S_r = S_c + S_a(1 - S_c)$ $S_c = 1 - \left[ \left( \frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right] e^{-m \left( \frac{h_{co}}{\psi} \right)^2}$ $S_a = C_v \frac{a}{e^{1/3} \psi^{1/6}} \psi_{90}^{2/3} \quad C_v = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + \psi_o/\psi_r)}$	$a$ , $h_{co}$ e $m$ = parâmetros de ajuste $h_{co} = 1$ a $2,5\psi_b$ (cm H <sub>2</sub> O) $S_r = \theta / \theta_s$ : $a \approx 0,006$ (curva de desaturação) $\psi_o = 10^7$ cm H <sub>2</sub> O $\psi_r = 15 \times 10^3$ cm H <sub>2</sub> O $\Leftrightarrow \theta_r$ $e$ = índice de vazios

Fonte: adaptado de Gerscovich (2001, p. 79-80).

Vale salientar que a maior parte das equações foram desenvolvidas para solos específicos com curva característica unimodal e modelam somente a trajetória de secagem. A equação de ajuste escolhida para representar a curva característica da ADF do presente estudo foi a de Van Genuchten (1980). De acordo com Gitirana, Marinho e Soto (2015), quanto maior

a quantidade de parâmetros, maior a capacidade de ajuste da equação. Desse modo, a equação de Van Genuchten (1980) destaca-se ao incluir três parâmetros de ajuste, conferindo um aumento significativo na flexibilidade do seu formato. Além disso, a curva de van Genuchten (1980) é popular, pois permite a utilização em conjunto com um método analítico de previsão de permeabilidade não saturada, proposto pelo mesmo autor.

Gerscovich (2002) realizou um estudo com onze solos no Brasil no qual utilizou diversas equações de ajuste para descrever as curvas características, entre eles o de Van Genuchten (1980). Segundo a autora, o modelo pode ser usado para fornecer uma boa estimativa da curva característica dos solos analisados.

#### 2.4. ESTADO DE TENSÃO DO SOLO NÃO SATURADO

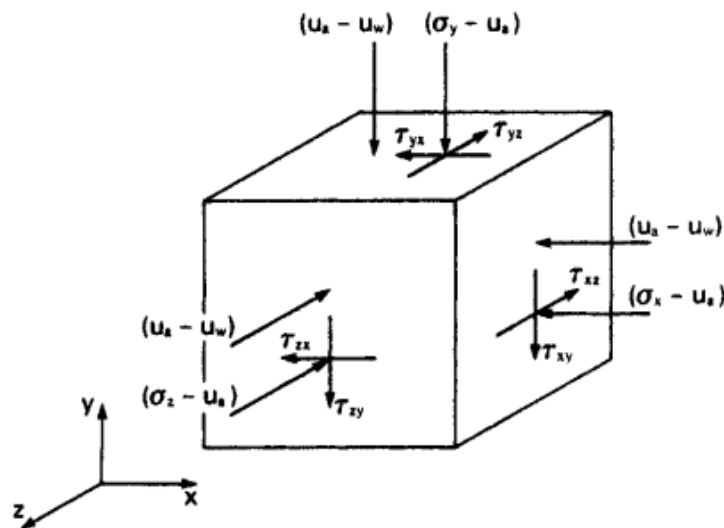
A tensão efetiva ( $\sigma - u$ ) é uma variável usada para descrever o comportamento de um solo saturado, em que  $\sigma$  é a tensão total e  $u$  a poropressão. Todos os aspectos mecânicos de um solo saturado são governados pela tensão efetiva. Muitas tentativas foram feitas para desenvolver um conceito semelhante de tensão efetiva para os solos não saturados. No entanto, o uso de uma única variável de tensão efetiva aplicada para solos na condição não saturada encontrou muitas dificuldades, levando pesquisadores à constatação de duas variáveis para expressar o seu estado de tensão (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Oliveira (2004) comenta que como os poros de um solo não saturado são preenchidos por dois fluidos, ar e água, os problemas são mais complexos. Devido ao sistema trifásico, ar, água e partículas de solo, se torna complicado quantificar a tensão transmitida entre os grãos ao se aplicar um carregamento. Ainda segundo o autor, devido às dificuldades em se equacionar as tensões efetivas em solos não saturados utilizando uma única variável de tensão, a contribuição das tensões totais e da sucção para a resistência ao cisalhamento passou a ser tratada utilizando duas variáveis de estado de tensão independentes.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), três conjuntos independentes de tensões normais são necessárias para descrever o estado de tensão de um solo, sendo  $(\sigma_y - u_a)$ ,  $(u_a - u_w)$  e  $(u_a)$ . Esses conjuntos governam o equilíbrio da estrutura de solo e da membrana contrátil. A variável  $(u_a)$ , correspondente à pressão de ar nos poros da estrutura do solo, pode ser eliminada quando as partículas de solo e água são consideradas incompressíveis. As componentes  $(\sigma - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$  denominadas tensão normal líquida e sucção matricial respectivamente, são referidas como as variáveis de estado de tensão para um solo não saturado.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993) existem três combinações de variáveis que podem ser utilizadas para descrever o estado de tensão de uma estrutura de solo e da membrana contráctil em solos não saturados, sendo:  $(\sigma - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$ ;  $(\sigma - u_w)$  e  $(u_a - u_w)$ ;  $(\sigma - u_a)$  e  $(\sigma - u_w)$ . No entanto, a combinação  $(\sigma - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$  é a mais satisfatória para o uso na prática da engenharia. Essa combinação é vantajosa pois os efeitos de uma mudança na tensão normal podem ser separados dos efeitos causados por uma mudança na poropressão de água, já que a fase ar está sob pressão atmosférica. Além disso, a sucção matricial contribui para a resistência ao cisalhamento dos solos com uma parcela de coesão aparente. A Figura 14 representa as variáveis do estado de tensão para solos não saturados.

Figura 14 - Variáveis do estado de tensão para um solo não saturado.



Fonte: Fredlund e Rahardjo (1993, p. 45).

## 2.5. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS NÃO SATURADOS

Devido à importância de se levar em conta os efeitos da sucção na resistência ao cisalhamento de solos não saturados, ao longo dos anos muitas equações foram propostas a partir da equação de resistência ao cisalhamento clássica. Segundo Campos e Motta (2015), as primeiras teorias a respeito do estudo da resistência ao cisalhamento de solos não saturados também envolveram o uso de tensões efetivas. No final dos anos 1950 e início dos 1960, várias equações foram propostas para definir as tensões efetivas em solos saturados. A Equação (2) foi apresentada por Bishop (1959) e é a mais conhecida.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

Onde:

$(\sigma - \mu_a)$  = tensão normal líquida;

$\chi$  = parâmetro de Bishop relacionado ao grau de saturação do solo;

$(\mu_a - \mu_w)$  = sucção matricial

De acordo com Farias (2004), o parâmetro  $\chi$  depende do material, tratando-se de um parâmetro constitutivo. O autor cita ainda a dificuldade em mensurar o parâmetro  $\chi$ , que é dependente do tipo de ensaio, ou seja, da trajetória de tensões e dos ciclos de molhagem e secagem. Bishop *et al* (1960) apresentaram a Equação 3 para resistência ao cisalhamento de solos não saturados, com base no princípio da tensão efetiva apresentada na Equação (3) e no critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

$$\tau = c' + [(\sigma - \mu_a) + \chi(\mu_a - \mu_w)] \cdot \tan\varphi' \quad (3)$$

Onde:

$\tau$  = resistência ao cisalhamento;

$c'$  = intercepto coesivo;

$(\sigma - \mu_a)$  = tensão normal líquida;

$\chi$  = parâmetro de Bishop relacionado ao grau de saturação do solo;

$(\mu_a - \mu_w)$  = sucção matricial;

$\varphi'$  = ângulo de atrito interno.

Segundo Weber (2013), o parâmetro  $\chi$  tenta expressar a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento do solo, variando para 0 quando o solo está seco e 1 para quando o solo está saturado. Campos (1997) comenta que o parâmetro  $\chi$  não representa uma característica fundamental do solo, sendo função de sua história prévia de umedecimento e secagem, além do grau de saturação e tipo de material.

De acordo com Oliveira (2004), a Equação (3) é uma extensão da proposta por Terzaghi (1936). Quando o solo está saturado, o parâmetro  $\chi$  é igual a 1, e a equação se torna a equação da resistência ao cisalhamento de solos saturados. A resistência ao cisalhamento

expressa pela Equação 3 é representada por um gráfico bidimensional com o estado de tensões do solo dado por uma única variável.

Fredlund *et al* (1978) propuseram duas equações (4) e (5) para a resistência ao cisalhamento de solos não saturados baseada nas duas variáveis de estado de tensão  $(\sigma - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$  apresentadas no item 2.4.

$$\tau = c' + (\sigma - \mu_a) \cdot \tan\varphi' + (\mu_a - \mu_w) \cdot \tan\varphi^b \quad (4)$$

$$\tau = c' + (\sigma - \mu_w) \cdot \tan\varphi' + (\mu_a - \mu_w) \cdot \tan\varphi'' \quad (5)$$

Onde:

$\tau$  = resistência ao cisalhamento;

$c'$  = intercepto coesivo;

$(\sigma - \mu_a)$  = tensão normal líquida;

$\varphi'$  = ângulo de atrito interno.

$(\mu_a - \mu_w)$  = sucção matricial;

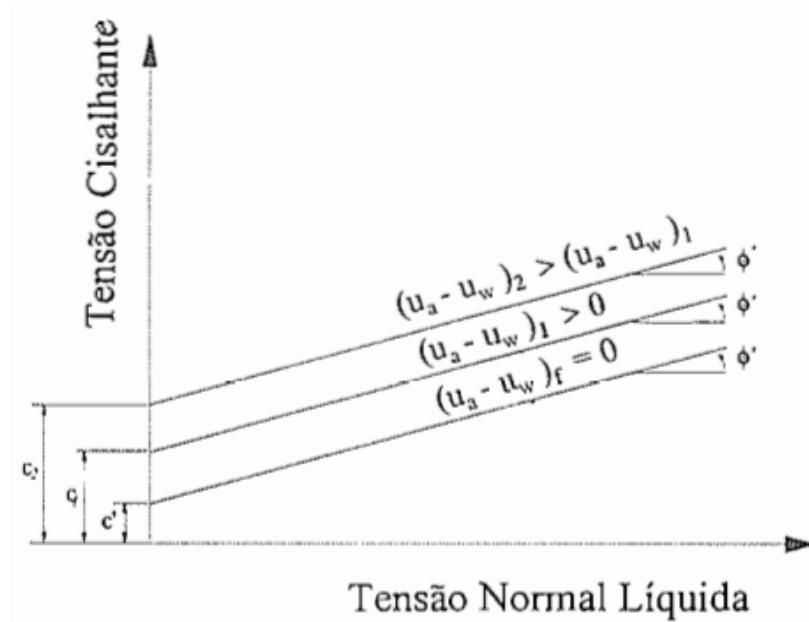
$\varphi''$  e  $\varphi^b$  = ângulos que quantificam a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento

De acordo com Feuerharmel (2007), independente da combinação de variáveis escolhida, o valor da resistência ao cisalhamento obtido deve ser o mesmo. Segundo Kuhn (2014), o ângulo de atrito  $\varphi'$  está associado a contribuição da tensão normal líquida na resistência ao cisalhamento. Já o ângulo  $\varphi^b$  está relacionado com a parcela de contribuição da sucção matricial à resistência ao cisalhamento.

### 2.5.1. Envoltória de resistência ao cisalhamento de solos não saturados

O modelo apresentado na Equação 3, apresentada previamente, corresponde à envoltória de ruptura clássica usual em solos saturados para cada nível de sucção. Dessa forma, a Figura 15 mostra que conforme o valor da sucção aumenta, ocorre um aumento da coesão total, ao passo que o ângulo de atrito interno ( $\varphi'$ ) se mantém constante. Esse acréscimo na coesão ocorre devido à geração da sucção (coesão aparente), sendo responsável pelo aumento da resistência ao cisalhamento não saturada.

Figura 15 - Envoltória de resistência para diferentes níveis de sucção.

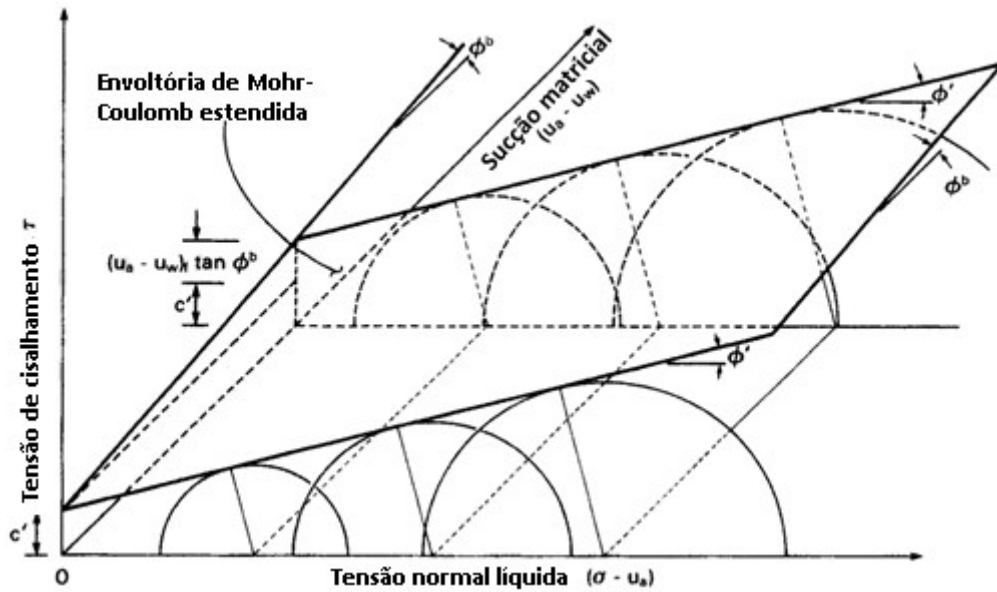


Fonte: Campos (1997, p.401).

No entanto, para solos não saturados a resistência ao cisalhamento não pode ser expressa a partir de uma reta. Isso porque, segundo Weber (2013), para cada nível de sucção há um comportamento distinto do solo. Conforme Feuerharmel (2007), a envoltória de resistência de um solo não saturado pode ser plotada em um gráfico tridimensional (Figura 16), tendo como ordenada a tensão cisalhante ( $\tau$ ), e como abscissas, as variáveis do estado de tensão ( $\sigma - u_a$ ) e ( $u_a - u_w$ ).

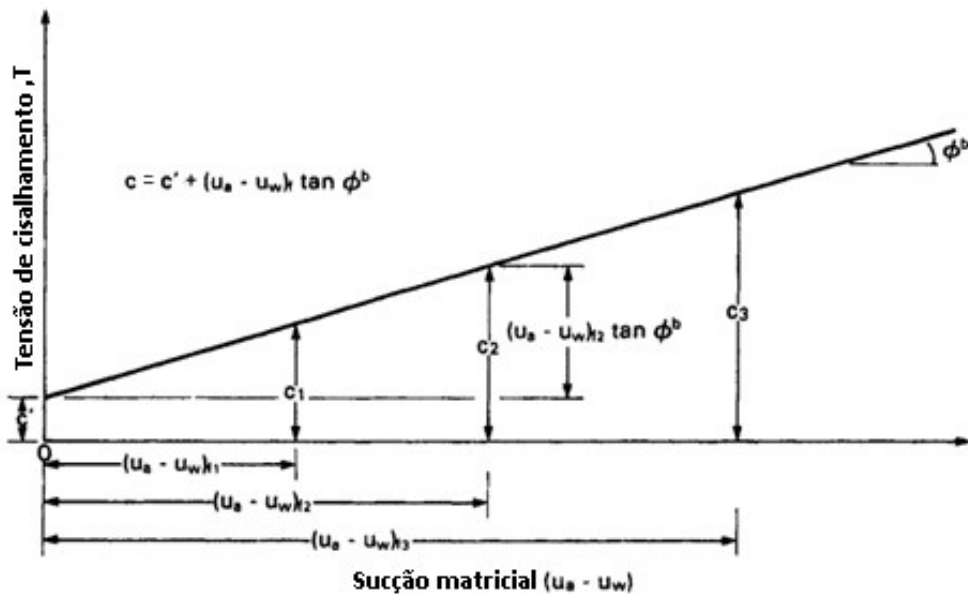
Campos e Motta (2015) comentam que a envoltória consiste em um plano com inclinações  $\varphi^b$  no eixo  $\tau \times (u_a - u_w)$  e  $\varphi'$  no eixo  $\tau \times (\sigma - u_a)$ . Ainda segundo os autores, qualquer reta nesse plano, traçada paralela aos eixos  $\tau \times (\sigma - u_a)$ , intercepta o plano definido pelos eixos  $\tau \times (u_a - u_w)$  em uma ordenada  $c = c' + (\mu_a - \mu_w) \cdot \tan \varphi^b$  (Figura 17). Segundo Weber (2013), quando a sucção for nula, o intercepto coesivo é a própria coesão efetiva.

Figura 16 - Envoltória de resistência ao cisalhamento estendida para solos não saturados.



Fonte: adaptado de Fredlund e Rahardjo (1993, p. 228).

Figura 17 - Interseção da reta no plano  $\tau \times (u_a - u_w)$ .

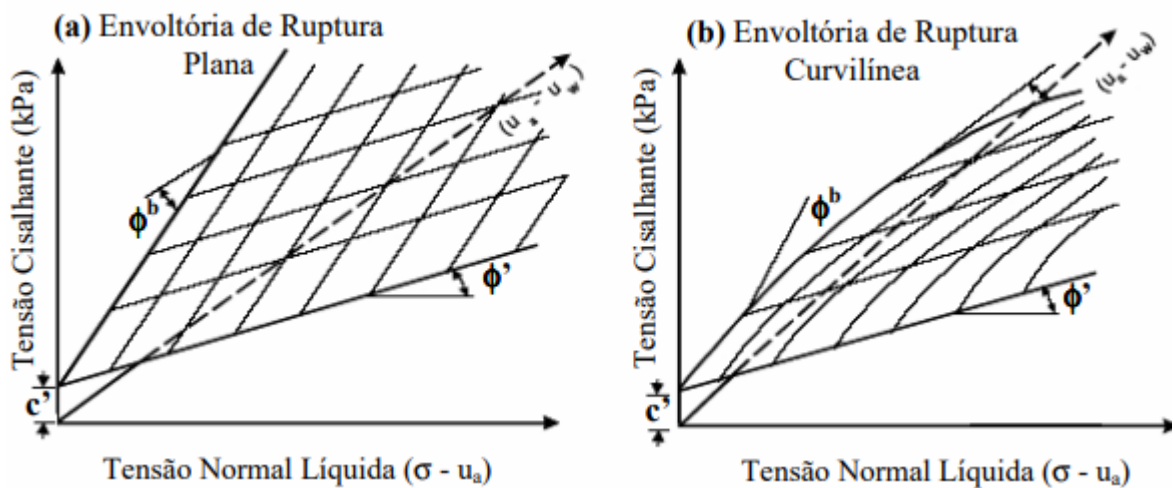


Fonte: adaptado de Fredlund e Rahardjo (1993, p. 229).

O ganho de resistência ao cisalhamento provocado pela elevação da tensão normal é caracterizado pelo ângulo de atrito  $\phi'$ , à medida que o acréscimo da resistência ao cisalhamento causado pela variação dos valores de sucção é descrito pelo ângulo  $\phi^b$ . Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), o valor de  $\phi^b$  é igual ou inferior a  $\phi'$  para diversos solos estudados no planeta.

A envoltória pode ser plana caso o ângulo  $\varphi^b$  seja constante, ou curva, no caso em que ocorra uma variação não linear de  $\varphi^b$ . Campos e Motta (2015) afirmam que devido as variações dos parâmetros  $\varphi'$  e  $\varphi^b$  que ocorrem na maioria das vezes, as envoltórias de resistência de solos não saturados devem ser representadas por uma superfície curva. Segundo Weber (2013), para descrever a resistência ao cisalhamento de solos não saturados três parâmetros são necessários,  $c'$ ,  $\varphi^b$  e  $\varphi'$ . Ainda segundo o autor, caso  $\varphi^b$  não variar com a sucção, tem-se uma envoltória de ruptura plana, no entanto, se ocorrer a variação desse ângulo, a envoltória de resistência transforma-se em uma superfície curva.

Figura 18 - Possíveis envoltórias de resistência para solos não saturados.



Fonte: Feuerharmel (2007, p. 65)



### 3. MATERIAL E METODOLOGIA

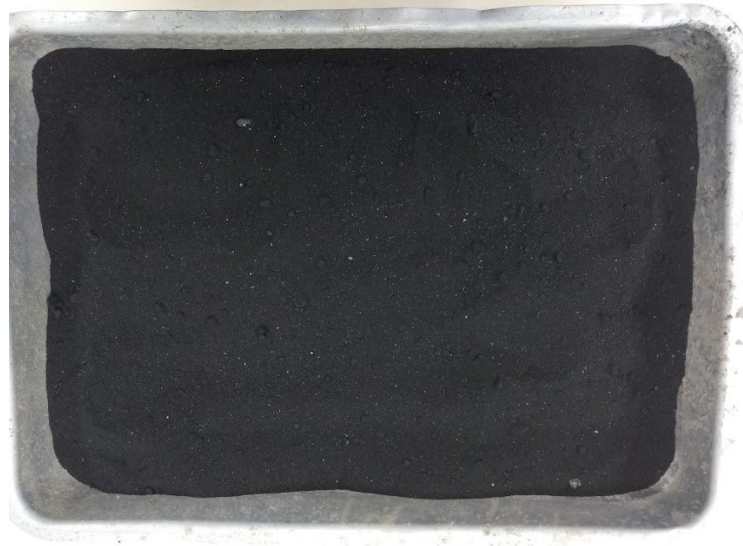
Este capítulo descreve o material e os procedimentos utilizados no desenvolvimento do trabalho durante a fase experimental da pesquisa. Por se tratar do mesmo material coletado pelo grupo de estudo e pesquisa do Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UFSC – Campus Joinville, serão apresentados ensaios e estudos realizados por Heidemann *et al* (2021) para classificação e caracterização físico-química da areia descartada de fundição. Além disso, serão descritos os parâmetros e características para o estudo do comportamento geotécnico da ADF, obtidos através do ensaio de compactação, cisalhamento direto e do método do papel-filtro.

#### 3.1. MATERIAL

Conforme apresentado no capítulo 2.1, no processo de fundição existem as areias verdes e as areias ligadas quimicamente. O material empregado na presente pesquisa consiste em uma areia verde de fundição (ADF), um subproduto proveniente de uma indústria de fundição de ferro para autopeças localizada no município de Joinville/SC.

O material foi coletado diretamente no depósito de resíduos da indústria e armazenado em uma bombona no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UFSC – Campus Joinville, com o intuito de manter suas propriedades físicas e químicas. Este material apresenta coloração escura e uma textura arenosa, com finos aderidos às partículas de areia. Segundo o relatório interno da empresa geradora do resíduo, os sólidos desta areia de fundição são compostos em massa por areia natural (90%), bentonita sódica (7%) e pó de carvão. A Figura 19 apresenta o material utilizado na pesquisa.

Figura 19 - Areia descartada de fundição (ADF).



Fonte: autor (2021).

Com o intuito descrever as características básicas da areia descartada de fundição empregada na pesquisa, serão apresentados ensaios e resultados obtidos pelo grupo de estudo e pesquisa do Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UFSC – Campus Joinville. Também serão expostos resultados de ensaios que foram realizados pela empresa fornecedora da ADF. Os resultados são importantes para realizar a classificação e a caracterização físico-química da areia descartada de fundição do ponto de vista ambiental e geotécnico.

### **3.1.1. Classificação do resíduo de areia descartada de fundição**

A fim de classificar e verificar se existe a possibilidade do ponto de vista ambiental e legal de se utilizar a areia descartada de fundição, foi fornecida pela empresa geradora de ADF a análise química do material utilizado na pesquisa.

A classificação do material é realizada por meio da comparação dos resultados de ensaios de solubilização e lixiviação cedidos pela empresa com os padrões que se encontram na norma ABNT NBR 10.004 (2004), que classifica os resíduos sólidos de acordo com seu risco potencial para o meio ambiente e a saúde pública. Os valores obtidos nos testes e os limites estabelecidos pela NBR 10.004 (2004) estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização e os respectivos valores limites.

Elementos	Ensaio de Lixiviação		Ensaio de Solubilização	
	Concentração (mg/L)	Valores limites (mg/L)	Concentração (mg/L)	Valores limites (mg/L)
<b>Alumínio</b>	-	-	154	0,2
<b>Arsênio</b>	< 0,01	0,01	< 0,01	0,01
<b>Bário</b>	1,65	70,0	1,15	0,7
<b>Cádmio</b>	< 0,001	5	< 0,001	0,005
<b>Chumbo</b>	0,043	1	0,057	0,01
<b>Cianeto</b>	-	-	< 0,05	0,07
<b>Cloreto</b>	-	-	43,9	250
<b>Cobre</b>	-	-	0,126	2,0
<b>Cromo</b>	0,068	5,0	0,13	0,05
<b>Fenóis totais</b>	-	-	0,4	0,01
<b>Ferro</b>	-	-	99,0	0,3
<b>Manganês</b>	-	-	1,05	0,1
<b>Mercúrio</b>	0,00039	0,1	0,0003	0,001
<b>Prata</b>	< 0,01	5,0	< 0,01	0,05
<b>Selênio</b>	< 0,008	-	< 0,008	0,01
<b>Sódio</b>	-	-	143,0	200
<b>Sulfato</b>	-	-	144,0	250
<b>Surfactantes</b>	-	-	< 0,1	0,5
<b>Zinco</b>	-	-	0,569	5,0

Fonte: adaptado do relatório interno da empresa fornecedora da ADF (2021).

É possível notar que as concentrações medidas no ensaio de lixiviação para os compostos avaliados são inferiores aos limites permitidos pela norma. No entanto, o ensaio de solubilização apresentou alguns compostos com concentrações superiores aos valores limites normativos, sendo eles, alumínio, ferro, índice de fenóis, chumbo, bário, cromo e magnésio. Diante desta constatação, a areia de fundição não pode ser classificada como um material inerte.

Segundo a norma ABNT NBR 10.004 (2004), como a ADF do presente estudo não apresenta características referentes à inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, o material pode ser classificado como um resíduo de Classe II – não perigoso. No entanto, por apresentar alguns compostos com concentração superior aos valores limites no ensaio de solubilização, o material acaba sendo classificado como não inerte. Em vista do exposto, a areia descartada de fundição do estudo é classificada como um resíduo Classe II A – não perigoso e não inerte.

Do ponto de vista legal, de acordo com a Lei Nº 17.479, de 15 de janeiro de 2018, do estado de Santa Catarina, mesmo sendo classificada como um material de Classe II A, a areia

descartada de fundição dessa pesquisa pode ser utilizada como material de construção para fins geotécnicos e de pavimentação.

### 3.1.2. Caracterização físico-química

Para auxiliar na compreensão do comportamento geotécnico da areia descartada de fundição utilizada na pesquisa, é necessário verificar suas propriedades físicas e químicas que influenciam no seu comportamento. A caracterização e definição das propriedades físicas e químicas serão realizadas a partir de análises feitas dos resultados de ensaios executados por Heidemann *et al* (2021).

A caracterização química foi realizada por meio da análise de espectrômetro de fluorescência de raio-X. Os principais compostos químicos da areia descartada de fundição estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química da areia descartada de fundição

<b>Composto</b>	<b>Concentração (% em massa)</b>
SiO <sub>2</sub>	91,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0
MgO	0,4
Na <sub>2</sub> O	0,3
K <sub>2</sub> O	0,3
TiO <sub>2</sub>	0,2
CaO	0,2
Perda por ignição	3,4

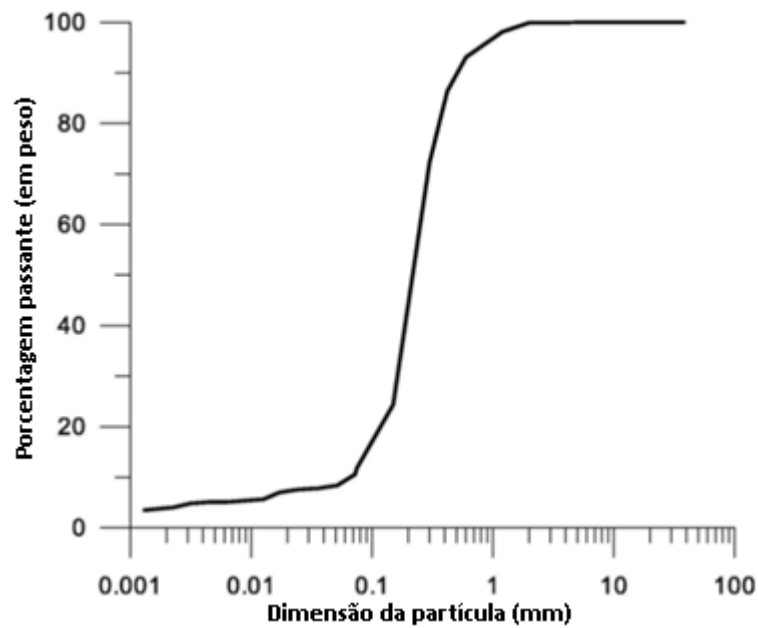
Fonte: adaptado de Heidemann *et al* (2021, p. 4).

É possível perceber que a sílica (SiO<sub>2</sub>) é o composto predominante, visto que quase 90% dos sólidos da areia descartada de fundição da pesquisa são compostos de areia de quartzo natural. A presença do óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) na composição provavelmente se deve ao fato do material possuir sobras do processo de fundição. Os outros compostos estão presentes devido à adição de bentonita e pó de carvão na mistura. A porcentagem de perda por ignição corresponde ao consumo de água e carbono durante a fundição.

Analisando a curva granulométrica e com o auxílio da ASTM D2487 (2017), que descreve um sistema de classificação de minerais e solos organo-minerais, é possível perceber a predominância de partículas do tamanho de areia (diâmetros entre 0,075mm e 4,75mm), com cerca de 88% da amostra total. Sendo que desses 88%, compreendem aproximadamente 74%

de areia fina (diâmetros entre 0,075mm e 0,425mm) e 14% de areia média (diâmetros entre 0,425mm e 2,0mm). É possível afirmar que a areia descartada de fundição é composta principalmente de areia fina, enquanto os finos (diâmetros menores que 0,075mm) compreendem 12% da amostra total. A curva granulométrica da areia descartada de fundição é apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Distribuição granulométrica da ADF.



Fonte: adaptado de Heidemann *et al* (2021, p. 4).

De acordo com Heidemann *et al* (2021), a areia descartada de fundição pode ser classificada como uniforme e mal graduada, conforme a ASTM D2487 (2017). Segundo o autor, isso revela vantagem se comparada a outras areias finas naturais, uma vez que nenhuma correção de graduação é necessária para várias aplicações na engenharia. Um resumo das propriedades geotécnicas básicas é apresentado na Tabela 3.

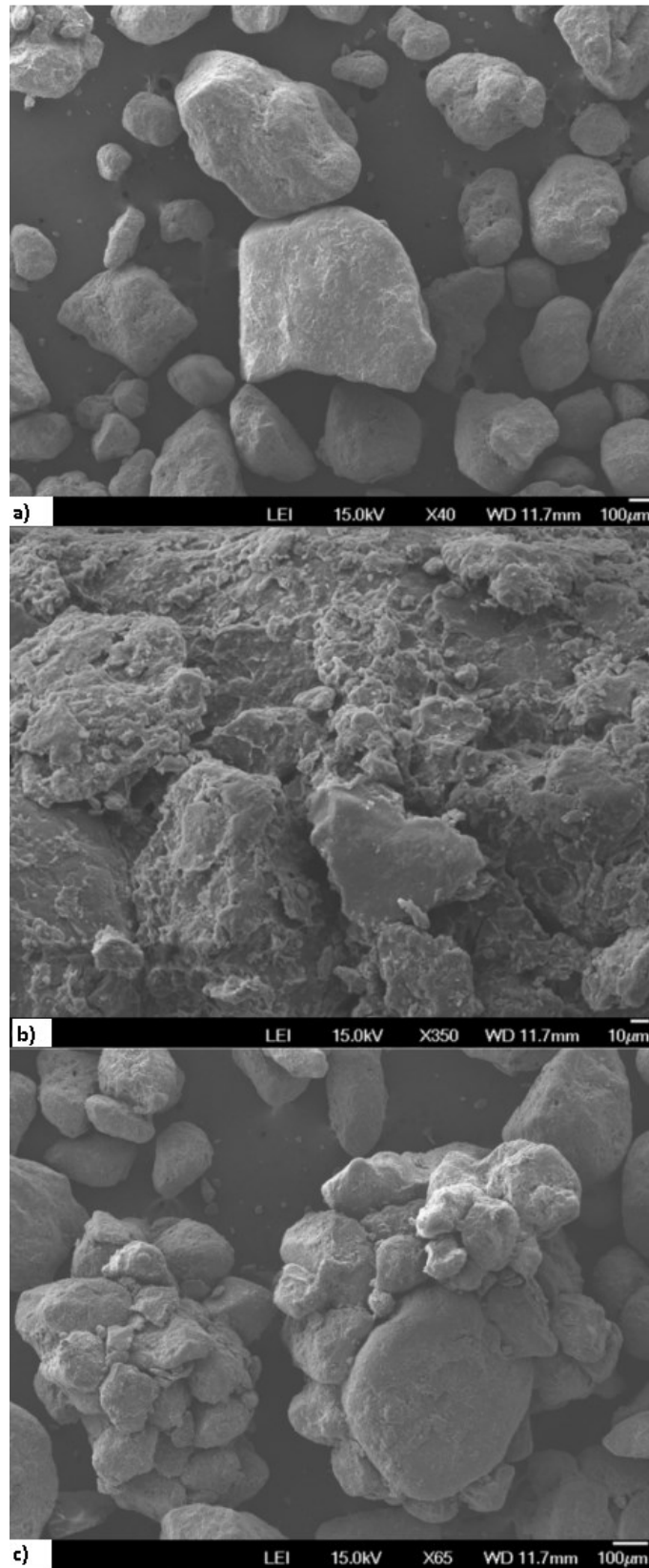
Tabela 3 - Propriedades geotécnicas básicas da ADF.

<b>Material</b>	<b>Areia descartada de fundição (ADF)</b>
Densidade real dos grãos (G)	2,61 g/cm <sup>3</sup>
Índice de plasticidade (IP)	Não plástico
Porcentagem de finos (%)	12,0
USCS	SP
d <sub>10</sub>	0,07
d <sub>30</sub>	0,17
d <sub>60</sub>	0,25
Coefficiente de não uniformidade (CU)	3,57
Coefficiente de curvatura (CU)	1,65
Índice de vazios máximo (e <sub>máx</sub> )	0,85
Índice de vazios mínimo (e <sub>mín</sub> )	0,56

Fonte: adaptado de Heidemann *et al* (2021, p. 5).

Em relação a plasticidade, a areia descartada de fundição é classificada como não plástica. Isso indica que a quantidade de bentonita adicionada na mistura não é o suficiente para fornecer plasticidade à ADF. O formato das partículas de ADF variam entre sub-angular a sub-arredondada, como mostra a Figura 21 feita através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As partículas finas estão aderidas a superfície das partículas de areia e funcionam como uma espécie de conectores, unindo grupos de grãos arenosos menores e formando aglomerados (HEIDEMANN *et al*, 2021).

Figura 21 - Imagens MEV (a) grãos de areia com aproximação de 40 vezes, (b) finos aderidos a superfície das partículas de areia com aproximação de 350 vezes e (c) aglomerados de pequenas partículas de areia com aproximação de 65 vezes.



Fonte: adaptado de Heidemann *et al* (2021, p. 5).

### 3.2. METODOLOGIA

Com o intuito de definir os parâmetros e características da areia descartada de fundição para o estudo do seu comportamento geotécnico, foram realizados os ensaios de compactação, cisalhamento direto e o método do papel filtro. Considerando o objetivo da presente pesquisa, espera-se por meio desses ensaios, avaliar a resistência ao cisalhamento não saturada do material tendo em conta a contribuição da sucção e sua correlação com a coesão aparente. Todos os procedimentos e ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville - SC.

Para o alcance dos resultados que contribuam com os objetivos da pesquisa, a campanha experimental pode ser dividida em diversas etapas. Em um primeiro momento, foi realizada a caracterização geotécnica da areia descartada de fundição através do ensaio de compactação. A próxima etapa consistiu no processo de umedecimento e secagem dos corpos de prova que foram compactados na umidade ótima utilizando-se o cilindro pequeno do ensaio de compactação Proctor. Após esse processo, aguardou-se um período de equilíbrio de no mínimo 14 dias para que ocorresse a homogeneização da umidade em todo o corpo de prova. Decorrido o tempo de equilíbrio, foram moldados os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto. De cada corpo de prova cilíndrico foram moldados dois corpos de prova retirados da primeira e da segunda camada de compactação. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com as tensões normais de 25, 50, 100 e 200 kPa. Ao mesmo tempo, foram moldados dois corpos de prova na umidade ótima em anéis de PVC para realização do método do papel-filtro. O tempo de equilíbrio adotado para esse método foi de sete dias para cada ponto da curva característica que será determinada.

Os procedimentos e métodos dos ensaios realizados na campanha experimental serão descritos nos itens subsequentes. A Tabela 4 demonstra as etapas desenvolvidas, os ensaios propostos e as respectivas normas utilizadas como referência. Os dados e resultados dos ensaios realizados serão apresentados e discutidos no capítulo 4.



Tabela 4 - Ensaios propostos e respectivas normas.

<b>Etapa</b>	<b>Material</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Caracterização geotécnica	ADF	Compactação	NBR 7182/2016
Umedecimento e secagem	ADF	-	-
Determinação da resistência ao cisalhamento	ADF	Cisalhamento direto	ASTM D3080/2011
Determinação da sucção matricial	ADF	Método do papel filtro	ASTM D5298-10/2010

Fonte: autor (2021).

### 3.2.1. Ensaio de compactação Proctor

A finalidade do ensaio de compactação Proctor é determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica seca do solo quando compactado com determinada energia, sendo possível a determinação da umidade ótima e da massa específica seca máxima. O ensaio pode ser realizado utilizando as seguintes energias de compactação: normal, intermediária ou modificada (ABNT NBR 7182, 2016).

Inicialmente, coletou-se 2500 gramas da areia descartada de fundição que estava armazenada em um tambor. Para determinar a quantidade de água que deveria ser acrescentada para o primeiro ponto da curva de compactação, foi adotado uma umidade inicial de 1,7%. Esse valor foi baseado em ensaios executados pelo Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UFSC – Campus Joinville que utilizou do mesmo material. Igualmente, foi estabelecido que a umidade ótima do material se encontra entre 11-12%. Foi determinado uma variação do teor de umidade entre os pontos da curva de compactação de 1%. Dessa maneira, definiu-se que o primeiro ponto da curva deveria possuir um teor de umidade de 9%. Com esses dados, foi possível obter a quantidade de água a ser acrescentada para o primeiro ponto da curva de compactação, conforme apresentado na Equação (6), bem como para os demais pontos, segundo a Equação (7).

$$m_{\text{água,acres}} = \left[ \left( \frac{m_t}{w_i + 1} \right) \right] \times (w_f + w_i) \quad (6)$$

Onde:

$m_{\text{água,acres}}$  = massa de água a ser acrescentada para o teor de umidade de 9%;

$m_t$  = massa total da amostra (2500g);

$w_i$  = teor de umidade inicial da amostra (1,7%);

$w_f$  = teor de umidade no qual se deseja alcançar (9%);

$$m_{1\%} = \left[ \left( \frac{m_t}{w_i + 1} \right) \right] \times 0,01 \quad (7)$$

Onde:

$m_{1\%}$  = massa de água a ser acrescentada para variar 1% do teor de umidade;

$m_t$  = massa total da amostra (2500g);

$w_i$  = teor de umidade inicial da amostra (1,7%);

Foi adicionado na amostra a quantidade de água determinada para o primeiro ponto da curva de compactação correspondente a 9% de umidade. Logo após ocorreu a homogeneização do material, adicionando água com auxílio da pisseta e homogeneizando com a pá de mão. Após a completa homogeneização, colocou-se uma certa quantidade de material dentro do cilindro, em seguida, foram aplicados os golpes com o auxílio do soquete. Foi definido que para a presente pesquisa seria empregada a energia normal de compactação, com a utilização do cilindro e do soquete pequenos. Segundo a NBR 7182/2016 e partir das definições feitas anteriormente, o número de camadas deve ser 3, sendo que em cada camada devem ser aplicados 26 golpes.

O ensaio foi realizado com reuso de material, isto significa que o material utilizado para determinar o primeiro ponto da curva de compactação foi extraído do cilindro, destorroado e utilizado novamente para os pontos seguintes, com incrementos sucessivos de água na mesma amostra, seguindo a variação de 1% no teor de umidade definido anteriormente. Para cada ponto, duas cápsulas foram retiradas para o controle e verificação do teor de umidade.

### 3.2.2. Umedecimento e secagem

Com o objetivo de analisar a contribuição da sucção para a resistência ao cisalhamento não saturada da areia descartada de fundição, algumas amostras foram umedecidas e outras secadas. Este procedimento visa reproduzir com maior fidelidade os ciclos de umedecimento e secagem que ocorrem com o material nas condições de campo, fazendo com que o solo alcance valores de sucção diferentes. Assim, é possível analisar as alterações que ocorrem no comportamento mecânico do material quando submetidos a esses ciclos, avaliando a variação da resistência ao cisalhamento não saturada.

Inicialmente, foram compactados corpos de prova sob energia normal com o uso do soquete e do cilindro pequenos de compactação. Todos os corpos de prova foram compactados na umidade ótima. Após a compactação, os corpos de prova foram extraídos e iniciou-se os

processos de umedecimento e secagem. Como o teor de umidade inicial do corpo de prova era conhecido (umidade ótima), procurou-se variar esse valor para + 2% e + 4% para o umedecimento e - 2% e - 4% para a secagem. Para o controle desta umidade, foi adotada a hipótese de que os pesos das partículas sólidas não variam, sendo que qualquer alteração que ocorresse seria devido à perda ou ganho de água.

Os corpos de prova submetidos ao umedecimento tiveram seu aumento no teor de umidade através da aplicação de água em toda sua superfície (topo e laterais) com o auxílio do borrifador. Teve-se o cuidado de adicionar a quantidade de água necessária para alcançar o teor de umidade desejado, controlando o peso da amostra em uma balança com precisão de 0,01g. Em seguida, o corpo de prova umedecido foi embrulhado em saco plástico e colocado dentro de uma caixa de PVC fechada. O corpo de prova permaneceu dentro da caixa por um período mínimo de 14 dias, para que a água adicionada fosse absorvida e ocorresse a homogeneização da umidade em todo corpo de prova. A Figura 22 apresenta um corpo de prova no processo de umedecimento.

Figura 22 - Corpo de prova no processo de umedecimento.



Fonte: autor (2021).

Devido à evaporação da água do corpo de prova ocorrer de forma mais lenta do que a adição de água, o processo de secagem foi realizado em duas etapas. No primeiro momento, os corpos de prova foram expostos ao ar em uma mesa dentro do laboratório por um período de 24 horas. Em seguida, como o corpo de prova ainda não havia alcançado o peso correspondente

ao teor de umidade desejado, utilizou-se uma estufa com temperatura variando entre 50 e 60°C. Durante esse tempo, a perda de peso e, conseqüentemente, perda de umidade era controlada utilizando-se uma balança com precisão de 0,01g. Para garantir que o corpo de prova não continuasse secando enquanto estava quente, o mesmo era retirado da estufa um pouco antes de atingir o peso determinado, com o intuito de homogeneizar a temperatura do corpo de prova com a do ambiente.

Assim como no umedecimento, após alcançado o peso determinado, o corpo de prova foi embrulhado em saco plástico e disposto na caixa de PVC por um período mínimo de 14 dias, com o intuito de homogeneizar o teor de umidade obtido em todo corpo de prova. A Figura 23 apresenta um corpo de prova no processo de secagem e a Figura 24 apresenta um exemplo de corpo de prova ensacado e acondicionado na caixa de PVC.

Figura 23 - Corpo de prova no processo de secagem.



Fonte: autor (2021).

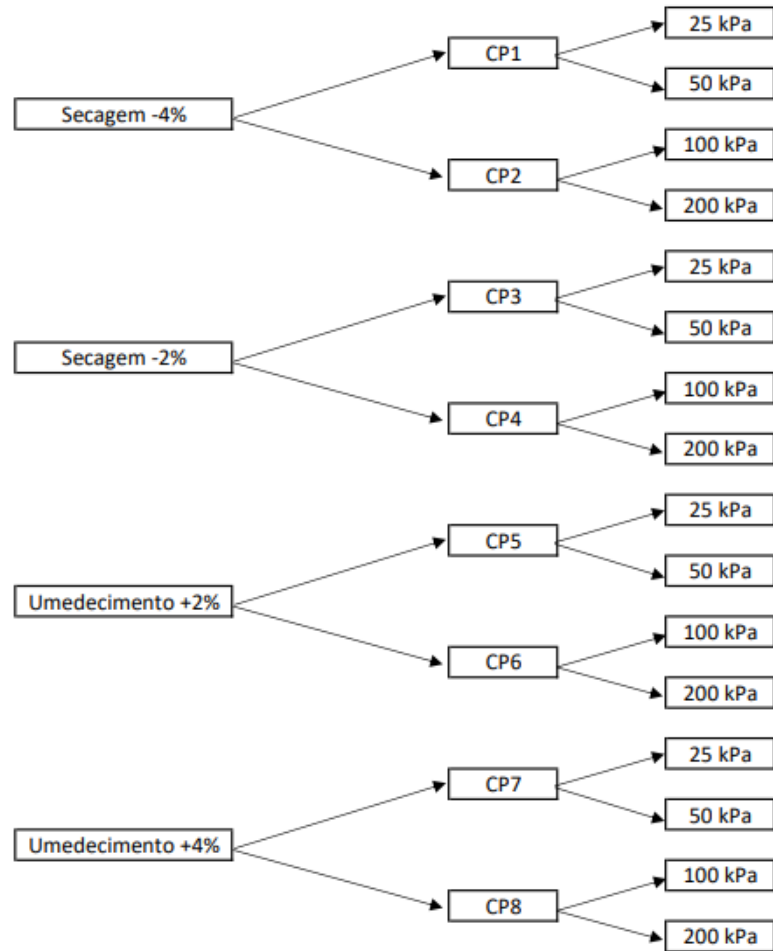
Figura 24 - (a) corpo de prova embrulhado e (b) corpos de prova dispostos na caixa de PVC.



Fonte: autor (2021).

Para cada condição de umedecimento e secagem (+ 2%, +4 %, - 2% e - 4%) foram moldados dois corpos de prova. Sendo que de cada corpo de prova, após o tempo de equilíbrio mínimo de 14 dias, foram moldados dois corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto. Ao todo, foram realizados os processos de umedecimento e secagem em oito corpos de prova. A Figura 25 apresenta um fluxograma referente ao procedimento de umedecimento e secagem.

Figura 25 - Fluxograma dos processos de umedecimento e secagem.



Fonte: autor (2021).

### 3.2.3. Ensaio de resistência ao cisalhamento

O ensaio de cisalhamento direto foi executado conforme as diretrizes da norma ASTM D3080/2011. Foi utilizado um equipamento de cisalhamento direto que contém um sistema automatizado e permite a realização de ensaios com aplicação de uma carga normal e velocidade de deslocamento constante, conforme apresenta a Figura 26.

Figura 26 - Equipamento de cisalhamento direto.

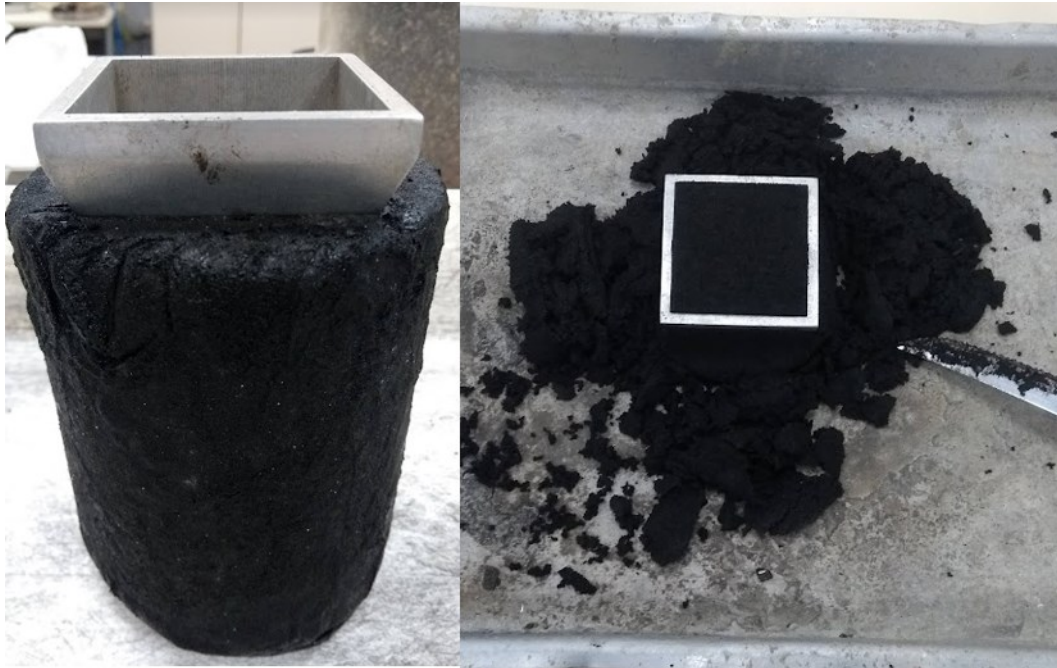


Fonte: autor (2021).

Os corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento direto foram moldados a partir das amostras compactadas no cilindro Proctor e que passaram pelo processo de umedecimento e secagem descritos no item 3.2.2. Portanto, foram realizados ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova com teores de umidade + 2%, + 4%, - 2% e - 4% em relação à umidade ótima. Além disso, foram realizados ensaios na umidade ótima, sendo este a referência para os demais.

Após o tempo de equilíbrio mínimo de 14 dias, os corpos de prova ensacados que estavam acondicionados na caixa de PVC foram retirados. Em seguida, com o auxílio do anel metálico biselado de 6,0 cm de lado e uma faca, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova quadrados com dimensões 6,0 x 6,0 x 2,0 cm. De cada corpo de prova cilíndrico foram extraídos da primeira e da segunda camada de compactação dois corpos de prova quadrados. Durante a moldagem, foram retiradas duas cápsulas para determinação do teor de umidade, de forma a verificar se foram atingidas as condições para realização do ensaio. Com o término da moldagem, pesou-se o corpo de prova para um controle mais rigoroso dos índices físicos, permitindo verificar diferenças e semelhanças entre todos os corpos de prova. A Figura 27 apresenta o processo de obtenção dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto.

Figura 27 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: autor (2021).

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados logo após a moldagem dos corpos de prova. Primeiramente foi realizada a etapa de adensamento. Nessa fase, o corpo de prova foi colocado na célula de cisalhamento e disposto no equipamento. Vale ressaltar que para não ocorrer perda de umidade, as pedras porosas que são posicionadas acima e abaixo do corpo de prova na caixa de cisalhamento foram envoltas por plástico filme de PVC. Como o objetivo do trabalho é avaliar a resistência não saturada da areia descartada de fundição, nessa fase a caixa de cisalhamento não foi inundada com água. Isso permite avaliar os efeitos da sucção nos parâmetros de resistência da amostra. Os corpos de prova com o mesmo teor de umidade foram submetidos a tensões normais de 25, 50, 100 e 200kPa. O término da etapa de adensamento foi determinado a partir do fim da variação nas deformações verticais medidas pelo equipamento.

Com o término da fase de adensamento, o corpo de prova foi submetido ao ensaio de cisalhamento direto. Uma velocidade de cisalhamento de 0,2 mm/min foi estipulada com base em ensaios anteriores realizados com uma velocidade menor. Percebeu-se que não houve diferença significativa nos parâmetros de resistência medidos em ambas as velocidades. Em seguida, deu-se início ao cisalhamento do corpo de prova a partir do avanço da parte superior da caixa de cisalhamento. O avanço máximo foi definido como sendo de 8mm, cerca de 13% da dimensão do corpo de prova. As leituras de resistência ao cisalhamento foram efetuadas pelo equipamento. Com o término do ensaio, os dados gerados foram retirados da máquina e



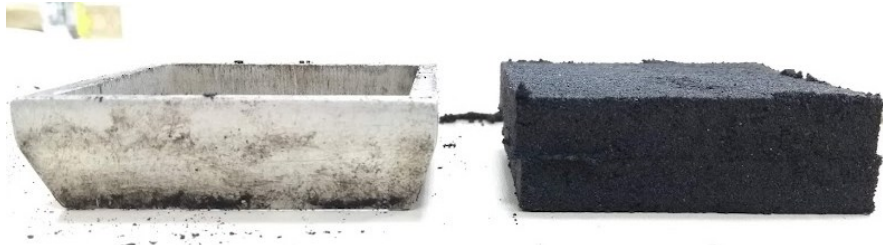
convertidos em uma planilha de Excel. A Figura 28 e a Figura 29 apresentam respectivamente a célula de cisalhamento aberta com o corpo de prova após o ensaio e a superfície de cisalhamento no corpo de prova.

Figura 28 - Caixa de cisalhamento aberta após ensaio.



Fonte: autor (2021).

Figura 29 - Superfície de cisalhamento no corpo de prova



Fonte: autor (2021).

### 3.2.4. Método do papel-filtro

O método do papel filtro foi a técnica definida para determinar a curva característica da areia descartada de fundição do presente estudo. A curva característica permite a visualização da variação da sucção matricial com os diferentes teores de umidade que o material pode apresentar. Dispondo dos valores de sucção matricial, é possível correlacionar os níveis de coesão aparente atingidos no ensaio de cisalhamento direto com os níveis de sucção descritos pela curva característica da areia descartada de fundição.

Esse método consiste colocar em contato direto um pedaço de papel filtro com amostra de solo até que ocorra o equilíbrio da sucção matricial entre a amostra e o papel. O valor da sucção é determinado a partir da curva de calibração do papel filtro, baseado no teor de umidade do papel após o tempo de equilíbrio. O papel filtro utilizado foi o Whatman nº 42 e as equações da curva de calibração adotadas estão propostas na norma internacional ASTM D5298-10/2010 e foram apresentadas no item 2.3.2.1

Vale ressaltar que apesar de ser um método simples, esse método é extremamente delicado e certas precauções devem ser tomadas durante a execução da técnica para que não ocorra erro nas medições dos valores de sucção. Desse modo, foi adotado um procedimento similar ao apresentado por Feuerharmel (2007), além de seguir as orientações da norma ASTM D5298-10/2010.

Primeiramente, foi compactado um corpo de prova na umidade ótima no cilindro de compactação Proctor em energia normal. Após a compactação, o solo foi removido de dentro do cilindro com o auxílio do extrator. Em seguida foram extraídas da primeira e da segunda camada de compactação duas amostras para o método do papel filtro. Essas amostras foram moldadas com o auxílio de um anel de PVC. Após a moldagem, os dois corpos de prova foram pesados e duas cápsulas foram retiradas para determinação do teor de umidade.

Com as duas amostras moldadas no mesmo teor de umidade, dois pedaços de papel filtro com tamanhos diferentes foram colocados na parte superior de cada amostra. O primeiro pedaço maior de papel, denominado “papel de sacrifício”, tinha objetivo de evitar que qualquer partícula da amostra ficasse aderida no papel menor, pois isso poderia alterar o peso e influenciar na medição da sucção. O segundo pedaço menor de papel foi colocado em cima do primeiro, sendo esse de fato utilizado para a determinação da umidade. O papel filtro foi utilizado diretamente da caixa e durante todo ensaio foi manuseado com o auxílio de uma pinça metálica. Em seguida, as amostras foram envoltas por duas camadas de plástico filme de PVC e uma camada de papel alumínio. Após embrulhadas, as amostras foram colocadas dentro de uma caixa de isopor fechada até que o equilíbrio de sucção fosse alcançado. Esses cuidados visavam garantir que o fluxo ocorresse somente entre a amostra e o papel filtro, sem influência do ambiente externo. A norma ASTM D5298-10/2010 recomenda um tempo de equilíbrio de 7 dias para todos os níveis de sucção. A Figura 30 apresenta o procedimento descrito anteriormente.

Figura 30 - Etapas do método do papel filtro.



Fonte: autor (2021).

Decorrido o tempo de equilíbrio de 7 dias, as amostras foram retiradas da caixa de isopor e desembrulhadas. Cada papel filtro foi rapidamente removido da amostra e colocado dentro de uma cápsula de vidro com tampa. O peso do papel filtro úmido foi determinado com o auxílio de uma balança com precisão de 0,0001g. Após a determinação do peso úmido, as cápsulas de vidro sem a tampa e com papel filtro dentro foram colocadas em um recipiente e levadas para uma estufa a 100°C durante 24 horas. Depois da secagem, as cápsulas foram retiradas da estufa e rapidamente as tampas foram recolocadas. Por aproximadamente 25 minutos, as cápsulas de vidro fechadas permaneceram em um dessecador, com o intuito de diminuir a temperatura e não influenciar na pesagem das cápsulas. Transcorrido o tempo, foi determinado o peso seco de cada papel filtro. A partir desses dados foi calculado o teor de umidade final do papel filtro, sendo uma média dos valores de umidade obtidos de cada uma

das amostras. Durante todo processo de pesagem, foram utilizadas luvas de látex (sem talco) para manusear as cápsulas e uma pinça metálica para manejar o papel filtro. A Figura 31 apresenta o processo de pesagem e determinação da umidade do papel filtro.

Figura 31 - Pesagem e determinação da umidade do papel filtro.



Fonte: autor (2021).

Com o teor de umidade determinado e a equação da curva de calibração escolhida, a sucção do papel filtro considerada igual à da amostra foi definida. O teor de umidade da amostra e sua respectiva sucção correspondem apenas um ponto da curva característica. Para o presente estudo, optou-se por apresentar a curva característica da ADF em função da sucção matricial e do grau de saturação. Dessa forma, os próximos pontos da curva foram definidos controlando-se o peso da amostra em uma balança com precisão de 0,01g. Foi considerado que a variação de peso ocorre apenas por evaporação da água, uma vez que não ocorre perda de material durante o processo. Como o primeiro ponto medido apresentou um grau de saturação elevado (em torno de 80%), definiu-se que os próximos pontos seriam secados, variando o grau de

saturação sempre em 10% do anterior até chegar em 20% de saturação. Durante a secagem, as amostras eram levadas para uma estufa com temperatura variando de 45 a 60° C. Quando as amostras alcançavam o peso correspondente, todo procedimento descrito anteriormente era repetido. Para cada ponto medido, buscou-se deixar as amostras sempre com o mesmo grau de saturação. Ao todo, foram determinados oito pontos da curva característica para, posteriormente, representá-la através da equação de ajuste.

### **3.2.5. Análise de estabilidade e modelagem da equação de resistência ao cisalhamento não saturada**

Esse item tem por objetivo apresentar de maneira breve os softwares e como foram realizadas as análises de estabilidade e a modelagem da equação proposta para a resistência ao cisalhamento não saturada da ADF.

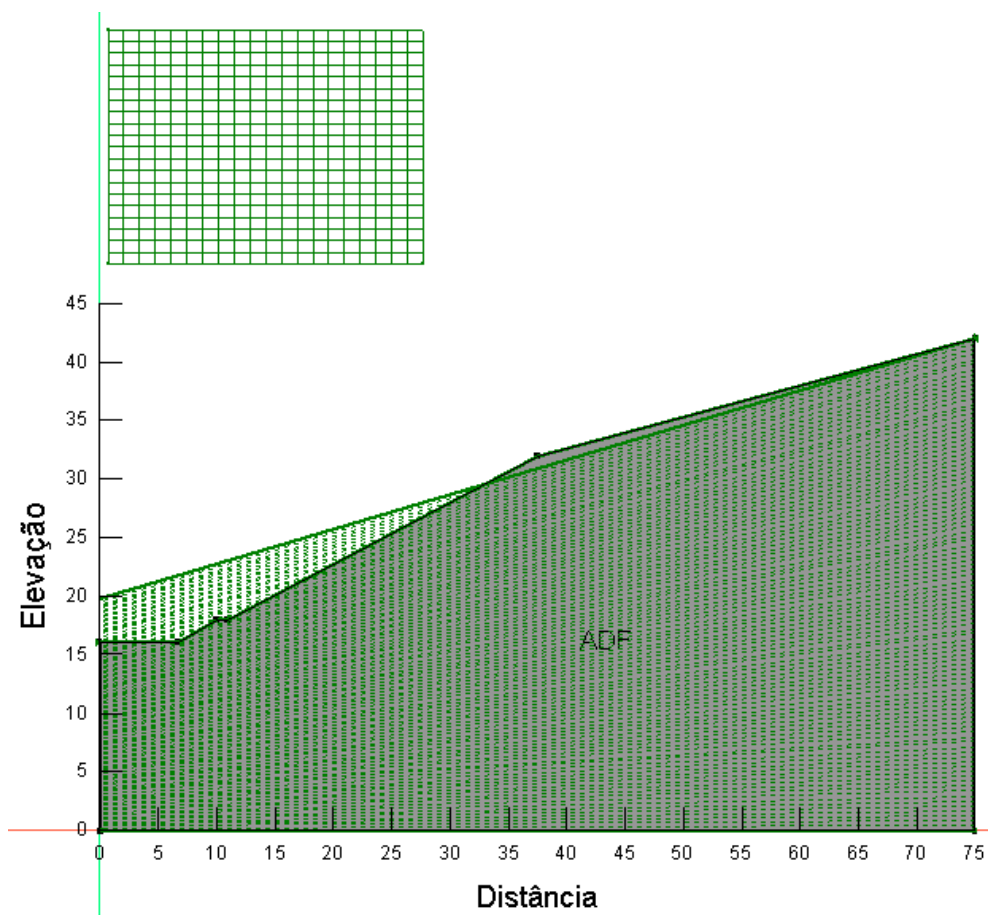
Para análise de estabilidade do aterro de ADF compactado foram utilizados os softwares Google Earth e o Geostudio 2021. Com o Google Earth foi possível obter o perfil de elevação de um aterro real e determinar as suas dimensões, assim como a inclinação do talude. Com as dimensões definidas, foi possível modelar o aterro no Geostudio, afim de se obter o modelo geomecânico na qual serão realizadas as análises de estabilidade.

O Geostudio é um software que possui diversos módulos que auxiliam na análise de diversos problemas da engenharia como, estabilidade e percolação de barragens, recalques, análise de estabilidade, entre outros. O módulo utilizado para análise de estabilidade no presente estudo foi o Slope/W, o qual é fundamentado em análises de equilíbrio limite e suas formulações estão baseadas no método das fatias. O método de análise de estabilidade utilizado foi o método das fatias proposto por Bishop (1955), conhecido como Bishop simplificado. Esse método sugere avaliar o cálculo de forças em cada fatia nas direções vertical e horizontal e o equilíbrio de momentos de todas as fatias.

Ao total foram realizadas seis análises, considerando as condições de umidade ótima, secagem 4%, secagem -2%, umedecimento +2% e umedecimento +4% e condição crítica (sem coesão). Os dados de entrada relativos ao material e suas características geotécnicas foram obtidos através das envoltórias de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito interno). Para os dados de entrada da análise, foi definido que o nível de água abaixo do nível da base do aterro. Dessa forma não ocorrerá a geração de poropressões positivas, apenas o desenvolvimento de poropressões negativas. A ideia é analisar o desenvolvimento e a influência da sucção do material na estabilidade do aterro. Além disso, a obtenção da superfície de

pesquisa será realizada com a ferramenta de grade e raios. Na grade de pesquisa foram definidos 20 incrementos na direção X e 20 incrementos na direção Y, resultando em 400 prováveis centro de círculo para a superfície de ruptura. Os raios das superfícies de ruptura foram definidos para toda a dimensão do talude. A Figura 32 apresenta a grade e os raios definidos para a análise de estabilidade do aterro na condição da umidade ótima. Vale ressaltar que a mesa configuração foi utilizada para as demais análises.

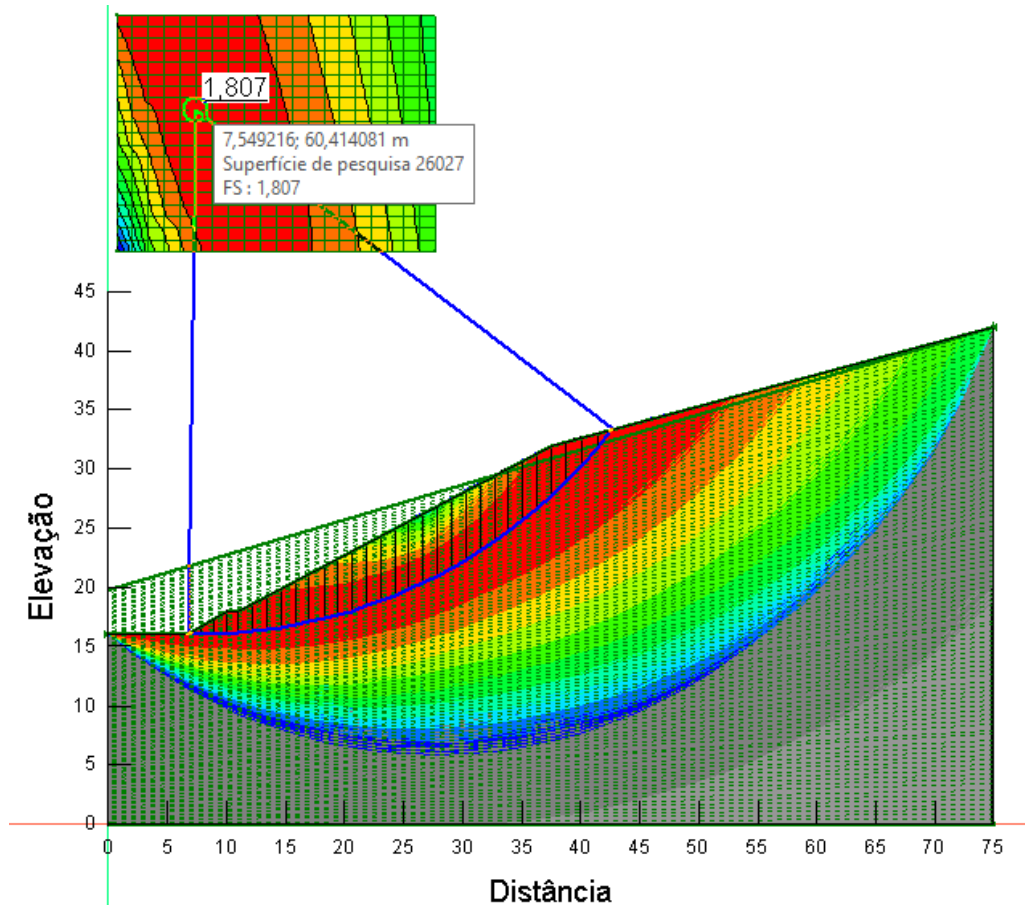
Figura 32 – Grades e raios para a análise de estabilidade do aterro executado com ADF na condição de umidade ótima.



Fonte: autor (2022).

Com o modelo geomecânico e o método de análise definido, foi possível gerar as prováveis superfícies de ruptura e obter o menor fator de segurança em função da superfície de ruptura crítica. A demonstra um exemplo da análise realizada para a condição na umidade ótima. Vale ressaltar que todas as análises e os resultados serão apresentados e discutidos com mais clareza e transparência no item 4.4.

Figura 33 – Análise realizada para a condição na umidade ótima.



Fonte: autor (2022).

Com base na equação de resistência ao cisalhamento não saturada de Fredlund *et al* (1978), foi proposto um modelo de equação para descrever a resistência ao cisalhamento da ADF. Buscou-se relacionar e determinar as variáveis tensão cisalhante, tensão normal líquida e sucção matricial para depois estabelecer uma envoltória de resistência em um plano 3D com base na equação proposta. O software utilizado para propor a equação foi o R.O software R é gratuito, exige a lógica de programação e o usuário pode criar seu próprio programa. Além disso, possui um conjunto de pacotes que auxiliam em assuntos relacionados à estatística, como a manipulação, avaliação e interpretação de dados. O código usado para rodar a análise no software foi a função “lm”, que consiste em ajustar uma base de dados em modelos lineares através da regressão múltipla.

De acordo com Amaral, Silva e Reis (2009) a regressão é utilizada para investigar a relação existente entre as variáveis através da construção de uma equação (modelo). Ainda segundo os autores, a regressão pode ser utilizada com vários objetivos, dentre eles: descrever a relação entre variáveis para entender um processo; prever o valor de uma variável a partir do

conhecimento dos valores das outras variáveis; substituir a medição de uma variável pela observação dos valores de outras variáveis; controlar os valores de uma variável em uma faixa de interesse.

Dessa forma, os dados de entrada para a construção do modelo foram as tensões normais e cisalhante obtidas do ensaio de cisalhamento direto e os valores de sucção provenientes da curva característica. Com o código, buscou-se relacionar a sucção e as tensões normais e cisalhantes para obter as variáveis do intercepto coesivo ( $c'$ ),  $\tan\phi'$  e  $\tan\phi_b$ . A boa relação estatística entre as variáveis do modelo de equação pode ser analisada através do valor  $p$ , o qual indica se existe relação entre as variáveis analisadas. Quanto menor e mais próximo de zero o valor  $p$ , melhor será a relação estatística. A maneira como o código foi argumentado no software R e o respectivo resultado das variáveis serão apresentados no item 4.3.2.



## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

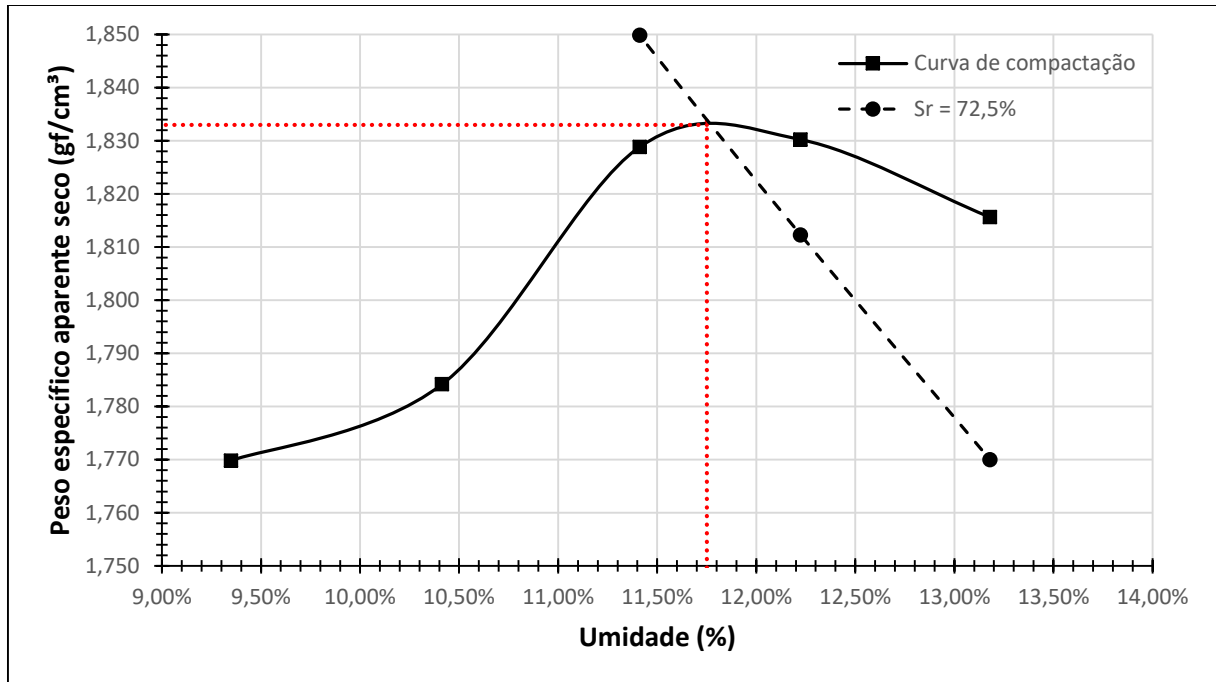
Este capítulo tem por objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos dos ensaios de compactação Proctor, método do papel filtro e cisalhamento direto. Com os ensaios executados, obtiveram-se dados para avaliar o comportamento geotécnico da ADF em condição não saturada. Além disso, serão apresentadas as análises de estabilidade para um aterro de ADF com base nos parâmetros definidos nos ensaios anteriores.

### 4.1. Ensaio de compactação Proctor

O ensaio de compactação seguiu os procedimentos especificados no item 3.2.1. Ao todo, foram realizados seis ensaios de compactação. Com base nos dados obtidos e nos cálculos realizados, é possível traçar a curva de compactação em função do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e da umidade ( $w$ ). A ABNT NBR 7182/2016 aconselha a realizar o ensaio até obter cinco pontos, sendo dois no ramo seco, um próximo a umidade ótima e dois no ramo úmido. No entanto, para traçar a curva de compactação foram utilizados seis pontos, pois houve dois pontos muito próximos ao que se considerava ser a umidade ótima. Logo, o sexto ponto foi compactado para confirmar a queda do peso específico aparente seco.

A areia descartada de fundição compactada sob energia normal apresentou um peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) de aproximadamente 1,833 gf/cm<sup>3</sup> e uma umidade ótima de 11,75%. A Figura 34 apresenta a curva de compactação e a curva de saturação utilizando o peso específico real dos grãos de 2,61 gf/cm<sup>3</sup> conforme apresentado no item 3.1.2.

Figura 34 - Curva de compactação sob energia normal.



Fonte: autor (2021).

#### 4.2. Curva característica

Para obtenção da curva característica foi utilizado a técnica do papel-filtro. O método seguiu os procedimentos descritos no item 3.2.4 e as orientações da norma ASTM D5298-10/2010. Segundo Feuerharmel (2007), a quantidade de água nos vazios do solo pode ser representada pelo teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) ou pelo grau de saturação. No presente trabalho, a curva característica da ADF será expressa pela sucção *versus* grau de saturação.

Na primeira parte, serão apresentados os dados obtidos diretamente do método, como, a umidade final do papel filtro e o respectivo valor da sucção. Na segunda parte, será apresentada a curva característica modelada através da equação de ajuste proposta com base nos pontos obtidos pelo método.

##### 4.2.1. Obtenção dos valores de sucção matricial

Conforme os procedimentos apresentados no item 3.2.4, foram determinados oito pontos para modelagem da curva característica da ADF. Esses pontos consistem em pares de grau de saturação e sucção. A magnitude da sucção foi determinada através de duas equações

da curva de calibração do papel filtro Whatman N°42 presente na norma internacional ASTM D5298-10/2010. Essas equações variam em função do teor de umidade final em que se encontra o papel filtro. Vale ressaltar que a umidade final é a média das umidades de dois papéis filtros retirados das duas amostras que estavam sempre no mesmo grau de saturação. As duas equações estão descritas a seguir.

$$\log\psi = 5,327 - 0,0779w_f; \text{ para } w_f \leq 45,3\% \quad (8)$$

$$\log\psi = 2,412 - 0,0135w_f; \text{ para } w_f \geq 45,3\% \quad (9)$$

Onde:

$\psi$  = sucção matricial (kPa);

$w_f$  = umidade final do papel filtro (%);

A primeira medida feita pelo método consistiu em uma diferença no grau de saturação entre as amostras. Os anéis foram extraídos do mesmo corpo de prova (que foi compactado na umidade ótima sob energia normal), porém houve diferença de peso entre eles, resultando em graus de saturações diferentes. O anel 1 apresentou um grau de saturação de 81,320% e o anel 2 apresentou um grau de saturação de 76,811%. Portanto, para os dois primeiros pontos da curva característica, optou-se por usar os valores de umidade correspondente a cada um dos dois graus de saturação, e não a média das duas amostras. Para o ponto seguinte, as amostras foram levadas a um grau de saturação de 70%. Como as duas amostras estavam no mesmo grau de saturação, a sucção foi determinada em função da média das umidades do papel filtro de cada uma das amostras. O mesmo procedimento foi realizado para os demais pontos, secando as amostras e variando o grau de saturação em 10% do ponto anterior até chegar em 20% de saturação. A Tabela 5 apresenta o grau de saturação, a umidade em que se encontra o papel filtro e o respectivo valor de sucção matricial.

Tabela 5 - Valores de sucção matricial obtidos através do método do papel filtro.

<b>Grau de saturação Sr (%)</b>	<b>Umidade do papel filtro do anel 1 w (%)</b>	<b>Umidade do papel filtro do anel 2 w (%)</b>	<b>Umidade final do papel filtro <math>w_f</math> (%)</b>	<b>Sucção matricial <math>\psi</math> (kPa)</b>
81,320	53,5714	-	53,5714	48,841
76,811	-	47,6923	47,6923	58,635
70	39,2157	38,6364	38,9260	197,089
60	16,3934	17,6471	17,0203	10025,879
50	5,5556	5,6604	5,6080	77649,634
40	11,4754	8,6207	10,0480	35015,225
30	4,0816	2,2727	3,1772	120087,466
20	1,9608	3,2787	2,6197	132715,771

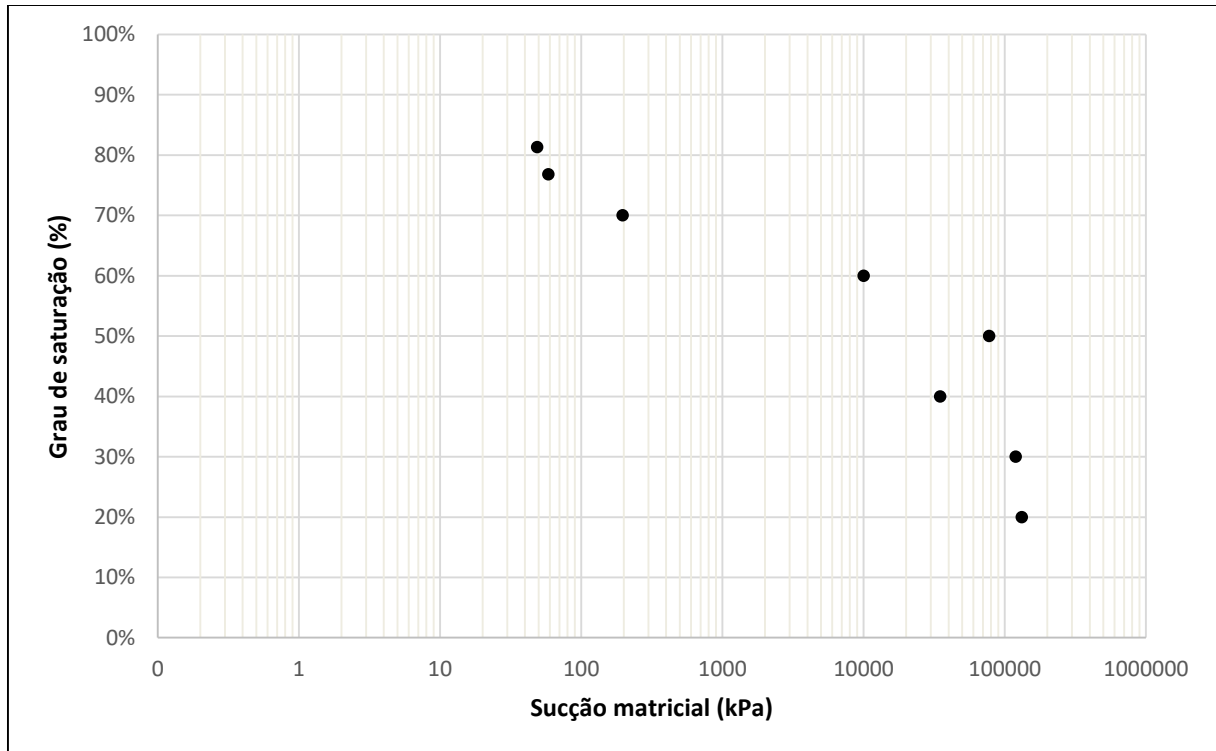
Fonte: autor (2022).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5, pode-se perceber que conforme o grau de saturação decresce, a umidade final do papel filtro medida no ensaio também diminui. Além disso, é possível perceber que a magnitude da sucção está diretamente relacionada com a quantidade de água presente na amostra de ADF, ou seja, a sucção aumenta conforme o grau de saturação diminui.

No entanto, verifica-se uma certa incoerência para o ponto de grau de saturação de 50%, no qual não apresentou a tendência descrita anteriormente. Nesse caso, deve ter ocorrido algum erro de operação durante o ensaio. De acordo com Marinho, Soto e Gitirana (2015), a simplicidade do método, muitas vezes, pode levar à falta de cuidado na aplicação da técnica e ocasionar erros na medição que são frutos de erros de operação. Ainda segundo os autores, a qualidade dos resultados depende da aplicação rigorosa da metodologia pelo usuário.

Com os dados apresentados na tabela anterior, é possível plotar os valores em um gráfico que expressa a sucção (escala logarítmica) em função do grau de saturação (%), como é mostrado na Figura 35

Figura 35 - Valores de sucção obtidos no método do papel filtro plotados no gráfico.



Fonte: autor (2022).

A partir desses valores é possível determinar a melhor equação de ajuste para a modelagem da curva característica. Essa etapa será apresentada no item a seguir.

#### 4.2.2. Obtenção da curva característica da ADF através da equação de ajuste proposta

A partir dos dados apresentados na Figura 35, determinou-se uma equação de ajuste para a curva característica da ADF. O modelo de Van Genuchten (1980) foi escolhido para ajustar os dados experimentais, expressos em termos do grau de saturação e da sucção. A equação proposta pelo modelo é descrita a seguir

$$S = \left[ \frac{1}{1 + (a\psi)^n} \right]^m \quad (10)$$

Onde:

S = grau de saturação (%);

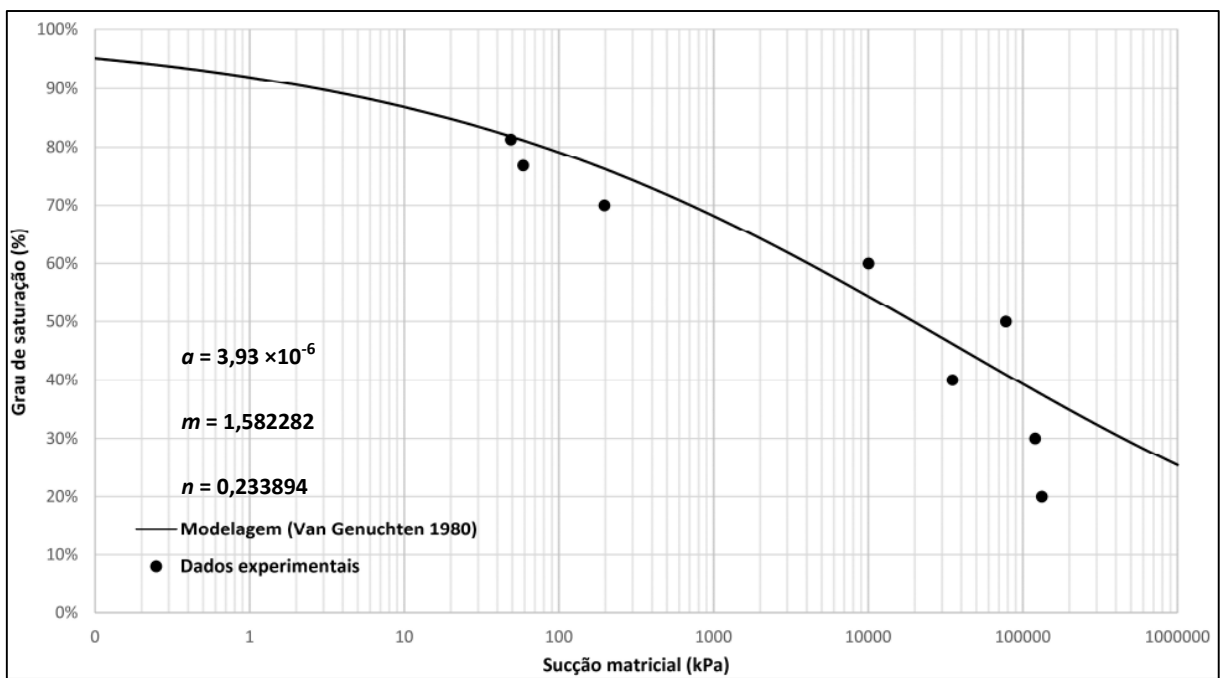
$\psi$  = sucção matricial medida obtida no método do papel filtro (kPa);

a, n, m = parâmetros de ajuste.

Com o auxílio do software Excel e os dados de entrada (sucção e grau de saturação) necessários para o modelo, o melhor ajuste foi obtido por regressão não linear. Nesse caso, os parâmetros de ajuste ( $a$ ,  $n$  e  $m$ ) foram determinados a partir da ferramenta SOLVE. Buscou-se minimizar o valor residual ao quadrado da Equação (10) através de iterações dos parâmetros ( $a$ ,  $m$  e  $n$ ). O valor do residual ao quadrado é a soma das diferenças quadradas entre os dados experimentais e os pontos ajustados através do modelo proposto. Após as iterações, o residual ao quadrado atingiu o valor de 0,0354, e os valores de  $3,93 \times 10^{-6}$ , 1,582282 e 0,233894 são referentes aos parâmetros  $a$ ,  $m$  e  $n$ , respectivamente.

A Figura 36 apresenta as sucções matriciais medidas através do método do papel filtro e a curva característica ajustada de acordo com a equação do modelo proposto por Van Genuchten (1980).

Figura 36 - Curva característica da ADF.



Fonte: autor (2022).

É possível perceber que os pontos do valor de entrada de ar, do grau de saturação e sucção residual não estão muito bem definidos. No entanto, mesmo assim é possível ajustar os dados em uma curva característica unimodal, apresentando um único trecho de dessaturação. Verifica-se que a curvatura não é tão acentuada se comparada com as curvas características típicas de solos arenosos apresentadas por Gerscovich e Sayão (2002). Nas curvas demonstradas pelos autores, percebe-se que os solos arenosos apresentam uma perda acentuada

de água para valores de sucção mais baixos, além de apresentarem os pontos do valor de entrada de ar, do grau de saturação e sucção residual bem definidos. A curva característica definida não apresenta esse comportamento, exibindo uma inclinação mais suave. Por se tratar de um material que não é composto totalmente de partículas do tamanho de areia e apresentar uma porcentagem de 12% de finos, a curva característica ajustada apresenta uma curvatura mais suave em razão da influência dos finos (bentonita) presentes no material. Dessa forma, é possível deduzir que os valores de sucções na ADF são mais sensíveis a mudanças no grau de saturação.

Níveis de sucção entre 50 e 60 kPa foram medidos para os corpos de prova que estavam na umidade ótima (saturação próximo a 80%). Percebe-se que, ao variar o grau de saturação de 70% para 60%, houve um aumento considerável da sucção, indicando a sensibilidade do material frente às mudanças no grau de saturação. Sob grau de saturação abaixo de 40%, os níveis de sucção atingiram valores superiores a 100000kPa. Para os valores entre 30 a 20%, não houve uma grande variação nos valores de sucção. Isso indica o fato de que a água ainda presente na ADF se encontra aderida a matriz de solo, fazendo com que sejam necessários elevados valores de sucção para removê-la. A partir do ponto de 30% de grau de saturação a ADF estava praticamente seca, havendo pouca variação dos valores de sucção entre si.

Nota-se que devido à sensibilidade do material às variações de umidade, para menores graus de saturação os dados experimentais de sucção ficaram dispersos em relação à curva ajustada. No entanto, para baixas sucções, a modelagem da curva conseguiu abranger bem os dados experimentais. Desse modo, é possível retirar do início e da faixa intermediária da curva, valores de sucções razoavelmente favoráveis para análise da resistência ao cisalhamento não saturada. As amostras submetidas aos ensaios de cisalhamento direto tiveram grau de saturação variando entre 35%-78%. Sendo assim, para os valores de grau de saturação mais altos e intermediários é possível retirar da curva característica valores de sucções coerentes. No entanto, para a faixa de grau de saturação mais baixa os valores de sucção podem indicar uma menor coerência.

#### 4.3. Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento da ADF foi avaliada através de ensaios de cisalhamento direto convencionais na condição não saturada, seguindo os procedimentos apresentados no item 3.2.3. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras na umidade ótima e

em amostras com teores de umidade + 2%, + 4%, - 2% e - 4% em relação a umidade ótima. Esses ensaios foram realizados para tensões normais líquidas de 25, 50, 100 e 200kPa.

Por se tratar de ensaios realizados em amostras com uma pequena variação de umidade entre si, em cada condição de ensaio buscou-se manter um controle rigoroso dos índices físicos. Dessa forma, é possível verificar diferenças e semelhanças entre as amostras que podem interferir na definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Esses parâmetros estão relacionados, principalmente, com a sucção desenvolvida nos diferentes graus de saturação que as amostras foram submetidas. A Tabela 6 apresenta informações dos corpos de prova submetidos aos ensaios.

Tabela 6 - Índices físicos das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto.

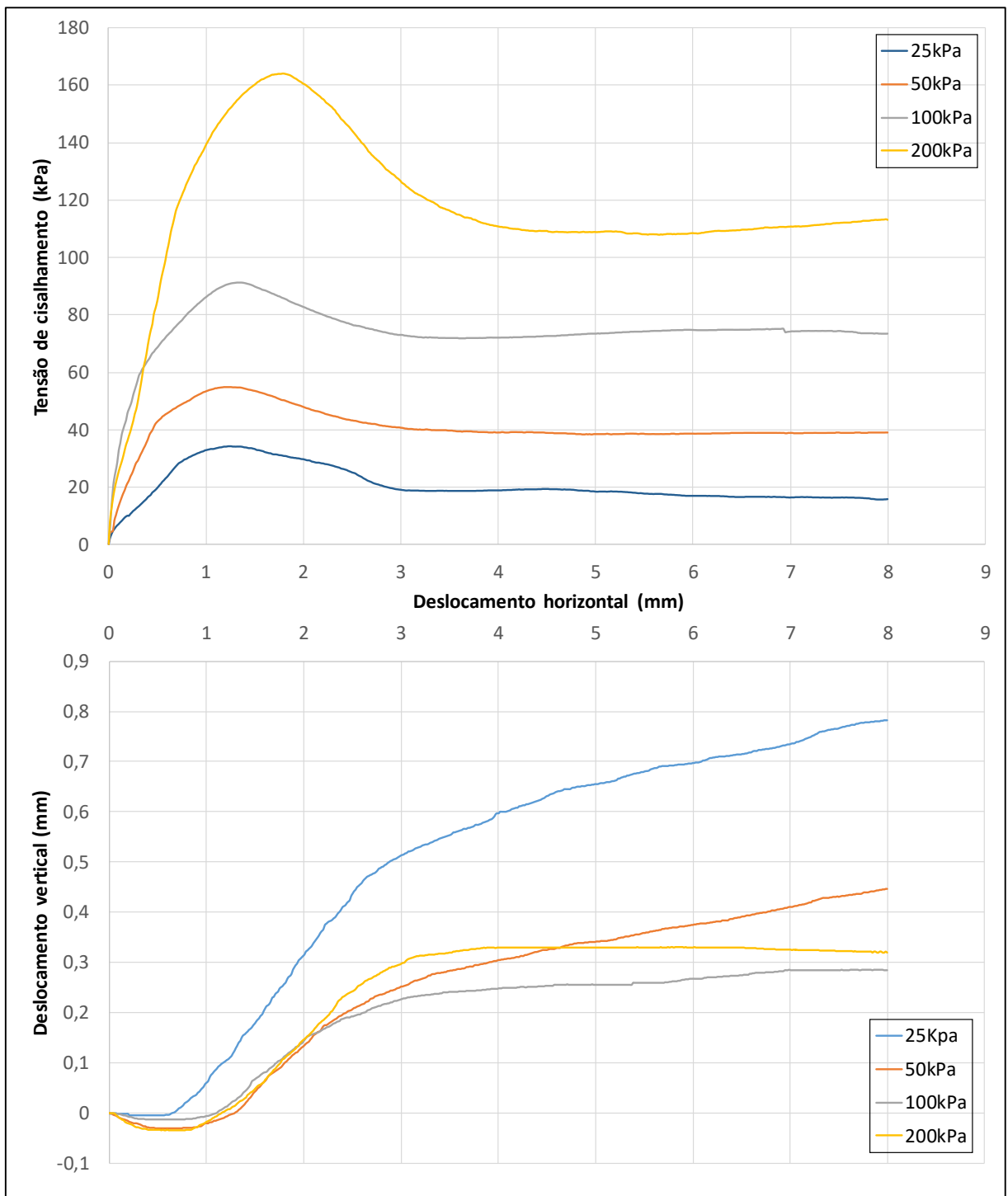
<b>Amostra</b>	<b>(<math>\sigma - \mu_a</math>) kPa</b>	<b>w (%)</b>	<b>Sr</b>	<b>e</b>	<b><math>\gamma_d</math>(g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Secagem -4%</b>	25	7,01	0,43	0,422	1,836
	50	7,02	0,36	0,509	1,851
	100	6,95	0,35	0,514	1,724
	200	7,43	0,42	0,457	1,791
<b>Secagem -2%</b>	25	9,20	0,53	0,454	1,795
	50	9,62	0,52	0,485	1,758
	100	8,66	0,44	0,512	1,726
	200	9,09	0,51	0,463	1,784
<b>Umidade ótima</b>	25	11,06	0,64	0,448	1,803
	50	11,34	0,60	0,496	1,744
	100	11,28	0,57	0,515	1,723
	200	11,25	0,62	0,473	1,771
<b>Umedecimento +2%</b>	25	13,37	0,67	0,523	1,714
	50	13,01	0,66	0,513	1,725
	100	13,17	0,64	0,539	1,696
	200	12,55	0,62	0,527	1,709
<b>Umedecimento +4%</b>	25	14,84	0,68	0,572	1,660
	50	15,15	0,76	0,524	1,713
	100	15,80	0,77	0,535	1,701
	200	15,25	0,78	0,511	1,727

Fonte: autor (2022).

Nas Figura 37 a Figura 41 estão apresentadas as curvas tensão x deformação e deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras ensaiadas na umidade ótima e com teores de umidade + 2%, + 4%, - 2% e - 4% em relação à umidade ótima.

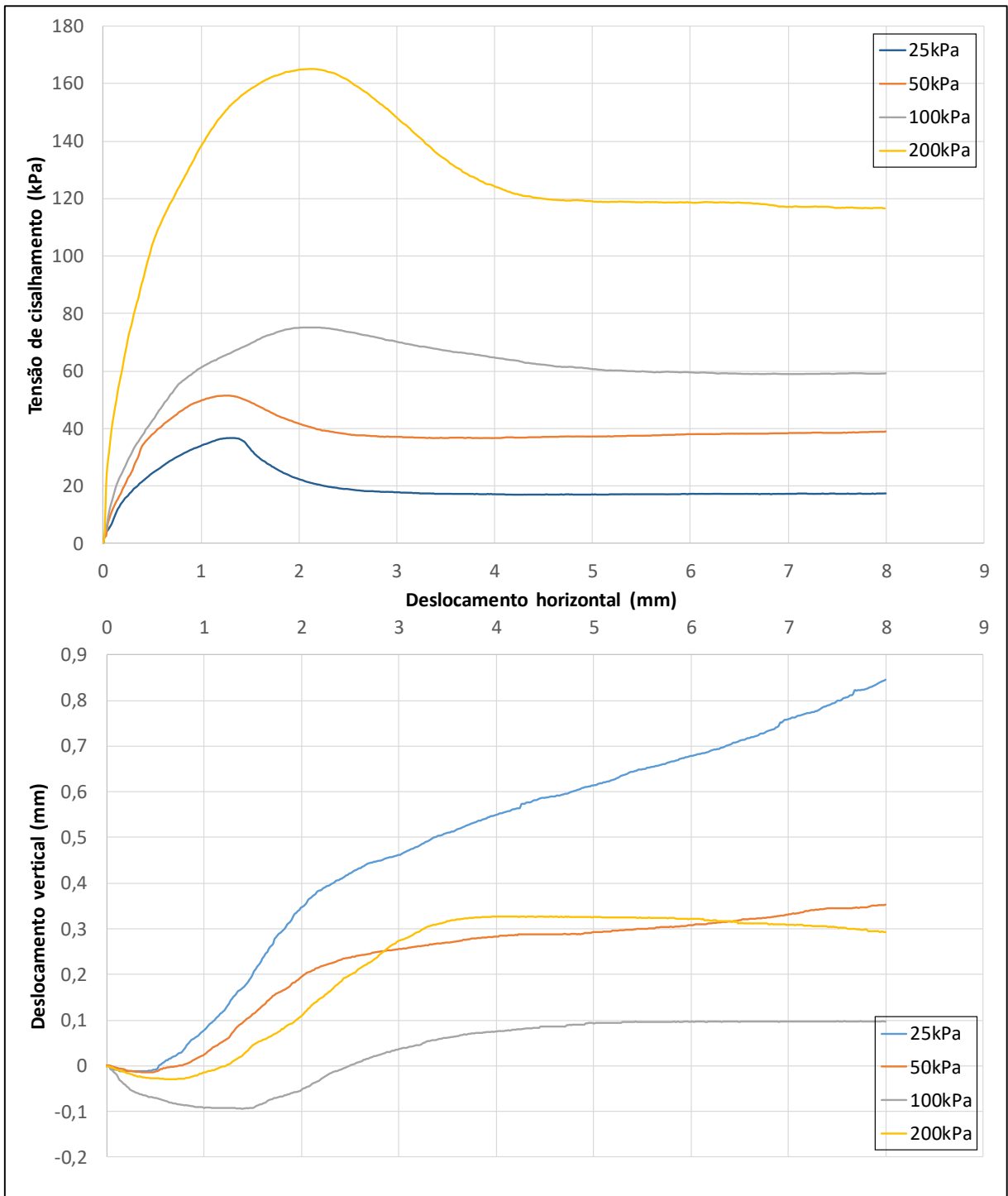


Figura 37 - Curva tensão x deformação e curva de deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras de secagem -4% em relação a umidade ótima.



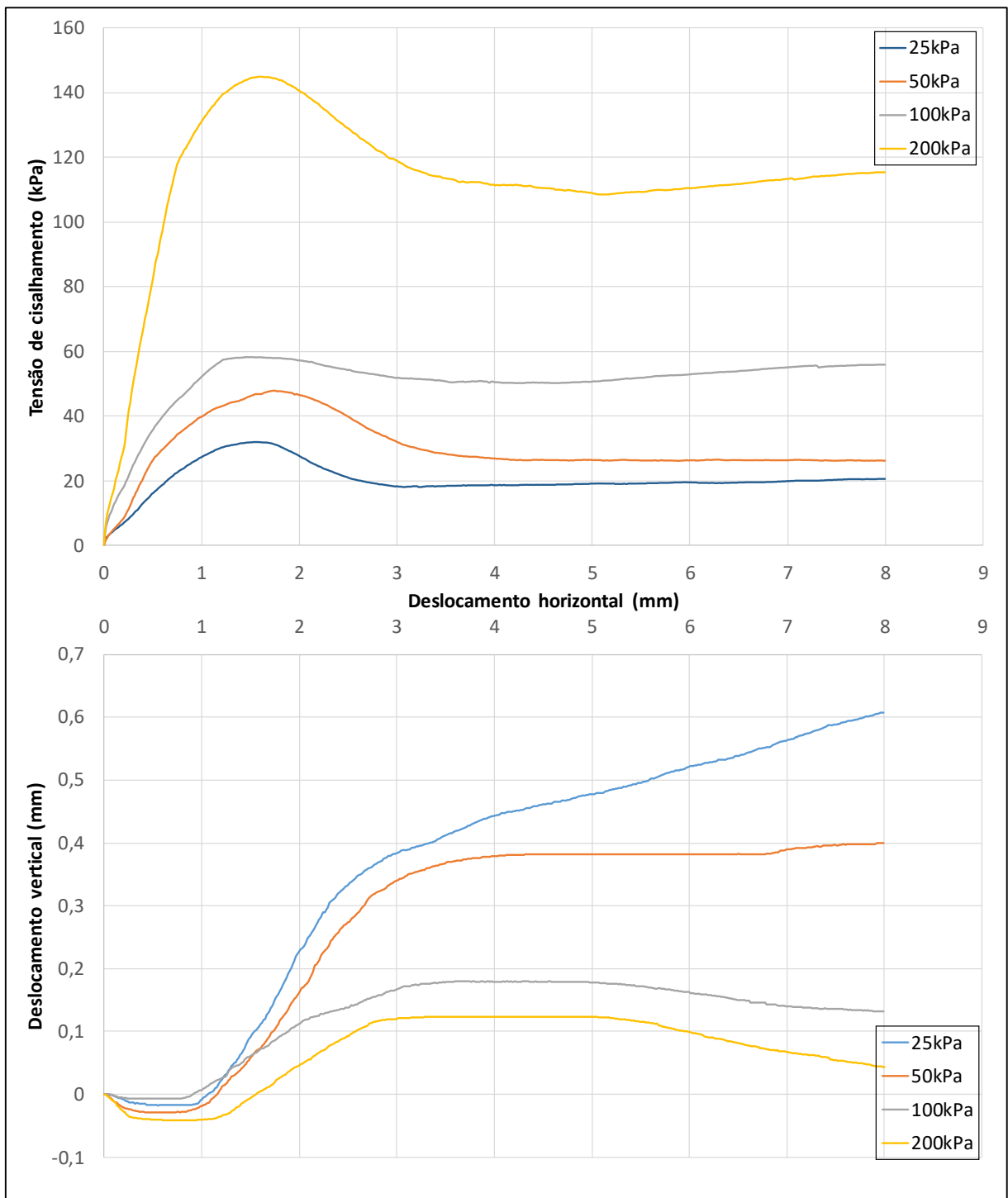
Fonte: autor (2022).

Figura 38 - Curva tensão x deformação e curva de deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras de secagem -2% em relação a umidade ótima.



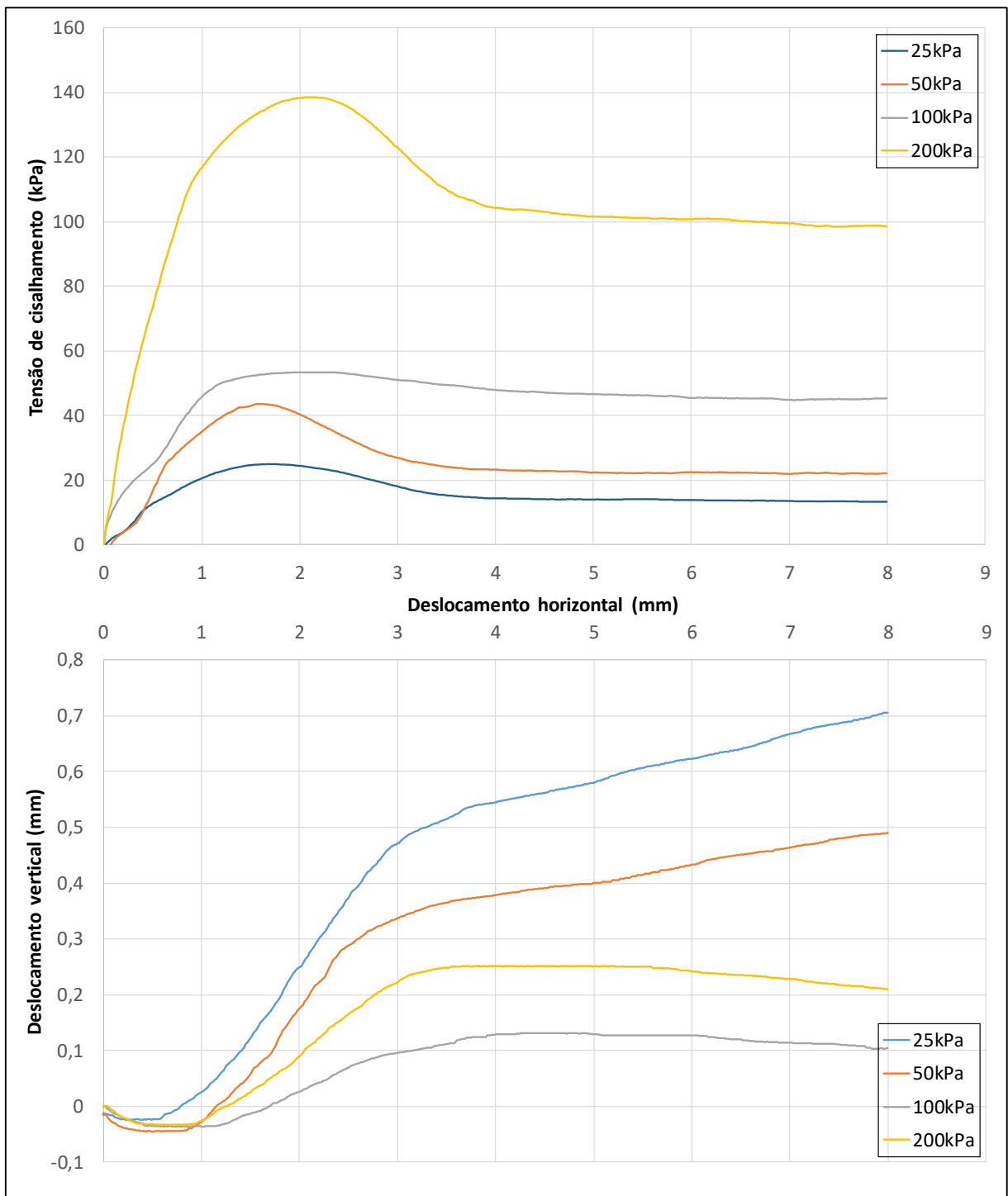
Fonte: autor (2022).

Figura 39 - Curva tensão x deformação e curva de deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras na umidade ótima.



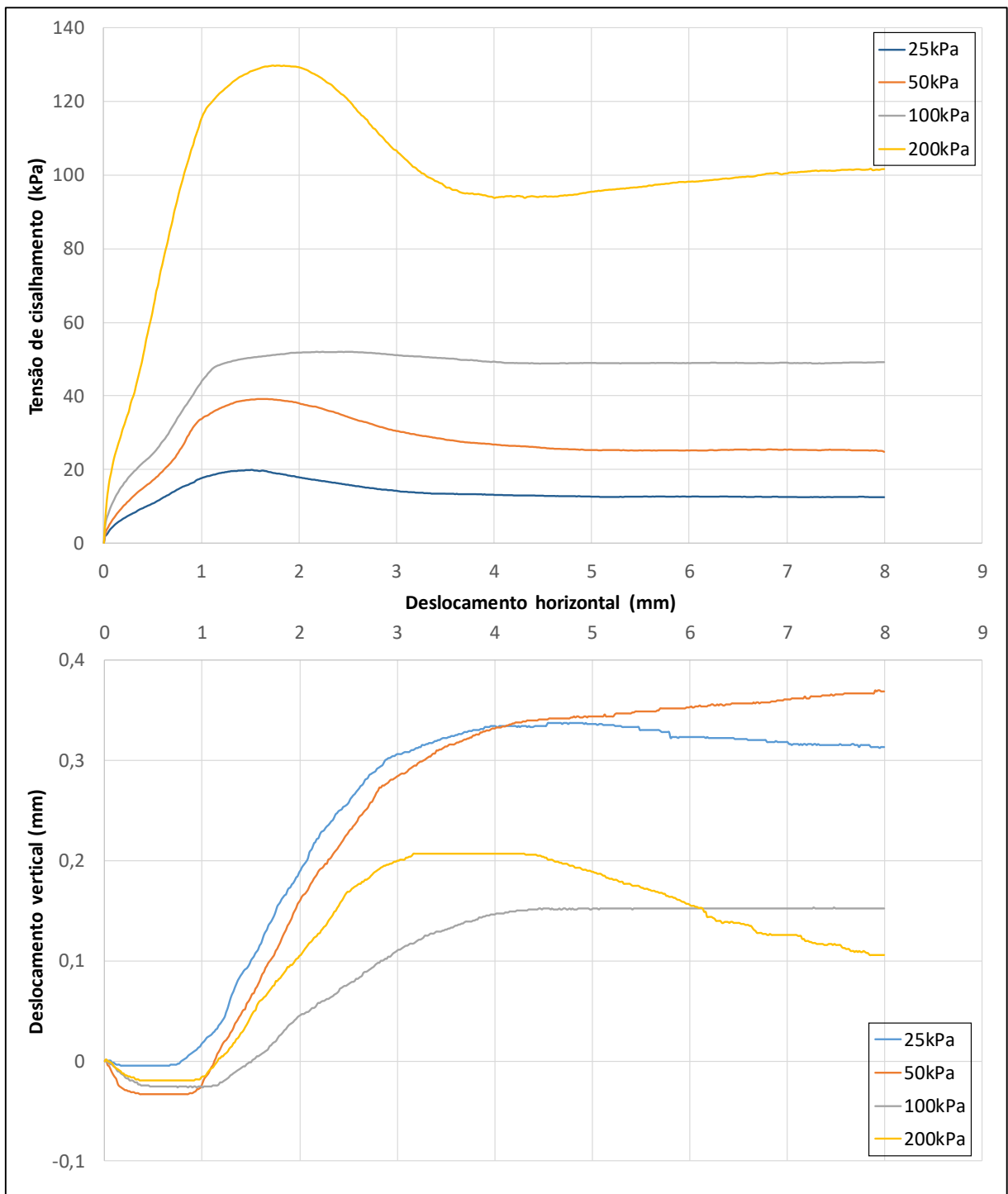
Fonte: autor (2022).

Figura 40 - Curva tensão x deformação e curva de deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras de umedecimento +2 em relação a umidade ótima.



Fonte: autor (2022).

Figura 41 - Curva tensão x deformação e curva de deslocamento vertical x deslocamento horizontal das amostras de umedecimento +4% em relação a umidade ótima.



Fonte: autor (2022).

A partir da análise das curvas tensão x deformação, é possível perceber que todas as amostras desenvolveram picos de resistência. Verifica-se também que a resistência aumenta e os picos ficam mais expressivos com o aumento da tensão normal e a diminuição no teor de

umidade. Vale a pena separar os efeitos da diminuição no teor de umidade e o aumento da tensão normal no desenvolvimento dos picos e na resistência das amostras.

Com a queda da umidade e do grau de saturação há o desenvolvimento da sucção, sendo mais relevante para as amostras secas. Como visto no item 2.3, a magnitude da sucção está relacionada com o a quantidade de água existente no solo. Dessa forma, para as amostras secas -2% e -4% em relação a umidade ótima, os picos são mais expressivos e a resistência aumenta devido ao acréscimo de coesão aparente gerado pela sucção. Conforme ocorre o aumento no teor de umidade nas amostras umedecidas +2% e +4%, o acréscimo de resistência gerado pela coesão aparente passa a ser menor, pois a sucção reduz à medida que o teor de umidade aumenta. Nessas amostras também ocorrem a geração de picos de resistência, no entanto, são menos expressivos principalmente para menores tensões normais.

Percebe-se em amostras com o mesmo teor de umidade que com o aumento da tensão normal, ocorre a geração de picos de resistência mais expressivos. Esses picos estão relacionados com o fenômeno de dilatância de solos densos, onde é possível verificar um estágio de compressão e expansão (GERSCOVICH, 2010). Analisando todas as curvas de deslocamento vertical x deslocamento horizontal, é possível perceber que inicialmente ocorre uma contração do corpo de prova, em seguida, as deformações passam a ser dilatantes a medida que se mobiliza a tensão cisalhante. Apesar de denso, o corpo de prova ainda apresenta algum espaço disponível para reorganização inicial das partículas. Em razão do confinamento decorrente da tensão normal as partículas tendem a se encaixar melhor. No entanto, para que as deformações continuem, deve haver o desencaixe das partículas. Isso faz com que sejam necessários valores adicionais de tensão cisalhante que origina os picos de resistência.

Assim, os picos de resistência nos gráficos tensão x deformação estão relacionados principalmente com o fenômeno de dilatância de solos densos. No entanto, o acréscimo na parcela da coesão também contribui para picos de resistência mais nítidos, sobretudo nas amostras secas. A elevação da tensão cisalhante máxima está relacionada com o aumento da sucção, que é decorrente da diminuição do teor de umidade. O acréscimo de coesão aparente, juntamente à coesão verdadeira e o ângulo de atrito interno, contribuem significativamente para resistência. É possível constatar que, em geral, as amostras apresentaram um comportamento do tipo frágil. Nas curvas tensão x deformação, a ruptura é definida pela máxima tensão cisalhante (pico) suportada pela ADF antes de romper.

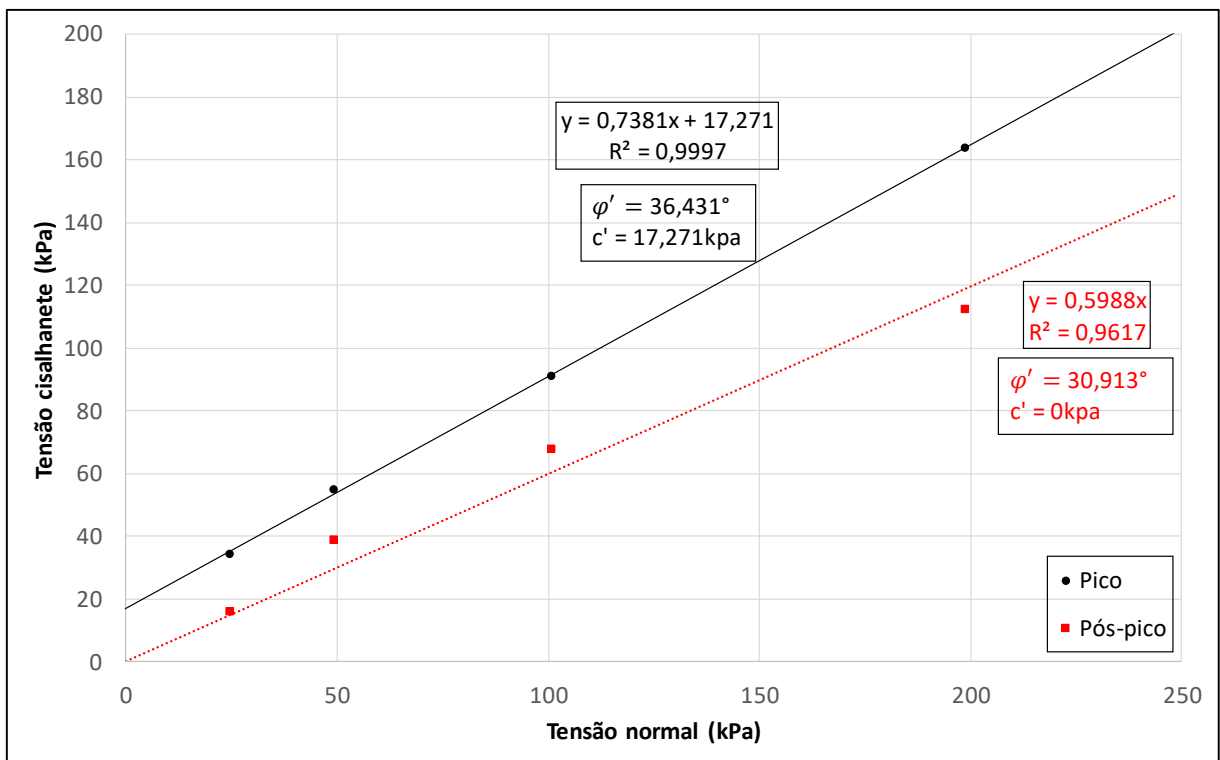
Em termos de variação da altura dos corpos de prova, ao analisar as curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal, percebe-se que a grandeza da contração e da expansão está diretamente ligada ao índice de vazios. Verifica-se que as amostras com

menor índice de vazios sofreram menor contração e maior expansão. O contrário ocorreu nas amostras com maior índice de vazios, as quais apresentaram maior contração e menor expansão.

#### 4.3.1. Envoltórias de resistência ao cisalhamento no plano $\tau$ x ( $\sigma$ - $\mu\alpha$ )

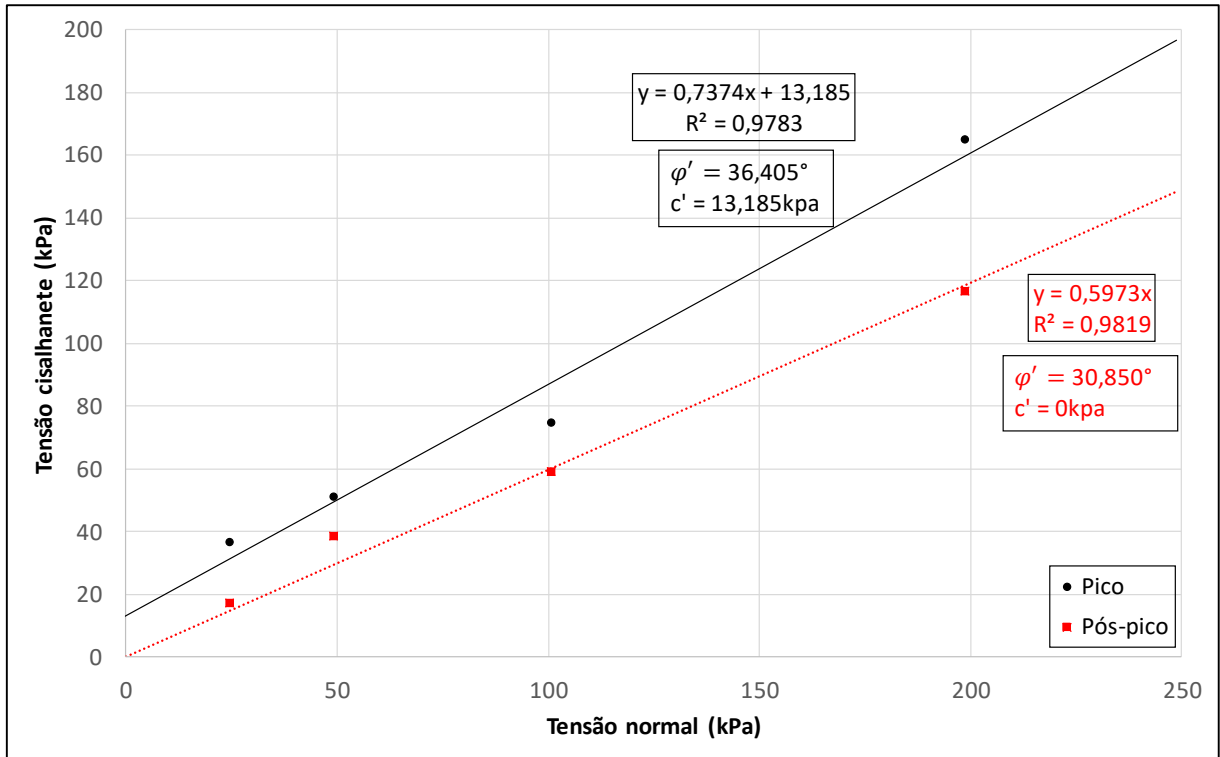
As Figura 42 a Figura 46 apresentam as envoltórias de resistência ao cisalhamento no plano  $\tau$  x ( $\sigma$ - $\mu\alpha$ ) das amostras na umidade ótima, umedecidas e secas. As envoltórias foram ajustadas por uma reta, onde a inclinação define o ângulo de atrito interno ( $\varphi'$ ) e a interseção com o eixo y o valor do intercepto coesivo ( $c'$ ). A resistência de pico foi determinada através da maior tensão cisalhante medida no ensaio. Já a resistência pós-pico foi definida por meio da média das tensões de cisalhamento medidas com deslocamento horizontais entre 7 e 8 mm.

Figura 42 - Envoltórias de resistência das amostras secas -4% em relação a umidade ótima.



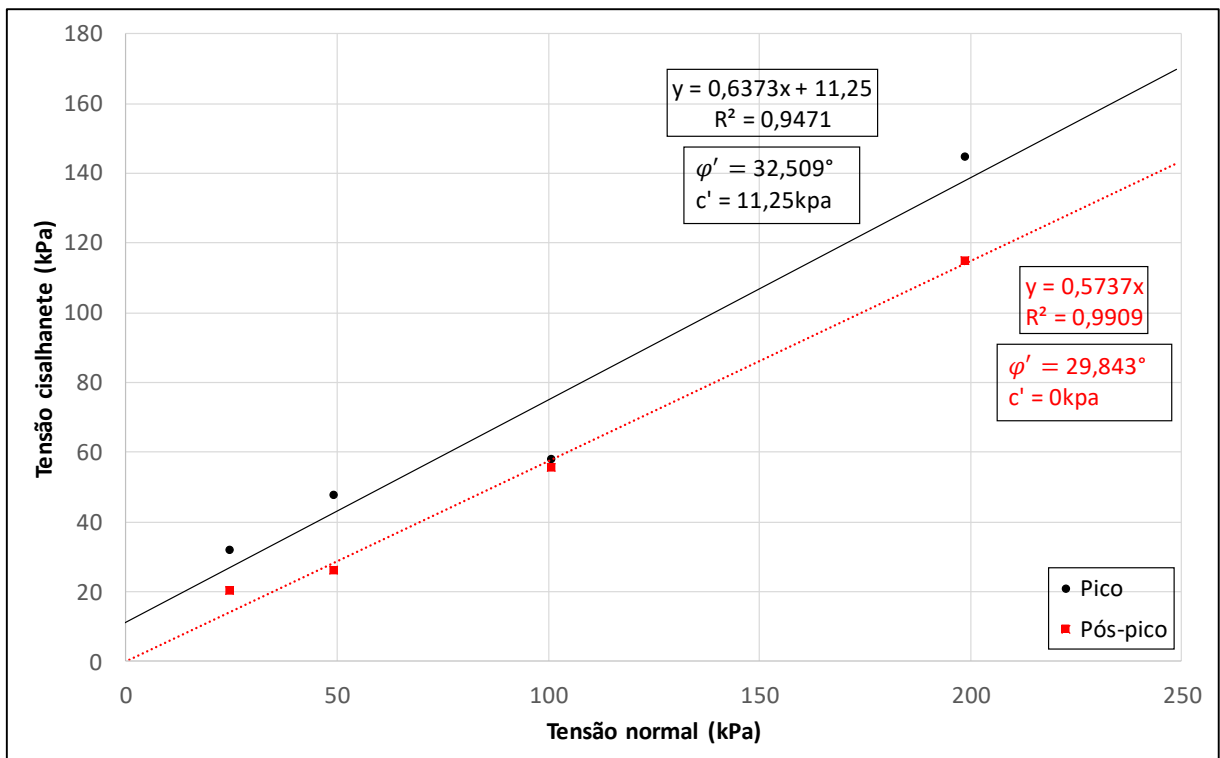
Fonte: autor (2022).

Figura 43 - Envoltórias de resistência das amostras secas -2% em relação a umidade ótima.



Fonte: autor (2022).

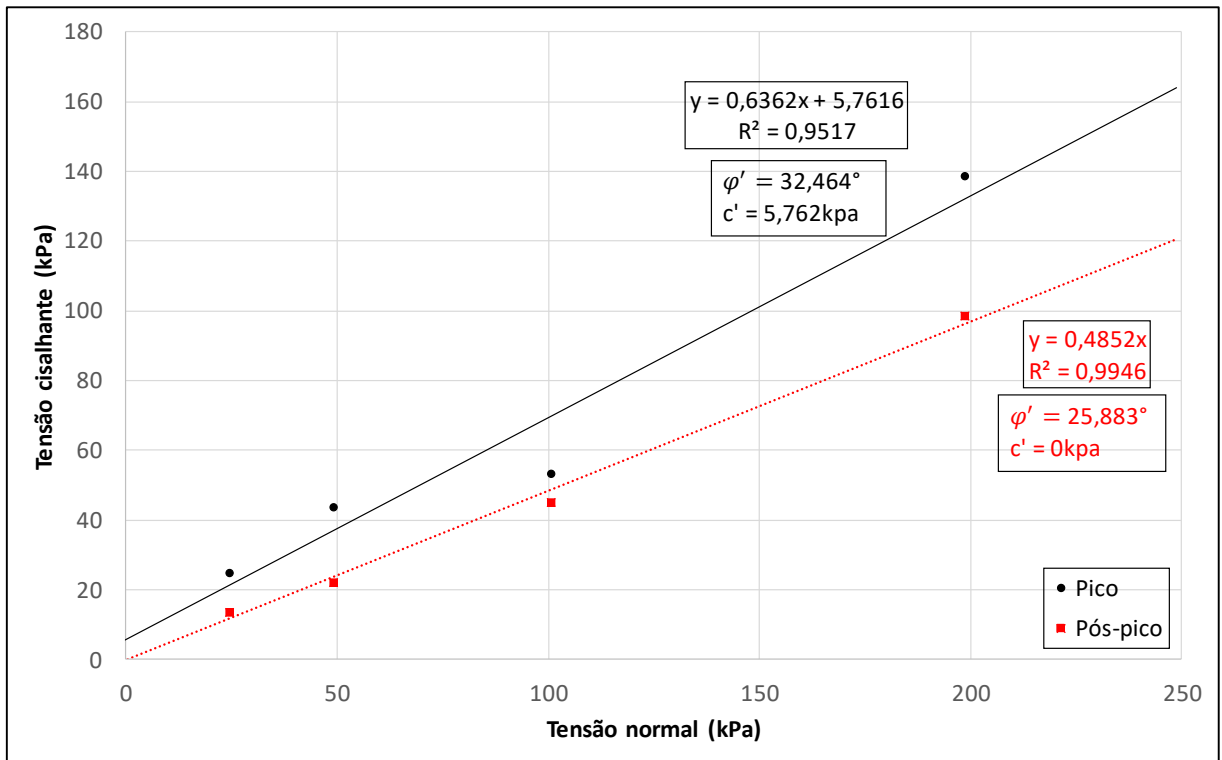
Figura 44 - Envoltórias de resistência das amostras na umidade ótima



Fonte: autor (2022).

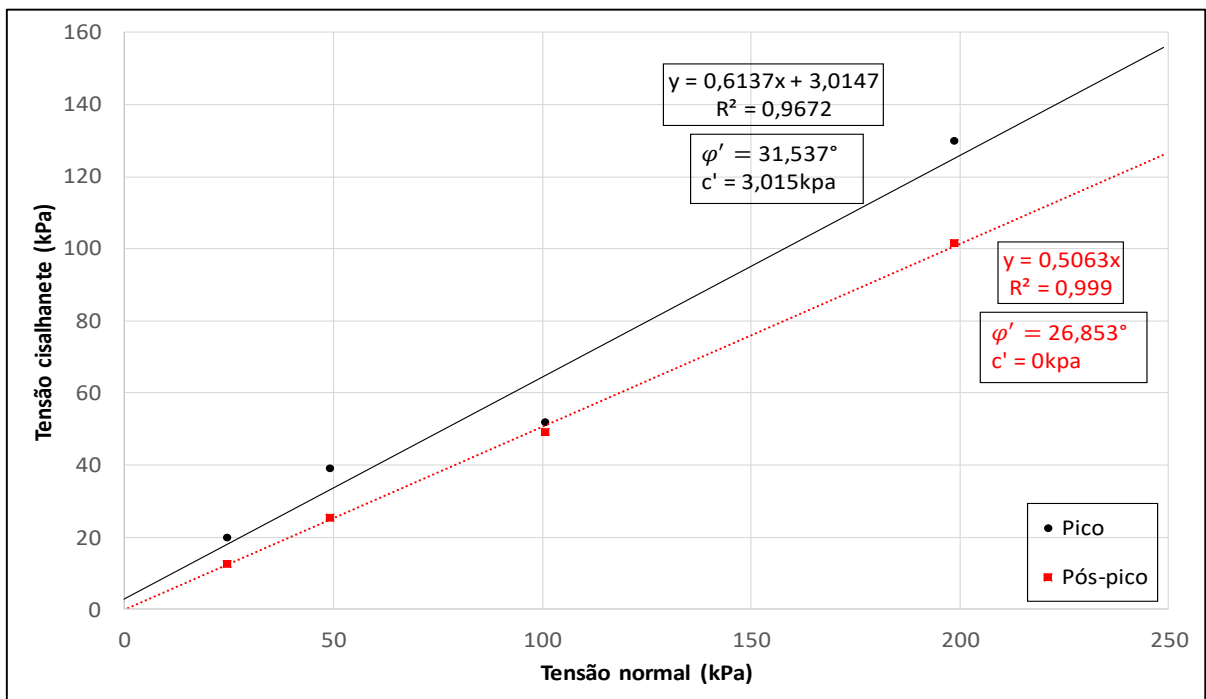


Figura 45 - Envoltórias de resistência das amostras umedecidas +2% em relação a umidade ótima.



Fonte: autor (2022).

Figura 46 - Envoltórias de resistência das amostras umedecidas +4% em relação a umidade ótima.



Fonte: autor (2022).

Por mais que as envoltórias estejam representadas em um plano 2D, é possível notar a contribuição da sucção para os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Nas amostras submetidas à secagem, é possível perceber uma tendência de acréscimo da parcela coesiva ( $c'$ ) e um aumento do ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ) quando comparada com as amostras na umidade ótima e umedecidas. A parcela coesiva expressa a coesão total medida em cada ensaio, formada pela coesão verdadeira mais a coesão aparente gerada pela sucção. Dessa forma, os valores de coesão total aumentam na medida em que se eleva a sucção por meio da redução do teor de umidade das amostras. Esse fato confere um aumento nos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Ao analisar as envoltórias de resistência das amostras submetidas ao umedecimento, percebe-se uma tendência de redução nos parâmetros de resistência ao cisalhamento em relação às amostras na umidade ótima. Isso ocorre pois conforme o teor de umidade aumenta nas amostras, o termo referente ao acréscimo de resistência (coesão aparente) devido a sucção vai se dissipando, o que a torna menos relevante para a resistência das amostras.

Para facilitar a visualização dos resultados, a Tabela 7 apresenta os valores do ângulo de atrito e intercepto coesivo nas condições de pico e pós-pico obtidos nos ensaios.

Tabela 7 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento.

<b>Amostras</b>	<b>Condição</b>	<b><math>\phi'</math> (°)</b>	<b><math>c'</math> (kPa)</b>
<b>Secagem -4%</b>	Pico	36,431	17,217
	Pós-pico	30,913	0
<b>Secagem -2%</b>	Pico	36,405	13,185
	Pós-pico	30,850	0
<b>Umidade ótima</b>	Pico	32,509	11,250
	Pós-pico	29,843	0
<b>Umedecimento +2%</b>	Pico	32,464	5,762
	Pós-pico	25,883	0
<b>Umedecimento +4%</b>	Pico	31,537	3,015
	Pós-pico	26,853	0

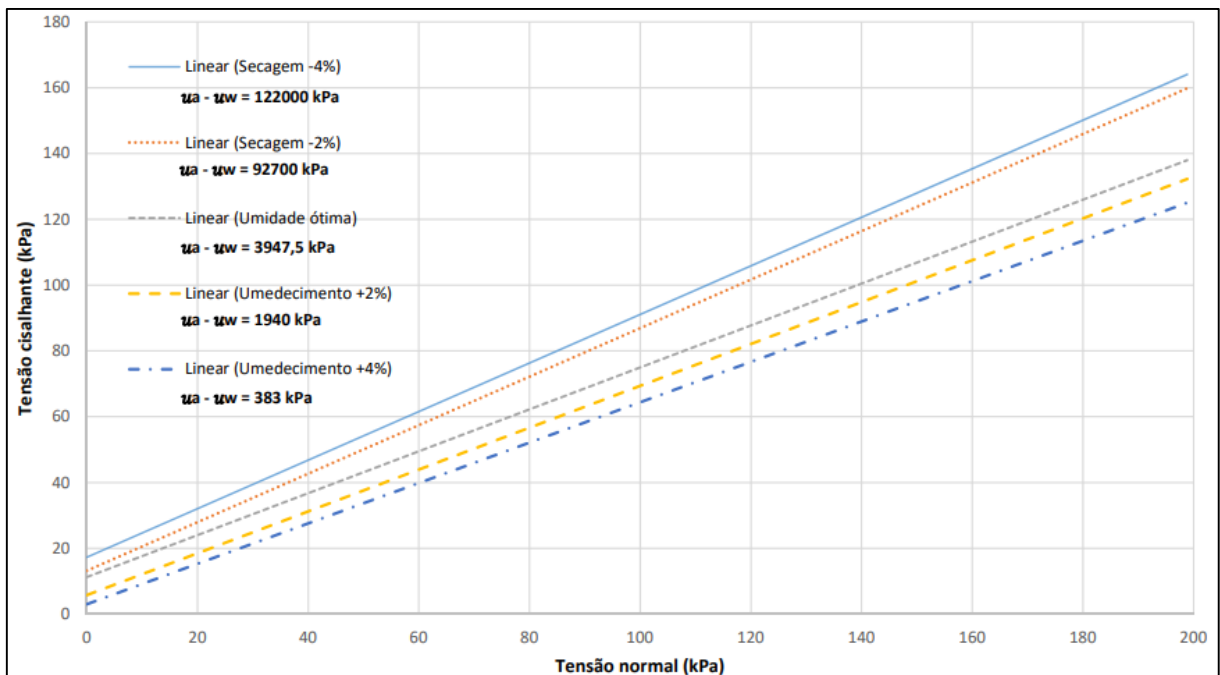
Fonte: autor (2022).

Ao analisar os parâmetros das amostras umedecidas em comparação com a umidade ótima, percebe-se que a variação não é tão expressiva, principalmente em relação ao ângulo de atrito interno nas condições de pico. No entanto, a redução da parcela coesiva na condição de pico e do ângulo de atrito interno na condição de pós-pico é relevante. Nota-se ainda que a secagem promoveu um aumento na parcela coesiva e uma variação maior entre o ângulo de atrito na condição de pico em relação a umidade ótima.

A partir dos resultados entre a amostra de referência (umidade ótima) e as amostras umedecidas e secas, é possível concluir que a contribuição da sucção para o aumento do ângulo de atrito interno é mais significativa nas condições de pico para as amostras secas. Dessa maneira, é possível afirmar que os picos gerados nas curvas tensão x deformação, além de sofrerem influência do fenômeno de dilatância, sofrem influência da sucção.

Em qualquer situação real em que a ADF se encontra com um teor de umidade compreendido entre os apresentados no trabalho (7,5%-15,5%), é possível perceber que para um mesmo teor de umidade, o ângulo de atrito interno e a parcela coesiva apresentam uma clara redução em situações de deslocamentos que levem a uma condição de pós pico. É possível inferir que os parâmetros de resistência ao cisalhamento são fortemente influenciados pela elevação e redução da sucção no material. A influência da sucção pode ser melhor observada quando as envoltórias são plotadas juntas, conforme apresentado na Figura 47.

Figura 47 - Envoltórias de resistência de pico à diferentes níveis de sucção.



Fonte: autor (2022)

O gráfico apresentado na Figura 47 utilizou-se dos dados das curvas tensão x deformação apresentados anteriormente. Além disso, adotou-se uma sucção média para cada condição de umidade que as amostras de ADF foram submetidas. A média consistiu nos valores de sucção de cada tensão confinante (25, 50, 100 e 200 kPa) com base no grau de saturação da

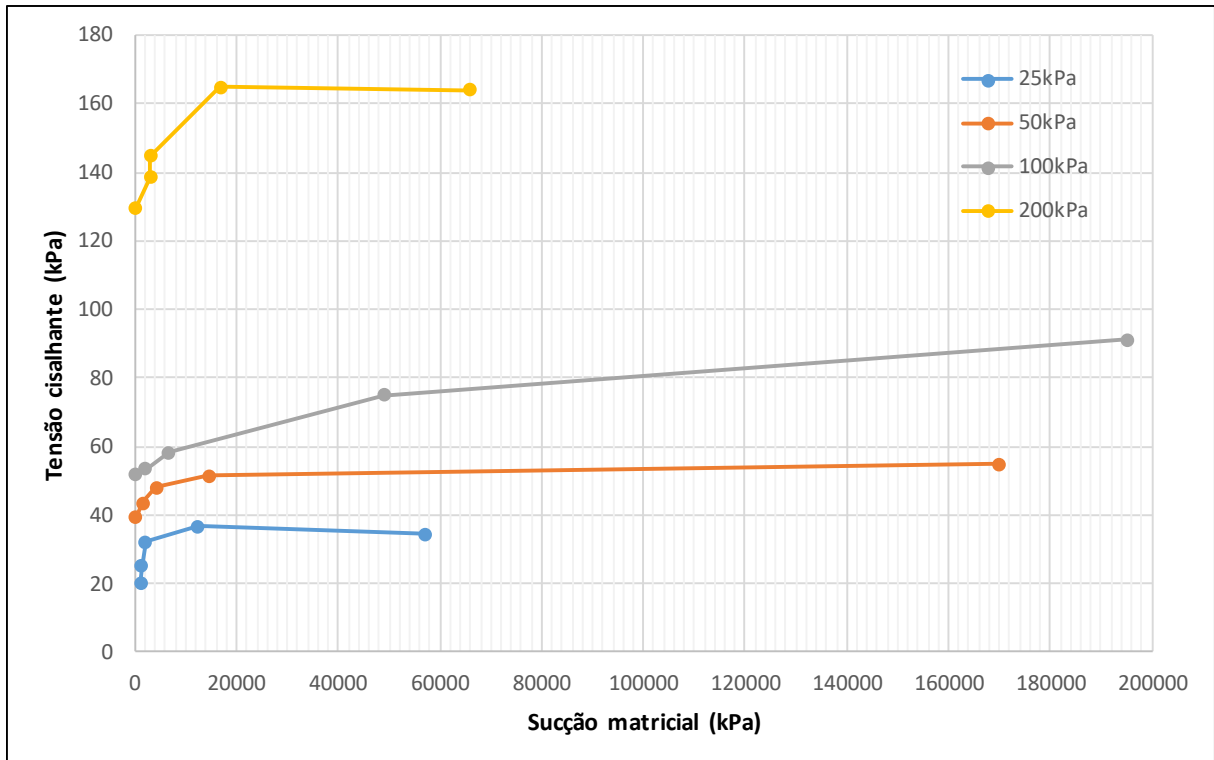
amostra no momento em que foi ensaiada. Esses valores de sucção foram extraídos da curva característica apresentada no item 4.2.2.

Ao adotar a amostra na umidade ótima como referência, é possível notar que conforme ocorre o acréscimo da sucção, há um aumento da coesão total (interseção com o eixo y) e do ângulo de atrito interno (inclinação da reta) nas amostras mais secas. Essa elevação da coesão total é referente à geração da coesão aparente que confere maior resistência na condição não saturada. Com a redução da magnitude da sucção, ocorre a diminuição da coesão total. No entanto, a inclinação das retas se mantém paralela entre a amostra na umidade ótima e as submetidas ao umedecimento. Nesse caso, o ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ) é pouco afetado com o decréscimo da sucção, gerando apenas redução da coesão total nas amostras mais úmidas.

#### **4.3.2. Contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento**

De acordo com a equação de resistência ao cisalhamento de Fredlund et al (1978) apresentada no item 2.4, o ângulo  $\phi^b$  quantifica a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento. O valor de  $\phi^b$  pode ser estimado através da inclinação da envoltória de ruptura no plano  $\tau$  x ( $\mu_a - \mu_w$ ). Dessa maneira, a Figura 48 apresenta a envoltória de resistência plotada nos eixos tensão cisalhante x sucção das amostras na umidade ótima, umedecidas e secas para cada tensão normal. Os valores de sucção foram estimados a partir da curva característica e os valores de tensão cisalhante de pico foram retirados das curvas tensão cisalhante x deformação.

Figura 48 - Envoltória de resistência tensão cisalhante x sucção matricial.

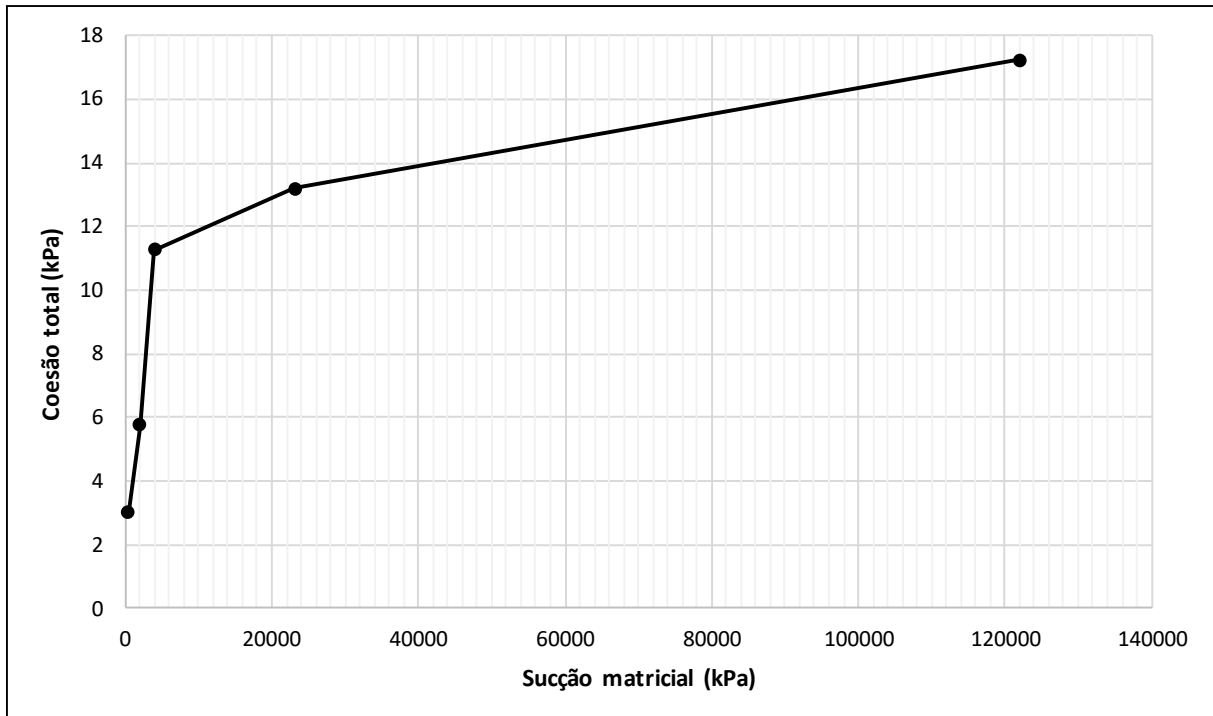


Fonte: autor (2022).

Percebe-se que ocorre um aumento da resistência ao cisalhamento não saturada com a elevação da sucção. É possível notar que o nível de contribuição da sucção para a resistência ao cisalhamento cresce de maneira não linear, indicando que o parâmetro  $\varphi^b$  não é constante. Observa-se que para baixas sucções, ocorre uma certa linearidade das envoltórias, o qual demonstra que possivelmente o parâmetro  $\varphi^b$  é constante para esse intervalo de sucção matricial. No entanto, à medida que os valores de sucção aumentam, o parâmetro  $\varphi^b$  varia de forma não linear. Vanapalli et al (1996) consideram que na fase anterior ao valor de entrada de ar (baixas sucções), em que o solo está saturado, ocorre um aumento linear da resistência. No segundo estágio, entre o valor de entrada de ar e a sucção residual, verifica-se um aumento não linear da resistência. E no terceiro estágio, após a sucção residual, a resistência pode diminuir, aumentar ou permanecer relativamente constante.

De maneira geral, percebe-se que à medida que ocorre o aumento da sucção há um ganho de resistência de maneira não linear até um valor máximo. A partir desse ponto máximo, a resistência se mantém parcialmente constante. O ganho de resistência não linear devido a variação do parâmetro  $\varphi^b$  pode ser analisada também através do gráfico coesão total x sucção

Figura 49 - Coesão total x sucção matricial.



Fonte: autor (2022).

A coesão total efetiva para a amostra com umedecimento +4% foi de 3,015 kPa, aumentando para 5,762, 11,25, 13,185 e 17,217 kPa para as amostras com umedecimento +2%, umidade ótima, secagem -2% e secagem -4%, respectivamente. Assim como no gráfico anterior, verifica-se um aumento linear da coesão total para as baixas sucções, e não linear conforme os valores crescem. É possível concluir que para baixos valores de sucção (130-6650 kPa), o nível de contribuição para a resistência da ADF é expressivo, se tornando constante e pouco relevante para valores mais altos de sucção. Essa situação está diretamente relacionada com a variação do valor do parâmetro  $\varphi^b$ .

A variação do ângulo  $\varphi^b$  já foi observada por diversos autores. Segundo Feuerharmel (2007), grande parte dos resultados apresentados na literatura demonstram que o parâmetro  $\varphi^b$  tem um valor inicial próximo ao de  $\varphi'$  para valores de sucção menores que o valor de entrada de ar do solo. Ainda segundo a autora, essa semelhança acontece porque a sucção atua efetivamente em toda seção transversal da amostra, assim como a tensão normal. Após o valor de entrada de ar a área de influência da sucção diminui, resultando na redução do valor de  $\varphi^b$  até que as condições residuais sejam alcançadas. Esse argumento explica o comportamento da ADF exposto nos dois gráficos apresentados na Figura 48 e na Figura 49. Observa-se que a influência da sucção é expressiva para baixos valores em função do parâmetro  $\varphi^b$

possivelmente ser mais elevado. No entanto, para altas sucções o ângulo  $\varphi^b$  diminui e tem pouca contribuição na resistência ao cisalhamento não saturada.

Conforme apresentado, pelo fato de ocorrer a variação do parâmetro  $\varphi^b$  a resistência cresce de maneira não linear e a envoltória de ruptura da ADF se torna uma superfície curva. Por esse motivo, buscou-se desenvolver um modelo de equação para o caso do parâmetro  $\varphi^b$  variável com base na equação de resistência ao cisalhamento não saturada de Fredlund *et al* (1978). Para isso, foi necessário relacionar as variáveis tensão cisalhante, tensão normal líquida e sucção matricial e estabelecer uma envoltória de resistência em um plano 3D.

O software R foi utilizado para relacionar as variáveis do modelo proposto. O código usado para rodar a análise no software foi a função “lm”, que consiste em ajustar uma base de dados em modelos lineares através da regressão múltipla. Buscou-se obter uma relação matemática linear entre a variável sucção e as variáveis tensão normal e tensão cisalhante. Os valores de sucção foram obtidos por meio da curva característica, e os dados da tensão normal e cisalhante foram obtidos através dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto. A maneira como o código foi argumentado em R e o respectivo resultado das variáveis estão representados no Quadro 1.

Quadro 1 - Código argumentado em R.

```

#Estimando a Regressão Múltipla
modelo_murilo2 <- lm(formula = Sc ~ . ,
                      data = murilo_ajustado)

#####

#####

#Parâmetros do modelo
summary(modelo_murilo2)

Call:
lm(formula = Sc ~ ., data = murilo_ajustado)

Residuals:
    Min     1Q   Median     3Q    Max
-19.3278 -4.4014  0.3788  6.4735 21.2708

Coefficients:
            Estimate Std. Error  t value Pr(>|t|)
(Intercept) 4.6758801  4.4455533   1.052  0.30761
Sn           0.6664880  0.0361691  18.427 1.14e-12 ***
Sucção      0.0003434  0.0001038   3.309 0.00414 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 10.83 on 17 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9545, Adjusted R-squared:  0.9492
F-statistic: 178.5 on 2 and 17 DF, p-value: 3.884e-12

```

Fonte: autor (2022).

Por meio do código, foram obtidas as variáveis do intercepto coesivo ( $c'$ ),  $\tan\phi'$  e  $\tan\phi^b$ . É possível notar, através do valor p, uma boa relação estatística entre as variáveis tensão normal e cisalhante. A variável de sucção apresentou um valor p com menor nível de significância, mas ainda assim estatisticamente significante, revelando a dificuldade de se obter



o parâmetro  $\varphi^b$  através de uma correlação linear. Apesar disso, é possível relacionar as variáveis obtidas para propor uma equação de resistência ao cisalhamento não saturada com base em Fredlund et al (1978).

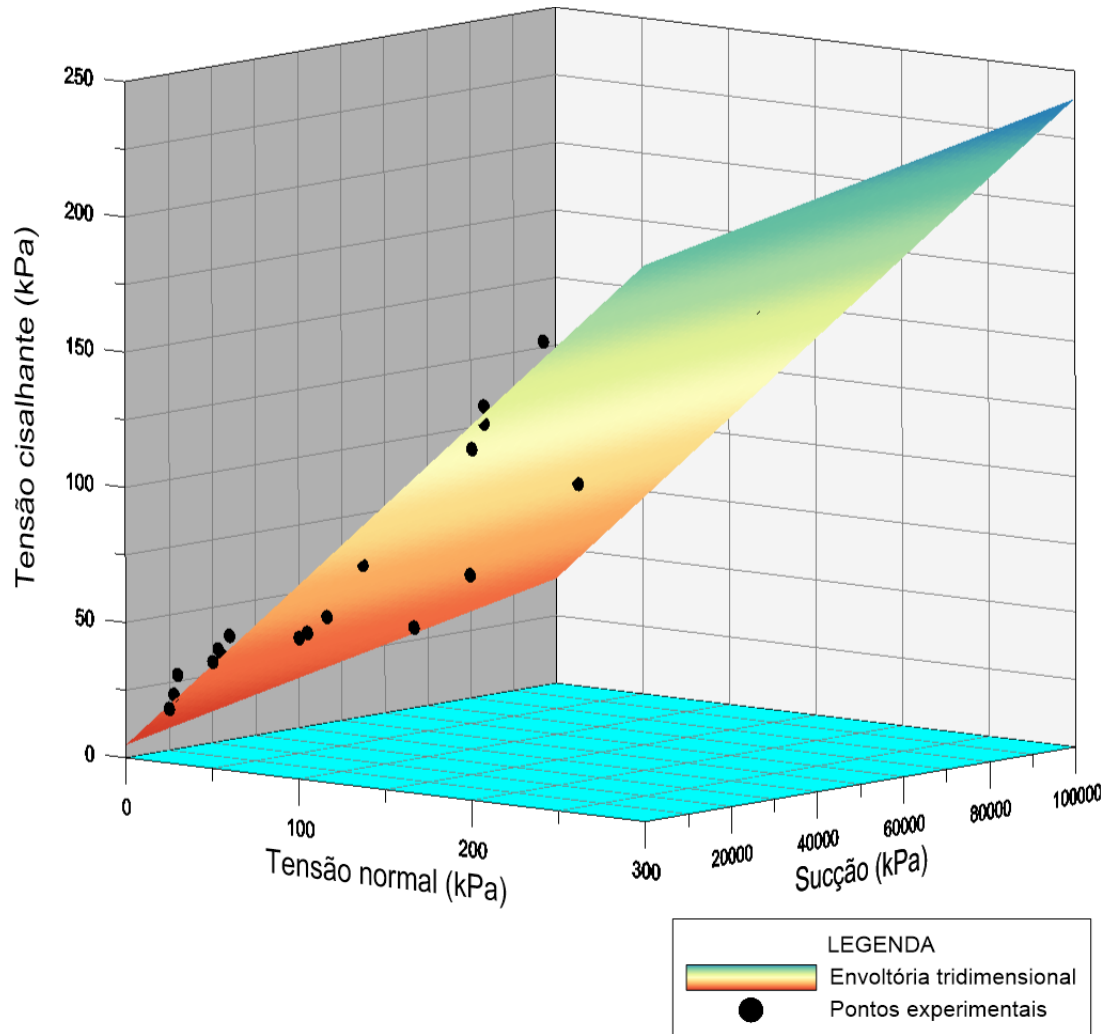
$$\tau = 4,676 + (\sigma - \mu_a) \cdot 0,666 + (\mu_a - \mu_w) \cdot 0,00034 \quad (11)$$

O ângulo de atrito interno ( $\varphi'$ ) decorrente da tensão normal líquida é de aproximadamente 33,66°. Esse valor é bem próximo ao ângulo de 33,87°, média dos ângulos de atrito interno na condição de pico das amostras submetidas ensaio de cisalhamento, apresentado no item 4.3.1. Esse fato indica que há uma boa correlação linear entre as variáveis tensão normal e cisalhante.

O ângulo  $\varphi^b$  resultou em um valor extremamente baixo, na ordem de 0,019°. Um motivo é o fato de que a correlação linear não é a melhor maneira de estimar um valor adequado para esse parâmetro. Além disso, a ADF apresenta valores muito elevados de sucção, possivelmente maiores ao valor de entrada de ar (VEA). Como comentado anteriormente, a partir desse valor, ocorre uma redução no valor de  $\varphi^b$  à medida que os valores de sucções aumentam. E pelo fato de apresentar elevados valores de sucção, a contribuição do parâmetro  $\varphi^b$  na resistência tende a ser muito mais baixa. Em seu estudo, Weber (2013) também comenta que não foi possível estimar um valor adequado para o parâmetro  $\varphi^b$  devido ao fato de os materiais analisados apresentarem elevados valores de sucção, superiores ao VEA, resultando em um ângulo extremamente baixo.

Através da Equação (11) é possível apresentar uma envoltória de resistência nos planos  $\tau \times (\sigma - \mu_a) \times (\mu_a - \mu_w)$ . Devido à dificuldade de modelagem de uma superfície curva, a qual exige mais parâmetros além dos que foram apresentados, a envoltória de ruptura apresentada na Figura 50 é plana. Compreende-se que uma envoltória de resistência de superfície curva seja mais adequada nos casos em que ocorre a variação dos ângulos de atrito interno. No entanto, o princípio desde o início foi relacionar com os parâmetros de Fredlund et al (1978) e Bishop (1959), por esse motivo trabalhou-se com uma envoltória plana.

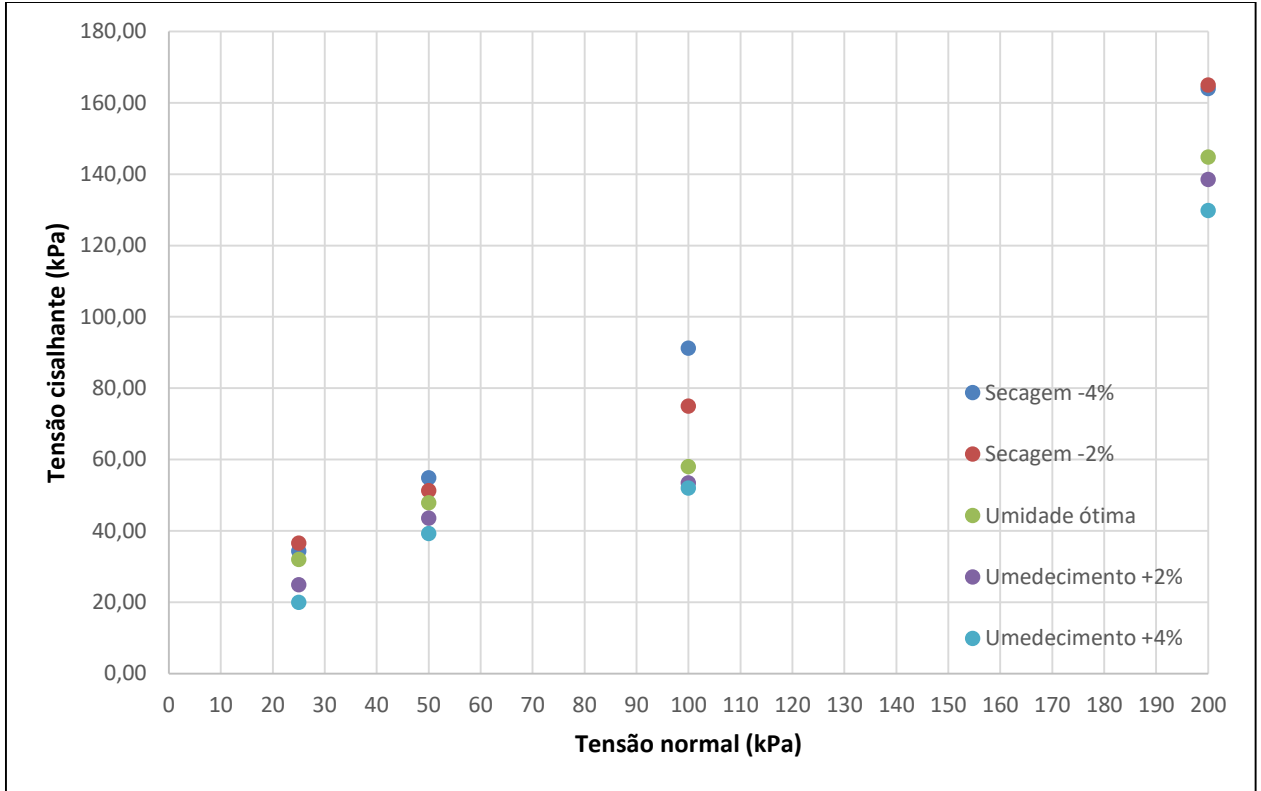
Figura 50 – Envoltória de resistência plana para ADF.



Fonte: autor (2022).

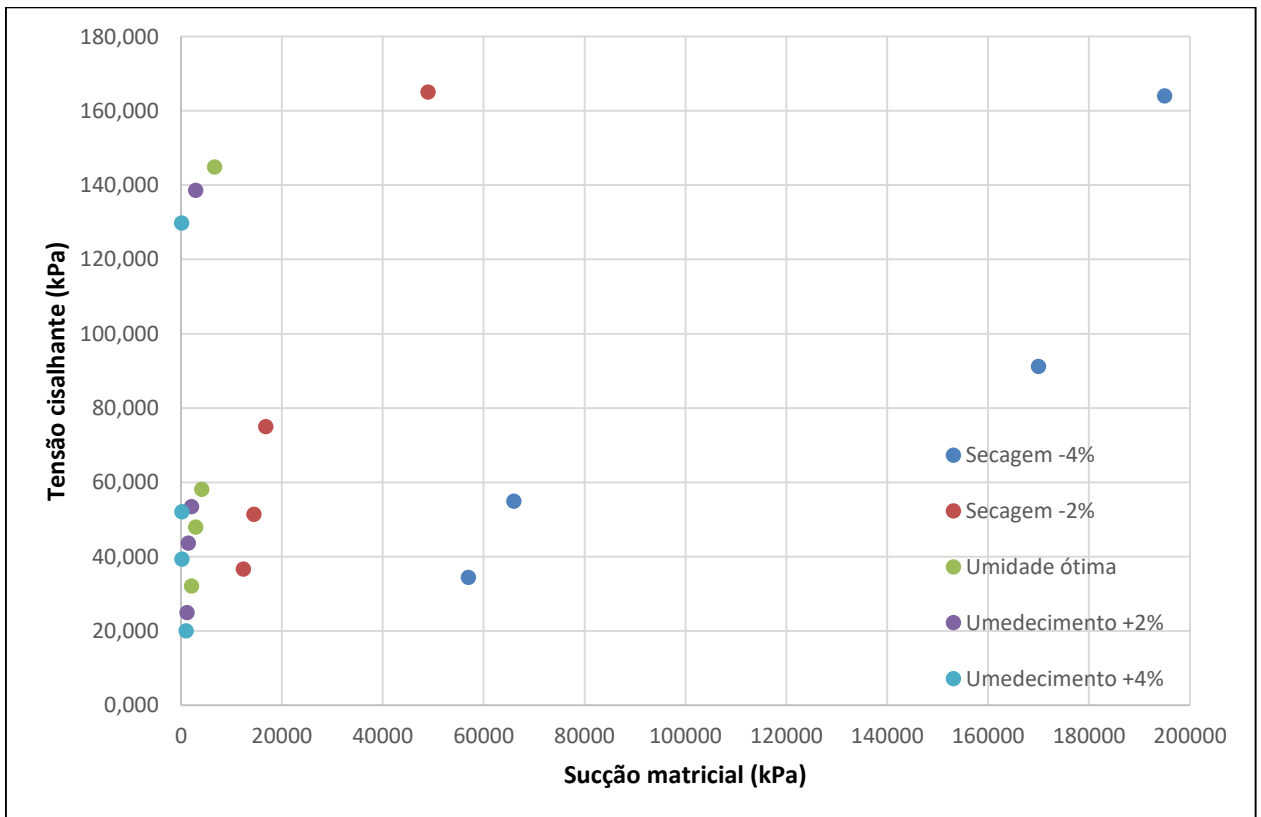
A envoltória 3D pode ser separada em dois gráficos,  $(\sigma - \mu_a)$  versus  $\tau$  e  $(\mu_a - \mu_w)$  versus  $\tau$ , com o objetivo de visualizar o ajuste dos pontos ensaiados através dos parâmetros da equação proposta.

Figura 51 - Valores de tensão cisalhante e tensão normal para o ajuste da equação proposta.



Fonte: autor (2022).

Figura 52 – Valores de tensão cisalhante e sucção matricial para o ajuste da equação proposta.



Fonte: autor (2022).

#### 4.4. Estabilidade de um aterro executado com areia descartada de fundição compactada

Nesta seção, buscou-se avaliar os impactos da coesão aparente sobre a estabilidade de um aterro executado com areia descartada de fundição. A ideia é mostrar que a consideração do estado não saturado na análise da estabilidade de taludes muitas vezes pode ser de grande interesse devido os ganhos de resistência oriundos do efeito da sucção. Segundo Wolle (2004), a consideração dos acréscimos de resistência passa a ser uma atividade que objetiva verificar os ganhos no fator de segurança e, a partir disso, procura-se adotar medidas práticas que possam permitir a sustentabilidade de tais condições. Campos e Motta (2015) comentam que mesmo na presença de baixos valores de coesão efetiva ou sucção, é possível ter valores de coesão aparente grandes o suficiente para manter uma encosta não saturada sob a ação de infiltração das águas da chuva.

Para a realização da análise de estabilidade foi definido um aterro executado com areia descartada de fundição compactada. Utilizou-se a ferramenta de perfil de elevação do Google Earth para analisar a seção transversal de um aterro de ADF já existente. Com o perfil de elevação definido, o aterro foi modelado no software Geostudio 2021 na análise SLOPE/W. O método de análise de estabilidade utilizado foi o método das fatias proposto por Bishop (1955), conhecido como Bishop simplificado.

Ao total foram realizadas seis análises, sendo que cinco delas foram feitas considerando as condições de umidade ótima, secagem -4%, secagem -2%, umedecimento +2% e umedecimento +4%. Os dados de coesão total e o ângulo de atrito interno ( $\varphi'$ ) necessários para análise foram retirados das envoltórias de resistência ao cisalhamento apresentadas no item 4.3.1. A sexta análise foi realizada considerando uma condição crítica na qual a ADF não apresenta coesão e nem ganho de resistência gerado pela sucção, dependendo apenas da parcela friccional. A ideia é apresentar a mudança do posicionamento da superfície de ruptura e a variação do fator de segurança em função dos níveis de coesão aparente gerados pela sucção. Os dados de entrada para cada condição estão apresentados na tabela abaixo.

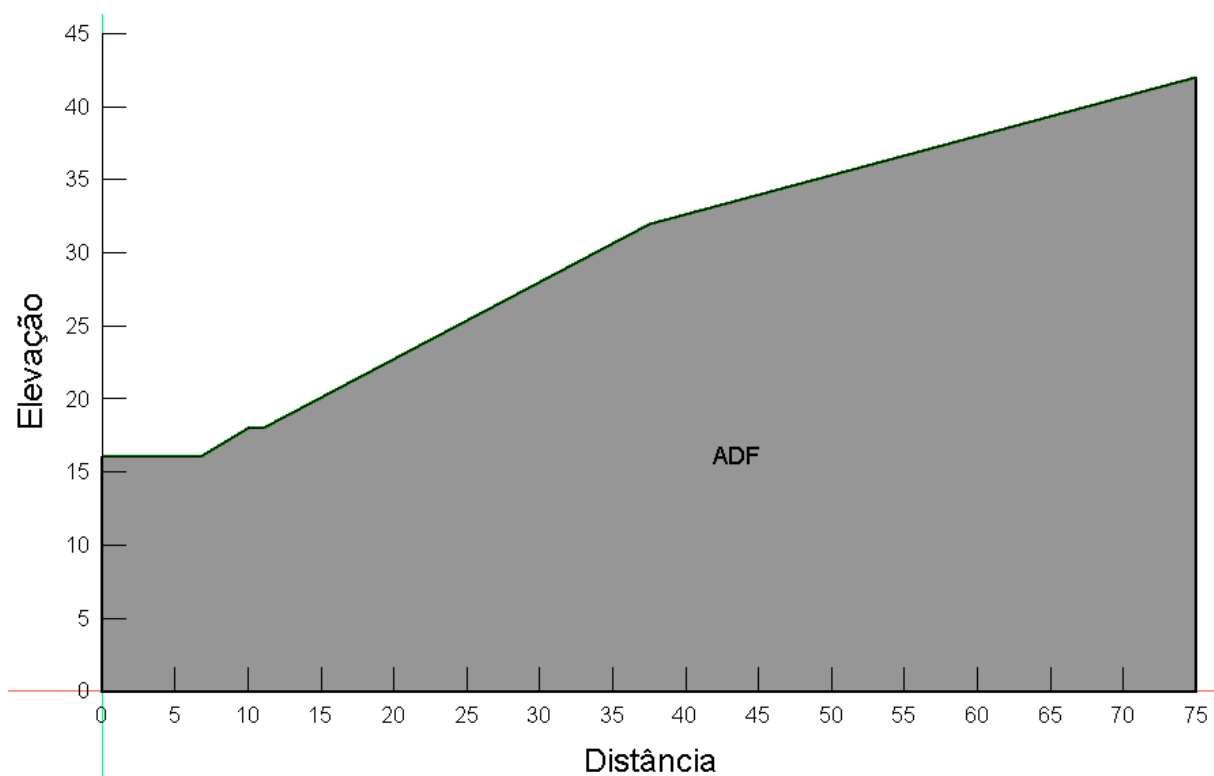
Tabela 8 – Dados de entrada para análise de estabilidade.

<b>Condição</b>	<b><math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\phi'</math> (°)</b>	<b><math>c'</math> (kPa)</b>
<b>Secagem -4%</b>	18,960	36,431	17,217
<b>Secagem -2%</b>	19,273	36,405	13,185
<b>Umidade ótima</b>	19,585	32,509	11,250
<b>Umedecimento +2%</b>	19,335	32,464	5,762
<b>Umedecimento +4%</b>	19,603	31,537	3,015
<b>Situação crítica</b>	20	30	0

Fonte: autor (2022).

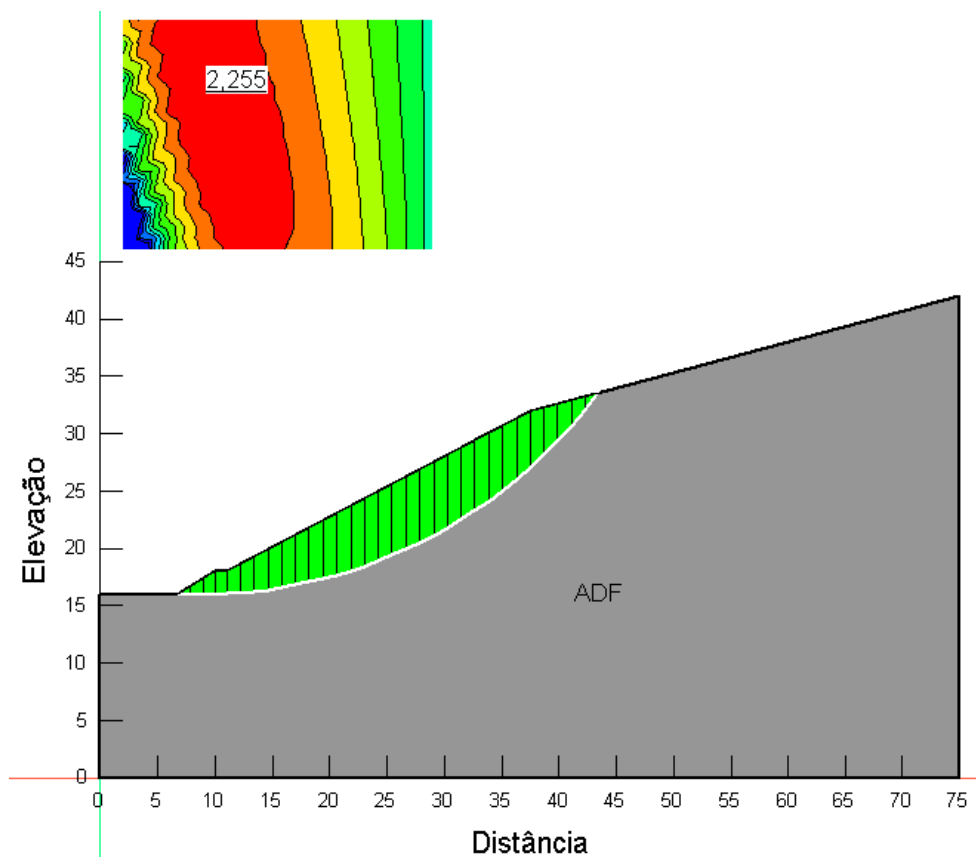
O fator de segurança mínimo adotado será o de 1,5, que segundo a ABNT NBR 11682/2009, corresponde a um nível de segurança desejado quando se tem um elevado risco de perda de vidas humanas e à possibilidade de grandes danos materiais e ao meio ambiente. O modelo geomecânico da encosta natural de ADF e as seis análises de estabilidade com a superfície de ruptura em destaque estão apresentadas na Figura 53 a Figura 59.

Figura 53 - Modelo geomecânico para análise de estabilidade



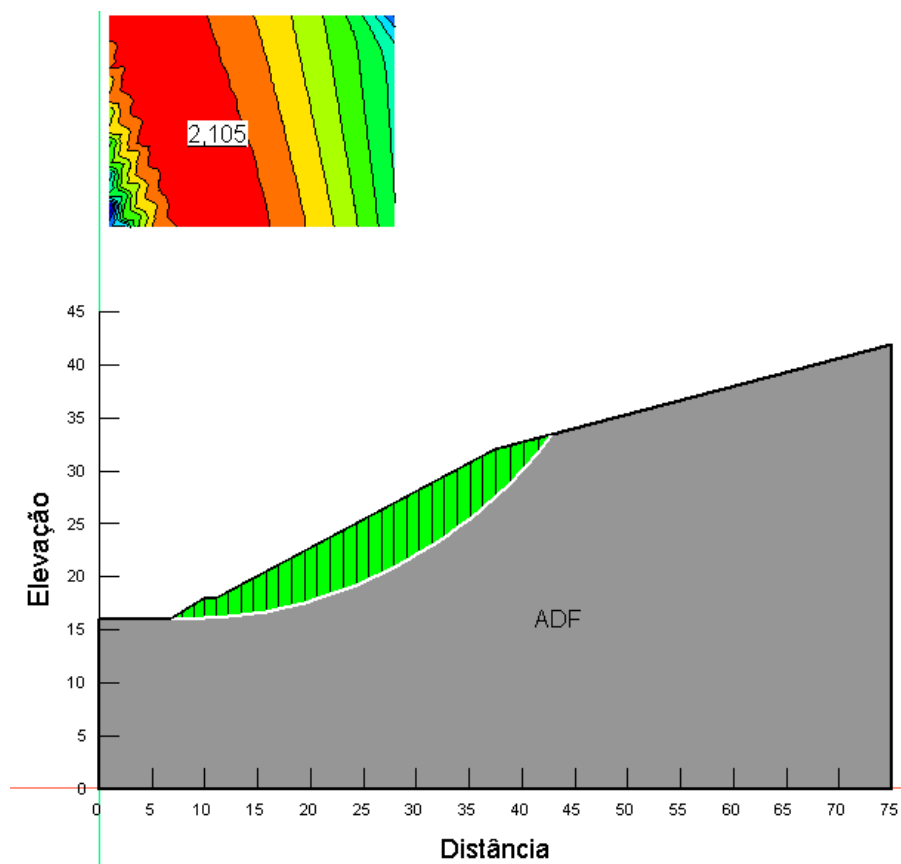
Fonte: autor (2022).

Figura 54 - Análise de estabilidade para condição de secagem -4%.



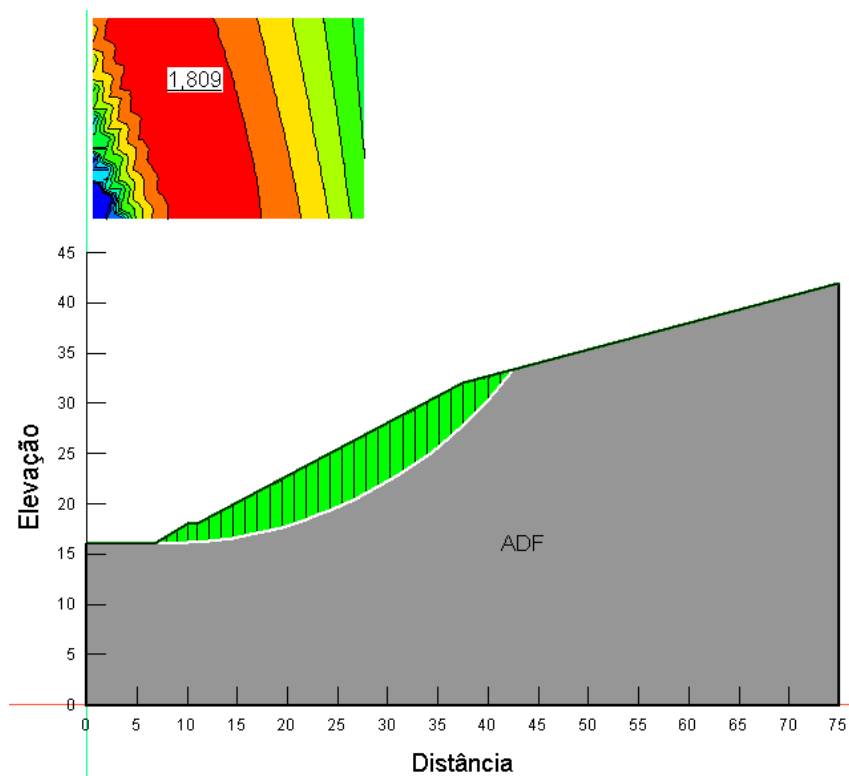
Fonte: autor (2022).

Figura 55 - Análise de estabilidade para condição de secagem -2%.



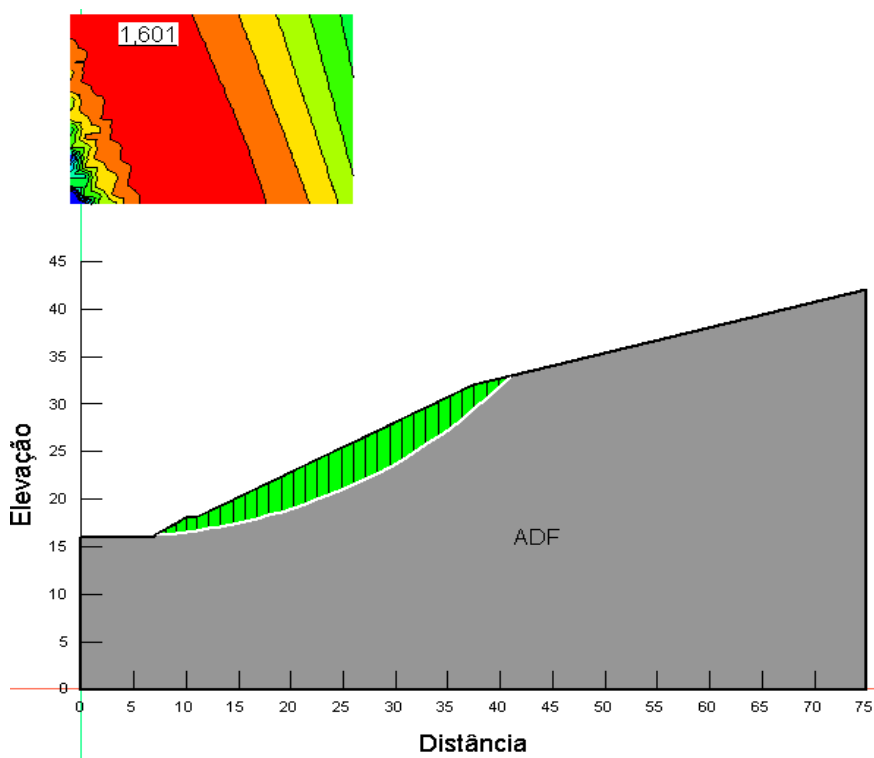
Fonte: autor (2022).

Figura 56 - Análise de estabilidade para condição de umidade ótima.



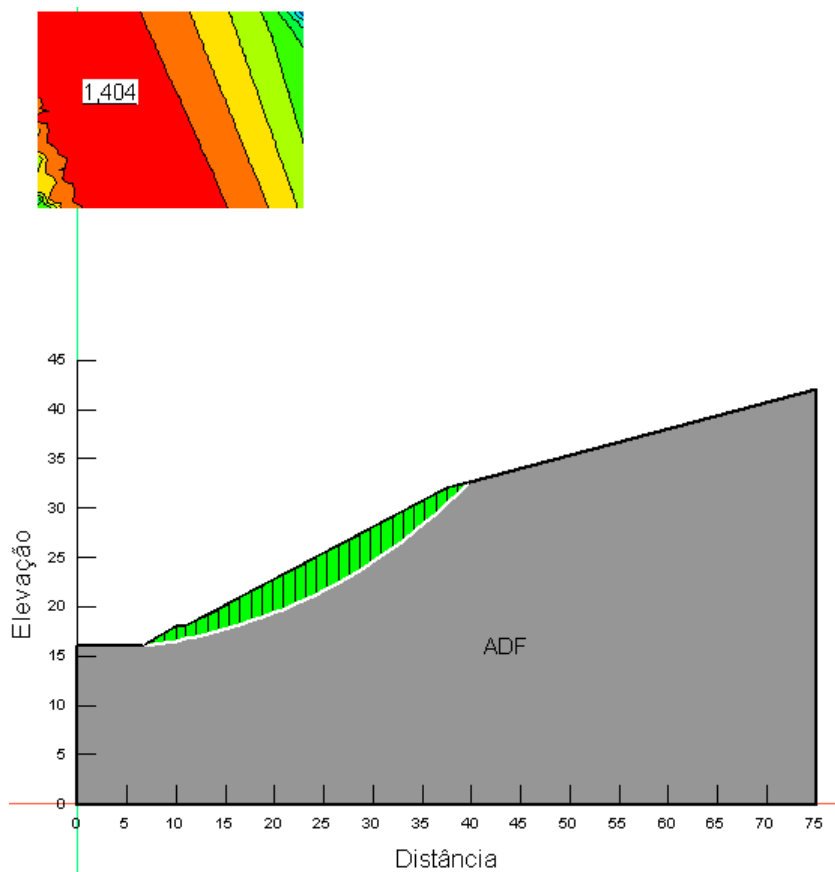
Fonte: autor (2022).

Figura 57 - Análise de estabilidade para condição de umedecimento +2%.



Fonte: autor (2022).

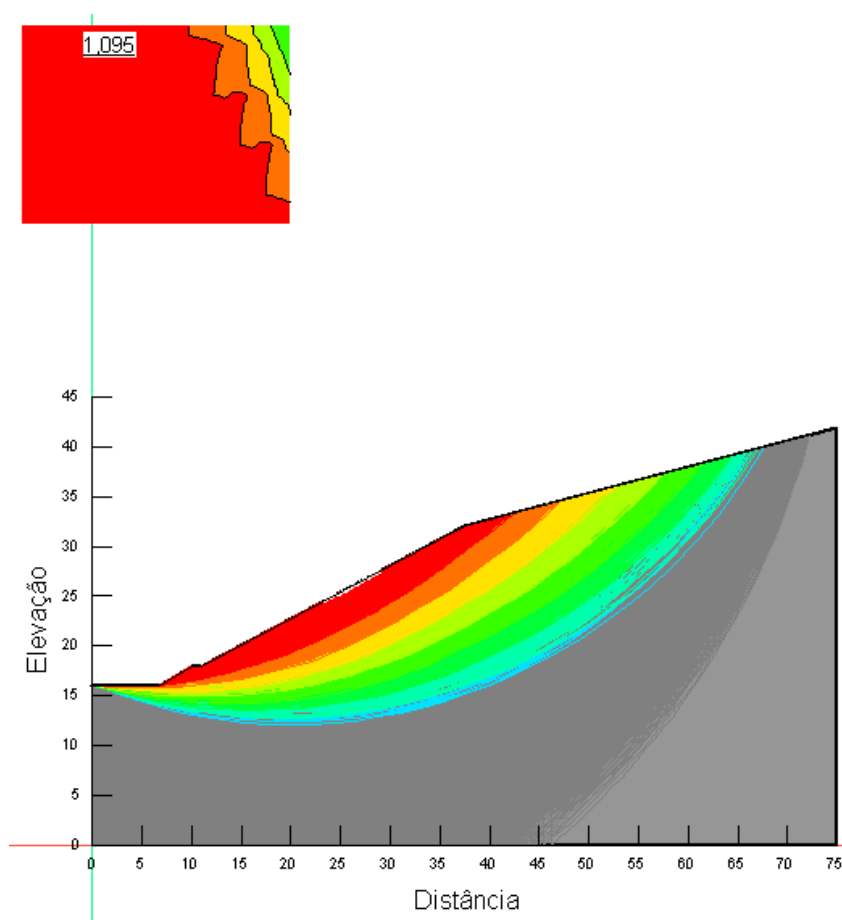
Figura 58 - Análise de estabilidade para condição de umedecimento +4%.



Fonte: autor (2022).



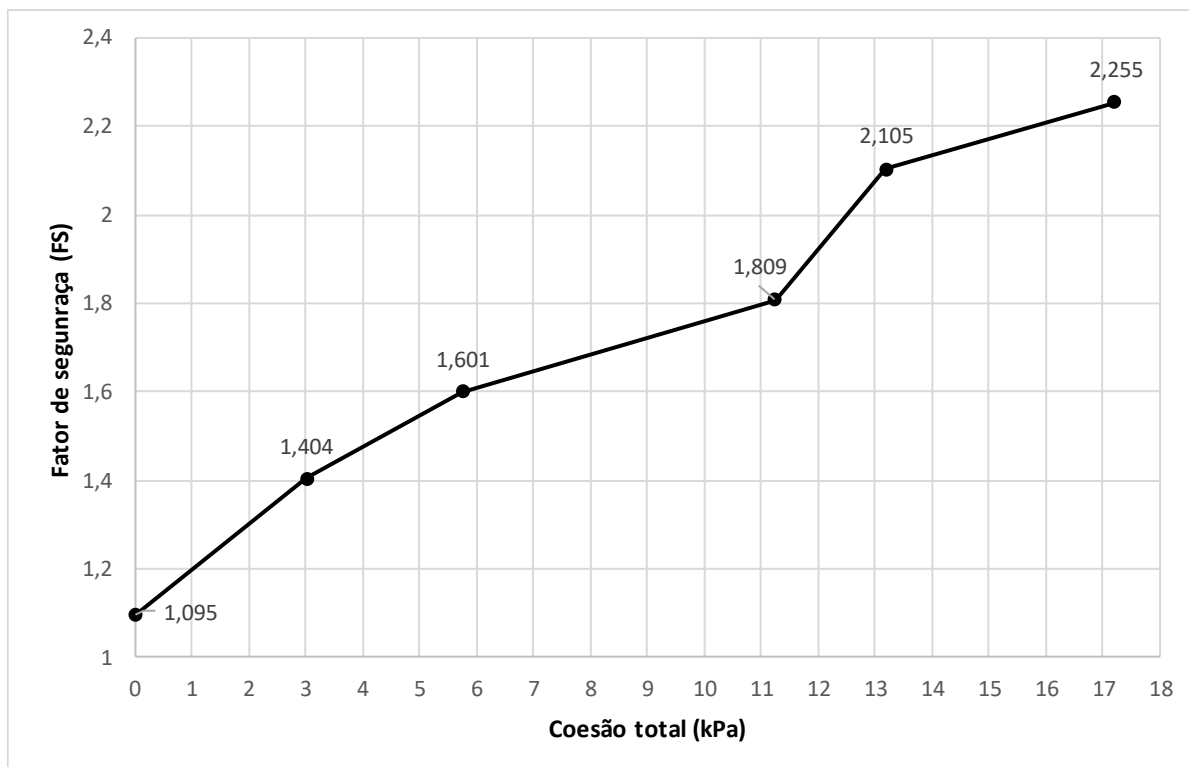
Figura 59 - Análise de estabilidade para a condição crítica (sem coesão).



Fonte: autor (2022).

É possível notar que as condições de umedecimento +2%, umidade ótima, secagem -2 e -4% satisfazem as condições para um fator de segurança mínimo de 1,5. As condições crítica e de umedecimento +4% obtiveram um fator de segurança menor que 1,5. Esse comportamento já era esperado, pois conforme ocorre um aumento na umidade do material, a parcela de coesão aparente gerada pela sucção se esvai, ocasionando uma redução na resistência ao cisalhamento do talude estudado. O contrário vale para os casos em que ocorre a redução da umidade. Nessa situação, o acréscimo de coesão provocado pela sucção contribui de maneira expressiva para a resistência do material. A variação do fator de segurança em função da coesão total é apresentada na Figura 60.

Figura 60 - Variação do fator de segurança da encosta natural em função da coesão total.



Fonte: autor (2022).

Em relação ao posicionamento da superfície de ruptura, não houve mudança de grande relevância entre as condições analisadas. Para todas as condições, a superfície de ruptura se manteve praticamente a mesma, localizada na parte da encosta com maior inclinação. Diante do exposto, considerar a condição não saturada na análise da estabilidade de encostas e/ou taludes pode ser de grande relevância. Segundo Wolle (2004), as variações nas tensões de sucção que causam deformações em encostas naturais são negligenciadas nesse tipo de análise, quando poderiam representar interessantes indicativos de comportamento das mesmas e até do seu nível de segurança contra a ruptura, nos casos de perda da sucção.

## 5. CONCLUSÕES

A contribuição da sucção sobre a resistência ao cisalhamento da ADF pode ser identificada e mensurada e se mostra relevante, assim como seus efeitos sobre a segurança e estabilidade de um talude constituído por ADF.

A partir do método do papel filtro, foi possível obter os valores de sucção e ajustá-los em uma curva característica unimodal com um único trecho de dessaturação. Constatou-se um comportamento mais suave, com uma curvatura menos acentuada do que as curvas características de solos arenosos usualmente propostas. Não foi possível definir os pontos do valor de entrada de ar, do grau de saturação e sucção residual. Níveis de sucção entre 50 e 60 kPa foram medidos para umidade ótima. Para valores de grau de saturação intermediário, entre 70 e 40%, houve um aumento considerável da sucção, indicando a sensibilidade do material frente às mudanças no grau de saturação. É possível concluir que, para pequenas variações no grau de saturação, a ADF necessita de muita energia (sucção) para remover a água presente na matriz de solo. Não houve grandes aumentos nos valores de sucção entre 40 e 20% de grau de saturação, revelando que a partir desse ponto o material está praticamente seco.

Os ensaios de cisalhamento direto demonstraram que a ADF apresenta picos de resistência que estão relacionados com o comportamento de dilatância das areias densas. A redução no teor de umidade aumenta a resistência ao cisalhamento de pico devido ao acréscimo de coesão aparente gerado pela sucção. À medida que ocorre um aumento no teor de umidade, o acréscimo de resistência gerado pela coesão aparente passa a ser menor, o que ocasiona uma redução na resistência ao cisalhamento de pico. Na condição de pico, o ângulo de atrito interno é pouco afetado com o aumento no teor de umidade, já o intercepto coesivo apresentou uma variação maior. O ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ) e o intercepto coesivo ( $c'$ ) aumentam conforme ocorre redução da umidade, onde em condições de pico o ângulo de atrito interno variou de  $31,537^\circ$  a  $36,431^\circ$  e o intercepto coesivo de 3,015 a 17,217 kPa. Para as condições de pós-pico, o intercepto coesivo é nulo e o ângulo de atrito interno variou de  $26,853^\circ$  a  $30,913^\circ$ . É possível concluir que o ângulo de atrito e a parcela coesiva da ADF apresentam clara redução se o material for submetido a deslocamentos que levem a uma condição de pós-pico.

Através das envoltórias apresentadas, verificou-se um aumento da resistência ao cisalhamento não saturada com a elevação da sucção. A envoltória  $\tau$  x ( $\mu_a$ -  $\mu_w$ ) demonstra que ocorre um aumento linear da tensão cisalhante para baixas sucções, e não linear conforme os valores de sucção aumentam. No geral, a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento

crece de maneira não linear. Esse fato indica que o parâmetro  $\varphi^b$  não é constante e varia conforme os níveis de sucção atingidos. A relação coesão total x sucção mostrou que para baixos valores de sucção (130-6650 kPa), o nível de contribuição para a resistência da ADF é expressivo, se tornando constante e pouco relevante para valores mais altos de sucção. Dessa maneira, é possível concluir que a influência da sucção é mais expressiva para baixos valores, devido ao parâmetro  $\varphi^b$  ser mais elevado. Já para altas sucções, o ângulo  $\varphi^b$  tem pouca contribuição na resistência ao cisalhamento não saturada, definido apenas pela parcela de coesão total.

Por meio do modelo de equação proposto para o caso parâmetro  $\varphi^b$  variável, foi possível perceber uma boa correlação entre as variáveis tensão normal e cisalhante. No entanto, revelou-se uma dificuldade de se obter um valor significativo de  $\varphi^b$  através de uma correlação linear. O parâmetro  $\varphi^b$  resultou em um valor extremamente baixo, na ordem de 0,019°. Esse valor de  $\varphi^b$  está relacionado com o fato de a ADF apresentar valores elevados de sucção, bem superiores ao valor de entrada de ar. Por essa razão, a contribuição do parâmetro  $\varphi^b$  na resistência ao cisalhamento tende a ser menos expressiva. A partir da equação de resistência ao cisalhamento não saturada proposta, foi possível desenvolver uma envoltória de resistência nos planos  $\tau$  x  $(\sigma - \mu_a)$  x  $(\mu_a - \mu_w)$ . No entanto, constatou-se uma dificuldade na modelagem de uma superfície curva, resultando em uma envoltória plana.

Os resultados das análises de estabilidade mostraram que à medida que ocorreu a redução no teor de umidade, verificou-se um aumento nos fatores de segurança, variando de 1,095 a 2,255. Somente a condição crítica e de umedecimento +4% não atingiram o valor mínimo de 1,5. Nesses casos, a saturação pode demonstrar uma condição de fragilidade do talude estudado. Percebeu-se ainda que o acréscimo de coesão provocado pela sucção contribui de maneira expressiva para resistência dos solos.

Por fim, é possível concluir que a consideração da resistência não saturada da ADF em aplicações geotécnicas pode ser de grande proveito. Isso se deve ao fato dos expressivos ganhos de resistência e fatores de segurança oriundos do efeito da sucção, principalmente nas condições mais secas. Por esse motivo, em situações práticas deve-se evitar que o material atinja teores de umidade maiores aos da umidade ótima, permitindo a sustentabilidade de fatores de segurança mais elevados possivelmente a menores custos. Para isso, uma sugestão consiste na utilização de geossintéticos (geomanta ou geomembrana) para evitar a infiltração da água no material e impedir a elevação da umidade para valores superiores a umidade ótima. Além disso, os resultados aqui descritos, podem ser aplicados na interpretação de dados de monitoração e

definição das condições de segurança em aterros de armazenamento de ADF ou excetuados com esse material.

### 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade ao estudo desenvolvido no presente trabalho, são sugeridos os seguintes temas:

- Realizar ensaios de cisalhamento direto inundado com a mesma amostra de ADF;
- Verificar o teor de umidade das amostras após os ensaios de cisalhamento direto com o objetivo de confirmar que não há perda de umidade durante o ensaio;
- Realizar ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada para as mesmas condições de umidade;
- Executar o método do papel filtro com mais amostras em diferentes graus de saturação com o objetivo de possuir mais pontos para moldar a curva característica;
- Realizar uma trajetória de umedecimento para a curva característica com o objetivo de verificar o comportamento e a variação dos valores de sucção da ADF quando umedecida;
- Elaborar uma análise de custos comparando medidas de estabilização de taludes que permitem a sustentabilidade dos fatores de segurança mais elevados em função da sucção desenvolvida na ADF.

## REFERÊNCIAS

ABIFA, Anuário, 2012.

ALVES, B. S. Q. **Estudo da viabilidade ambiental da reutilização das areias descartadas de fundição**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

AMARAL; D,G; SILVA, L, V; REIS, A, E. **Análise de regressão linear no Pacote R**. Relatório técnico – Universidade Federal de Minas Gerais (Instituto de Ciências Exatas – Departamento de Estatística). 2009, p. 51.

AMERICAN FOUNDRY SOCIETY. Revista: MODERN CASTING. Schaumbur, 2019. Disponível em: <https://www.qgdigitalpublishing.com/publication/?m=&l=1&i=637245&p=0>. Acesso em: 08 mar. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2487**. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). 10 p. West Conshohocken: ASTM, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3080**. Direct shear test of soils under consolidated drained conditions. 9 p. West Conshohocken: ASTM, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5298-10**. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. 6 p. West Conshohocken: ASTM, 2010.

ARULRAJAH, A.; YAGHOUBI, E.; IMTEAZ, M.; HORPIBULSUK, S. Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and pipe-bedding construction material: Engineering and environmental evaluation. **Sustainable Cities and Society**, Elsevier n. 28 (2017) 343–349.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Produção de fundidos tem novo incremento em 2019**. ABIFA, 2020. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/producao-de-fundidos-tem-novo-incremento-em-2019/>. Acesso em: 08 mar. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**. Resíduos sólidos – classificação. 71 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**. Estabilidade de encostas. 33 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**. Solo - ensaio de compactação. 10 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BENEVELI, R. M. **Estudo dos efeitos de umedecimento e secagem na resistência ao cisalhamento de um solo compactado em laboratório**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro. p. 182, 2002.

- BONET, I. I. **Valorização do resíduo de areia de fundição (RAF): incorporação nas massas asfálticas do tipo CBUQ**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- BONET, I. I. **Valorização do resíduo de areia de fundição (RAF): incorporação nas massas asfálticas do tipo CBUQ**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- CAMPOS, T. M. P. Resistência ao cisalhamento de solos não saturados. *In: 3º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS*. (org). **Solos não saturados**. Rio de Janeiro: CAMPOS, T. M. P. *et al.* 1997. p. 399-417.
- CAMPOS, T. M. P.; MOTTA, M. F. B. Resistência ao cisalhamento de solos não saturados. *In: CARVALHO, J. C. et al.* (org). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 465-497.
- CAREY, P. sand/binders/sand preparation/ & coremaking. **Foundry Management & Technology**, v. 122, n. 1, p. D3–D12, 2002.
- CARNIN, R. L. P. et al. Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado. **Revista Pavimentação**, p. 56-67, out./nov./dez. 2010.
- CASOTTI, B. P.; BEL FILHO, E. D.; CASTRO, P. C.; Indústria de fundição: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 33, p. 121-162, mar. 2011.
- CHEGATTI, S. **Estudo da influência da bentonita presente nas areias descartadas de fundição na contaminação do solo e águas subterrâneas**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- CINTRA, J. C. A. Aplicações da mecânica dos solos não saturados - fundações em solos colapsíveis. *In: DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA*, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo; Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (org). **Solos não saturados**. São Carlos: VILAR, O. M. *et al.* 2004. p. 575-593.
- COUTINHO NETO, B. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) — Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- DA COSTA, C. J. B. **Mistura asfáltica com o uso de areia de fundição de ferro descartada**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.
- FARIAS, M. M. Modelagem constitutiva para o comportamento mecânico de solos não saturados. *In: DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA*. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo; Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (org). **Solos não saturados**. São Carlos: VILAR, O. M. *et al.* 2004. p. 527-542.
- FERREIRA, G.C.; DAITX, E.C. A mineração de areia industrial na Região. Rem: **Revista Escola de Minas**. Ouro Preto. v. 56: p.59-65 p. 2003.

FERREIRA, S. R. M.; OLIVEIRA, J. T. R.; GONZÁLEZ, Y. V. Técnicas de amostragem e preparação de amostras. *In: CARVALHO, J. C. et al. (org). Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 145-179.

FEUERHARMEL, C. **Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da formação da serra geral**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: John Wiley & Sons, 1993.

FREDLUND, D.G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, Canadá, v. 31, nº 3, p. 521–532, 1994.

GERSCOVICH, D. M. S. **Resistência ao cisalhamento**. Trabalho Acadêmico (Graduação em Engenharia Civil) – Apostila da disciplina de Estruturas e Fundações, Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

GERSCOVICH, D.M.S.; SAYÃO, A.S.F.J. Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soils from Brazil. *In: Third International Conference on Unsaturated Soils*. Recife, **Anais...**, v. 1, p. 295-300, 2002.

GERSCOVICH, D.M.S; Equações para modelagem da curva característica aplicadas a solos brasileiros. *In: 4º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS*. Porto Alegre, **Anais...**, v. 1, p. 76-92, 2001.

GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. A curva de retenção de água de materiais porosos. *In: CARVALHO, J. C. et al. (org). Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 205-229.

HEIDEMANN, M; NIERWINSKY, P, H; HASTENPFLUG, D; BARRA, S, B; PEREZ, G, Y. Geotechnical behavior of a compacted waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, Elsevier, n. 227, jan. 2021.

JAVED, S. LOVELL, C.; WOOD, L. **Waste foundry sand in asphalt concrete**. 1994.

KLINSKY, L. M. G. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição residual em camadas de pavimentos**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013

KÜHN, V.O. **Resistência ao cisalhamento de um solo tropical não saturado considerando altas succões**. 2014. Dissertação (Programa de pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil – Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO.

LEONG, E, C; HE, L; RAHARDJO, H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. **Geotechnical Testing Journal**, v. 25, nº 3, p. 321-332, 2002.



MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos. In: 3º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS. (org). **Solos não saturados**. Rio de Janeiro: CAMPOS, T. M. P. *et al.* 1997. p. 373-398.

MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N. Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção. In: CARVALHO, J. C. *et al.* (org). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 231-256.

MENDES, R. M. **Estudo das propriedades geotécnicas de solos residuais não saturados de Ubatuba (SP)**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

OLIVEIRA, O. M. **Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

QUISSINI, C. S. **Estudo da aplicação de areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos**. 2009, 84f. Dissertação (Programa de pós-graduação em Materiais – Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS.

ROMANUS, A. Areia de moldagem a verde. Apostila do curso, v.1. 1991.

ROSSETTO, T.S. **Caracterização de areias descartadas de fundição com diferentes teores de bentonita**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental), Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

SIDDIQUE, R.; KAUR, G.; RAJOR, A. Waste foundry sand and its leachate characteristics. Resources, **Conservation and Recycling**, Elsevier, n. 54, p. 1027– 1036, abr. 2010.

SOLEIMANBEIGI, A.; EDIL, T. B. Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill. **Geotech Geoenvironmental Eng**, n. 141, p. 1–14, jan. 2015.

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G. PUF AHL, D.E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. **Géotechnique**, v.49(2), p. 143-159, 1999.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUF AHL, D.E.; CLIFTON, A.W. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. **Canadian Geotechnical Journal**, Canadá, v. 33, n° 3, p. 379–392, 1996.

VIVIAN, J. B. **Utilização do método do papel filtro para a determinação das curvas características de um solo coluvionar não saturado contaminado com óleo diesel**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

WEBER, R. C. **Avaliação das trajetórias de umedecimento e secagem na deformabilidade elástica de solos compactados**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Geotecnia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

WINKLER, E.S.; BOL'SHAKOV, A.A. Characterization of foundry sand waste. Chelsea: University Of Massachusetts, 2000. 71 p. (Technical Report # 31).

WOLLE, C. M. Algumas considerações sobre a utilização dos novos conceitos de comportamento dos solos não saturados em projetos de engenharia. *In*: DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo; Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (org). **Solos não saturados**. São Carlos: VILAR, O. M. *et al.* 2004. p. 635-641.

WROTH, C. P.; Houlsby, G.T. Soil mechanics – Property characterization and analysis procedures. *In*: **Proceedings** of 11th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1985, San Francisco. Rotterdam: AA Balkema, p. 1-55, 1985.

YAGHOUBI, E. et al. Shear strength properties and stress-strain behavior of waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, Elsevier. n. 249, p. 1-8, mar. 2020.

YIN, J; SOLEIMANBEIGI, A; LIKOS, J, W; EDIL, B, T. Compression Behavior of Foundry Sands. *In*: **Proceedings** of GEOTECHNICAL AND STRUCTURAL CONGRESS, 2016, Phoenix. Phoenix: CHANDRAN, C. Y.; HOIT, M. I, p. 1392-1403, 2016.