



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

CÍNTIA LOPES DE CASTRO

**COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO DE SOLOS REFORÇADOS COM
FIBRAS CONSIDERANDO A CONDIÇÃO NÃO SATURADA**

FORTALEZA

2020

CÍNTIA LOPES DE CASTRO

COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS
CONSIDERANDO A CONDIÇÃO NÃO SATURADA

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

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar

FORTALEZA

2020

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

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

- C35c Castro, Cíntia Lopes de.
Comportamento Hidromecânico de Solos Reforçados com Fibras Considerando a Condição Não Saturada /
Cíntia Lopes de Castro. – 2020.
120 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.
Coorientação: Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar .
1. Solo reforçado. 2. Ensaio do papel filtro. 3. Curva de retenção. 4. Sucção. I. Título.

CDD 624.15

CÍNTIA LOPES DE CASTRO

COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS
CONSIDERANDO A CONDIÇÃO NÃO SATURADA

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

Aprovada em: 11/05/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar (Coorientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho (Examinador interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Michéle Dal Toé Casagrande (Examinador externo)
Universidade de Brasília (UnB)

À minha mãe, por ser minha inspiração e meu porto seguro.

AGRADECIMENTOS

Principalmente, agradeço à Deus, pelo dom da vida e pela saúde que me mantém firme na jornada.

Aos meus pais Célia Maria Lopes de Castro e Francisco Adriano de Castro, por serem a base da minha vida e minha motivação para continuar na busca da realização dos nossos sonhos.

Aos meus irmãos Letícia Lopes de Castro e Lucas Lopes de Castro, por serem meus companheiros fiéis de todas as horas.

À minha família, de modo geral, agradeço pelo amor incondicional, pelo apoio nas minhas escolhas (mesmo sem entender muito bem) e no amparo nos momentos de dificuldade.

Ao Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares, agradeço a excelente orientação, paciência e grandiosa contribuição na elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar, agradeço pelas sugestões iniciais para o tema da pesquisa e pela parceria como colega de trabalho na minha passagem como professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Espero voltar em breve!

À empresa MACAFERRI BRASIL LTDA por doar gentilmente as fibras utilizadas na pesquisa e por apoiar tantas outras pesquisas pelo Brasil. Minha gratidão!

Aos meus professores do programa de pós-graduação, pela contribuição na minha formação profissional e ensinamentos que vou levar para toda vida.

Aos professores participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Francisco Chagas e Prof. Dra. Michéle Casagrande, pelo tempo dedicado a avaliação deste trabalho, pelas colaborações e sugestões.

Ao laboratório de mecânica dos solos e pavimentação da Universidade Federal do Ceará (UFC), por todo apoio na realização dos ensaios. Em especial, Roberto, Rosiel, Ana, Anselmo e Francisco.

À Fabiola, pela generosa ajuda com o equipamento dos ensaios de compressão triaxial. Meu muito obrigada!

Aos bolsistas do Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GPGE) do IFCE, pela ajuda nos ensaios iniciais de caracterização dos solos.

Ao meu grande amigo Átila Alves Pinto, pessoa incrível que tive o presente de conhecer na graduação, que acompanhou de perto todos os momentos de luta e de glória do mestrado. Agradeço o companheirismo, lealdade, amizade, incentivo e carinho. Que a nossa amizade permaneça forte e perdure para toda a vida.

Agradeço aos amigos, que conquistei ao longo dos vinte e oito meses de mestrado, em especial, Natália Canuto, Joyce Pascoal, Paulo Rossy, Marllon Vieira e Yuri Costa.

À minha amiga Katia Pires, pela amizade e companheirismo, por me incentivar e ajudar em tudo que preciso. Por me salvar e acolher nos momentos de ansiedade e tristeza.

Aos queridos amigos que a residência universitária me deu Mayara Rodrigues, Manuel Alves, Ezequiel Marinho, Jeymyson Alves, Matheus Roque, Washignton Roque, Sabrina Matias, Ana Nery, Maria Evaneide e Adenilson Rocha pelos momentos de descontração e alegria em meio às dificuldades de morar longe da família. Alguns que hoje não tenho contato, mas estão guardados com carinho no coração.

Aos meus amigos queridos, que encontrei durante as estradas da vida Jardiana Galvão, Rosimeire Uchoa, Jaqueline Lima, Daniel Carlos, Marcela Medeiros, Nízia Rodrigues, Marcela Rocha, Gerbson Queiroz, Debora Suelda, Claudenia Lemos, Zayara Americo, Luana Alves, Cristina Nobre, Cleidiane Barbosa e tantos outros.

Obrigada a todos, que contribuíram de alguma forma para que eu chegasse até aqui. Sou imensamente grata.

“Transportai um punhado de terra todos os dias e fareis uma montanha.” (Confúcio)

RESUMO

O reforço do solo pela adição de fibras de polipropileno pode ser uma boa alternativa para solucionar problemas geotécnicos, pois tende a aumentar a resistência do solo em relação a condição natural. No entanto, na literatura há poucos estudos que investiguem o comportamento dos solos reforçados com fibras na condição não saturada. Em vista disso, o presente trabalho tem por objetivo estudar o comportamento tensão-deformação de misturas solo-fibras, considerando a condição não saturada. Como etapa desta pesquisa, um programa experimental foi desenvolvido em laboratório, que consistiu na realização dos ensaios de caracterização geotécnica e mineralógica do solo e de misturas solo-fibras, além da caracterização hidromecânica. Foram utilizadas fibras de polipropileno com comprimento de 6mm e 18 μ m de diâmetro. A condição não saturada foi analisada através das curvas de retenção do solo e das misturas solo-fibra obtidas com a realização de ensaio de papel filtro, para teores de fibras de 0, 0,25, 0,5, 0,75, 1,0 e 1,25% em relação ao peso seco do solo, a fim de obter a relação da sucção com a umidade do solo. Os resultados permitiram identificar a transição do formato das curvas de retenção de unimodal para o bimodal, provocada pela inclusão das fibras de polipropileno, sugerindo a modificação das características hidromecânicas com a adição do reforço. Além disso, foi feita uma análise comparativa da tensão-deformação-resistência nas condições saturada e não saturada, com a realização de ensaios triaxiais CID para teores de fibras de 0, 0,25, 0,75 e 1,25% em relação ao peso seco do solo. Os resultados dos ensaios de compressão triaxial na condição saturada demonstraram um aumento da resistência com a inclusão das fibras, principalmente para teores de fibras mais elevados. Com relação aos resultados na condição não saturada, verificou-se que a resistência não saturada do solo reforçado é alterada, observando-se um aumento do intercepto coesivo com a adição de fibras ao solo e com a diminuição da saturação.

Palavras chave: Solo reforçado, Ensaio do papel filtro, Curva de retenção, Sucção.

ABSTRACT

Soil reinforcement by adding polypropylene fibers can be a good alternative to solve geotechnical problems, as it tends to increase soil resistance in relation to natural condition. However, in the literature there are few studies that investigate the behavior of soils reinforced with fibers in the unsaturated condition. In view of this, the present work aims to study the stress-deformation behavior of soil-fiber mixtures, considering the unsaturated condition. As a stage of this research, an experimental program was developed in the laboratory, which consisted of the performance of geotechnical and mineralogical characterization tests of soil and soil-fiber mixtures, in addition to hydromechanical characterization. Polypropylene fibers with a length of 6mm and 18 μ m in diameter were used. The unsaturated condition was analyzed through soil retention curves and soil-fiber mixtures obtained by performing filter paper tests for fiber contents of 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 and 1.25% in relation to dry soil weight, in order to obtain the relationship of suction with soil moisture. The results allowed identifying the transition from the format of the unimodal to bimodal retention curves, caused by the inclusion of polypropylene fibers, suggesting the modification of the hydromechanical characteristics with the addition of reinforcement. In addition, a comparative analysis of the stress-deformation-resistance was performed in saturated and unsaturated conditions, with the performance of triaxial CID assays for fiber contents of 0, 0.25, 0.75 and 1.25% in relation to dry soil weight. The results of triaxial compression assays in the saturated condition demonstrated an increase in resistance with the inclusion of fibers, mainly for higher fiber contents. Regarding the results in the unsaturated condition, it was verified that the unsaturated resistance of the reinforced soil is altered, observing an increase in the cohesive intercept with the addition of fibers to the soil and with the decrease in saturation.

Keywords: Reinforced soil, Filter paper test, retention curve, suction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elemento de um solo não saturado com fase contínua de ar	30
Figura 2 - Tipos de fluxo de solo para papel filtro	33
Figura 3 - Curvas de calibração para os papéis filtro Whatman n°. 42 e Schleicher & Schuell n°. 589	34
Figura 4 - Curva de retenção típica do solo	36
Figura 5 - Divisão da curva de retenção em zonas	37
Figura 6 - Alguns formatos típicos de curvas de retenção	38
Figura 7 - Estrutura dos solos com distribuição dos poros unimodais e bimodais.....	39
Figura 8 - Efeito da histerese na curva de retenção	40
Figura 9 - Envoltória de resistência de solos não saturados	42
Figura 10 - Características da Curva de Retenção.....	42
Figura 11 - Determinação dos parâmetros utilizados para calcular os valores de a , n e m	43
Figura 12 - Influência do parâmetro a na curva de retenção	44
Figura 13 - Influência do parâmetro n na curva de retenção.....	44
Figura 14 - Influência do parâmetro m na curva de retenção	44
Figura 15 - Envoltória de resistência de solos não saturados	46
Figura 16 - Envoltória possível de resistência de um solo residual não saturado	46
Figura 17 - Fluxograma do programa experimental.....	48
Figura 18 - (a) Área delimitada para coleta e (b) localização do campo experimental da UFC	50
Figura 19 - Camada superficial do solo descartada.....	50
Figura 20 - Fibras de polipropileno	51
Figura 21 - (a) Molde de madeira utilizado na compactação dos corpos de prova e (b) Saturação dos corpos de prova por capilaridade	56
Figura 22 - Corpos de prova posicionados para a secagem.....	56
Figura 23 - Detalhes do procedimento do ensaio do papel filtro.....	57
Figura 24 - (a) Pesagem dos recipientes na balança de precisão de 0,0001 g e (b) Secagem do papel filtro em estufa	58
Figura 25 - Microscópio eletrônico de varredura com detector de EDS	59
Figura 26 - Mesa de tensão utilizada no ensaio.....	60
Figura 27 - Equipamento empregado nos ensaios triaxiais	62
Figura 28 - Secagem dos corpos de prova até umidade pré-definida.....	63
Figura 29 - Curva granulométrica	64

Figura 30 - Curvas de compactação solo natural e solo-fibras.....	65
Figura 31 - Resultado do ensaio de difração de raio-X.....	66
Figura 32 - Amostras de solo antes e depois da incineração em mufla.....	67
Figura 33 - Curva de Retenção – Solo Natural.....	69
Figura 34 - Pontos experimentais obtidos pelo ensaio do papel filtro das amostras solo-fibra	70
Figura 35 - Pontos experimentais obtidos pelo ensaio do papel filtro das amostras solo-fibra	71
Figura 36 - Curva de Retenção – SF025.....	71
Figura 37 - Curva de Retenção – SF050.....	72
Figura 38 - Curva de Retenção – SF075.....	72
Figura 39 - Curva de Retenção – SF100.....	73
Figura 40 - Curva de Retenção – SF125.....	73
Figura 41 - Curvas de retenção solo-fibra pelo método Fredlund e Xing (1994)	74
Figura 42 - Curvas de retenção solo-fibra pelo método Gitirana e Fredlund (2004)	75
Figura 43 - Curva de retenção do solo natural e solo-fibras pelo método Fredlund e Xing (1994) e Gitirana e Fredlund (2004).....	76
Figura 44 - Curva de retenção solo natural e solo-fibras pelo método Gitirana e Fredlund (2004)	77
Figura 45 - MEV (x120) Solo Natural.....	78
Figura 46 - MEV (x120) (a) SF050, (b) SF075, (c) SF100, (d) SF125.....	79
Figura 47 - Resultado do ensaio de macro e microporosidade.....	80
Figura 48 - Curvas tensão-deformação axial (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125	81
Figura 49 - Curvas variação volumétrica-deformação axial (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e ..	82
Figura 50 - Curvas Tensão-Deformação Axial para amostras (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125 na umidade ótima	83
Figura 51 - Curvas Tensão-Deformação Axial para amostras (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125 abaixo da umidade ótima.....	84
Figura 52 - Efeito da Variação do Teor de Fibra (a) $\sigma_3 = 50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3 = 200\text{kPa}$	87
Figura 53 - Corpos de prova obtidos dos ensaios de compressão triaxial não saturado na umidade ótima após a fase de cisalhamento.....	88
Figura 54 - Curvas Tensão-Deformação Axial para amostras na umidade ótima por tensão confinante (a) $\sigma_3=50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3=100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3=200\text{kPa}$	89
Figura 55 - Corpos de prova obtidos dos ensaios de compressão triaxial não saturado abaixo da umidade ótima após a fase de cisalhamento.....	90

Figura 56 - Curvas Tensão-Deformação Axial para amostras abaixo da umidade ótima por tensão confinante (a) $\sigma_3=50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3=100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3=200\text{kPa}$	91
Figura 57 - Efeito da Variação da condição de saturação do solo natural por tensão confinante (a) $\sigma_3 = 50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3 = 200\text{kPa}$	94
Figura 58 - Efeito da Variação da condição de saturação da amostra SF025 por tensão confinante (a) $\sigma_3 = 50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3 = 200\text{kPa}$	95
Figura 59 - Efeito da Variação da condição de saturação da amostra SF075 por tensão confinante (a) $\sigma_3 = 50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3 = 200\text{kPa}$	96
Figura 60 - Efeito da Variação da condição de saturação da amostra SF125 por tensão confinante (a) $\sigma_3 = 50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3 = 200\text{kPa}$	97
Figura 61 - Trajetória de tensões - Saturados (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125.....	98
Figura 62 - Trajetórias de tensões - Não saturados na umidade ótima (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125.....	99
Figura 63 - Trajetórias de tensões - Não saturados abaixo da umidade ótima (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125	99
Figura 64 - Módulos de deformação secante a 0,5% para condição (a) Saturada, (b) Não saturado na umidade ótima e (c) Não saturado abaixo da umidade ótima.....	101
Figura 65 - Relação entre o teor de fibra e intercepto coesivo	103
Figura 66 - Relação entre o teor de fibra e ângulo de atrito interno.....	104
Figura 67 - Envoltórias de resistência das amostras (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125 nas condições de saturação estudadas	105
Figura 68 - Curvas de retenção e umidades dos ensaios triaxiais	106
Figura 69 - Envoltórias de ruptura não saturada.....	107
Figura 70 - Envoltória de ruptura não saturada - intervalo entre 0 e 15kPa.....	107
Figura 71 - Envoltória de ruptura não saturada - intervalo entre 15 e 8000kPa.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos diretos e indiretos de medida de sucção	32
Tabela 2 - Tempo de equilíbrio para medição de sucção total	34
Tabela 3 - Curvas de calibração para papel filtro Whatman nº. 42	35
Tabela 4 - Equações de ajuste para a curva de retenção.....	41
Tabela 5 - Laboratórios parceiros na realização dos ensaios desta pesquisa.....	49
Tabela 6 - Propriedades das fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa	51
Tabela 7 - Nomenclatura das amostras.....	52
Tabela 8 - Ensaios triaxiais realizados no programa experimental	61
Tabela 9 - Umidades dos ensaios triaxiais não saturados abaixo da umidade ótima	63
Tabela 10 - Classificação do solo	65
Tabela 11 - Parâmetros adotadas das curvas de compactação.....	66
Tabela 12 - Composição em porcentagem de massa dos óxidos presentes no solo analisado .	68
Tabela 13 - Parâmetros de ajuste da equação de Fredlund e Xing (1994) das amostras solo-fibra	74
Tabela 14 - Valores de sucção da entrada de ar e residual dos macroporos e microporos.....	75
Tabela 15 - Parâmetros de ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) das amostras solo-fibra	76
Tabela 16 - Módulo de deformação secante (0,5%) - MPa	100
Tabela 17 - Quadro Resumo dos Parâmetros de Resistência	102
Tabela 18 - Sucções encontradas pelas curvas de retenção.....	106
Tabela 19 - Parâmetro de resistência não saturado (ϕ^b) por intervalos de sucção.....	108

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Parâmetro de ajuste da curva de retenção
A ₃	Areia fina
c'	Intercepto coesivo
E _s	Módulo de deformação secante
G _s	Densidade real dos grãos
m	Parâmetro de ajuste da curva de retenção
n	Parâmetro de ajuste da curva de retenção
SM-SP	Areia siltosa mal graduada
S _r	Grau de saturação residual
S _{res1}	Primeiro grau de saturação residual (macroporos)
S _{res2}	Segundo grau de saturação residual (microporos)
u_a	Poropressão do ar
u_w	Poropressão da água
λ	Parâmetro de ajuste da curva de retenção
σ	Tensão total
σ'	Tensão efetiva
χ	Parâmetro de Bishop função do grau de saturação do solo
Ψ	Sucção total
Ψ_b	Valor de sucção de entrada de ar
Ψ_{b1}	Primeiro valor de sucção de entrada de ar (macroporos)
Ψ_{b2}	Segundo valor de sucção de entrada de ar (microporos)
Ψ_{res}	Sucção residual
θ_r	Teor de umidade volumétrica residual
θ_s	Teor de umidade volumétrica saturada
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
ϕ^b	Parâmetro que quantifica o acréscimo de resistência relativo ao aumento de sucção.
γ	Peso específico aparente do solo
γ_d	Peso específico aparente do solo
π	Sucção osmótica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo geral	20
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>20</i>
1.2	Estrutura da dissertação.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Solos reforçados com fibras	22
<i>2.1.1</i>	<i>Tipos de fibras utilizadas como reforço</i>	<i>22</i>
<i>2.1.1.1</i>	<i>Fibras poliméricas.....</i>	<i>23</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Interação solo-fibra – Estudos experimentais</i>	<i>25</i>
2.2	Solos Não Saturados	29
<i>2.2.1</i>	<i>Sucção Total, Matriz e Osmótica</i>	<i>30</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Técnicas de Medida de Sucção.....</i>	<i>31</i>
<i>2.1.2.1</i>	<i>Ensaio do Papel Filtro.....</i>	<i>32</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Curva de retenção de água no solo</i>	<i>35</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Principais modelos de ajuste da curva de retenção</i>	<i>40</i>
2.3	Resistência dos solos não saturados	45
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	48
3.1	Campo experimental	49
3.2	Obtenção das amostras	50
3.3	Fibras de polipropileno utilizadas.....	51
3.4	Preparação das amostras	52
3.5	Ensaio de Caracterização Geotécnica	53
<i>3.5.1</i>	<i>Análise granulométrica</i>	<i>53</i>
<i>3.5.2</i>	<i>Limites de consistência.....</i>	<i>53</i>
<i>3.5.3</i>	<i>Densidade real dos grãos.....</i>	<i>53</i>
<i>3.5.4</i>	<i>Ensaio de compactação</i>	<i>53</i>
3.6	Ensaio de Caracterização Mineralógica	54

3.6.1	<i>Difração de Raio X</i>	54
3.6.2	<i>Teor de Matéria Orgânica</i>	54
3.6.3	<i>Fluorescência de Raio X</i>	55
3.7	Ensaio de Caracterização Hidromecânica	55
3.7.1	<i>Ensaio do papel filtro</i>	55
3.7.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	59
3.7.3	<i>Ensaio de macro e microporosidade</i>	59
3.7.4	<i>Ensaio de compressão triaxial saturado e não saturado</i>	60
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	64
4.1	Ensaio de Caracterização Geotécnica	64
4.1.1	<i>Análise granulométrica</i>	64
4.1.2	<i>Limites de consistência</i>	65
4.1.3	<i>Densidade real dos grãos</i>	65
4.1.4	<i>Ensaio de compactação</i>	65
4.2	Ensaio de Caracterização Mineralógica	66
4.2.1	<i>Difração de Raio X</i>	66
4.2.2	<i>Teor de Matéria Orgânica</i>	67
4.2.3	<i>Fluorescência de Raio X</i>	67
4.3	Ensaio de Caracterização Hidromecânica	68
4.3.1	<i>Curvas de retenção do solo natural e das misturas de solo-fibra</i>	68
4.3.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	78
4.3.3	<i>Análise da macroporosidade e microporosidade</i>	80
4.3.4	<i>Comportamento das curvas tensão-deformação</i>	81
4.3.4.1	<i>Curvas tensão versus deformação para condição saturada</i>	81
4.3.4.2	<i>Curvas tensão versus deformação para condição não saturada na umidade ótima</i> ...	83
4.3.4.3	<i>Curvas tensão versus deformação para condição não saturada abaixo da umidade ótima</i>	84
4.3.4.4	<i>Influência da variação do teor de fibras na condição saturada</i>	85

4.3.4.5	<i>Influência da variação do teor de fibras na condição não saturada na umidade ótima</i>	88
4.3.4.6	<i>Influência da variação do teor de fibras na condição não saturada abaixo da umidade ótima</i>	90
4.3.4.7	<i>Influência da variação da condição de saturação no comportamento das curvas tensão versus deformação</i>	92
4.3.5	<i>Trajetórias de tensões</i>	98
4.3.6	<i>Análise da rigidez inicial</i>	100
4.3.7	<i>Envoltórias e Parâmetros de Resistência</i>	102
4.3.8	<i>Parâmetros de resistência não saturada</i>	106
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
5.1	Conclusões	110
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	114
	REFERÊNCIAS	115

1 INTRODUÇÃO

A busca por alternativas cada vez mais eficientes e econômicas é comum no âmbito da engenharia geotécnica. O solo por ser um material com grande disponibilidade e baixo custo se torna vastamente empregado e na maioria dos casos é o responsável por suportar todas as cargas das edificações.

No entanto, o solo é um material heterogêneo, de comportamento complexo e variável, podendo apresentar propriedades que não se enquadram às características e às necessidades de projeto. Dessa forma, alternativas para adequar o solo aos requisitos de projeto são necessárias. Estas alternativas podem abranger desde a alteração de suas propriedades, com a possível inclusão de algum agente estabilizante ou com a inclusão de elementos resistentes (geotêxteis, fibras, grelhas, tiras), até a remoção completa e substituição do material.

A utilização do reforço de solos com fibras se torna conveniente principalmente em casos onde se tem solos com baixa capacidade de suporte, destacando-se alguns exemplos de aplicação como: reforço de solos sob fundações superficiais, coberturas de aterros sanitários, pavimentação, estruturas de contenção e estabilização de solos.

A técnica de reforçar solos com fibras tem demonstrado eficiência, quando estas são distribuídas aleatoriamente no solo, devido à melhoria nas propriedades mecânicas que é capaz de conferir a estes materiais, principalmente aumentos da resistência, da ductilidade e da tenacidade, e a diminuição da queda de resistência pós-pico (FEUERHARMEL, 2000, CASAGRANDE, 2001, FESTUGATO, 2008).

Apesar do reforço do solo com fibras se apresentar como uma boa alternativa para solucionar problemas geotécnicos, estudos que investiguem o comportamento dos solos reforçados com fibras na condição não saturada não são muito recorrentes. O estudo da condição não saturada do solo é importante no Brasil, devido à ocorrência de regiões de clima tropical e semiárido, onde há a variação do teor de umidade no solo, ocasionada por períodos de chuva e estiagem, acarretando solos, na maior parte do tempo, em estado não saturado.

Nesse contexto, os solos reforçados com fibras de polipropileno quando são empregados como aterros sobre solos moles, taludes, coberturas de aterros sanitários ou em fundações superficiais, estão submetidos a variações de umidade que podem ocasionar alterações no comportamento hidromecânico do solo. Dessa forma, estudos que considerem a influência da sucção das misturas solo-fibra sob o ponto de vista geotécnico são necessários e importantes para a compreensão do comportamento da estrutura durante sua vida útil.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em estudar o comportamento hidráulico e mecânico de camadas de um solo reforçado com a adição de fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente, considerando a condição não saturada.

1.1.1 *Objetivos específicos*

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho foram contemplados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar caracterização geotécnica e mineralógica um solo predominantemente arenoso, assim como obter parâmetros de compactação do solo e das misturas solo-fibra;
- Avaliar a influência da adição de fibras de polipropileno, com comprimento de 6mm e teores de fibras de 0; 0,25; 0,5. 0,75; 1; 1,25% em relação ao peso de solo seco, nas curvas de retenção de água do solo natural e das misturas de solo-fibra;
- Analisar a influência da incorporação das fibras na macroporosidade e microporosidade dos solos reforçados com fibras de polipropileno;
- Analisar a rigidez inicial do solo natural e do solo reforçado;
- Determinar os parâmetros de resistência saturados e não saturados do solo natural e do solo-fibra e compará-los, para teores de fibras de 0; 0,25; 0,75 e 1,25% em relação ao peso de solo seco, considerando a deformação axial máxima de 10%;
- Avaliar a influência da sucção no solo reforçado com fibras de polipropileno e comparar com o solo natural.

1.2 Estrutura da dissertação

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, incluindo esta introdução. Segue uma breve apresentação sobre cada um deles.

O capítulo um apresenta a contextualização, em linhas gerais, do assunto da pesquisa e os objetivos gerais e específicos. Além de conter a referida descrição dos capítulos.

No segundo capítulo encontra-se a revisão bibliográfica para o embasamento teórico da pesquisa, assim como deixam claros os conceitos e abordagens de vários pesquisadores a respeito do assunto em questão.

No terceiro capítulo trata da metodologia que apresenta o programa experimental utilizado para o desenvolvimento da pesquisa, assim como as principais etapas dos métodos de ensaios empregados baseados nas normas vigentes.

O capítulo quatro consiste na apresentação, análise e interpretação dos resultados, buscando a compreensão do comportamento tensão *versus* deformação da mistura solo-fibra sob a influência das condições de saturação estudadas.

Por último, o quinto capítulo é destinado às conclusões do trabalho, onde estão sumarizadas as principais informações coletadas durante a pesquisa, e apresentando-se sugestões para as próximas pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os assuntos mais relevantes que fundamentarão o presente trabalho, que englobam conceitos sobre solos reforçados com fibras e solos não saturados.

2.1 Solos reforçados com fibras

A técnica de reforçar solos é cada vez mais recorrente no mercado e vem ganhando interesse no âmbito científico. O processo de reforço de solos consiste em introduzir no maciço terroso elementos que resistam a solicitações de tração. Como exemplo de tais elementos utilizados para reforço de solos podem-se citar: fitas metálicas, mantas, geotêxteis, geogrelhas, malhas de aço e fibras.

O reforço de solos com fibras não é uma técnica recente. Os incas já a utilizavam na construção de estradas para templos religiosos, empregando pelos de vicunha misturados a solo local. Algumas dessas estradas resistiram até os dias de hoje. No entanto, a utilização da inclusão de fibras em obras geotécnicas ainda pode ser considerada pequena.

Um dos fatores que pode limitar a utilização de misturas de solo e fibras em obras geotécnicas é a obtenção de uma mistura homogênea em campo, que é fundamental para garantir um bom desempenho do solo reforçado. Desse modo, deve haver um cuidado maior na homogeneização dos materiais, que pode ser realizada com utilização de equipamentos específicos para se obter a uniformidade na distribuição das fibras e ainda evitar predominância de uma orientação específica das fibras no solo, que podem comprometer seriamente o comportamento mecânico da mistura (PALMEIRA, 2018).

2.1.1 Tipos de fibras utilizadas como reforço

Há uma grande variedade de fibras utilizadas em reforços de solos, desde as fabricadas na indústria quanto aquelas utilizadas de forma alternativa. O comportamento e as características de cada uma delas estão intimamente ligados ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação. Ainda, a utilização adequada em obras geotécnicas dependerá necessariamente das características da matriz de solo a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante.

Sendo assim, a compreensão do mecanismo de interação solo-fibra e da parcela de contribuição de cada uma das fases, no comportamento do material como um todo, é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregada.

As fibras podem ser classificadas em quatro grandes classes: naturais, minerais e metálicas e as poliméricas. As fibras naturais são na sua maioria de origem vegetal. Segundo Hannant (1994), as fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser de bambu, juta, capim elefante, coco, sisal, malva, piaçava, cana-de-açúcar e linho. Algumas destas fibras podem atingir grandes resistências. As fibras do bambu, por exemplo, atingem normalmente resistências acima de 100 MPa, com módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa (HANNANT, 1994).

Dentre as fibras minerais pode-se citar: (a) as fibras de carbono: que são baseadas na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na leveza destes, as fibras de carbono apresentam resistência à tração de aproximadamente 2400 GPa e módulo de elasticidade em torno de 420 GPa (TAYLOR, 1994); (b) as fibras de amianto: apresentam resistência à tração em torno de 1000Mpa e módulo de elasticidade aproximadamente 160 GPa e apresenta uma ótima aderência com uma matriz composta por cimento; e (c) fibras de vidro: são geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos. O diâmetro dos filamentos individuais é geralmente da ordem de 10 μm (TAYLOR, 1994).

As fibras metálicas mais comuns são as de aço, com resistência à tração de aproximadamente 1100 MPa e seu módulo de elasticidade de 200 GPa. Dependendo do meio onde estão inseridas, apresentam problemas relacionados com corrosão. Seu formato pode ser bastante variável, de forma a aumentar sua aderência com a matriz (HANNANT, 1994).

A seguir, serão abordadas mais detalhadamente as fibras poliméricas, pois as fibras de polipropileno, material utilizado nesse estudo, se encontram nesta classe de fibras.

2.1.1.1 Fibras poliméricas

De acordo com a estrutura química dos polímeros, as fibras poliméricas podem apresentar diferentes denominações e comportamentos, originando vários tipos de fibras, tais como: fibras de polipropileno, fibras de polietileno, fibras de poliéster e fibras de Poliamida (Kevlar).

a) fibras de polipropileno: Polipropileno é um polímero termoplástico extremamente versátil como formador de fibras, sendo amplamente utilizado em

vários setores da indústria, desde a produção de recipientes, peças automotivas, material de escritório, e claro, na produção de fibras, entre outros. Algumas das principais propriedades das fibras de polipropileno são: alta resistência ao ataque químico e biológico; baixa absorção de umidade; alta resistência à ação dos raios solares (ARAÚJO, 2011).

b) fibras de polietileno: São fibras que possuem um baixo módulo de elasticidade, sendo fracamente aderidas à matriz cimentada e altamente resistentes aos álcalis. Sua durabilidade é alta, mas apresentam maiores deformações de fluência quando comparadas com as fibras de polipropileno. Entretanto, polietileno de alta densidade tem sido desenvolvido para aumentar o módulo de elasticidade e a aderência com a matriz do solo. As fibras de polietileno são encontradas comercialmente na forma de monofilamentos picados ou malhas contínuas (VENDRUSCOLO, 2003).

c) fibras de poliéster: Existe uma variedade de tipos de poliéster, sendo o de uso mais comum o Polietileno Tereftalato (PET), utilizado na indústria de produção de recipientes para produtos alimentícios. As fibras produzidas com este material possuem alta tenacidade, alto módulo de elasticidade e baixa capacidade de absorção de água (ARAÚJO, 2011).

d) fibras de Poliamida (Kevlar): são fibras fortemente orientadas, compostas por poliamidas aromáticas, resistentes a altas temperaturas e cargas. Pelas suas propriedades são usadas em aplicações que exigem resistência a altas temperaturas. Outra categoria dentro do grupo das fibras de poliamida são as para-aramidas, como o Kevlar, possuindo altos valores do módulo de elasticidade e resistência à tração, assim como uma baixa deformação até a ruptura. Este tipo de fibras é utilizado em aplicações que requerem forte absorção de energia, como sistemas de blindagem e reforço de materiais compósitos (ARAÚJO, 2011).

Muitos pesquisadores se dedicaram à investigação da inclusão de diferentes tipos de fibras no solo como reforço, pode-se citar os trabalhos de: Casagrande (2001), Michalowski (2003), Trindade et al. (2006), Consoli et al. (2007), Consoli et al. (2009), Yilmaz (2009), Farloca e Pinto (2011), Ahmad (2010), Rao e Nasr (2011), Park (2011), Chen (2015), Wang (2019) e Carvalho (2019).

2.1.2 Interação solo-fibra – Estudos experimentais

Os mecanismos de interação solo-fibra vão ditar a eficiência da solução do reforço do solo, uma vez que a inclusão das fibras altera a estrutura do solo, dando-lhe características de um novo material. Assim, deve ser avaliado até que ponto o comportamento mecânico do solo reforçado vai ser influenciado com a adição das fibras.

Segundo AI-Refeai (1991), os principais fatores que influenciam o mecanismo de interação solo-fibra incluem densidade do solo, tipo do solo, tamanho de partículas, forma de partícula, propriedades da superfície do reforço, força atuante, rigidez da matriz reforçada, geometria e a orientação das fibras.

Teodoro (1999) estudou o comportamento de dois solos (uma argila siltosa e uma areia siltosa), reforçados com fibras plásticas de polipropileno de diferentes teores e comprimentos. Os resultados mostraram que a resistência do solo arenoso cresceu com o aumento do teor e do comprimento das fibras e o solo argiloso apresentou acréscimo de resistência, com o aumento do teor de fibras que apresentaram comprimentos de até 10mm. As curvas tensão-deformação obtidas dos resultados de ensaios triaxiais, para solos com e sem reforço, tiveram um comportamento similar, com uma resistência de pico definida e pequena redução de queda de tensão pós pico.

Nos estudos de Feuerhermel (2000) analisou-se o comportamento de uma argila caulínica, artificialmente cimentada e não-cimentada, reforçada com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente na massa de solo. Comparando a influência da adição dessas fibras a dois outros solos, um arenoso e outro areno-siltoso, concluiu-se que a adição de fibras de polipropileno provocou reduções no módulo de deformação inicial do solo, sendo que a intensidade das alterações depende do tipo e das características de cada solo. Para misturas não-cimentadas, os solos menos rígidos, argila e areia-siltosa, tiveram os módulos de deformação inicial mais afetados quando comparadas com as misturas dos mesmos solos cimentados. Já para as areias, as reduções do módulo de deformação inicial foram pequenas. Quanto à resistência ao cisalhamento, verificou-se três etapas para o comportamento resistente dos solos não cimentados: (a) uma inicial, controlado pela matriz do solo, (b) uma intermediária, comandada conjuntamente pela matriz e pelos componentes dos reforços, e (c) uma etapa final, controlada exclusivamente pelas fibras. Ademais, as fibras promoveram uma redistribuição de esforços e deformações, modificando a forma como as deformações se distribuem no solo mediante uma solicitação externa.

Segundo Feuerhermel (2000), a forma de ruptura dos solos cimentados é grandemente alterada pela inclusão das fibras de polipropileno, reduzindo sua fragilidade. A amplitude destas alterações provocadas pelas fibras depende fundamentalmente de uma boa adesão solo-fibra, que pode ser atingida pela ação de um agente cimentante, formando uma estrutura cimentada bastante resistente ou por uma combinação apropriada dos fatores comprimento das fibras e tensões efetivas médias normais atuantes. Em outras palavras, pode-se dizer que com a inclusão das fibras o comportamento do material na ruptura, que era frágil, torna-se dúctil.

Casagrande (2001) estudou o comportamento mecânico de camadas de um solo residual areno-siltoso reforçado com a adição de fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente na massa de solo, sob carregamento estático, visando o assentamento de fundações superficiais. O estudo se baseou em uma etapa de laboratório e outra de campo. O programa experimental consistiu na realização de ensaios triaxiais adensados e drenados do solo residual e de misturas solo-fibra, a fim de avaliar o comportamento em termos de tensão-deformação-resistência. Na etapa de campo foram construídos aterros experimentais com camadas de solo residual compactado, e do mesmo reforçado com fibras. Nos modelos experimentais foram executadas provas de carga em placa circular com objetivo de avaliar o comportamento carga x recalque de fundações superficiais. Como resultados, identificou-se que a inclusão de fibras de polipropileno produziu um aumento significativo da capacidade de suporte do solo, além de uma redução considerável dos recalques, quando comparado os comportamentos do solo sem reforço.

Heineck (2002) afirmou existir uma bilinearidade na envoltória de ruptura de uma areia siltosa reforçada com fibras. A parte inicial da envoltória possui um intercepto coesivo quase inexistente, além de um ângulo que ultrapassa o dobro do valor correspondente ao do solo sem reforço. Na segunda parte da envoltória, acima da tensão confinante crítica, naquele estudo foi possível perceber que o ângulo de atrito é similar ao do solo sem reforço, porém, houve um acréscimo razoável do intercepto coesivo.

Vendruscolo (2003) verificou a influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento de um solo arenoso cimentado e não cimentado através de ensaios triaxiais e concluiu que as propriedades mecânicas do compósito dependem fundamentalmente das propriedades da matriz; a porcentagem de cimento e a tensão de confinamento exercem forte influência no comportamento mecânico do material compósito; na qual o efeito da adição de fibras é mais evidente para maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo seu efeito mais pronunciado para materiais compósitos com maiores densidades relativas.

Alguns estudos foram realizados com objetivo de verificar a rigidez dos solos reforçados com fibras de polipropileno através da avaliação do módulo de deformação secante. Montardo (1999), observou que a introdução de fibras de polipropileno não exerce qualquer efeito na rigidez de uma areia e Feuerharmel (2000), verificou que o módulo de deformação secante a 0,1% de deformação axial sofreu uma pequena redução, praticamente insignificante, com a introdução de fibras de polipropileno no arenito, comprovando com este estudo que as fibras de polipropileno não exercem uma influência significativa na rigidez dos compósitos de areia e arenito.

Casagrande (2005) avaliou o comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno, submetidos a grandes deformações, a fim de verificar se possuíam características adequadas para o emprego em *liners* de cobertura de aterros sanitários e aterros sobre solos moles. Para este estudo foram realizados ensaios triaxiais consolidados drenados com distintas trajetórias de tensões e isotrópicos com aplicação de altas tensões, em amostras de areia e areia-fibra, como também em ensaios de cisalhamento do tipo *ring shear* e provas de carga em placa de 0,30 m de diâmetro sobre espessas camadas de areia compactada, reforçada e não reforçada com fibras. A adição de fibras influenciou o comportamento compressivo da areia, aumentou os parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico e pós-pico das matrizes estudadas após grandes deslocamentos horizontais, sem quedas significativas de resistência pós-pico no caso da matriz arenosa. O efeito da inclusão de fibras foi mais evidente para baixas tensões efetivas médias iniciais, menores diâmetros, maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo seu efeito mais pronunciado para misturas mais densas. O comportamento carga-recalque do solo arenoso foi significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte e alterando mecanismos de ruptura do solo.

Donato (2007) estudou a distribuição de tensões em um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno em campo através de ensaios de prova de carga em placa circular, com medidas diretas de tensão através de células de tensão total. Buscou-se investigar a influência da adição de fibras no comportamento carga-recalque de camadas compactadas de solo. Calibrações em laboratório foram realizadas para avaliar os fatores que afetam as medidas de tensões em células de tensão total inseridas no solo. O Método dos Elementos Finitos foi também utilizado para simular numericamente a distribuição de tensões dentro de câmaras de calibração. A análise numérica dos resultados mostrou que a distribuição das tensões verticais na câmara de calibração é função do seu fator de forma (altura/diâmetro) e que as constantes de calibração também são função da posição de instalação das células de tensão. Nos ensaios de placa observou-se que o comportamento carga-recalque do solo arenoso é significativamente

influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte e alterando os mecanismos de ruptura.

Festugato (2008) analisou o comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de polipropileno, considerando diferentes índices aspectos (relação comprimento/diâmetro da fibra). Para isso, construiu uma célula de compressão triaxial, com medidas internas de deformações, instrumentada e calibrada para realização de ensaios, sob trajetórias de tensões convencionais, em amostras com 100mm de diâmetro e 200mm de altura. O solo utilizado consistiu em uma areia fina, de granulometria uniforme, reforçada com fibras de diferentes comprimentos e diâmetros, com índices aspectos variando entre 120 e 2174. As amostras de solo-fibras apresentaram densidade relativa de 50%, teor de umidade de 10% e teor de fibras em relação à massa de solo seco de 0,5%. Os resultados mostraram que houve um ganho de resistência na matriz reforçada, e conseqüentemente, um aumento dos parâmetros de resistência, em comparação ao solo sem reforço. Enquanto os valores de ângulo de atrito não foram influenciados pelo índice aspecto das fibras, os valores de intercepto coesivo dos compósitos sofreram aumentos consideráveis. Festugato (2008) também verificou nos seus experimentos um aumento na rigidez com o acréscimo da tensão confinante. Ainda, não foi observado influência no comportamento dilatante da areia pela adição de fibras, ou seja, não apresentou alteração de volume quando submetido a variações na tensão cisalhante. Por fim, constatou-se que as fibras não romperam por tração e a interação entre a matriz do solo e as fibras se dá através do deslizamento e do alongamento das fibras.

Girardello (2010) estudou o comportamento mecânico de uma areia não saturada, com e sem reforço de fibras, através de ensaios de compressão triaxial (saturados e não saturados) e ensaios de placa realizados em amostras com densidade relativa de 50% e 90%. Além disso, realizou ensaio do papel filtro para obtenção da sucção das amostras de solo e solo-fibra. Para o reforço da areia foi adicionada a quantidade de 0,5% de fibra de polipropileno em relação ao peso seco de solo. A análise dos resultados mostrou que para os ensaios triaxiais realizados na condição não saturada, o ângulo de atrito diminuiu sensivelmente em comparação com os ensaios saturados, o que pode ser justificado pelo surgimento de um intercepto coesivo, que confere ao solo maior capacidade de suporte, pois nesse caso adiciona-se a resistência devido a sucção do material. Para os ensaios de placa, a inclusão aleatória das fibras de polipropileno confere ao material uma melhora no comportamento carga-recalque, com conseqüente mudança dos mecanismos de ruptura. Quanto aos ensaios de sucção realizados em amostras de solo reforçado e não reforçado, em diferentes densidades relativas, concluiu-se que

as fibras são inertes na sucção do material, não oferecendo influência na magnitude da resistência apresentada devido a sucção.

Carvalho (2019) estudou o comportamento mecânico de compósitos solo fibra através da inserção de fibras naturais de sisal, curauá e coco, em uma matriz de solo arenoso, com comprimentos e teores de fibras distintos, onde as fibras foram distribuídas aleatoriamente na massa de solo. O comportamento tensão *versus* deslocamento foi avaliado por meio de ensaios de cisalhamento direto em média escala, em amostras com dimensões 300 x 300 mm e 220 mm de altura. Os ensaios utilizaram fibras com 25 e 50 mm de comprimento, nos teores de 0,5 e 0,75% de fibra (em relação ao peso seco do solo), em uma densidade relativa de 50% e 10% de umidade. A partir dos ensaios de cisalhamento direto, considerando os parâmetros de resistência, a mistura de solo-fibra de coco com comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra evidenciou os melhores resultados, quanto ao ângulo de atrito e intercepto coesivo, quando comparado com os parâmetros de resistência do solo arenoso. Os resultados se mostraram satisfatórios para a inclusão das fibras vegetais de sisal, curauá e coco, como reforço de solos arenosos, com potencial aplicação em aterros sobre solos moles, taludes e fundações superficiais, dando um fim mais nobre a este material no âmbito técnico, atendendo a aspectos econômicos, sociais e ambientais.

2.2 Solos Não Saturados

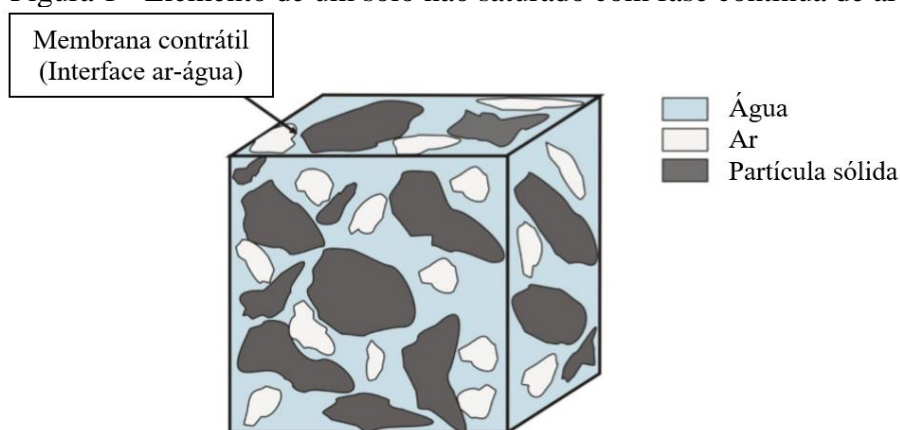
A presença de solos não saturados é recorrente no Brasil, devido às suas características climáticas e ao manto de intemperismo associado, principalmente em regiões em que ocorrem estações secas e úmidas. Desse modo, o estudo a respeito dos solos não saturados se torna imprescindível.

Correntemente, os problemas práticos envolvendo obras geotécnicas consideram a condição saturada ou completamente seca do solo. Contudo, ao levar em conta a condição não saturada do solo, na qual os vazios do solo podem estar preenchidos por água e ar, tende-se a realizar análises mais realistas do comportamento do solo.

Na mecânica dos solos saturados, um dos conceitos mais importantes diz respeito ao desenvolvido por Terzaghi (1943) referente às tensões efetivas, que é definida como a diferença entre a tensão total e a poropressão (pressão na água). No entanto, quando se trata da mecânica dos solos não saturados esse conceito não se aplica, pois não leva em consideração a influência da pressão do ar nos vazios do solo.

De acordo com Lambe e Whitman (1995), considerando a presença do ar nos vazios dos solos não saturados, estes representam um sistema trifásico composto por sólidos (partículas sólidas), líquidos (geralmente, água) e gás (ar não dissolvido). No entanto, Fredlund e Mosgenstern (1977) sugeriram a quarta fase, na qual consiste na interação entre a fase líquida e a fase gasosa, chamada de membrana ou película contrátil. A Figura 1 ilustra o modelo idealizado por Fredlund e Morgenstern (1977) para um elemento de solo não saturado.

Figura 1 - Elemento de um solo não saturado com fase contínua de ar



Fonte: Adaptado de Fredlund e Morgenstern, 1977

2.2.1 Sucção Total, Mátrica e Osmótica

Nos solos não saturados, os espaços entre as partículas de solo (vazios) são preenchidos por alguma quantidade de água e ar, nessa situação surge uma pressão na água do solo abaixo da pressão atmosférica. Esta pressão é chamada sucção (Marinho, 1997).

Segundo Lu e Likos (2004) a sucção total do solo quantifica o potencial termodinâmico da água dos vazios do solo em relação a um potencial de referência da água livre. A água livre, nesse contexto, é definida como a água que não contém soluções dissolvidas, não havendo interações com outras fases que transmitem curvatura à interface ar-água, e não tendo outras forças externas além da gravidade.

Fredlund (2012) definiu a sucção total como sendo a sucção equivalente derivada da medida da pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com a água do solo em relação à pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com água pura livre. A sucção total é composta por duas componentes: a sucção mátrica (ou matricial) e a sucção osmótica. A relação matemática entre as componentes da sucção total é dada pela soma algébrica da sucção mátrica e a sucção osmótica, conforme equação a seguir:

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

Onde:

Ψ = sucção total;

u_a = poropressão do ar, kPa;

u_w = poropressão da água, kPa;

$(u_a - u_w)$ = sucção mátrica;

π = sucção osmótica.

A sucção mátrica consiste na parcela de sucção referente à pressão isotrópica negativa da água intersticial do solo devida às forças de capilaridade e de adsorção e que depende da matriz do solo. Esta parcela de sucção relaciona-se ao tipo de partícula e ao arranjo estrutural do solo (matriz do solo), sendo seu valor representado pela diferença entre as pressões na água e no ar ($u_a - u_w$) presentes nos interstícios do solo. Já a sucção osmótica é função dos sais dissolvidos no interior do solo, ou seja, é a parcela de sucção relacionada à diferença de concentração química de solutos da água no solo.

Fredlund e Rahardjo (1993) salientaram que uma vez que na maioria das situações práticas a sucção osmótica é razoavelmente constante, e a variação na sucção total se dá, em alguns casos, por uma alteração na sucção mátrica.

2.2.2 Técnicas de Medida de Sucção

Com o crescimento de estudos envolvendo a mecânica dos solos não saturados, vários métodos experimentais surgiram com o intuito de se determinar parâmetros específicos, como por exemplo, a medição da sucção atuante no solo.

Existem várias técnicas para medir a sucção nos solos, que podem ser divididos em métodos diretos e indiretos. A Tabela 1 apresenta um resumo de alguns desses métodos, em que se destacam a componente de sucção obtida, a faixa de variação das sucções medidas e observações importantes sobre cada técnica.

Tabela 1 - Métodos diretos e indiretos de medida de sucção

Métodos/Técnicas	Componentes de Sução	Faixa de sucção (kPa)	Observações
Psicrômetro	Total	100 ^a - ~8000	Necessidade de ambiente com temperatura constante
Papel Filtro	Total/mátrica	Faixa inteira	a sucção mátrica é medida quando o papel filtro estiver em contato direto com o solo úmido
Tensiômetro	Total/Mátrica	0 - 90	Dificuldades com cavitação e difusão de ar através do copo cerâmico
Translação de eixos	Mátrica	0 - 1500	A escala da medida é uma função do valor da ar-entrada do disco cerâmico
Sensores de condutividade térmica	Mátrica	10 - ~1500	Medição indireta usando sensor cerâmico do tamanho de poros variáveis
Placa de sucção	Mátrica	0 - 100	Controle de temperatura, principalmente para baixas sucções

^aAmbiente com temperatura controlada $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$.

Fonte: Adaptado de Fredlund (2012)

Alguns trabalhos que utilizaram diferentes técnicas de medidas de sucção podem ser citados: Miller (2002), Puppala (2006), Southen (2007), Tarantino (2009), Miguel e Bonder (2012), Priono et al. (2016). Na sequência, será dado um enfoque maior na técnica do papel filtro, por ser o ensaio realizado nesta pesquisa para obtenção das curvas de retenção do solo e solo-fibra.

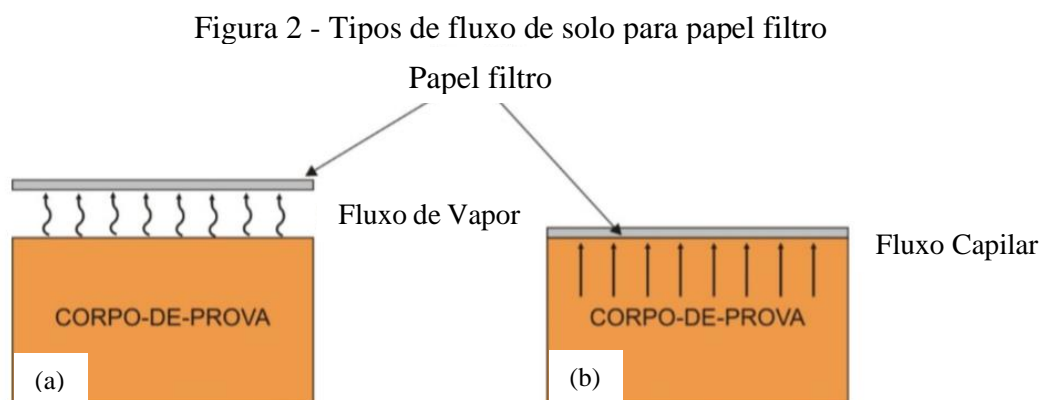
2.1.2.1 Ensaio do Papel Filtro

O ensaio do papel filtro é um método indireto de medida de sucção inicialmente utilizado na ciência dos solos e agronomia, somente a partir da década de 70 que surgiram as primeiras tentativas da utilização do ensaio para fins geotécnicos. Atualmente, o ensaio é padronizado pela norma D 5298 (ASTM, 2016).

Segundo Leong et al. (2002), as principais vantagens da técnica do papel filtro para medidas de sucção são: a simplicidade, baixo custo e a possibilidade de medir um grande intervalo de sucção.

O princípio de medição da técnica do papel filtro baseia-se em assumir que o papel filtro ficará em equilíbrio com o solo para uma sucção específica, uma vez que quando um solo com uma determinada umidade é colocado em contato com um material poroso com capacidade de absorver água, os dois corpos terão uma troca de água até atingirem um equilíbrio.

O método do papel do filtro pode ser usado para medir a sucção total (quando o papel filtro não se encontra em contato direto com o solo) ou a sucção mátrica (quando o papel filtro está em contato com o solo). Desse modo, existem duas formas de fluxo, a primeira refere-se ao fluxo por meio de vapor d'água (Figura 2a) e a segunda por fluxo capilar (Figura 2b), dado que o fluido dos vazios do solo é permitido se mover junto com a água adsorvida através do papel filtro.



Fonte: Adaptado de Marinho, 1995

Um cuidado importante a ser tomado na técnica do papel filtro na medição da sucção mátrica consiste no contato do papel filtro e o solo, para que o papel não seja comprimido, ocasionando uma restrição na pressão da água (Chandler & Gutierrez, 1986). Por outro lado, Marinho (1994) mostra que o contato tem pouca influência nos resultados, desde que seja atendido o tempo de equalização de 7 dias, tempo suficiente para o equilíbrio do papel filtro e o solo na medição da sucção mátrica.

Todavia, como o tempo de equilíbrio para fluxo de vapor é maior que o fluxo capilar, para a medição da sucção total deve-se atentar para os tempos de equalização indicados na Tabela 2, em função do nível de sucção.

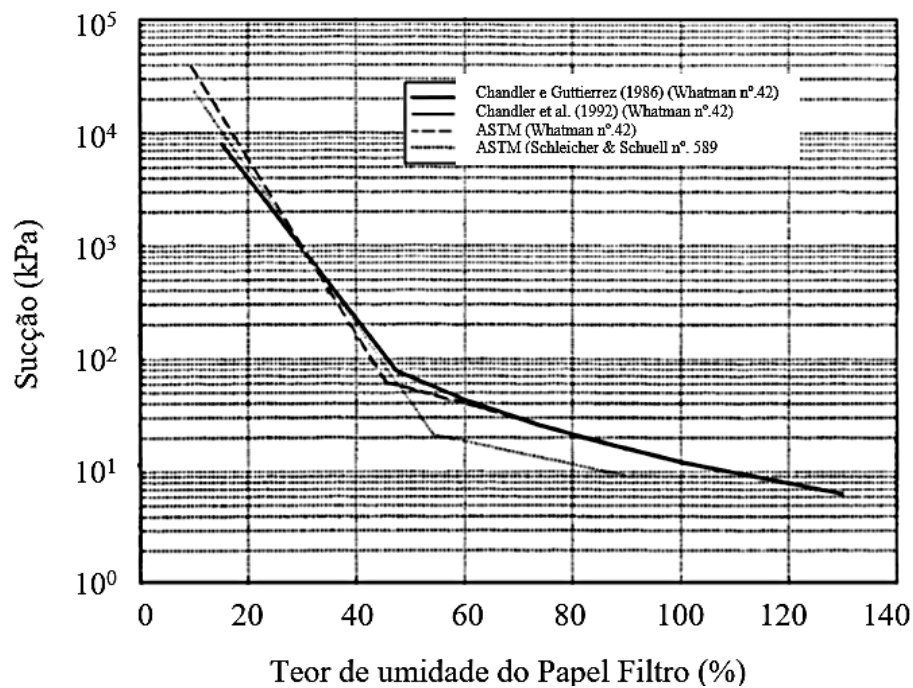
Tabela 2 - Tempo de equilíbrio para medição de sucção total

Nível de Sucção Total (kPa)	Tempo de Equilíbrio Sugerido (dias)
0 - 100	>30
100 - 250	30
250 - 1000	15
1000 - 30000	7

Fonte: Marinho, 1994

Os papéis filtros mais utilizados para obtenção da sucção são Whatman n°. 42 e o Schleicher & Schuell n°. 589, estes papéis foram calibrados por diversos pesquisadores. Leong et al. (2002) reuniram e apresentaram diferentes curvas de calibração disponíveis na literatura. A Figura 3 apresenta algumas das principais curvas de calibração para estes papéis.

Figura 3 - Curvas de calibração para os papéis filtro Whatman n°. 42 e Schleicher & Schuell n°. 589



Fonte: Adaptado de Marinho, 1994

Das curvas de calibração para o papel filtro Whatman n°. 42 foram obtidas relações entre a umidade do papel filtro e a sucção, que são apresentadas na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Curvas de calibração para papel filtro Whatman nº. 42

Referência	Sucção	Faixa de umidade (w) (%)	Log10 (Sucção) (kPa)
ASTM D5298	Total/Mátrica	w<45,3	5,327 – 0,0779 w
	Total/Mátrica	w>45,3	2,412 – 0,0135 w
Chandler & Gutierrez (1986)	Mátrica	(*)	2,85 – 0,0622 w
Chandler et al. (1992)	Mátrica	w<47	4,842 – 0,0622 w
	Mátrica	w>47	6,050 – 2,48 Log w
Oliveira & Marinho (2006)	Total/Mátrica	w<33	4,83 – 0,0839 w
	Total/Mátrica	w>33	2,57 – 0,0154 w

Nota: w – Umidade gravimétrica

(*) Faixa de sucção (80 – 6000 kPa)

Gomes (2007) estudou sobre alguns fatores que influenciam a acurácia do método do papel filtro. Em seu trabalho salienta que embora seja uma ferramenta eficiente para o estudo do comportamento de solos não saturados, apresenta algumas limitações. Ainda, apresentou evidências experimentais que indicam que a acurácia das aferições efetuadas por este método pode ser significativamente afetada pela deficiência de contato entre o papel filtro e o solo estudado, no caso da medição da sucção mátrica. Portanto, segundo o autor, irregularidades superficiais ou descontinuidades na face da amostra podem ser responsáveis por medições incorretas. A partir de resultados experimentais, observou que o aumento do tempo de equalização entre o papel filtro e a água intersticial do solo tende a reduzir a tendência de majoração das aferições de sucções.

Muitas pesquisas recentes utilizaram o método do papel filtro, podendo ser citadas os trabalhos dos seguintes autores: Bulut et al.(2001), Rios (2006), Bicalho (2007), Vivian (2008), Leme (2009), Zhao et al. (2016), Almeida (2018).

2.2.3 Curva de retenção de água no solo

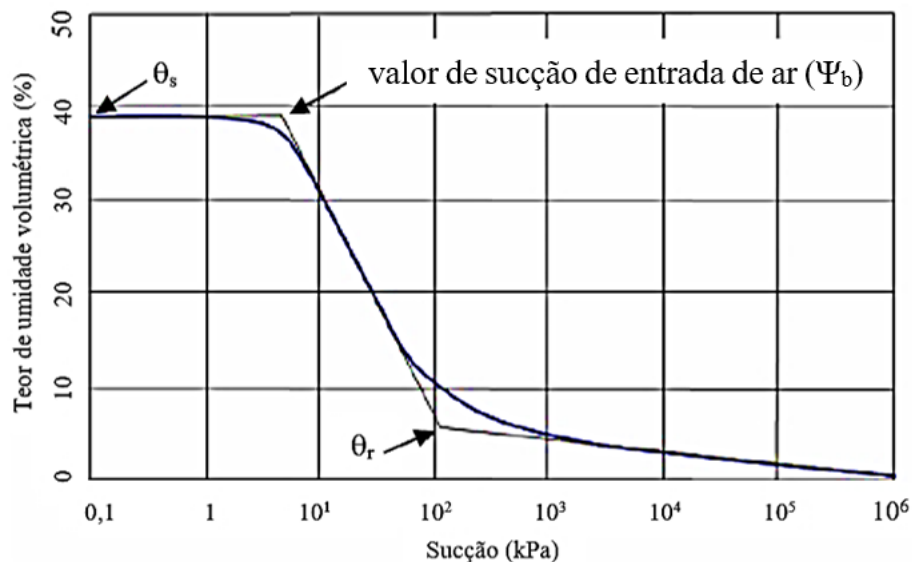
A curva de retenção de água no solo, também conhecida por curva característica do solo, é dada pela relação entre a quantidade de água presente no solo e a energia necessária para remover essa água, ou seja, a sucção. Fredlund (2002) se refere à curva de retenção como a

propriedade chave para a implementação da mecânica dos solos não saturados na prática da engenharia, considerando a curva de retenção a propriedade mais importante do solo não saturado.

A quantidade de água presente no solo pode ser representada na curva de retenção pela umidade gravimétrica, umidade volumétrica ou pelo grau de saturação. A sucção é inversamente proporcional a umidade do solo, pois para umidades próximas da saturação, a sucção é praticamente nula. Para representação da curva de retenção, devido aos grandes valores de sucção, utiliza-se a representação em um gráfico semilogarítmico.

Mais comumente, a curva de retenção é apresentada em termos da umidade volumétrica e sucção. A Figura 4 apresenta uma curva de retenção típica, onde alguns valores são destacados: o teor de umidade volumétrica saturada (θ_s), o valor de sucção de entrada de ar (Ψ_b) e o teor de umidade volumétrica residual (θ_r).

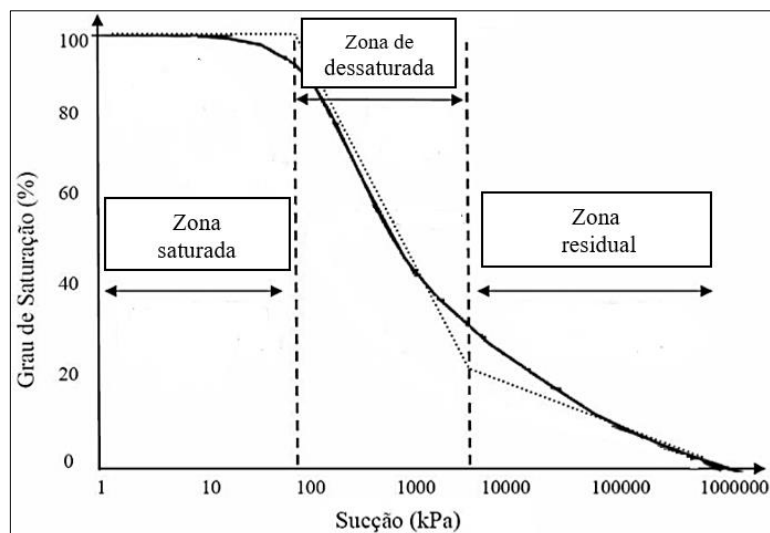
Figura 4 - Curva de retenção típica do solo



Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing, 1994

O teor de umidade volumétrica saturada (θ_s) representa teoricamente a porosidade do solo, considerando todos os vazios completamente preenchidos por água. A pressão de entrada de ar é a sucção equivalente ao início da entrada de ar nos vazios durante um processo de secagem. O teor de umidade residual (θ_r) é o valor de umidade a partir da qual variações adicionais de sucção resultarão em baixas alterações no teor de umidade volumétrica. Segundo Fredlund (2006), a curva de retenção pode ser dividida em três zonas, são elas: zona saturada, zona de dessaturação e zona residual, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 - Divisão da curva de retenção em zonas



Fonte: Adaptado de Fredlund et al., 2006.

A zona saturada corresponde ao intervalo de sucção para o qual o material se encontra completamente saturado. Este trecho estende-se até a sucção que equivale ao valor de entrada de ar. Um significado físico do valor de entrada de ar é que consiste na máxima sucção que os maiores vazios do material são capazes de suportar sem serem drenados.

O segundo trecho, a zona de dessaturação, da curva de retenção equivale ao intervalo de sucção para o qual o solo sofre drenagem sob o efeito de aumento da sucção, sendo que a água a ser drenada está em uma condição relativamente livre nos vazios do solo.

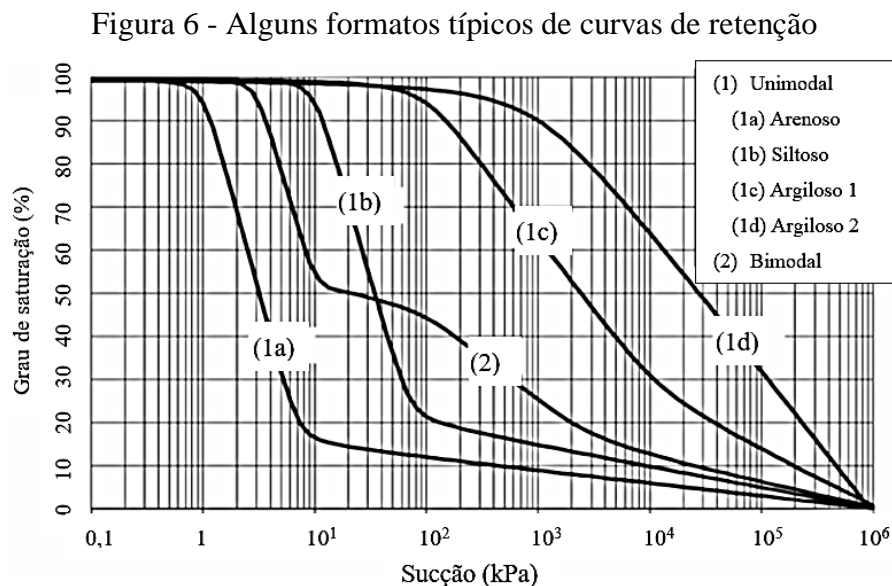
Para sucções superiores à sucção residual, ou seja, na zona residual, a remoção de água exige sucções expressivas e se dá predominantemente por processos de transferência de vapor. Neste trecho a quantidade de água armazenada nos vazios do material está em condição relativamente menos livre do que a água drenada na forma de fluxo líquido.

O formato da curva de retenção pode ser influenciado por diversos fatores, entre eles: o índice de vazios, tipo de solo, distribuição granulométrica, mineralogia, grau de intemperismo, distribuição do tamanho dos poros, entre outros.

A Figura 6 apresenta alguns formatos típicos de curvas de retenção. Estas curvas apresentam dois formatos distintos de curvas: unimodais e bimodais. As curvas unimodais apresentam um único trecho de dessaturação. Esse formato se assemelha àqueles de distribuições de frequência unimodais, daí a denominação dada a essas curvas. A analogia com distribuição de frequência não é coincidência, pois, a partir da derivada da curva de retenção, pode ser avaliada a distribuição de frequências de tamanho de poros do material (Gitirana e Fredlund, 2004).

Além disso, da Figura 6 pode ser destacado o segundo solo argiloso (1d), que não apresenta grau de saturação residual aparente. Esse tipo de curva é frequentemente observado para certos materiais altamente plásticos.

Vale ressaltar, que a curva de retenção bimodal representada na Figura 6 apresenta dois trechos de dessaturação, como consequência, apresenta dois valores de entrada de ar, sendo o primeiro correspondente a uma família de poros de dimensões relativamente maiores, e o segundo, a outra família de poros, menores.

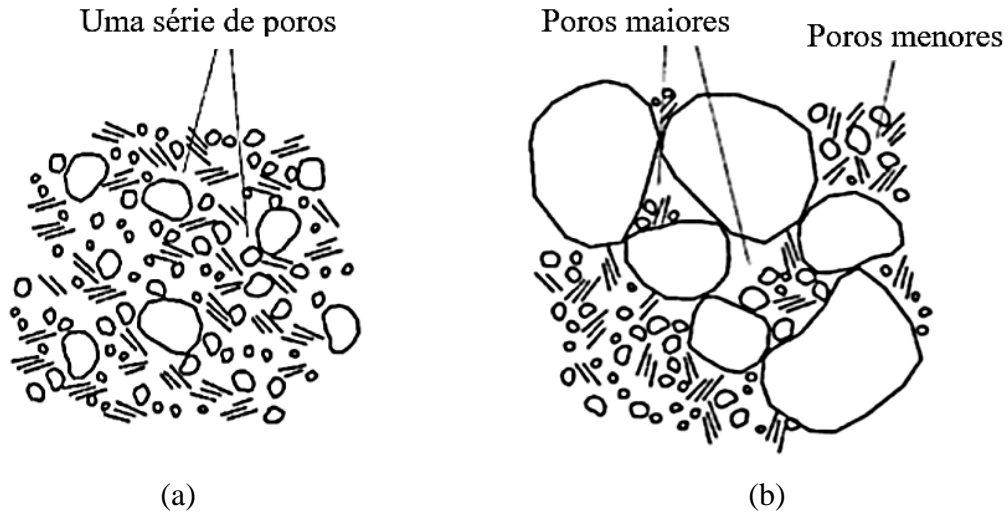


Fonte: Modificado de Gitirana Jr. e Fredlund, 2004

Comumente, a curva de retenção bimodal é atribuída à dupla porosidade nos solos, que pode apresentar-se devido a distribuição dos tamanhos dos grãos bimodal, à compactação ou às outras características tais como fissuras no solo (Li e Zhang, 2009; Satyanaga et al., 2013; Li et al., 2014). Os poros em solos de dupla porosidade são em grande parte regidos pelo arranjo de grãos grossos e grãos finos, que causam grandes poros (macroporos) e pequenos poros (microporos), respectivamente (Burger e Shackelford, 2001; Zhang e Chen, 2005).

Alguns critérios para identificar solos que possuem curva de retenção bimodal foram propostos pela Satyanaga et al. (2013), Li et al. (2014) e Zou e Leong (2019). A Figura 7 mostra a representação teórica da estrutura dos solos com distribuição dos poros unimodais e bimodais.

Figura 7 - Estrutura dos solos com distribuição dos poros unimodais e bimodais



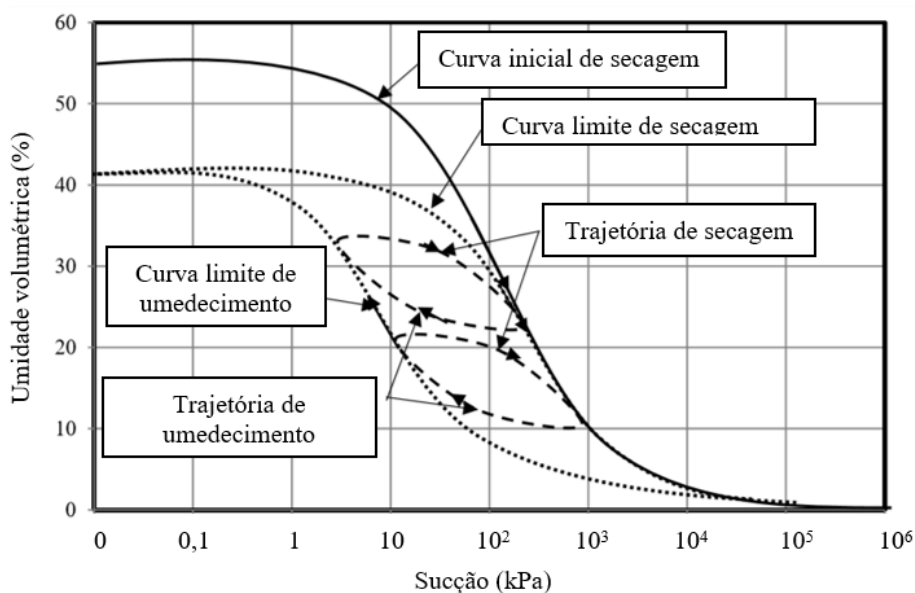
Fonte: Adaptado de Zhang e Chen, 2005

Vivian (2008) utilizou o método do papel filtro para a determinação das curvas características de um solo coluvionar não saturado contaminado com óleo diesel para diferentes teores. O programa experimental consistiu na realização do método do papel filtro, através da técnica sem contato entre a amostra e o papel, com a obtenção das curvas características do solo contaminado. As curvas características apresentaram formato bimodal, sugerindo que a microestrutura e a macroestrutura têm papel determinante na entrada e na saída de água dos poros do solo.

Um fator importante que altera a relação entre a umidade e a sucção é o fenômeno da histerese, devido a forma que água é retirada da estrutura do solo no processo de secagem ou colocada no processo de umedecimento, resultando em curvas de retenção diferentes para o mesmo solo.

Segundo Lu e Likos (2004) quando o solo é submetido a processos de secagem, como evaporação ou drenagem por gravidade, geralmente tende a reter uma quantidade maior de água do que para a mesma magnitude de sucção durante processos de umedecimento, como infiltração ou ascensão capilar, causando o efeito da histerese na curva de retenção de água no solo, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8 - Efeito da histerese na curva de retenção



Fonte: Modificado de Yang (2012)

Para aprofundamento sobre o fenômeno da histerese sugere-se a leitura do trabalho de Zou (2018), no qual apresentam modelos que estimam curvas de retenção unimodais e bimodais que consideram o fenômeno da histerese.

2.2.4 Principais modelos de ajuste da curva de retenção

A curva de retenção é apresentada continuamente, a partir das equações de ajuste e dos pontos experimentais. Muitos pesquisadores propuseram modelos de ajuste que sejam válidas para alguns tipos de solos e para determinadas faixas de sucção.

A complexidade dos efeitos da adsorção e das diversas geometrias dos vazios dos solos torna muito difícil a modelagem de uma curva para qualquer tipo de solo, porém os valores experimentais da curva de retenção podem ser representados por equações matemáticas. Na Tabela 4 são apresentadas as equações mais utilizadas.

Tabela 4 - Equações de ajuste para a curva de retenção

Autor	Equação	Parâmetros
Gardner (1956)	$\theta_n = 1/(1 + a\Psi^n)$	a, n
Brooks e Corey (1964)	$\theta_n = 1 \quad \Psi \leq \Psi_b$ $\theta_n = 1/(\Psi/\Psi_b)^{-\lambda} \quad \Psi > \Psi_b$	Ψ_b, λ
Van Genuchten (1980)	$\theta_n = 1/(1 + (a\Psi)^n)^m$	a, n, m
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = C(\Psi)\theta_s/[\ln(e + (\Psi/a)^n)]^m$ $C(\Psi) = 1 - \ln(1 + \Psi/\Psi_{res}) / \ln(1 + 10^6/\Psi_{res})$	a, n, m, Ψ_{res}
Gitirana Jr. e Fredlund (2004) - unimodal	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\Psi/\sqrt{\Psi_b \Psi_{res}})} + S_2$	$\Psi_b, \Psi_{res}, a, S_r$
Gitirana Jr. e Fredlund (2004) - bimodal	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\Psi/\sqrt{\Psi_{b1} \Psi_{res1}})^{d_1}}$ $+ \frac{S_2 - S_3}{1 + (\Psi/\sqrt{\Psi_{b2} \Psi_{res1}})^{d_2}}$ $+ \frac{S_3 - S_4}{1 + (\Psi/\sqrt{\Psi_{b2} \Psi_{res2}})^{d_3}} + S_4$ $d_j = 2 \exp[1/\ln(\Psi_{j+1}^a/\Psi_j^a)]; j=1,2,3$ $\Psi_1^a = \Psi_{b1}; \Psi_2^a = \Psi_{res1}; \Psi_3^a = \Psi_{b2}; \Psi_4^a = \Psi_{res2}$	$\Psi_{b1}, \Psi_{res1}, S_{res1},$ $\Psi_{b2}, \Psi_{res2}, S_b,$ S_{res2}, a

Fonte: Elaborada pela autora.

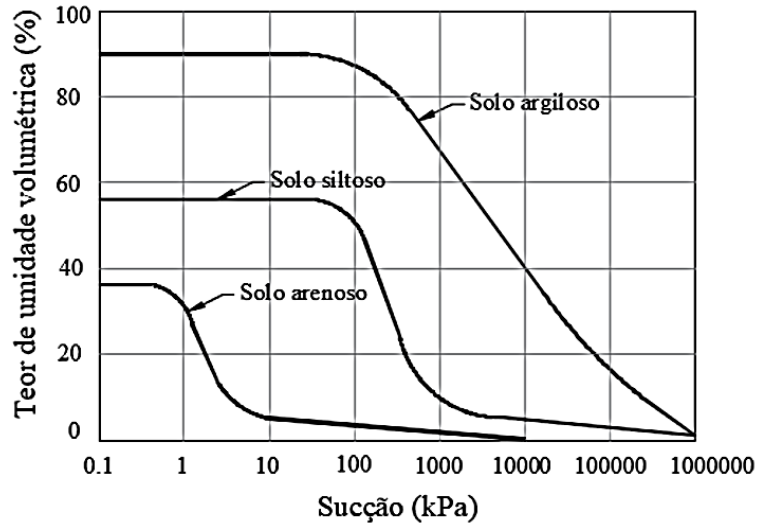
A família de equações propostas por Gitirana Jr. e Fredlund (2004) inclui uma equação para o ajuste de curvas bimodais, com dois valores de entrada de ar e dois pontos residuais. Os demais modelos podem ser adaptados para curvas bimodais empregando as equações para dois trechos unidos por uma sucção de junção, ou seja, são consideradas duas curvas unimodais.

Alguns trabalhos que abordam as equações para ajuste de curvas características unimodais e bimodais e a determinação dos parâmetros de ajuste podem ser destacados, como: Sillers e Fredlund (2001), Chen et al. (2010), Zhai e Rahardjo (2012), Satyanaga et al., 2013, Li et al. (2014), Wijaya and Leong (2016), Zhang et al. (2017) e Leong (2019).

Fredlund e Xing (1994) apresentaram curvas de retenção típicas para diferentes tipos de solo, conforme mostra a Figura 9. É possível identificar que solos mais finos tendem a

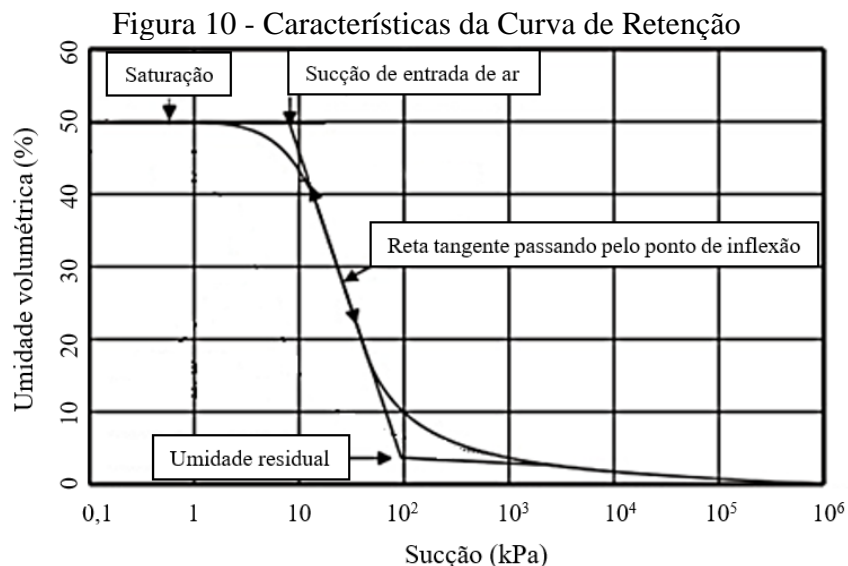
apresentar valores de entrada de ar mais elevadas, quando comparados com solos mais granulares. Desse modo, evidencia-se a influência da distribuição granulométrica na curva de retenção.

Figura 9 - Envoltória de resistência de solos não saturados



Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing, 1994

Um procedimento gráfico foi sugerido por Fredlund e Xing (1994) para a determinação da sucção correspondente a entrada de ar e ao valor de umidade volumétrica residual. A entrada de ar é definida como a interseção entre a reta horizontal, equivalente ao estado de saturação, com a reta tangente que passa pelo ponto de inflexão da curva. A interseção desta última reta com a reta tangente à curva e que passa pelo valor de sucção de 10^6 kPa, define o valor de umidade volumétrica residual. A Figura 10 ilustra estes procedimentos.



Fonte: Adaptada de Fredlund e Xing, 1994

No caso de curvas bimodais utilizando o ajuste por Fredlund e Xing (1994) faz-se a obtenção das características das curvas considerando duas curvas unimodais. Os valores de a , m e n na equação de Fredlund e Xing (1994) podem ser obtidos graficamente. Estes parâmetros podem ser estimados pelas seguintes expressões:

$$a = \Psi_i \quad (2)$$

$$m = 3,67 \ln \left[\frac{\theta_s C(\Psi_i)}{\theta_i} \right] \quad (3)$$

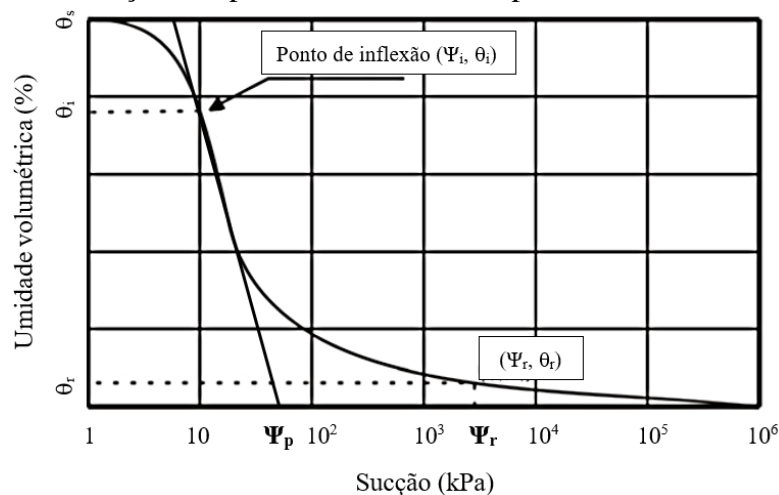
$$n = \frac{1,31^{m+1}}{mC(\Psi_i)} 3,72S^* \quad (4)$$

$$S^* = \frac{S}{\theta} - \frac{\Psi_i}{1,31^m(\Psi_i - \Psi_r) \ln(1+(10^6/\Psi_r))} \quad (5)$$

$$S = \frac{\theta_i}{\ln(\Psi_p/\Psi_i)} \quad (6)$$

Os valores Ψ_i , θ_i , θ_s , Ψ_r e Ψ_p são obtidos graficamente como indicado na Figura 11. O ponto de inflexão da curva de retenção corresponde às coordenadas Ψ_i e θ_i . A sucção Ψ_p é obtida passando-se uma tangente pelo ponto de inflexão a reta interceptando o eixo das abscissas neste valor. As coordenadas de (Ψ_r, θ_r) representa o ponto onde a curva de retenção passa a decrescer linearmente até 10^6 kPa.

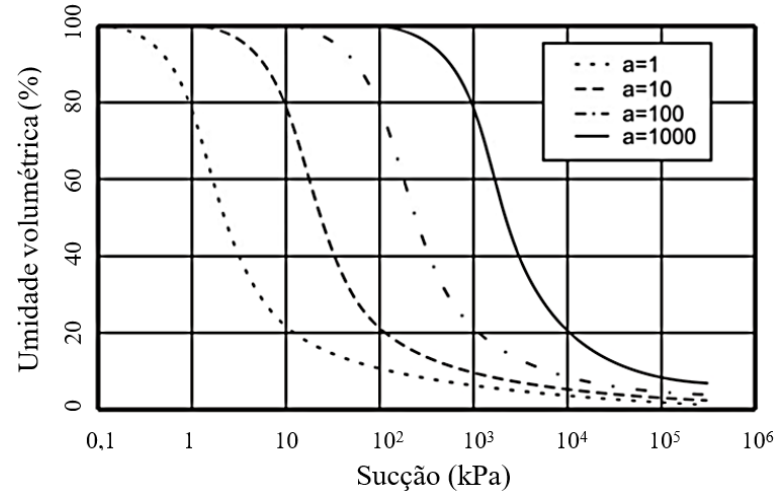
Figura 11 - Determinação dos parâmetros utilizados para calcular os valores de a , n e m



Fonte: Modificado de Fredlund e Xing, 1994

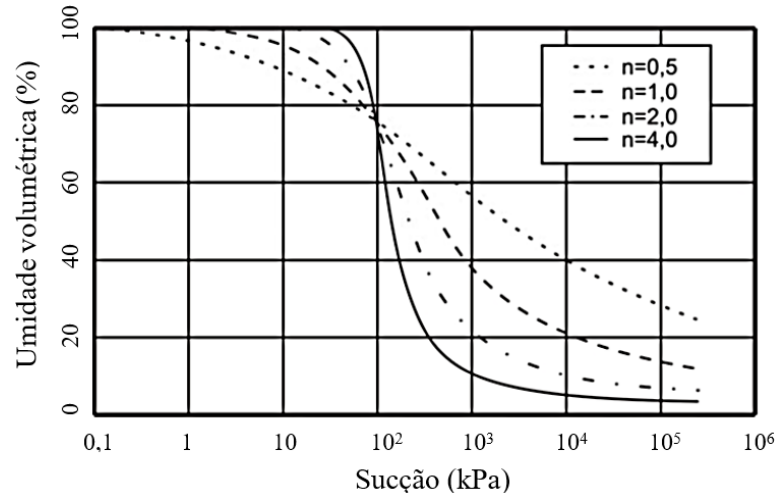
Os parâmetros a , n e m estão relacionados ao formato da curva de retenção, conforme apresentado nas Figuras 12, 13 e 14.

Figura 12 - Influência do parâmetro a na curva de retenção



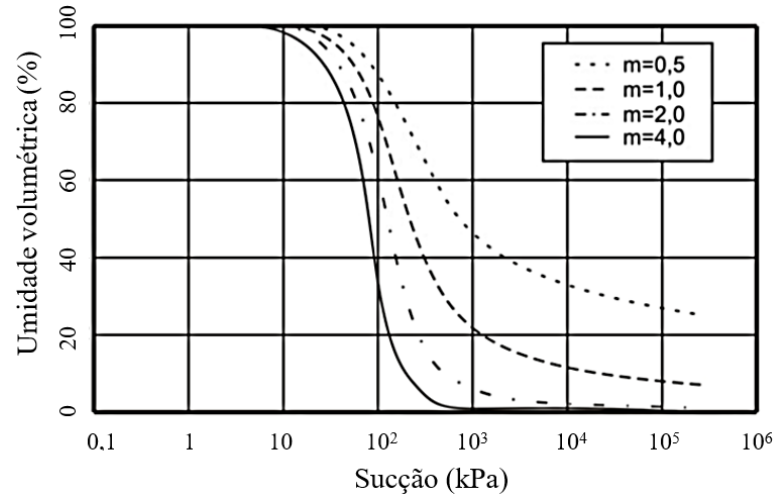
Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing, 1994

Figura 13 - Influência do parâmetro n na curva de retenção



Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing, 1994

Figura 14 - Influência do parâmetro m na curva de retenção



Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing, 1994

2.3 Resistência dos solos não saturados

Os estudos relacionados com a resistência ao cisalhamento de solos não saturados mais consagrados foram desenvolvidos por Bishop (1959) e Fredlund et al. (1978).

O modelo proposto Bishop (1959) propôs que as tensões efetivas em solos não saturados envolvem de maneira simplificada a equação clássica de Terzaghi, sendo apresentada da seguinte forma:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (7)$$

Em que:

σ' = Tensão efetiva

u_a = poropressão do ar;

u_w = poropressão da água;

$(\sigma - u_a)$ = tensão líquida;

$(u_a - u_w)$ = sucção matricial;

χ = Parâmetro função do grau de saturação do solo.

Nota-se que a equação proposta por Bishop (1959) se reduz a teoria clássica da mecânica dos solos saturados de Terzaghi, quando o parâmetro χ é igual a 1, ou seja, solos totalmente saturados. Enquanto, o parâmetro χ é nulo para os solos totalmente secos.

Em vista a dificuldade na obtenção do parâmetro χ experimentalmente, Fredlund et al. (1978) propuseram uma equação, que considera o conceito de variáveis de tensão, para a determinação da resistência ao cisalhamento de solos não saturados, como segue:

$$\tau_r = c' + (\sigma - u_a)_r \tan \phi' + (u_a - u_w)_r \tan \phi^b \quad (8)$$

Onde:

c' = coesão;

u_a = poro pressão do ar;

u_w = poropressão da água;

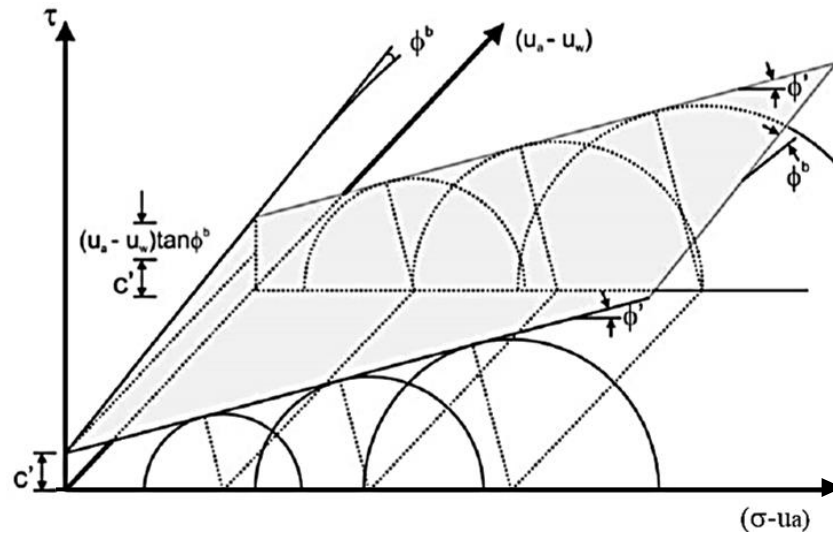
$(u_a - u_w)$ = sucção matricial;

ϕ' = ângulo de atrito efetivo;

ϕ^b = parâmetro que quantifica o acréscimo de resistência relativo ao aumento de sucção.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), o parâmetro ϕ^b constitui um ângulo que indica a razão do aumento da resistência do solo não saturado em relação à sucção. Considerando que os ângulos ϕ' e ϕ^b não variam com o acréscimo de sucção, a superfície tangente aos círculos de Mohr na ruptura formam um plano, conforme ilustra a Figura 15.

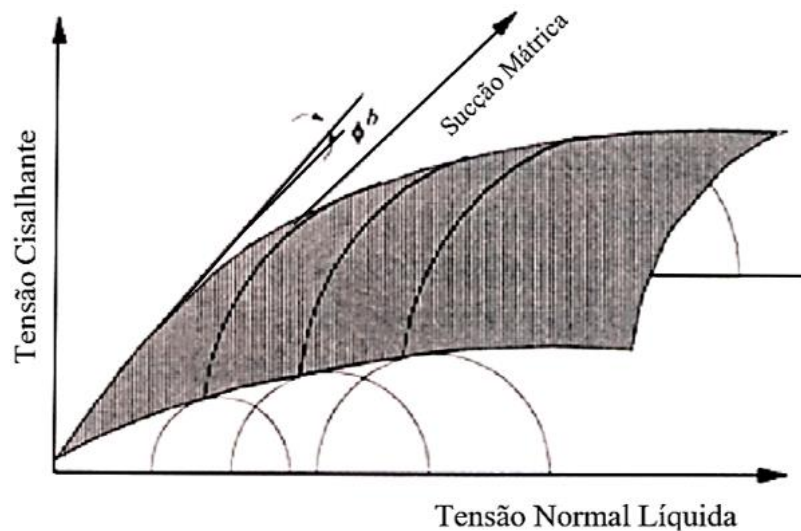
Figura 15 - Envoltória de resistência de solos não saturados



Fonte: Adaptado de Fredlund et al. (1978)

Em contrapartida, Campos (1997) afirmou que o comportamento da envoltória tridimensional não é simplesmente planar, sugerindo que a envoltória geral de resistência de solos não saturados deve ser representada por uma superfície curva, como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Envoltória possível de resistência de um solo residual não saturado



Fonte: Campos, 1997

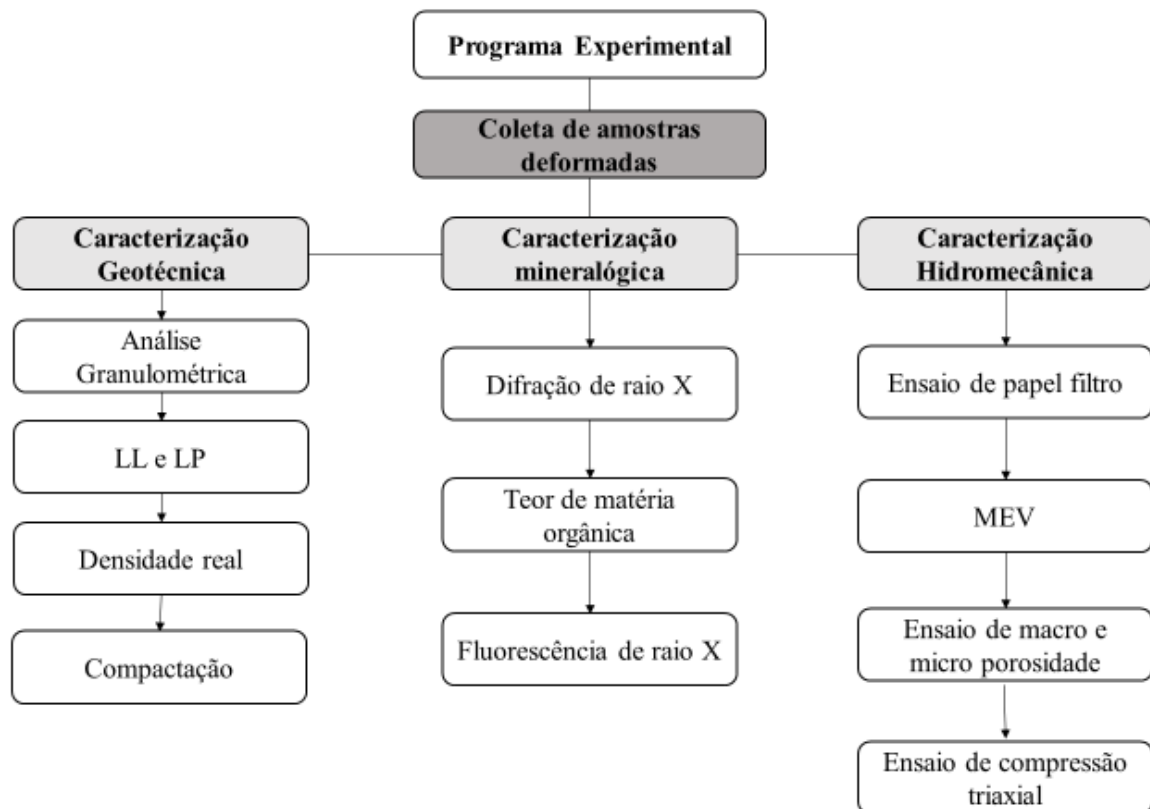
Estudos realizados em um solo coluvionar por Pereira (2012), através de ensaios triaxiais não saturados com medida de sucção, indicaram que o ângulo de atrito é influenciado pela sucção e tensão normal líquida aplicada. Os resultados obtidos mostraram que as envoltórias no plano tensão cisalhante *versus* sucção são não lineares, o que concorda com envoltórias curvas, e resultaram, para baixos valores de sucção, em valores de ϕ^b sempre superiores a ϕ' . Para este estudo, foi utilizado o equipamento triaxial com sucção controlada, inserindo os medidores de deslocamentos locais nos corpos de prova, denominados sensores de efeito Hall.

Saad (2016) estudou o comportamento mecânico de solos argilosos reforçados com fibras na condição não saturada. A investigação foi realizada em uma argila de baixo índice de plasticidade. As amostras foram testadas com adição de 1, 3 e 5 % de teor de fibras, sendo utilizadas resíduos de fibras de tapetes distribuídas aleatoriamente, ensaiadas para diferentes valores de sucção mátrica de 50, 100 e 200 kPa, através de ensaios de compressão triaxial não saturados. Além disso, determinou-se as curvas de retenção de água no solo com diferentes teores de fibras. Os resultados indicaram que os resíduos de fibras de tapetes aumentam a resistência ao cisalhamento das argilas não saturadas. Também foi constatado que o aumento relativo da resistência também é uma função de sucção aplicada.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, assim como os principais materiais e equipamentos necessários para a realização do programa experimental. Uma visão geral dos ensaios realizados é apresentada no fluxograma da Figura 17.

Figura 17 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaborada pela autora.

Os ensaios foram realizados em colaboração com laboratórios do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) e da Universidade Federal do Ceará (UFC). A Tabela 5 apresenta os laboratórios parceiros, destacando cada ensaio executado por laboratório e sua respectiva instituição.

Tabela 5 - Laboratórios parceiros na realização dos ensaios desta pesquisa

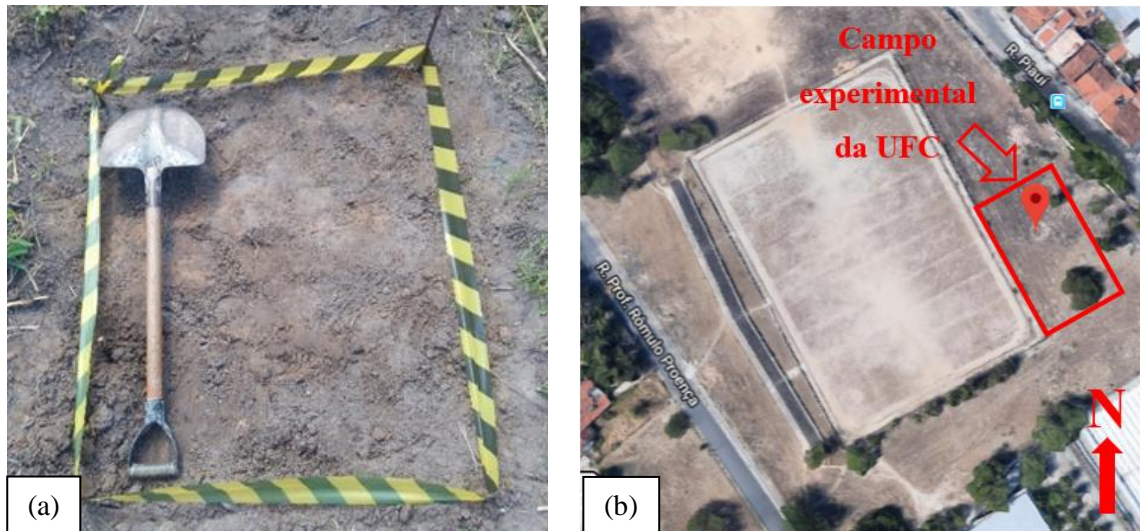
Ensaio	Laboratório	Instituição
Ensaio de Caracterização Geotécnica		
Análise granulométrica	Laboratório de Mecânica dos Solos e Asfalto (LMSA)	IFCE
Limites de consistência	Laboratório de Mecânica dos Solos e Asfalto (LMSA)	IFCE
Densidade Real	Laboratório de Mecânica dos Solos e Asfalto (LMSA)	IFCE
Compactação	Laboratório de Mecânica dos Solos e Asfalto (LMSA)	IFCE
Ensaio de Caracterização Mineralógica		
Difração de Raio X	Laboratório de Raio X (LRX)	UFC
Teor de Matéria Orgânica	Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA)	IFCE
Fluorescência de Raio X	Laboratório de Raio X (LRX)	UFC
Ensaio de Caracterização Hidromecânica		
Ensaio de Papel Filtro	Laboratório de mecânica dos solos e pavimentação (LMSP)	UFC
MEV	Laboratório de Microscopia Eletrônica (LAMEV)	UFC
Ensaio de micro e macroporosidade	Laboratório de Física dos Solos (LFS)	UFC
Ensaio de compressão triaxial	Laboratório de mecânica dos solos e pavimentação (LMSP)	UFC

Fonte: Elaborada pela autora.

3.1 Campo experimental

O solo utilizado na pesquisa foi coletado no Campo Experimental de Geotecnia e Fundações (GECEF) da Universidade Federal do Ceará (UFC), em uma área de aproximadamente 900m², localizado no Campus do Pici, próximo ao Instituto de Educação Física e Esportes (IEFES). A área delimitada para coleta do solo é mostrada na Figura 18a e a localização do Campo Experimental é representada na Figura 18b.

Figura 18 - (a) Área delimitada para coleta e (b) localização do campo experimental da UFC



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2 Obtenção das amostras

No local definido para a amostragem foram coletadas amostras deformadas, para a realização de ensaios de caracterização geotécnica, mineralógica e hidromecânica, conforme mostrado no fluxograma do programa experimental. A coleta das amostras foi realizada por método direto manual, com a perfuração de terreno, com auxílio de pá e picareta, em uma cota 10cm abaixo da cota do terreno natural, sendo a camada superficial do solo de aproximadamente 10cm descartada (Figura 19) por conter muitas raízes da vegetação existente no campo experimental e conseqüentemente, podendo conter excesso de matéria orgânica.

Figura 19 - Camada superficial do solo descartada



Fonte: Elaborada pela autora.

3.3 Fibras de polipropileno utilizadas

As fibras de polipropileno empregadas são fabricadas pela empresa Macaferri Brasil, sendo cedidas para a realização da presente pesquisa. A Fibra de Polipropileno selecionada foi a FibroMac 6TM, compostas por filamentos extremamente finos, produzidos através de processo de extrusão (Figura 20). As propriedades das fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa são apresentadas na Tabela 6.

Figura 20 - Fibras de polipropileno



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 6 - Propriedades das fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa

Resistência à tração na ruptura	300MPa
Alongamento na ruptura	80%
Comprimento	6mm
Diâmetro	18 μ m
Seção	Circular
Peso específico	0,91 g/cm ³
Módulo de Young	3000MPa
Temperatura de fusão	160°C
Temperatura de ignição	365°C

Fonte: Catálogo Macaferri Brasil (2018)

3.4 Preparação das amostras

Após a coleta das amostras deformadas no campo experimental, estas foram trazidas para o laboratório de mecânica dos solos e pavimentação do IFCE, secas ao ar, limpas (retirando restos de matéria orgânica, galhos, vidros, plásticos, tijolos, etc), destorroadas, peneiradas e acondicionadas em sacos plásticos em quantidades suficientes para serem misturadas com as fibras, seguindo as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 2016).

Para facilitar a referência as amostras de solo natural e solo-fibra serão utilizadas nomenclaturas específicas para cada uma delas, conforme Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Nomenclatura das amostras

Amostra	Nomenclatura
Solo Natural	SN
Solo com 0,25% de fibras	SF025
Solo com 0,50% de fibras	SF050
Solo com 0,75% de fibras	SF075
Solo com 1,00% de fibras	SF100
Solo com 1,25% de fibras	SF125

Fonte: Elaborada pela autora.

A quantidade de fibra adicionada à mistura, equivalente aos teores de fibras de 0,25%, 0,5%, 0,75%, 1% e 1,25%, foi determinada em relação à massa de solo seco e o peso de água, adicionado para a realização dos ensaios de compactação, foi calculado em relação ao peso total da matéria prima seca (solo + fibra). A balança utilizada para pesagem de todos os materiais (solo, fibra e água) possui resolução de 0,01gf.

Para a homogeneização da mistura solo e fibras seguiu-se as recomendações de Casagrande (2001). Inicialmente foi feita a mistura dos componentes secos da mistura, antes de ser adicionada a água, sendo a homogeneização realizada manualmente e verificada visualmente. Constatou-se uma maior dificuldade de homogeneização com o aumento dos teores de fibras utilizados na mistura, observando-se a formação de aglomerações de fibras na preparação das amostras.

3.5 Ensaio de Caracterização Geotécnica

Os ensaios de caracterização geotécnica foram realizados no laboratório de mecânica dos solos e pavimentação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). A seguir serão apresentados as normas utilizadas e informações relevantes sobre cada ensaio.

3.5.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica consistiu no peneiramento grosso e fino, além da sedimentação. Os procedimentos foram executados conforme recomenda a norma NBR 7181 (ABNT, 2016). Com o ensaio foi obtida a curva granulométrica e determinado os percentuais constituintes do solo.

3.5.2 Limites de consistência

Os limites de consistência ou limites de Atterberg foram determinados através dos ensaios de limites de liquidez e limites de plasticidade, seguindo as orientações das normas NBR 6459 e NBR 7180 (ABNT, 2016).

3.5.3 Densidade real dos grãos

O procedimento adotado para determinação da densidade das partículas está descrito na norma ME 093 (DNER, 1994), por meio da utilização do picnômetro.

3.5.4 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado conforme prescrito na norma NBR 7182 (ABNT, 2016). A preparação das amostras de solo seguiu as recomendações da norma NBR 6457 (ABNT, 2016). Foram realizados ensaios de compactação para as amostras de solo e solo-fibra, com objetivo de determinar as curvas de compactação de cada amostra, e conseqüentemente o peso específico aparente seco máximo e umidade ótima a ser utilizada na

moldagem dos corpos de prova compactados para os ensaios de compressão triaxial, ensaios de papel filtro e ensaios de macroporosidade e microporosidade.

As amostras foram compactadas no cilindro grande (volume de 3229,96 cm³) em 5 camadas, com aplicação da energia de compactação normal com a utilização do soquete grande de 4,5 kg com uma altura de queda de 45 cm e 12 golpes por camada.

3.6 Ensaios de Caracterização Mineralógica

A seguir, são descritas sucintamente as técnicas utilizadas para a caracterização mineralógica do solo estudado e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) do solo e das misturas solo-fibra.

3.6.1 Difração de Raio X

A técnica de difração de raio X baseia-se em um padrão de difração da radiação, característico de cada estrutura cristalina, no qual é possível identificar e quantificar substâncias químicas sólidas cristalinas, como se cada padrão de difração fosse uma espécie de impressão digital da amostra.

A difração de raio X foi realizada com o objetivo de verificar a composição mineralógica básica do solo, constatando a existência ou não de argilominerais expansivos, que podem influenciar nos resultados dos demais ensaios. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Raio X, situado no Departamento da Física da UFC.

3.6.2 Teor de Matéria Orgânica

Para a determinação do teor de matéria orgânica seguiu-se a metodologia empregada na NBR 13600 (ABNT, 1996). O teor de matéria orgânica é quantificado pela relação entre diferença entre a massa do solo seco em estufa e a massa do solo após a incineração em mufla.

3.6.3 Fluorescência de Raio X

Para analisar a composição química das amostras de solos foram realizadas a técnica de “Espectrometria de Fluorescência de Raio-X por Energia Dispersiva (EDX)”, que é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes em uma amostra (análise qualitativa) assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento se encontra presente na amostra.

As análises das amostras de solo, através de um detector de Energia Dispersiva de Raio X (EDX ou EDS), foram realizadas no Laboratório de Raio X do Departamento de Física da UFC.

3.7 Ensaios de Caracterização Hidromecânica

A descrição dos procedimentos realizados nos ensaios de caracterização hidromecânica é apresentada a seguir. Assim como, os equipamentos utilizados e principais detalhes de cada ensaio.

3.7.1 Ensaio do papel filtro

O ensaio de papel filtro consiste basicamente em colocar o solo em contato com o papel filtro, que tem a capacidade de absorver a água presente no solo até uma certa condição de equilíbrio, na qual os potenciais matriciais da água no solo e no material poroso se tornam iguais.

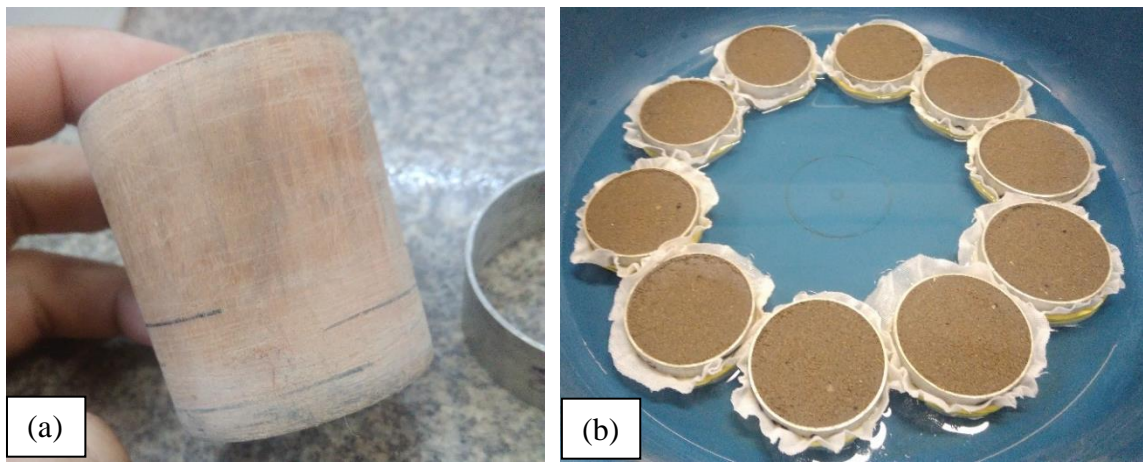
O ensaio foi executado segundo o procedimento da norma D 5298 (ASTM, 2016), com algumas alterações sugeridas por Marinho (2000) e Rios (2006). A seguir, será descrito os procedimentos empregados do ensaio do papel filtro para esta pesquisa.

Para realização do ensaio de papel filtro utilizou-se amostras de solo e solo-fibra compactadas em anéis de 5 cm de diâmetro e com 2 cm de altura. Com o objetivo de determinar as curvas de retenção da água no solo através do processo de secagem.

Cada amostra foi homogeneizada e colocada na umidade ótima, deixada acondicionada em sacos plásticos rigorosamente lacrados por 24 horas, para estabilização da umidade em toda a amostra. Após esse período, os corpos de prova foram compactados dentro dos anéis com auxílio de um molde de madeira (Figura 21a), em três camadas com pesos preestabelecidos em função do peso específico aparente seco máximo de cada amostra.

Na sequência, foi feita a etapa de saturação (Figura 21b), onde os anéis foram protegidos com tecido presos por ligas na lateral, de forma a evitar perda de material durante este processo. Em uma bacia com uma fina lâmina d'água, os corpos de prova foram colocados para umedecimento, na qual a saturação foi atingida por capilaridade, por um período mínimo de oito horas.

Figura 21 - (a) Molde de madeira utilizado na compactação dos corpos de prova e
(b) Saturação dos corpos de prova por capilaridade



Fonte: Elaborada pela autora.

Com a saturação atingida, os corpos de prova foram colocados em lugar arejado e fresco para que gradualmente perdessem umidade. Os corpos de prova foram retirados em tempos diferentes para que assim atingissem diferentes teores de umidade, e conseqüentemente diferentes valores de sucção. A Figura 22 ilustra como os corpos de prova foram posicionados para a secagem, com objetivo de garantir uma secagem uniforme.

Figura 22 - Corpos de prova posicionados para a secagem



Fonte: Elaborada pela autora.

Quando um corpo de prova atingia um determinado teor de umidade (controlado através de pesagem) era retirado, sendo imediatamente colocado dois papéis filtro Whatman N° 42 sobre a superfície da amostra. O papel que foi colocado em contato direto com o solo foi descartado, pois poderiam aderir partículas do solo, que conduziriam a erros na medição da umidade gravimétrica do papel filtro.

Posteriormente, a amostra e os papeis foram envolvidos por uma camada de plástico filme, seguida de uma camada de papel alumínio e outra camada de papel filme. Após a etapa anterior, as amostras foram acondicionadas em uma caixa de isopor e colocadas dentro de um saco plástico lacrado, garantindo o isolamento dos corpos de prova, de modo a evitar qualquer variação de umidade. A Figura 23 mostra os procedimentos do ensaio descritos anteriormente.

Figura 23 - Detalhes do procedimento do ensaio do papel filtro



Fonte: Elaborada pela autora.

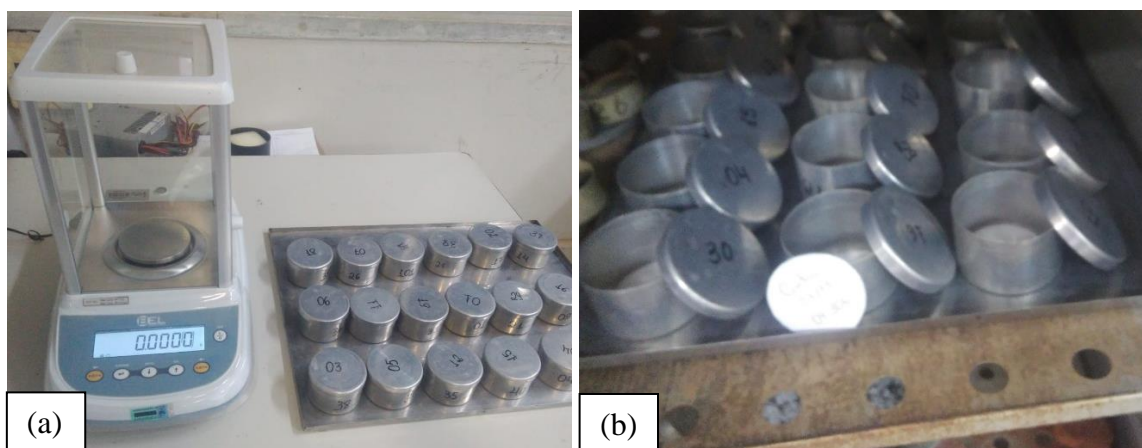
O período de equalização entre o papel filtro e o solo foi de 7 dias, como prescreve a norma D 5298 (ASTM, 2016). Após o tempo de equalização, os papéis filtro foram colocados rapidamente em cápsulas tampadas, previamente pesadas (Figura 24a), e na sequência foi

pesado o conjunto (cápsula tampada + papel filtro) em uma balança de precisão de 0,0001 g. A retirada da embalagem e a pesagem do papel filtro foi feita rapidamente para evitar variação de umidade.

Após esta pesagem, os papéis filtro foram secos em estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, em cápsulas de alumínio com as tampas abertas, por aproximadamente duas horas (Figura 24b). Depois deste tempo, as cápsulas de alumínio foram tampadas e permaneceram na estufa por 15 minutos para equilíbrio da temperatura. Na sequência, os papéis filtros secos foram novamente pesados. Os papéis filtro foram imediatamente descartados, e devido a variação da temperatura, as cápsulas tampadas foram pesadas novamente, conforme recomenda a norma D 5298 (ASTM 2016).

A umidade do solo de cada amostra também foi medida, a fim de obter os pontos experimentais que relacionam sucção e umidade do solo.

Figura 24 - a) Pesagem dos recipientes tampados na balança de precisão de 0,0001 g e b) Secagem do papel filtro em estufa



Fonte: Elaborada pela autora.

As equações de calibração utilizadas no ensaio de papel filtro para determinar a sucção do papel filtro foi a proposta por Chandler et. al. (1992). A sucção do solo foi obtida através da sucção do papel filtro, uma vez que após a equalização tem-se que a sucção do papel filtro e do solo são iguais.

O ensaio de papel filtro foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC. Foram obtidas seis curvas características, sendo uma para o solo natural e as demais para as misturas solo-fibra para os teores de fibras de polipropileno de 0,25%, 0,5%, 0,75%, 1% e 1,25% em relação ao peso do solo seco.

3.7.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica permitiu a visualização da estrutura do solo e a análise da forma, distribuição, adesão solo-fibra e conexão entre os vazios no interior das amostras ensaiadas. As imagens das amostras foram registradas com aumento de 120 vezes do tamanho real.

As amostras submetidas as análises foram previamente compactadas dentro de anel com diâmetro de 5 cm e altura de 2 mm, posteriormente colocadas na estufa a 105°C para completa secagem.

Todas as análises de microscopia foram realizadas no Laboratório de Microscopia do Departamento de Geologia da UFC. O equipamento utilizado foi o Microscópio Eletrônico de Varredura com detector de EDS, modelo TM3000, da marca Hitachi (Figura 25).

Figura 25 - Microscópio eletrônico de varredura com detector de EDS



Fonte: Elaborada pela autora.

3.7.3 Ensaio de macro e microporosidade

Neste estudo foram realizados ensaios para determinação da macroporosidade e microporosidade do solo, com o emprego da mesa de tensão. Uma descrição da mesa de tensão pode ser consultada no trabalho de Oliveira (1968). O método da mesa de tensão é rápido, simples e de fácil execução, mais comumente utilizado nas ciências agrárias.

De maneira sucinta, o método consiste em aplicar nas amostras saturadas uma tensão correspondente a uma coluna d'água de 60 cm de altura, ou seja, 6 kPa, que fará com

que ocorra a drenagem da água dos macroporos. Após a drenagem, foi feita a secagem das amostras em estufa a 105°C e determinado a porcentagem dos microporos, correspondente a água ainda retida no solo. Com a diferença entre a porcentagem de água de saturação (porosidade total) e a porcentagem de microporos, obtém-se a porcentagem de macroporos, uma vez que a porosidade total é a soma das porcentagens dos macroporos e microporos da amostra de solo.

O ensaio de determinação de macro e microporosidade foi realizado no Laboratório de Física dos Solos do Departamento de Ciências Agrárias da UFC. O equipamento utilizado para o ensaio é apresentado na Figura 26.

Figura 26 - Mesa de tensão utilizada no ensaio



Fonte: Elaborada pela autora.

3.7.4 Ensaio de compressão triaxial saturado e não saturado

Foram realizados nessa pesquisa um total de 36 ensaios triaxiais, sendo 12 do tipo CID, consolidados isotropicamente e drenado e 24 ensaios triaxiais não saturados, subdivididos em 12 corpos de prova ensaiados na umidade ótima e 12 corpos de prova ensaiados abaixo da umidade ótima. Os ensaios foram realizados no laboratório de mecânica dos solos e pavimentação da UFC.

Os ensaios de compressão triaxial foram realizados variando a condição de saturação, o teor de fibras de polipropileno e a tensão confinante, de acordo com a Tabela 8 apresentada a seguir.

Tabela 8 - Ensaio triaxiais realizados no programa experimental

Condição de Saturação	Nomenclatura das amostras	Teor de Fibras	Tensão confinante		
			50 kPa	100 kPa	200 kPa
Saturados	SN	Sem fibras	50 kPa	100 kPa	200 kPa
	SF025	0,25%			
	SF075	0,75%			
	SF125	1,25%			
Não-Saturados na umidade ótima	SN	Sem fibras	50 kPa	100 kPa	200 kPa
	SF025	0,25%			
	SF075	0,75%			
	SF125	1,25%			
Não-Saturados abaixo da umidade ótima	SN	Sem fibras	50 kPa	100 kPa	200 kPa
	SF025	0,25%			
	SF075	0,75%			
	SF125	1,25%			

Fonte: Elaborada pela autora.

A moldagem dos corpos de provas para os ensaios triaxiais foi realizada em um molde com dimensões suficientes para confecção de amostras com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. O controle da compactação foi feito através do grau de compactação dos corpos de prova, no qual o critério de aceitação dos corpos de prova foi $100 \pm 5\%$.

Para os ensaios de compressão triaxial saturados, logo após a montagem do corpo de prova na câmara triaxial, iniciava-se a fase de saturação da amostra. O processo de saturação foi feito de duas etapas: (1) pela percolação de água, na base para o topo do corpo de prova; nesta etapa a amostra era submetida a uma tensão confinante de 10kPa para impedir o fluxo preferencial entre o corpo de prova e a membrana, tendo duração de no mínimo quatro horas; (2) pela aplicação de contra-pressão; onde estágios de incrementos de 50 kPa na tensão confinante e na contra-pressão eram aplicados, sendo a diferença entre a contrapressão e a tensão confinante mantida constante em 10 kPa. Quando a poropressão monitorada na base do corpo de prova equalizava-se com a contra-pressão aplicada em seu topo, um novo incremento de pressão era aplicado. O processo continua até chegar-se a uma saturação de pelo menos 95%, monitorada através da medição do parâmetro B (Skempton, 1954), medido após a aplicação de cada incremento de tensão.

Em seguida, partiu-se para a etapa de adensamento do solo, nesta fase a tensão confinante é elevada até obter-se a tensão efetiva de ensaio e é considerada finalizada quando a variação de volume do corpo de prova torna-se constante. Por fim, aplicou-se a carga para fase de cisalhamento do corpo de prova.

A velocidade de carregamento empregada foi de 0,1824 mm/min para os ensaios saturados e 0,2438 mm/min para os ensaios não saturados. A seguir são apresentados os principais elementos do equipamento empregado nos ensaios triaxiais:

- Prensa: que permite a aplicação de deformação controlada;
- Câmara triaxial: que permite que o corpo de prova seja submetido a tensão de confinamento e a força axial;
- Sistema de aplicação de pressão: através de colunas de mercúrio;
- Medidores de pressão confinante: pela leitura do manômetro;
- Medidores de poropressão: pela leitura do transdutor;
- Medidores de variação volumétrica: pela leitura da variação da altura da bureta;
- Medidores de deformação: através da leitura do extensômetro;
- Medidores de força axial: através da leitura da deformação do anel dinamométrico;

A aquisição dos dados foi realizada pela leitura dos medidores citados anteriormente. Com auxílio de uma planilha eletrônica, foram realizados os cálculos e gráficos necessários para a obtenção dos resultados do ensaio. A Figura 27 mostra o equipamento utilizado para execução de todos os ensaios de compressão triaxial.

Figura 27 - Equipamento empregado nos ensaios triaxiais



Fonte: Elaborada pela autora.

Para os ensaios de compressão triaxial não saturados foram considerados duas condições de saturação: (a) não-saturados na umidade ótima e (b) não-saturados abaixo da umidade ótima. As umidades dos ensaios triaxiais não saturados abaixo da umidade ótima são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Umidades dos ensaios triaxiais não saturados abaixo da umidade ótima

Amostra	Umidade (%)
SN	2,0
SF025	4,5
SF075	5,0
SF125	4,0

Fonte: Elaborada pela autora.

Nos ensaios de compressão triaxial não saturados foi feita uma adaptação do ensaio, no qual não houve a etapa de saturação do corpo de prova e não ocorreu o adensamento do solo. Ou seja, para o caso dos ensaios triaxiais não saturados na umidade ótima, assim que o corpo de prova foi moldado com peso específico aparente seco máximo e umidade ótima, logo em seguida foi colocado da câmara triaxial e aplicada a carga da fase de cisalhamento do corpo de prova, sendo posteriormente obtidos os resultados para esta condição.

Já para os ensaios triaxiais não saturados com amostras abaixo da umidade ótima, os corpos de prova foram moldados com peso específico aparente seco máximo e umidade ótima e permitida a secagem, sendo controlada pela variação do peso do corpo de prova, até a umidade pré-definida. Para isso, os corpos de prova foram deixados em ambiente arejado e fresco dentro de caixas de isopor, vedadas parcialmente com plástico filme com furos, para permitir a secagem e evitar excesso de poeira nas amostras, conforme ilustra a Figura 28.

Figura 28 - Secagem dos corpos de prova até umidade pré-definida



Fonte: Elaborada pela autora.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

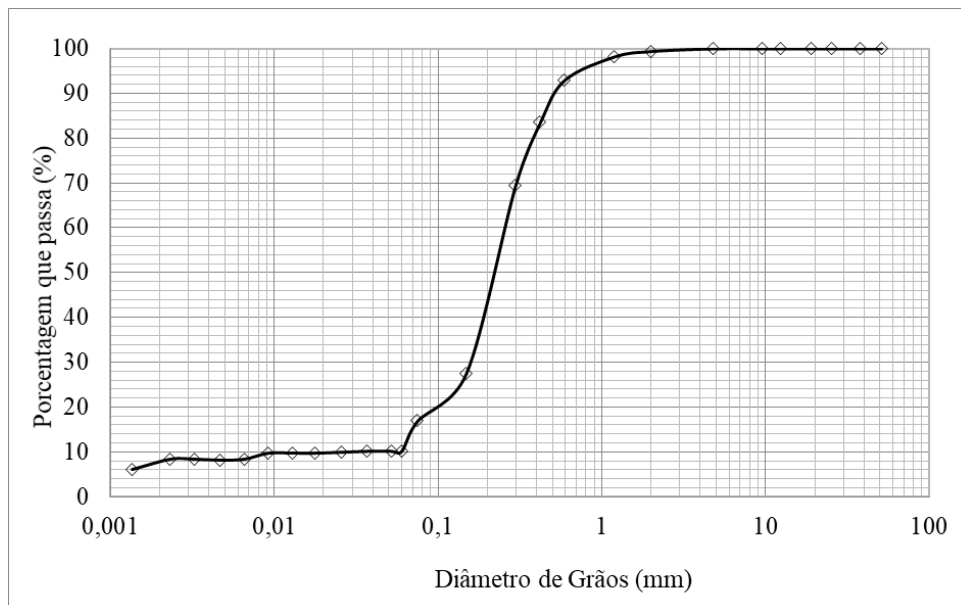
Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados no programa experimental proposto nesta pesquisa, assim como será feita a análise e discussão destes resultados.

4.1 Ensaios de Caracterização Geotécnica

4.1.1 Análise granulométrica

A curva granulométrica obtida por peneiramento e sedimentação é apresentada na Figura 29. Conforme a curva granulométrica, verifica-se que o solo é predominantemente arenoso. A composição do solo foi de 7% de areia grossa, 51% de areia média, 32% de areia fina, 2% de silte e 8% de argila, obtida de acordo com a norma NBR 6502 (ABNT, 1995). A classificação do solo foi feita pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e pelo Sistema Transportation Research Board (TRB) e é apresentada na Tabela 10.

Figura 29 - Curva granulométrica



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 10 - Classificação do solo

Sistema	Classificação	
SUCS	SM-SP	Areia siltosa mal graduada
TRB	A3	Areia fina

Fonte: Elaborada pela autora.

4.1.2 Limites de consistência

Os limites de consistência ou limites de Atterberg, o limite de liquidez e o de plasticidade, indicam que o solo apresenta características de um solo não plástico, NP.

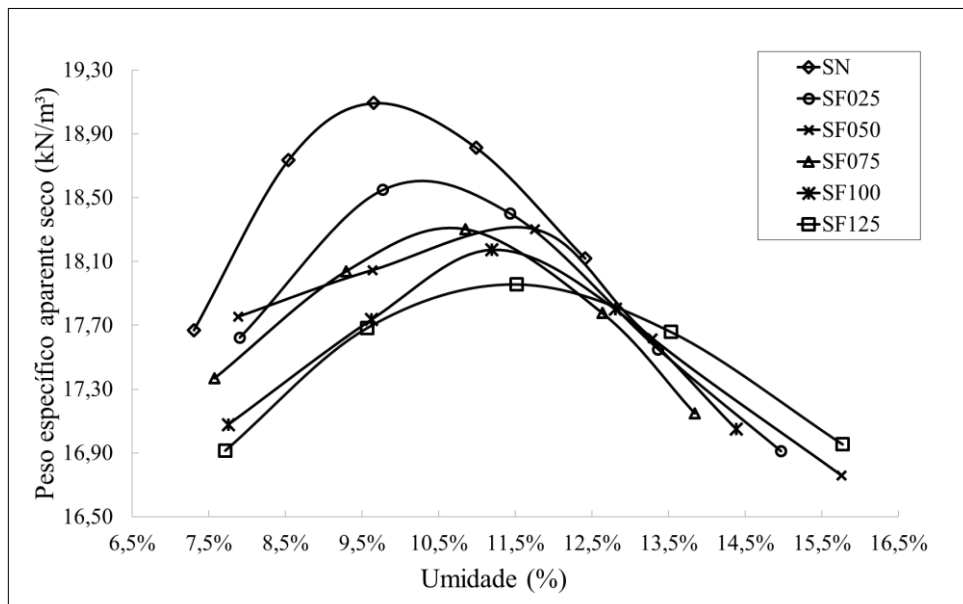
4.1.3 Densidade real dos grãos

O ensaio para determinação da densidade das partículas, pelo método do picnômetro, indicou que a densidade real dos grãos (G_s) é de 2,56.

4.1.4 Ensaio de compactação

A Figura 30 apresenta as curvas de compactação obtidas para o solo natural e as misturas solo-fibra, identificadas conforme indicado. Os valores obtidos para umidades ótimas (w) e pesos específicos secos máximos ($\gamma_{d, \text{máx}}$) correspondentes, destinados à moldagem dos corpos de prova dos ensaios de papel, ensaio de macroporosidade e microporosidade e ensaios de compressão triaxial, são apresentadas na Tabela 11.

Figura 30 - Curvas de compactação solo natural e solo-fibras



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 11 - Parâmetros adotadas das curvas de compactação

Amostra	w (%)	$\gamma_{d, \text{máx}}$ (kN/m ³)
SN	9,6	19,09
SF025	10,5	18,60
SF050	11,5	18,30
SF075	10,6	18,31
SF100	11,3	18,18
SF125	11,5	17,95

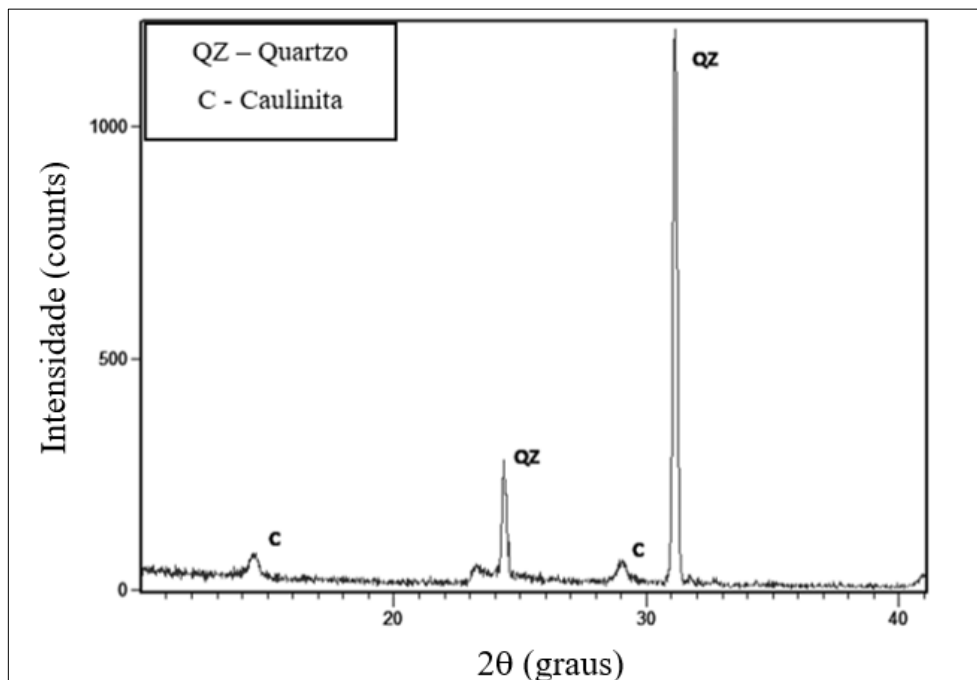
Fonte: Elaborada pela autora.

4.2 Ensaios de Caracterização Mineralógica

4.2.1 Difração de Raio X

A difração de raio-X permite a análise da mineralogia do material em estudo, na qual identificou predominantemente no solo a presença do quartzo, mineral característico dos solos arenosos, reforçando o resultado encontrado na análise granulométrica. Além do quartzo, foi verificado a presença de caulinita, que justifica a não expansibilidade do solo. A Figura 31 apresenta o resultado do ensaio de difração de raio X.

Figura 31 - Resultado do ensaio de difração de raio-X



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.2 Teor de Matéria Orgânica

A presença de matéria orgânica tem interferência direta no comportamento mecânico e hidráulico dos solos. A matéria orgânica presente no solo pode exercer influência direta ou indireta nos mesmos. Segundo Braida et. al. (2006) a influência direta atua principalmente sobre os processos físico-químicos, como por exemplo, a capacidade de troca catiônica do material, ou na elevada superfície específica. Já a influência indireta incide sobre o comportamento físico do solo com efeitos na consistência, na agregação, e conseqüentemente, na distribuição dos poros.

As amostras de solo foram submetidas ao ensaio de teor de matéria orgânica, resultando em um teor de matéria orgânica médio de 1,9%, com desvio padrão de 0,43%. Segundo Rawi et al (2017) não é recomendado assentamento de fundações em solos com teor de matéria orgânica acima de 2%. Assim, o solo é considerado adequado para o caso de obras de fundações. Na Figura 32 é mostrada as amostras de solo antes e depois da incineração em mufla.

Figura 32 - Amostras de solo antes e depois da incineração em mufla



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.3 Fluorescência de Raio X

A análise de fluorescência forneceu a composição em porcentagem de massa dos óxidos presentes no solo (Tabela 12). Como era esperado, observou-se a predominância do óxido de sílica (SiO_2) associado ao conteúdo de quartzo, assim como verificado no ensaio de difração de raio X. Verificou-se também a presença de óxidos de alumínio (Al_2O_3) e ferro

(Fe₂O₃) em menores quantidades, além de outros componentes químicos em porcentagem de massa muito pequenas. A composição química encontrada é comum para solos arenosos.

Tabela 12 - Composição em porcentagem de massa dos óxidos presentes no solo analisado

Óxidos	Porcentagem de massa (%)
SiO ₂	64,39
Al ₂ O ₃	14,61
Fe ₂ O ₃	9,61
TiO ₂	5,97
CaO	2,29
K ₂ O	1,66
Cl	0,05
MnO	0,18
P ₂ O ₅	0,41
ZnO	0,11
ZrO ₂	0,72

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3 Ensaio de Caracterização Hidromecânica

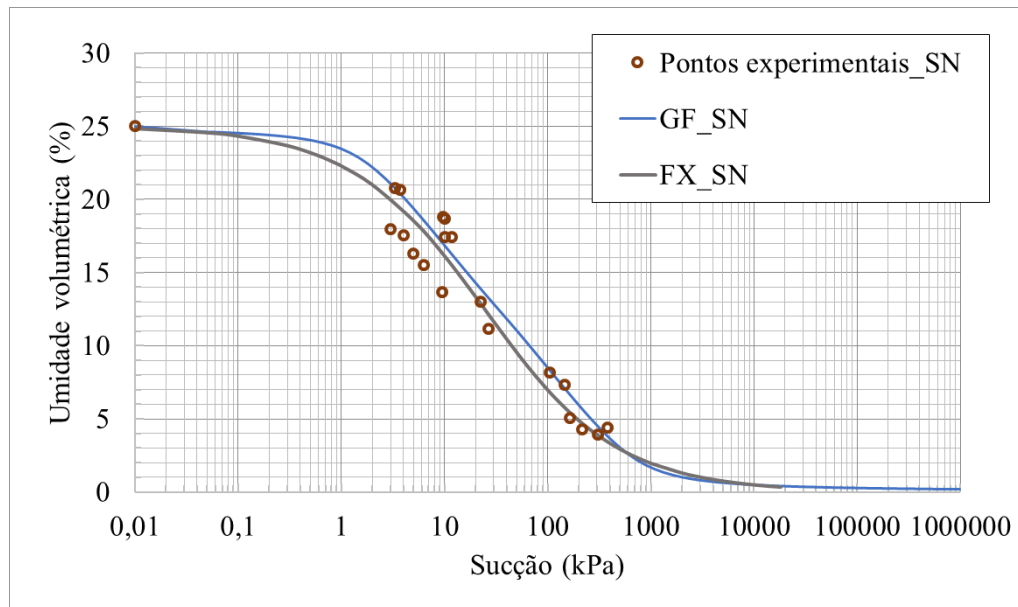
4.3.1 Curvas de retenção do solo natural e das misturas de solo-fibra

A realização do ensaio do papel tem como objetivo a obtenção dos pontos experimentais que relacionam a quantidade de água presente no solo e a sucção correspondente. A partir desses pontos e de modelos matemáticos são traçadas as curvas de retenção de água no solo.

Nesta pesquisa, foram obtidas as curvas de retenção para o solo natural e para as misturas de solo-fibra e estas serão expressas em termos de sucção e umidade volumétrica. De posse dos pontos experimentais encontrados no ensaio, as curvas foram obtidas utilizando as equações de ajuste propostas por Fredlund e Xing (1994) e Gitirana e Fredlund (2004), que serão identificadas por FX e GF, respectivamente.

Na Figura 33 é apresentada os pontos experimentais obtidos no ensaio do papel filtro e as curvas de retenção de água do solo natural pelos métodos citados anteriormente.

Figura 33 - Curva de Retenção – Solo Natural



Fonte: Elaborada pela autora.

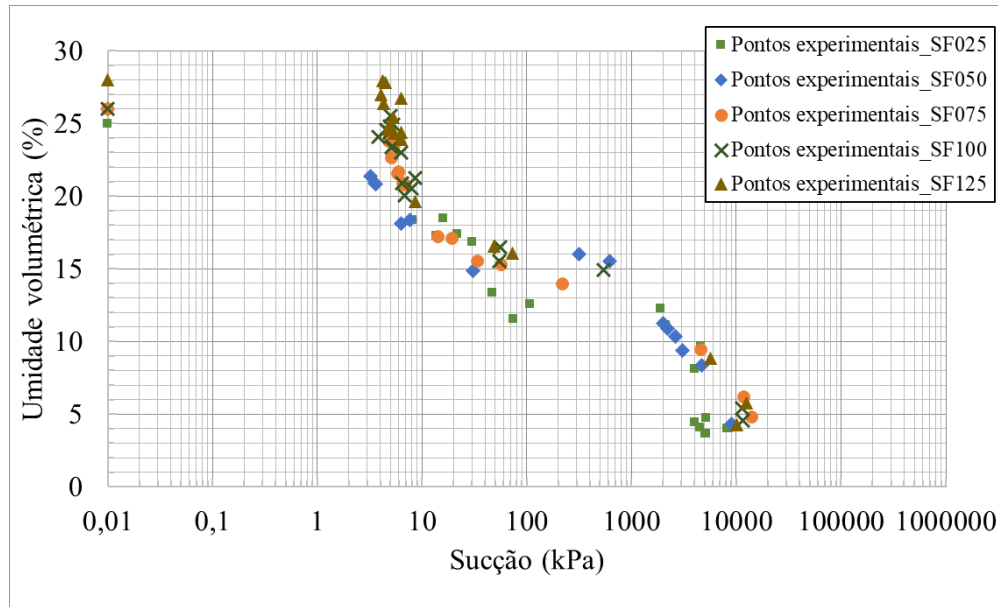
As curvas de retenção foram semelhantes para os dois métodos utilizados. As curvas apresentaram um formato unimodal, comportamento típico de solos arenosos, com baixo valor de sucção de entrada de ar, aproximadamente 3 kPa, sucção residual de 400 kPa e teor de umidade residual em torno de 2,5%.

Embora os dados experimentais apresentem pequena dispersão, os ajustes de Fredlund e Xing (1994) e Gitirana e Fredlund (2004) se mostraram adequados, pois foi possível identificar o formato unimodal das curvas de retenção.

Os parâmetros de ajuste da equação de Fredlund e Xing (1994) utilizados foram: $a = 40$ kPa; $n = 0,63$; $m = 2,54$ e $\Psi_{res} = 1000$ kPa. Já os parâmetros para o modelo de Gitirana e Fredlund (2004) foram: $\Psi_b = 1,6$ kPa; $\Psi_{res} = 670$ kPa; $a = 0,093$ e $\theta_{res} = 0,025\%$.

A Figura 34 mostra os resultados experimentais do ensaio do papel filtro, realizados nas amostras de solo-fibra com a variação do teor de fibra.

Figura 34 - Pontos experimentais obtidos pelo ensaio do papel filtro das amostras solo-fibra

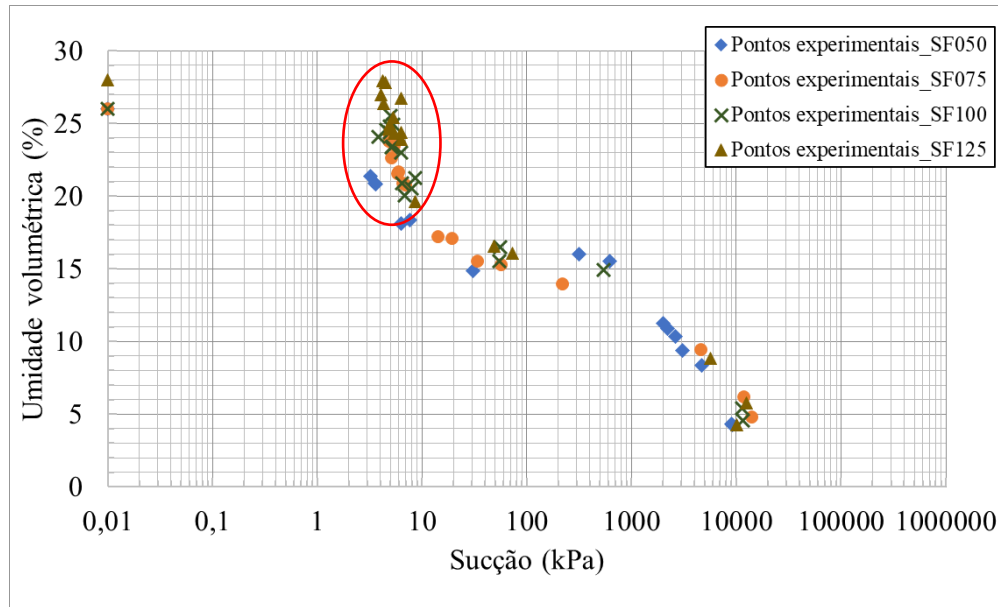


Fonte: Elaborada pela autora.

Através da análise dos pontos experimentais, é possível verificar que os pontos experimentais obtidos pelo método do papel filtro para amostras com a adição das fibras apresentam tendência ao comportamento bimodal das curvas de retenção, ou seja, a inclusão das fibras modificou o formato da curva de retenção de água no solo. Esta transição de um comportamento unimodal para um formato bimodal revela a alteração na estrutura do solo devida à adição das fibras.

A Figura 35 mostra o comportamento observado dos pontos experimentais para as misturas com teores de fibras superiores a 0,25%. No trecho inicial da curva, nota-se uma pequena variação de sucção, para uma variação relativamente maior de umidade, após o valor de entrada de ar, sugerindo que no processo de secagem das amostras de solo com as fibras, há inicialmente a secagem da água dos macroporos do solo e da secagem das fibras de polipropileno, que também retém água, ou seja, essa significativa variação de umidade com baixa variação de sucção pode ocorrer devido a secagem das fibras adicionadas ao solo.

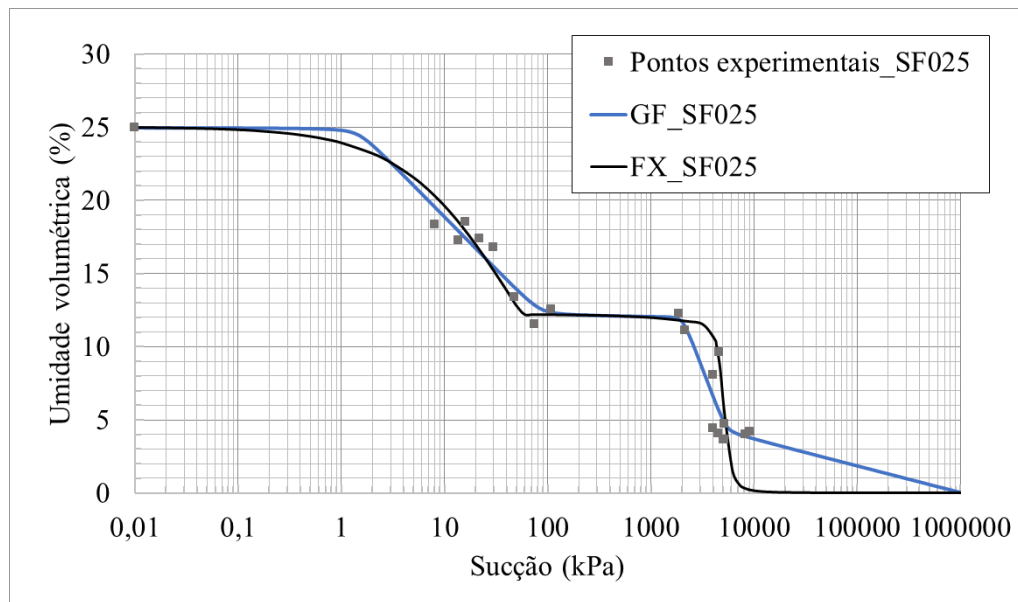
Figura 35 - Pontos experimentais obtidos pelo ensaio do papel filtro das amostras solo-fibra



Fonte: Elaborada pela autora.

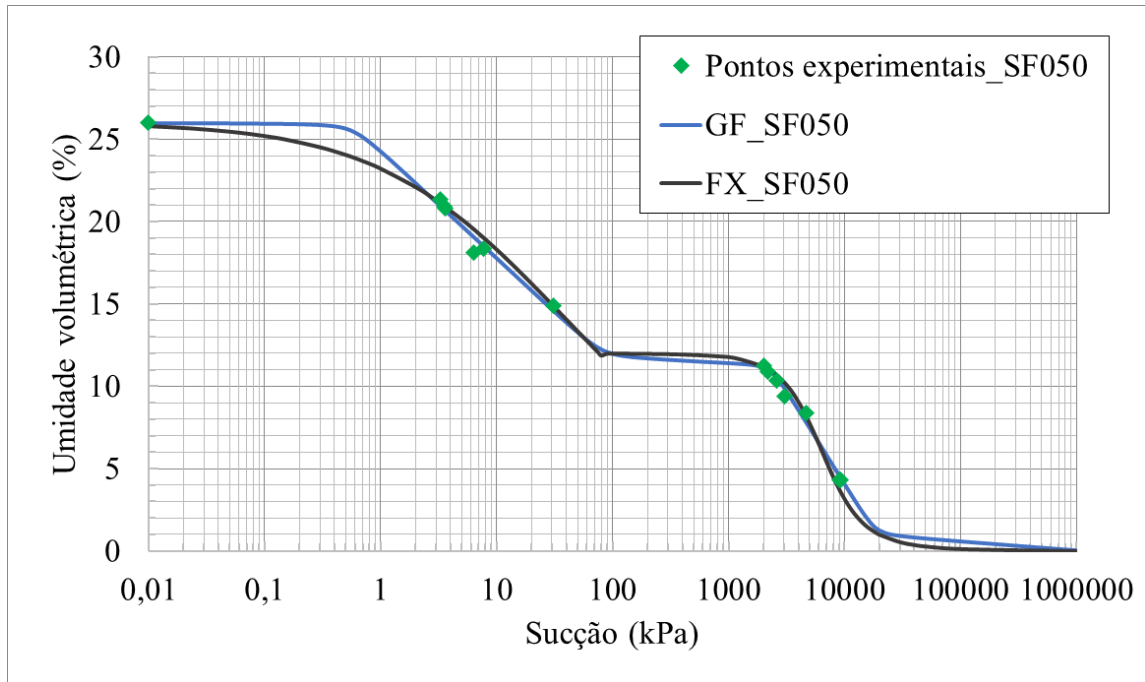
Para os ajustes dos pontos experimentais das misturas foram utilizadas as equações de Fredlund e Xing (1994), considerando-se duas curvas unimodais unidas por uma sucção de junção definida para cada amostra. Já para o método de Gitirana e Fredlund (2004), as equações foram desenvolvidas para curvas de retenção bimodais, não precisando de adaptação. Nas Figuras 36, 37, 38, 39 e 40 são apresentadas as curvas de retenção ajustadas pelo método de Fredlund e Xing (FX) e Gitirana e Fredlund (GF).

Figura 36 - Curva de Retenção – SF025



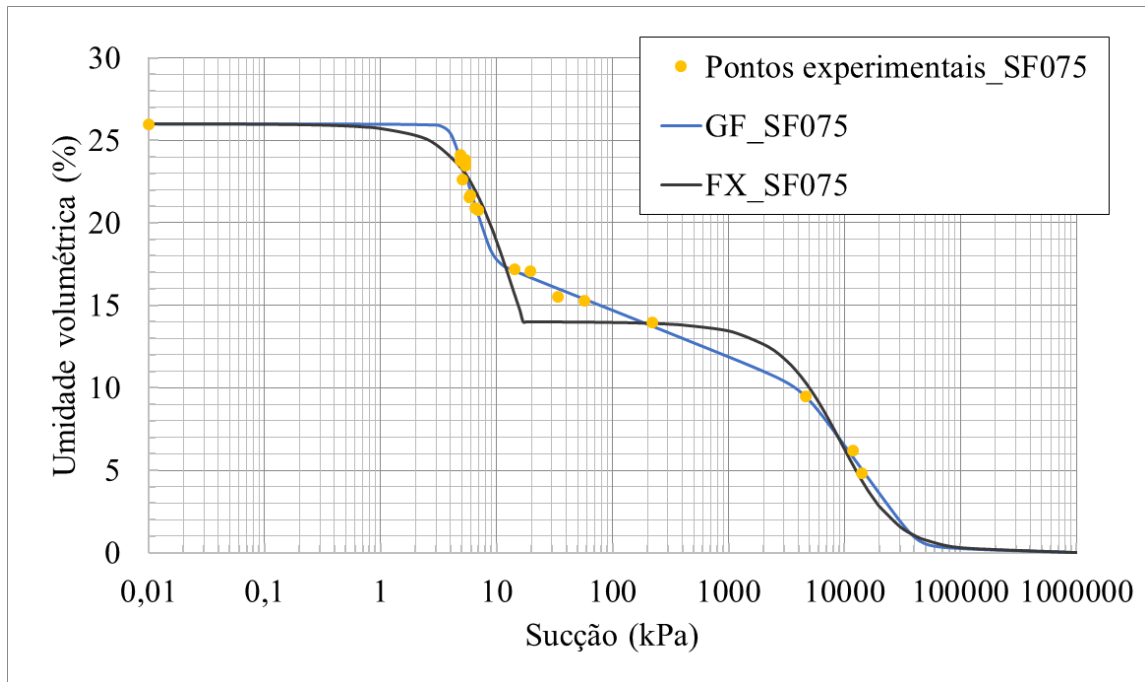
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 37 - Curva de Retenção – SF050



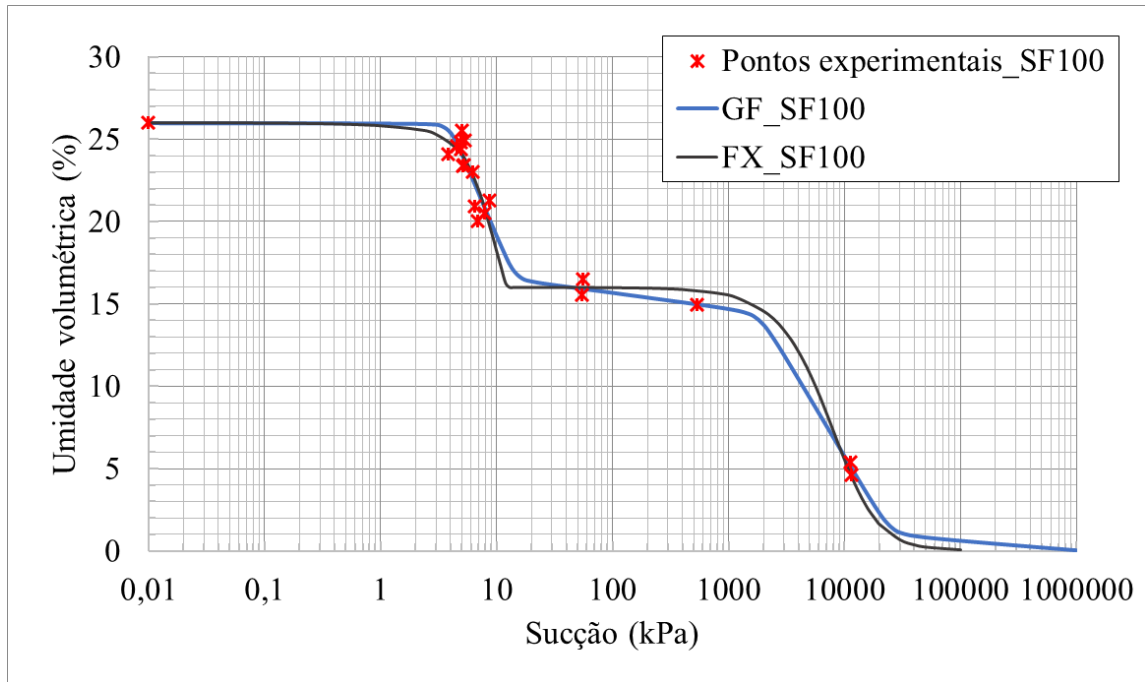
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 38 - Curva de Retenção – SF075



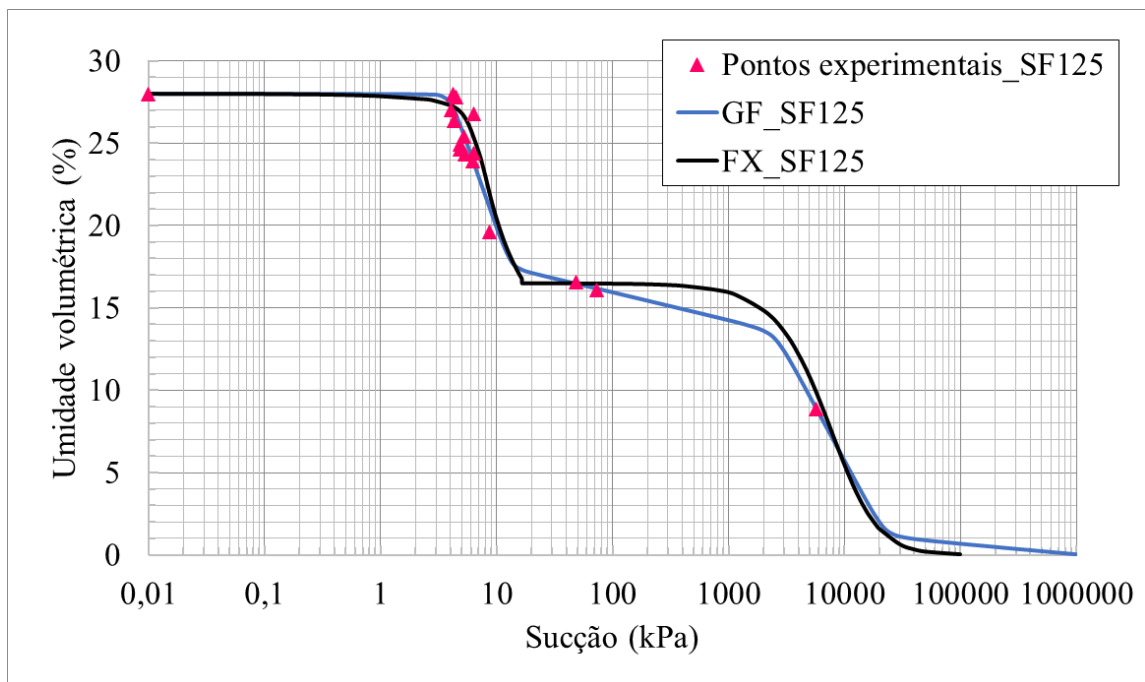
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 39 - Curva de Retenção – SF100



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 40 - Curva de Retenção – SF125



Fonte: Elaborada pela autora.

Como pode ser visto nas curvas de retenção encontradas, os métodos de ajuste resultaram em curvas de retenção aproximadas. Tem-se a obtenção de curvas de retenção bimodais, sugerindo que a macroestrutura e a microestrutura do solo foram afetadas pela

inclusão das fibras, conseqüentemente, pode acarretar alteração no comportamento hidromecânico das amostras.

A Tabela 13 apresenta os parâmetros utilizados para realizar o ajuste matemático pela equação de Fredlund e Xing (1994) das curvas de retenção bimodais das misturas solo-fibra, considerando a presença de macroporos e microporos.

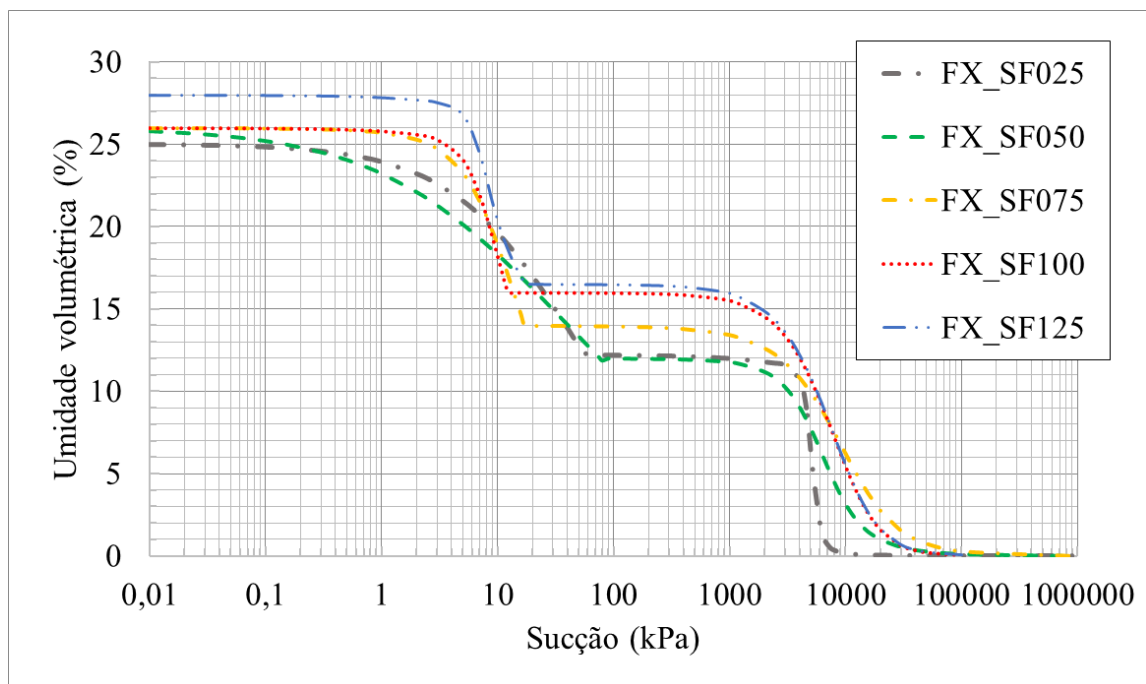
Tabela 13 - Parâmetros de ajuste da equação de Fredlund e Xing (1994) das amostras solo-fibra

Amostra	Macroporos				Microporos			
	a (kPa)	n	m	Ψ_r (kPa)	a'	n'	m'	Ψ_r (kPa)
SF025	31	0,78	1,68	50	5000	12,1	1,97	11800
SF050	8,2	0,57	1,15	90	6000	2,53	1,98	20000
SF075	9,5	2,14	0,87	10	9785,5	1,71	2,19	7450
SF100	7,2	3,68	0,51	12	10000	1,77	3,6	30000
SF125	6,4	6,27	0,25	16,5	10000	1,72	3,71	30000

Fonte: Elaborada pela autora.

Para possibilitar comparações entre as curvas de retenção obtidas para as misturas de solo-fibra com diferentes teores, a Figura 41 apresenta todas as curvas de retenção ajustadas pelo método de Fredlund e Xing (1994).

Figura 41 - Curvas de retenção solo-fibra pelo método Fredlund e Xing (1994)



Fonte: Elaborada pela autora.

Pode-se, então, obter o valor de entrada de ar associado à remoção de água dos macroporos e o valor de entrada de ar correspondente à dessaturação dos microporos presentes nas amostras. Entre a sucção residual do primeiro trecho e o valor de entrada de ar do segundo trecho ocorre uma menor variação na quantidade de água das amostras solo-fibra, caracterizando a existência do patamar.

Os valores de sucção da entrada de ar e a sucção residual dos macroporos (Ψ_{b1} e Ψ_{res1}) e dos microporos (Ψ_{b2} e Ψ_{res2}) foram obtidos graficamente a partir da Figura 44 e estão expostos na Tabela 14 a seguir.

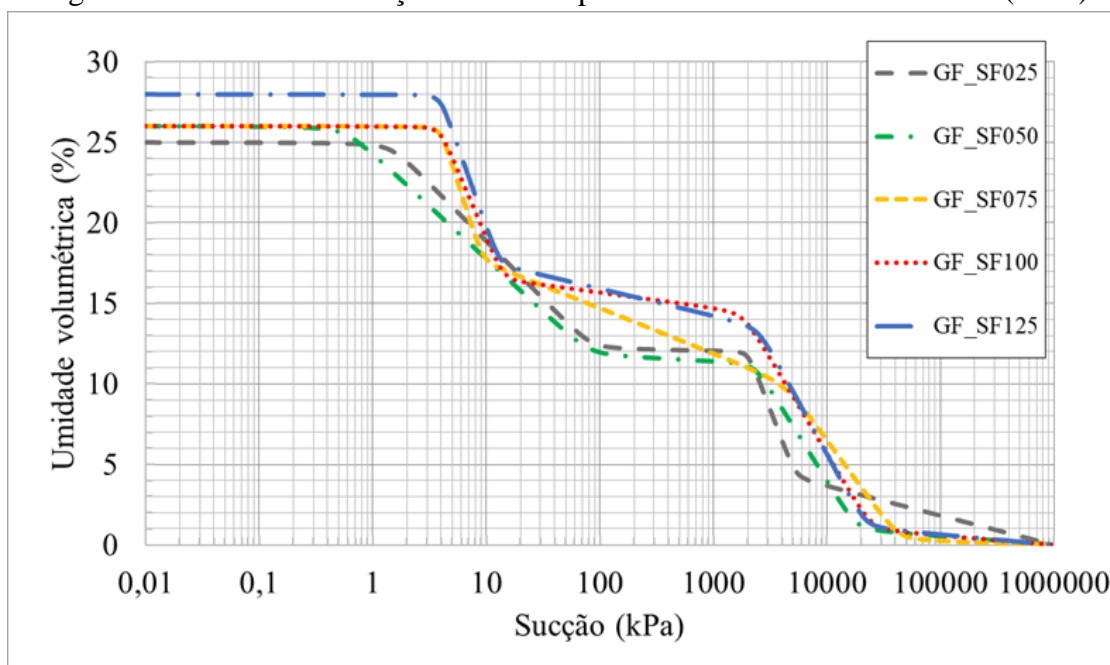
Tabela 14 - Valores de sucção da entrada de ar e residual dos macroporos e microporos

Amostra	Macroporos		Microporos	
	Ψ_{b1} (kPa)	Ψ_{res1} (kPa)	Ψ_{b2} (kPa)	Ψ_{res2} (kPa)
SF025	3	90	3500	8000
SF050	3	90	3000	20000
SF075	5	18	3000	30000
SF100	5	12	3000	30000
SF125	5	16	3000	30000

Fonte: Elaborada pela autora.

As curvas de retenção obtidas pelas equações de ajuste propostas por Gitirana e Fredlund (2004) estão reunidas na Figura 42 e a Tabela 15 mostra os parâmetros empregados para este método.

Figura 42 - Curvas de retenção solo-fibra pelo método Gitirana e Fredlund (2004)



Fonte: Elaborada pela autora.

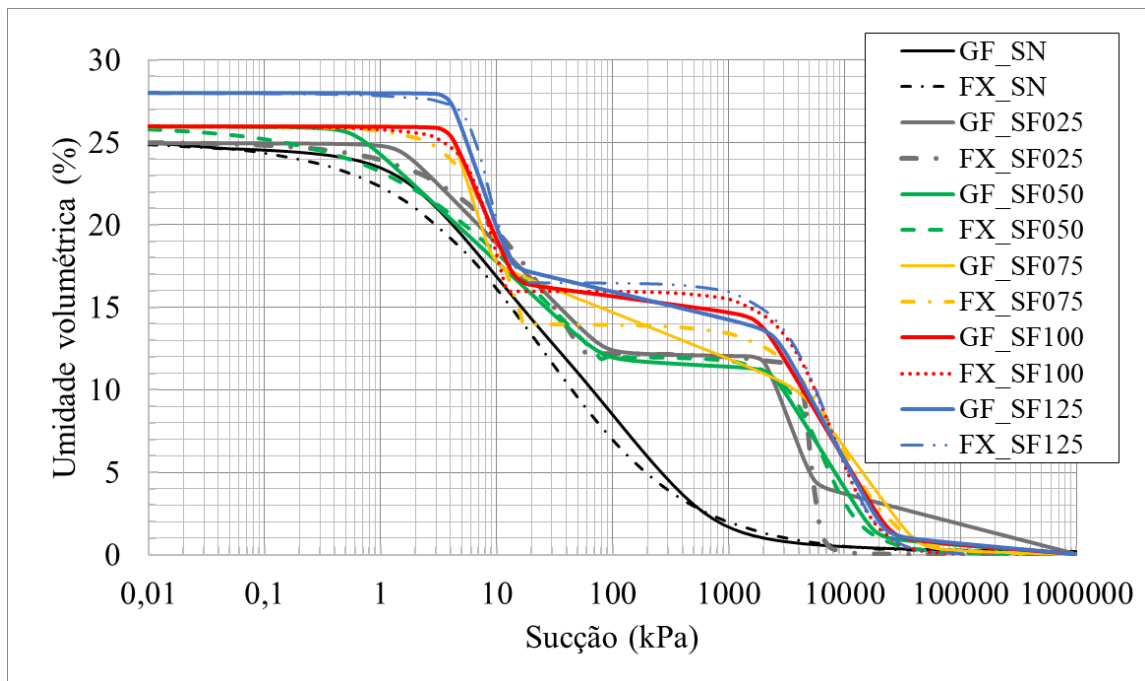
Tabela 15 - Parâmetros de ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) das amostras solo-fibra

Amostra	Ψ_{b1} (kPa)	Ψ_{res1} (kPa)	θ_{res1} (%)	Ψ_{b2} (kPa)	θ_b (%)	Ψ_{res2} (kPa)	θ_{res2} (%)	a
SF025	1,45	84,43	12,1	2031,7	12,1	5293,4	4,15	0,020
SF050	0,58	80,87	11,7	2313,3	11,4	18086,1	0,9	0,020
SF075	4	9,319	17,52	4410,6	10,2	42275	0,26	0,022
SF100	4	14,19	16,41	1836,4	14,56	24740,2	0,88	0,022
SF125	4	13,06	17,4	2506,6	13,6	21993,3	1,04	0,020

Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 43 é apresentada todas as curvas características obtidas pelo método de ajuste de Fredlund e Xing (1994) e Gitirana e Fredlund (2004), para as amostras de solo natural e solo-fibra.

Figura 43 - Curva de retenção do solo natural e solo-fibras pelo método Fredlund e Xing (1994) e Gitirana e Fredlund (2004)



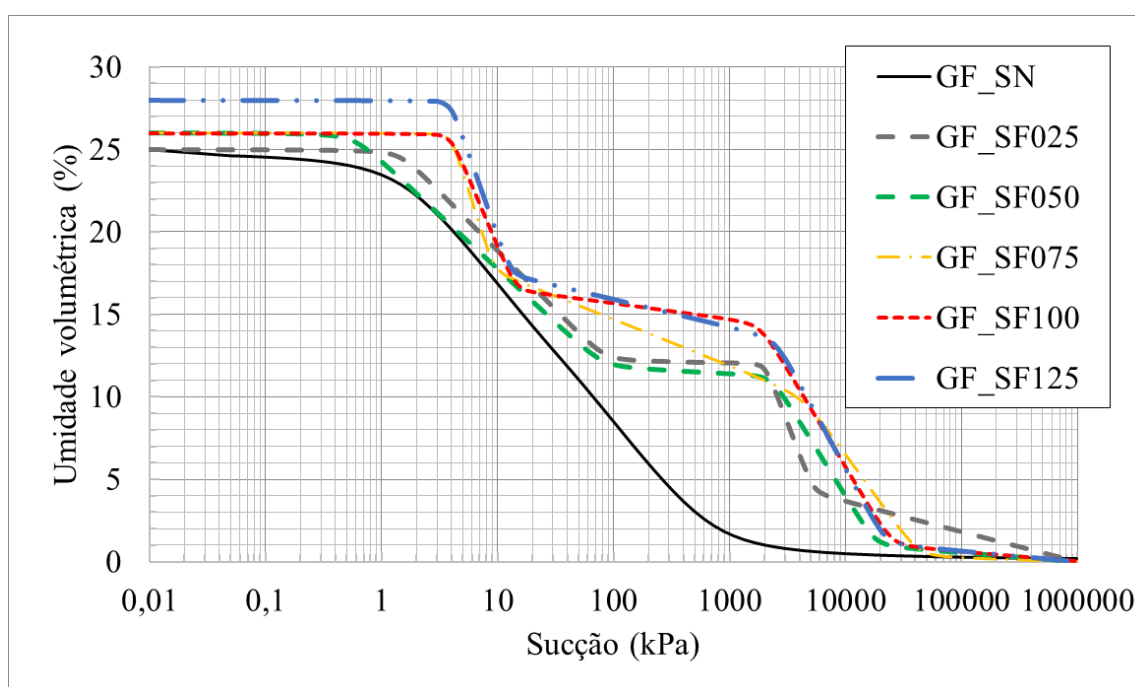
Fonte: Elaborada pela autora.

A partir dos resultados e das análises realizadas, verificou-se que as curvas de retenção encontradas pelos métodos de Fredlund e Xing (1994) e Gitirana e Fredlund (2004) apresentaram comportamento semelhante e foram concordantes com os pontos experimentais. Dessa forma, optou-se pela utilização das curvas de retenção encontradas pelo método proposto

por Gitirana e Fredlund (2004) para continuidade da pesquisa, uma vez que as equações desse método foram desenvolvidas para solos com comportamento bimodal, como é o caso das amostras solo-fibra. Além disso, esse método resultou em curvas mais aproximadas dos pontos experimentais obtidos pelo ensaio do papel filtro, para todas as amostras estudadas.

A Figura 44 é apresentada com objetivo de comparar e discutir as curvas de retenção obtidas pelo método de ajuste de Gitirana e Fredlund (2004), para o solo natural e para as misturas solo-fibra.

Figura 44 - Curva de retenção solo natural e solo-fibras pelo método Gitirana e Fredlund (2004)



Fonte: Elaborada pela autora.

Os aspectos mais relevantes que podem ser constatados na análise das curvas de retenção ajustadas pelo método de Gitirana e Fredlund (2004) são:

- A curva de retenção de água do solo muda seu formato de unimodal para bimodal quando são reforçados com fibras de polipropileno para os teores de fibra estudados;
- As curvas de retenção das amostras SF025 e SF050 apresentam inclinação menor quando comparadas as amostras SF075, SF100 e SF125, considerando o trecho de dessaturação dos macroporos. Enquanto para o trecho de dessaturação dos microporos, todas as amostras apresentam inclinação semelhante. Dessa forma, pode-se inferir pelo comportamento das curvas de retenção que a dessaturação dos macroporos ocorre de forma mais suave para as

amostras SF025 e SF050, já a dessaturação dos microporos ocorre de maneira similar para todas as amostras reforçadas com fibras.

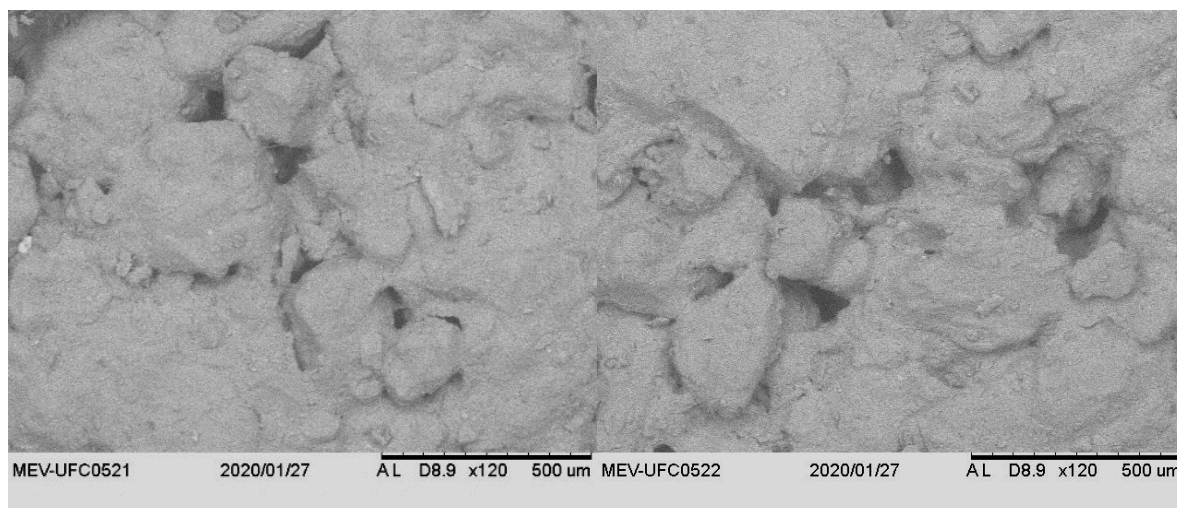
- As curvas de retenção das amostras SF100 e SF125 são praticamente coincidentes;

As curvas de retenção encontradas serão utilizadas para relacionar a umidade das amostras ensaiadas no ensaio de compressão triaxial e a sucção correspondente.

4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Mediante a Microscopia Eletrônica de Varredura foi possível observar características morfológicas e inferir sobre a textura, estrutura, adesão entre os materiais. A microscopia foi realizada nas amostras compactadas de solo natural e para as misturas de solo-fibra. A Figura 45 mostra as micrografias do solo natural, na qual é possível observar a presença de vazios e a forma irregular das partículas.

Figura 45 - MEV (x120) Solo Natural



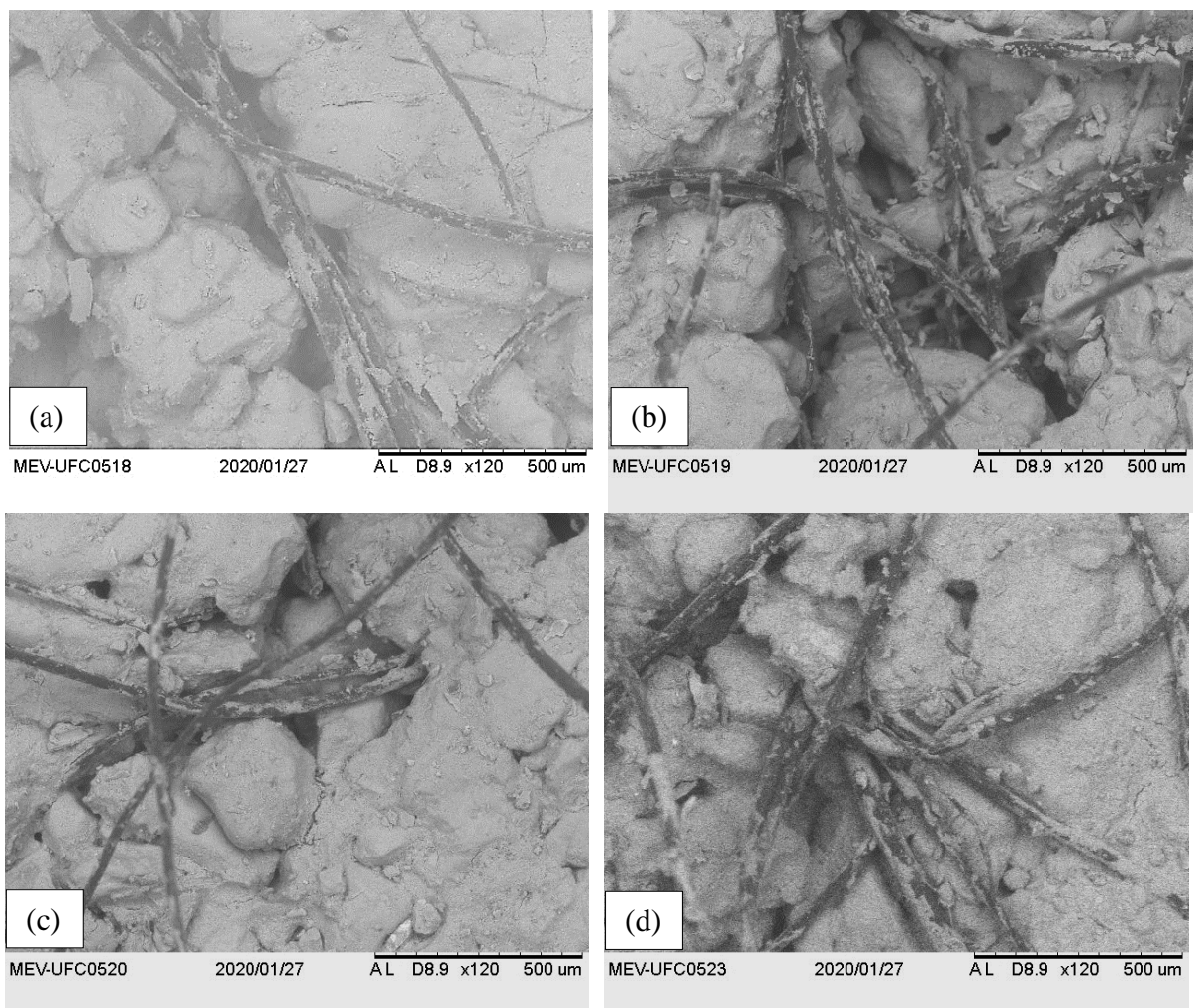
Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 46 apresenta as micrografias das amostras SF050, SF075, SF100 e SF125, respectivamente. Constata-se que as estruturas das misturas de solo-fibra são similares, com predominâncias de aglomerações do solo e vazios aparentemente maiores que os vazios do solo natural. Nas regiões de interação solo-fibra, é possível verificar que há maior quantidade de vazios e pouca adesão dos materiais. Além disso, constata-se aglomerações de fibras, que dificultam a conexão e intertravamento entre as partículas do solo. Nota-se que as fibras não possuem completa aderência com o solo, mesmo estando compactados. O aumento do teor de

fibras contribuiu para a formação de macroporos e causaram um aumento da porosidade da mistura.

Vale ressaltar que as fibras são distribuídas aleatoriamente na massa de solo, com isso em determinadas regiões da amostra as aglomerações podem estar mais concentradas mesmo para teores de fibra menores. Esse fato, pode ser observado nas micrografias das amostras SF075 e SF125, uma vez que pode ser visto uma maior aglomeração de fibras na amostra SF075 (Figura 46b) quando comparada a amostra SF125 (Figura 46d).

Figura 46 - MEV (x120) (a) SF050, (b) SF075, (c) SF100, (d) SF125



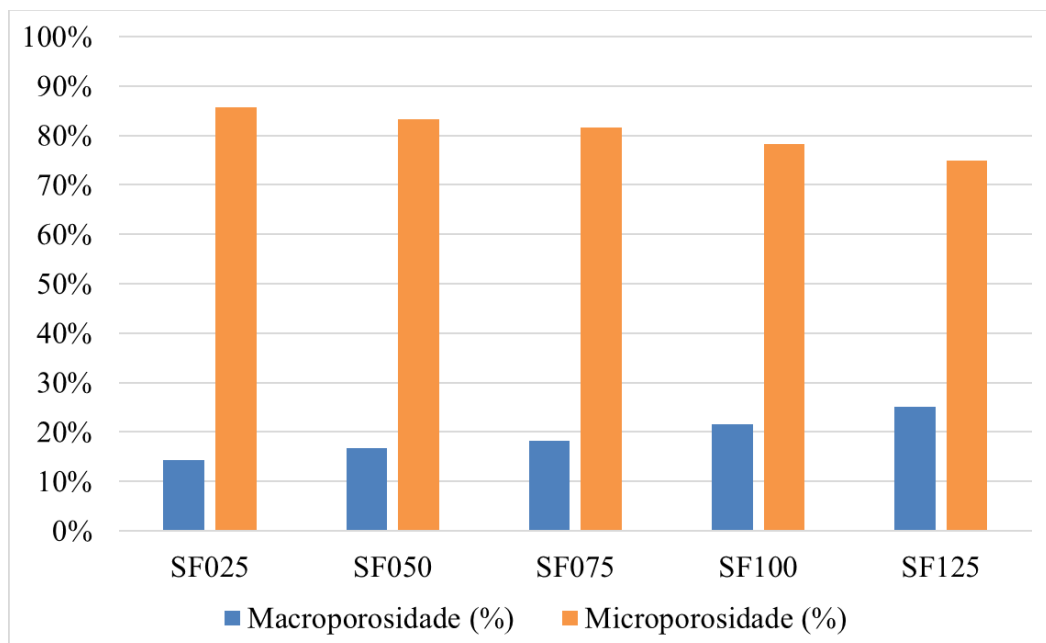
Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.3 Análise da macroporosidade e microporosidade

O ensaio de macroporosidade e microporosidade pelo método da mesa de tensão foi realizado para investigar a relação entre os macroporos e microporos das amostras. Para a amostra de solo natural, optou-se por não realizar este ensaio, pois o formato da curva de retenção foi unimodal, sugerindo que a distribuição dos poros é aproximadamente do mesmo tamanho. Além disso, as estruturas das amostras sem e com reforço possuem formação distintas, não sendo possível a comparação.

Vale ressaltar que este ensaio é adequado para as amostras ensaiadas, uma vez que os valores de entrada de ar referente aos macroporos das misturas solo-fibra são menores que 6 kPa, indicando que a aplicação desta tensão é suficiente para permitir a drenagem dos macroporos. Os resultados deste ensaio serão expressos em porcentagens de macroporos e microporos e são apresentados na Figura 47.

Figura 47 - Resultado do ensaio de macro e microporosidade



Fonte: Elaborada pela autora.

Como pode ser visto, a porcentagem de microporosidade é expressivamente maior (em torno de 80%) do que a porcentagem de macroporosidade (aproximadamente 20%). Esse resultado era esperado, uma vez que a quantidade de fibra adicionada é relativamente pequena se comparada a quantidade de solo na amostra. Além disso, o solo é predominantemente formado por areia média a fina, como foi constatado na análise granulométrica, podendo assim

acarretar a formação de uma maior quantidade de poros pequenos, ou seja, microporos. Foi possível constatar uma sensível elevação da macroporosidade com o aumento do teor de fibra, como previsto, visto que o aumento das fibras causa um acréscimo na porosidade da mistura. Para se obter resultados mais conclusivos a respeito da macroporosidade e microporosidade das amostras são necessários ensaios que avaliem a distribuição e tamanhos dos poros.

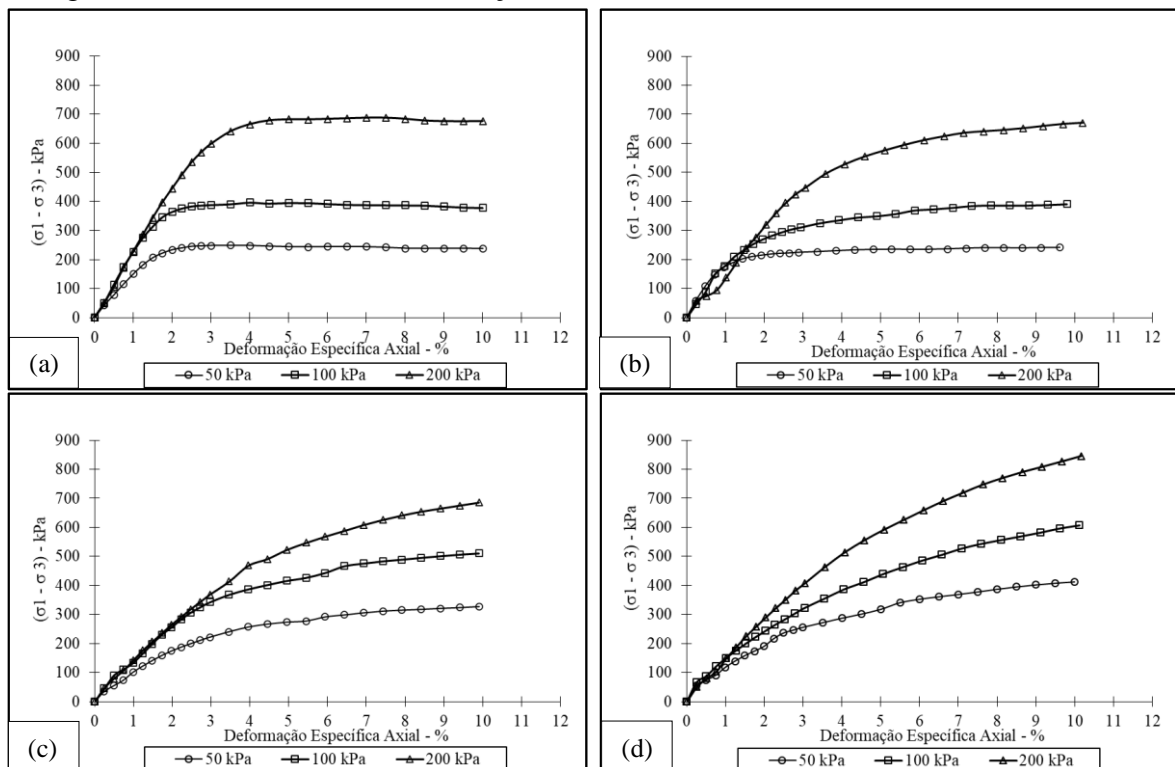
4.3.4 Comportamento das curvas tensão-deformação

A apresentação e análise do comportamento das curvas tensão-deformação serão divididos em ensaios saturados e não saturados, sendo posteriormente realizada uma análise comparativa entre eles.

4.3.4.1 Curvas tensão versus deformação para condição saturada

A Figura 48 mostra as curvas tensão-deformação resultantes dos ensaios de compressão triaxial saturado, do solo natural e solo-fibras para os teores estudados, plotadas no espaço deformação axial *versus* tensão desvio.

Figura 48 – Curvas tensão-deformação axial (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125



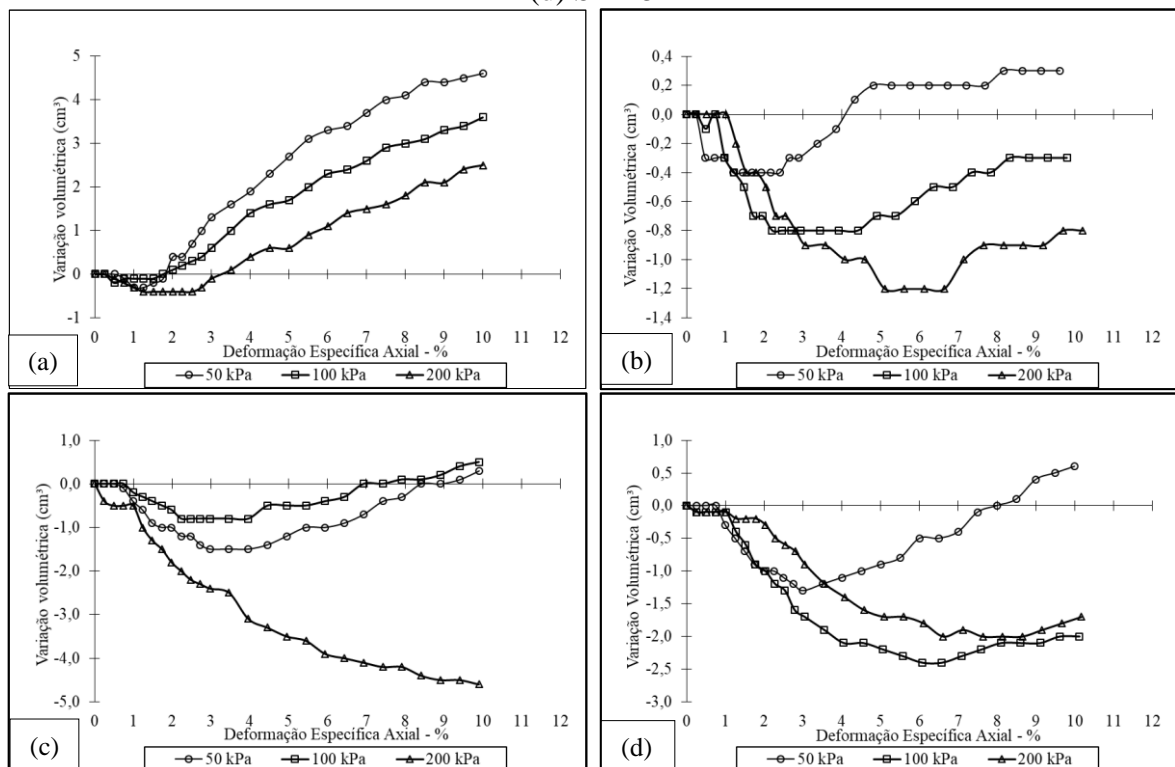
Fonte: Elaborada pela autora.

O comportamento das amostras sem reforço apresenta valores de tensão desvio que se mantêm constante para deformações axiais maiores. Para as tensões confinantes maiores (100kPa e 200kPa), a amostra SF025 apresenta aumento da resistência sem a presença de picos, continuando a crescer com o aumento da deformação axial de forma aparentemente constante. As curvas das amostras SF075 (Figura 48c) e SF125 (Figura 48d) apresentam tensões desviadoras crescentes com a deformação axial, sem a existência de um pico ou a tendência de atingir um valor máximo para o nível de deformações estudadas, indicando que as amostras não atingiram seu estado de ruptura, podendo alcançar maiores deformações antes da ruptura.

4.3.4.1.1 Curvas deformação volumétrica *versus* deformação axial para condição saturada

As curvas correspondentes de variação volumétrica, no espaço deformação axial *versus* deformação volumétrica são apresentadas na Figura 49. O solo natural apresentou variação volumétrica correspondente a um comportamento inicial compressivo seguido de expansão do solo (Figura 49a). A amostra SF025 se mostrou mais compressiva inicialmente, e posteriormente apresentou expansão para a tensão confinante de 50kPa, já para as demais tensões confinantes predominou o comportamento compressivo (Figura 49b).

Figura 49 - Curvas variação volumétrica-deformação axial (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125



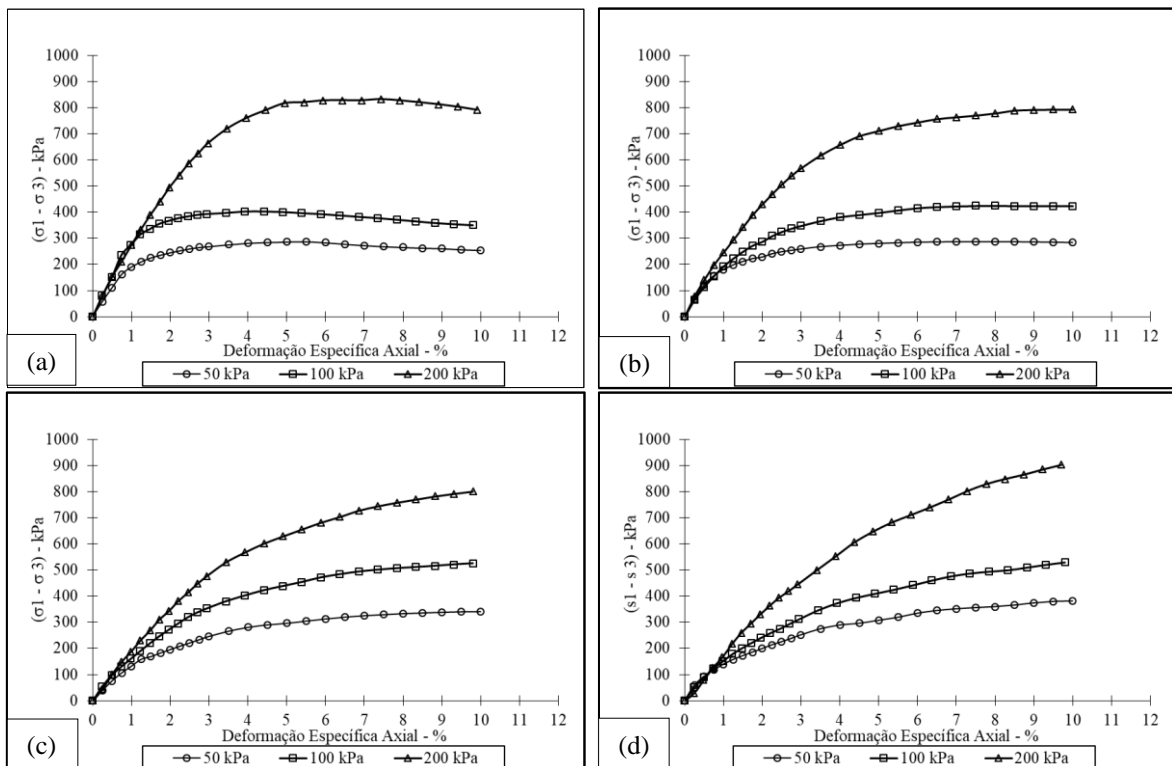
Fonte: Elaborada pela autora.

Com relação a variação volumétrica da amostra SF075, nota-se um comportamento inicial de compressão e posterior expansão para as tensões confinantes de 50 kPa e 100 kPa, enquanto para tensão confinante de 200 kPa observou apenas o comportamento compressivo. Já para a amostra SF125, verificou-se comportamento predominantemente compressivo para as tensões confinantes 100 kPa e 200 kPa, enquanto ocorreu uma compressão inicial e expansão da amostra para a tensão confinante 50 kPa.

4.3.4.2 Curvas tensão versus deformação para condição não saturada na umidade ótima

Na Figura 50 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de compressão triaxial não saturado do solo natural e das misturas solo-fibra, estando as amostras na umidade ótima. Conforme os resultados, constata-se que o solo natural apresenta resistência de pico bem definida em todos os níveis de tensões de confinamento aplicadas, no entanto, com uma pequena queda da resistência pós-pico.

Figura 50 - Curvas Tensão-Deformação Axial para amostras (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125 na umidade ótima



Fonte: Elaborada pela autora.

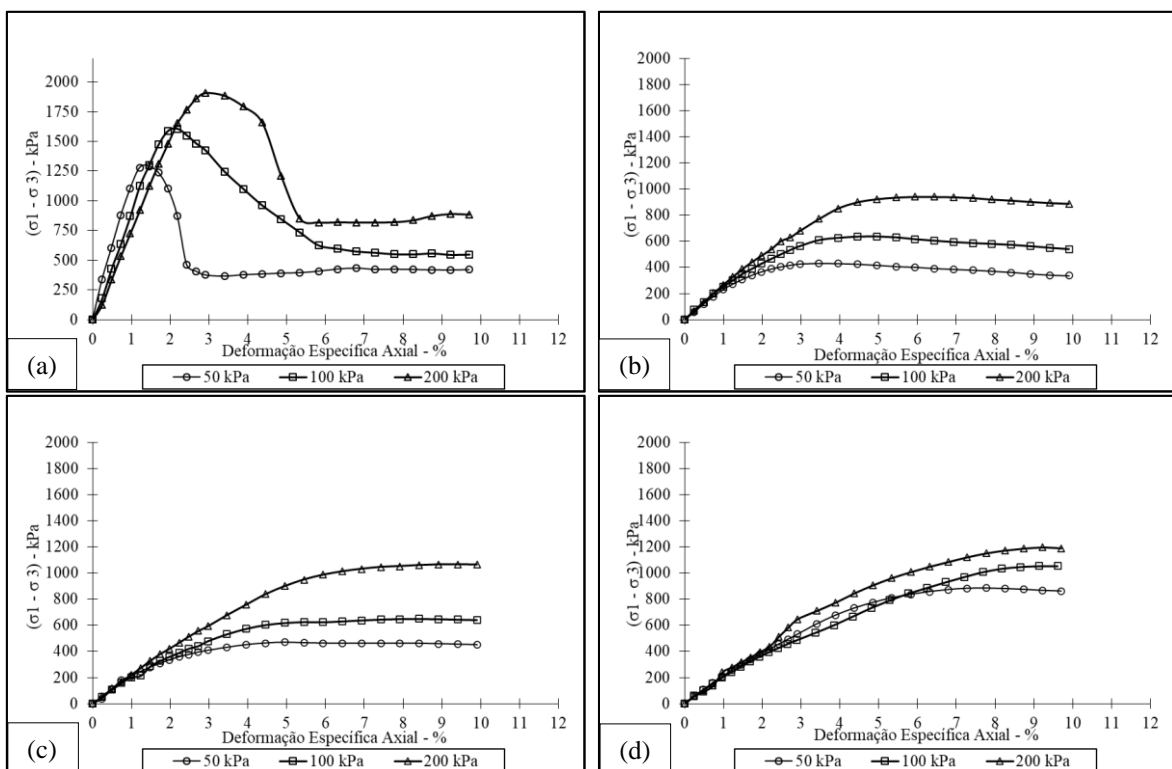
Observa-se ainda que a amostra SF025 apresentou comportamento semelhante ao solo natural em termos de resistência. Para as tensões confinantes 50kPa e 100kPa, foi observado um valor máximo de tensão desvio e mantido este valor aproximadamente constante para maiores deformações. Enquanto para tensão confinante de 200kPa, foi verificado crescimento da tensão desvio com o aumento da deformação axial.

As curvas tensão-deformação axial das amostras SF075 e SF0125 crescem continuamente com a deformação axial, sem apresentar pico até o nível de deformação estudadas, este comportamento também foi observado para a condição saturada.

4.3.4.3 Curvas tensão versus deformação para condição não saturada abaixo da umidade ótima

Na Figura 51 são mostrados os resultados referente aos ensaios triaxiais realizados nas amostras com umidades abaixo da umidade ótima. A mudança mais notória para esta condição de saturação aconteceu nas curvas de tensão-deformação do solo natural (Figura 51a).

Figura 51 - Curvas Tensão-Deformação Axial para amostras (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125 abaixo da umidade ótima



Fonte: Elaborada pela autora.

As curvas tensão deformação do solo natural apresentaram um pico de resistência bem pronunciado e uma grande queda na resistência pós-pico. Tal fato pode ser atribuído a cimentação do solo causada pela presença dos óxidos de ferro e alumínio, além da influência da sucção presente.

A amostra SF025 apresentou um pico de resistência, seguido de uma leve queda de resistência pós-pico, com o acréscimo da deformação axial, enquanto as amostras SF075 e SF125 atingiram um valor máximo de tensão desviadora, mantendo este valor com o aumento da deformação axial.

4.3.4.4 Influência da variação do teor de fibras na condição saturada

Para fins de comparação e análise dos resultados obtidos para os teores de fibra estudados, são apresentadas na Figura 52 as curvas tensão-deformação para as tensões de confinamento empregadas no ensaio de compressão triaxial saturado. Vale ressaltar que todas as análises de resistência foram realizadas em função da tensão desviadora de pico, considerando a deformação axial de 10% utilizada em todos os ensaios de compressão triaxial.

A amostra SF025 apresentou uma queda de resistência em relação ao solo natural de aproximadamente 3%, para as tensões confinantes de 50kPa e 200kPa. No entanto, na tensão confinante de 200kPa não foi verificada a estabilização da tensão desviadora para o nível de deformação axial adotada. Para a tensão confinante de 100kPa, esse decréscimo de resistência foi da ordem de 1% com relação ao solo natural. Verifica-se que com o acréscimo da deformação axial as tensões desvio das amostras SN e SF025 tendem para o mesmo valor residual, considerando a deformação axial 10%, para todas as tensões confinantes aplicadas.

As fibras passaram a contribuir no acréscimo de resistência com a adição dos teores de fibra de 0,75% e 1,25%, correspondente as amostras SF075 e SF125, respectivamente. A amostra SF075 apresentou um aumento de resistência de aproximadamente 30% com relação ao solo natural, para as tensões confinantes de 50kPa e 100kPa, considerando o nível de deformação axial adotado de 10%. Para a tensão confinante de 200kPa, a amostra SF075 apresentou comportamento não esperado, pois não foi verificado ganho de resistência com relação ao solo natural até a deformação axial de 10%, sugerindo que pode ter acontecido algum problema no equipamento ou no procedimento, sendo necessário a realização de novo ensaio para confirmação do resultado.

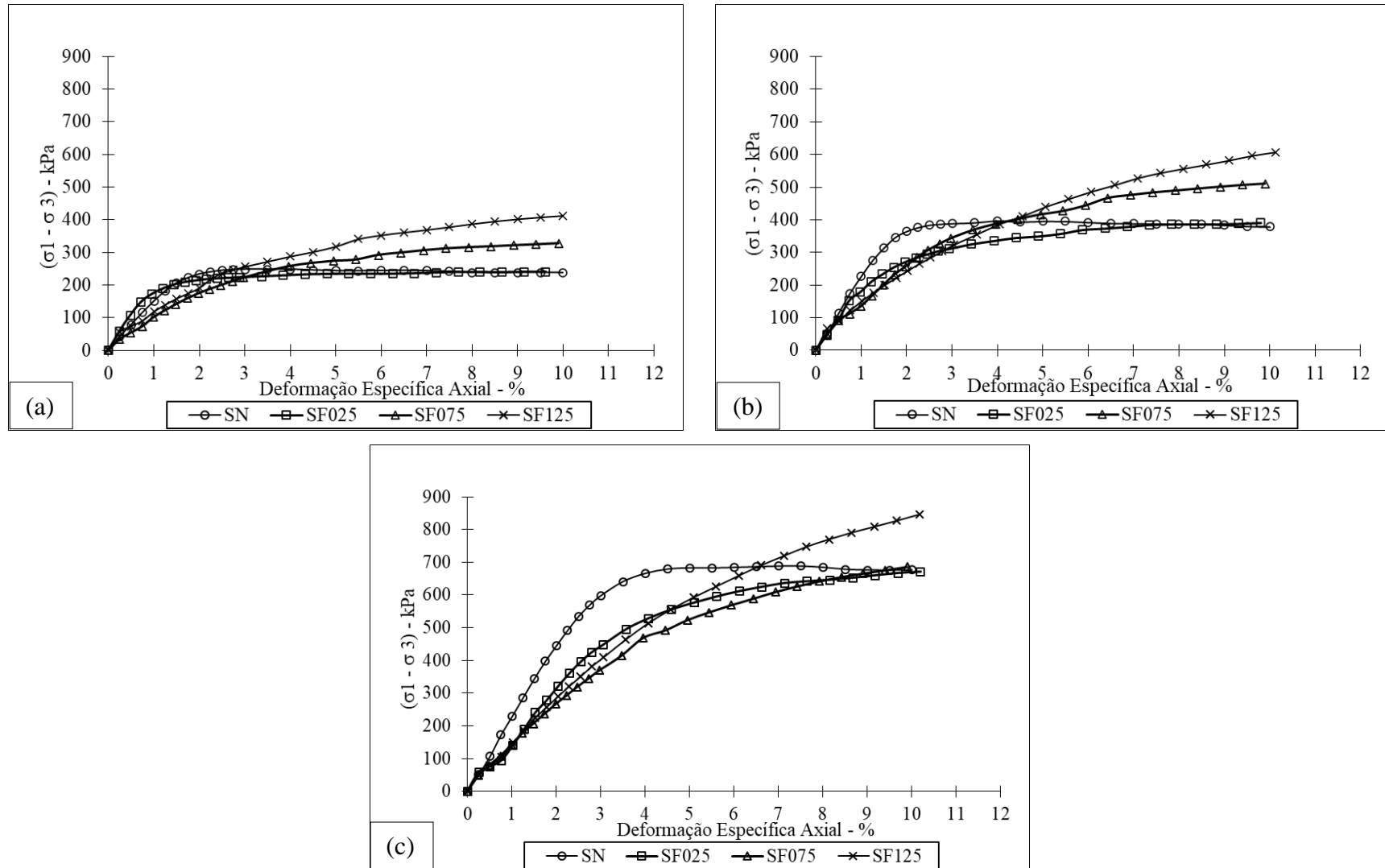
A amostra SF125 apresentou maior ganho de resistência com relação ao solo natural. Esse ganho de resistência foi mais pronunciado para tensões confinantes menores,

sendo da ordem de 66% e 53% para as tensões confinantes de 50kPa e 100kPa, respectivamente. Enquanto para a tensão confinante de 200kPa, o aumento de resistência com relação ao solo natural foi de aproximadamente 23% com relação ao solo natural.

Ao comparar as amostras SF075 e SF125 quanto a resistência, observa-se que o ganho de resistência ao aumentar o teor de fibra de 0,75% para 1,25% é da ordem de 23%. Vale ressaltar que o comportamento das curvas tensão-deformação dessas duas amostras apresentou um aspecto similar entre si, ou seja, quanto maior a deformação axial aplicada, maior o aumento do ganho da tensão desvio, sem a presença de resistência de pico e sem apresentar a estabilização das tensões.

De forma geral, constata-se que a influência do teor de fibra é significativa na resistência do solo. No entanto, a adição do teor de fibras de 0,25% não representou ganhos de resistência significativos quando comparado ao solo natural até o nível de deformação estudado. No entanto, a resistência da amostra reforçada tende a crescer com o aumento da deformação axial, assim espera-se que exista ganho de resistência para maiores deformações. Além disso, as amostras reforçadas apresentam um comportamento mais dúctil em relação ao solo natural. Os resultados apontam que a resistência é melhorada significativamente para as amostras SF075 e SF125, indicando que os teores de fibra de 0,75% e 1,25% contribuem satisfatoriamente na resistência e continua a crescer para maiores deformações.

Figura 52 - Efeito da Variação do Teor de Fibra (a) $\sigma_3 = 50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3 = 200\text{kPa}$

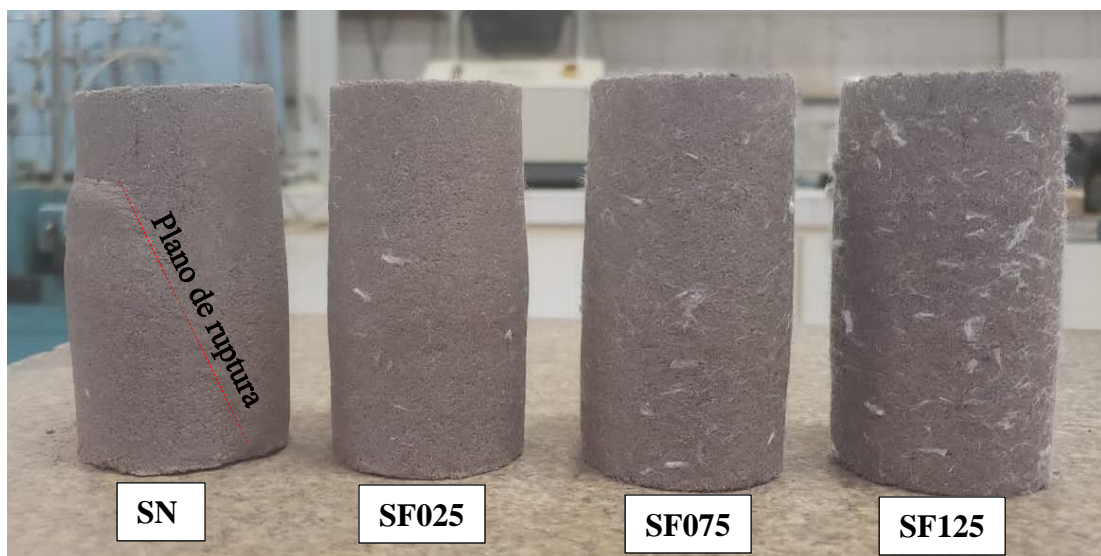


Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.4.5 Influência da variação do teor de fibras na condição não saturada na umidade ótima

A Figura 53 mostra alguns dos corpos de prova obtidos dos ensaios de compressão triaxial não saturado na umidade ótima após a fase de cisalhamento. Pode-se perceber que somente a amostra de solo natural, conforme indicado, apresenta plano de ruptura visível, enquanto as amostras reforçadas não apresentam plano de ruptura aparente, sugerindo que as amostras reforçadas com fibras não atingiram seu estado de ruptura, como já mencionado anteriormente.

Figura 53 - Corpos de prova obtidos dos ensaios de compressão triaxial não saturado na umidade ótima após a fase de cisalhamento

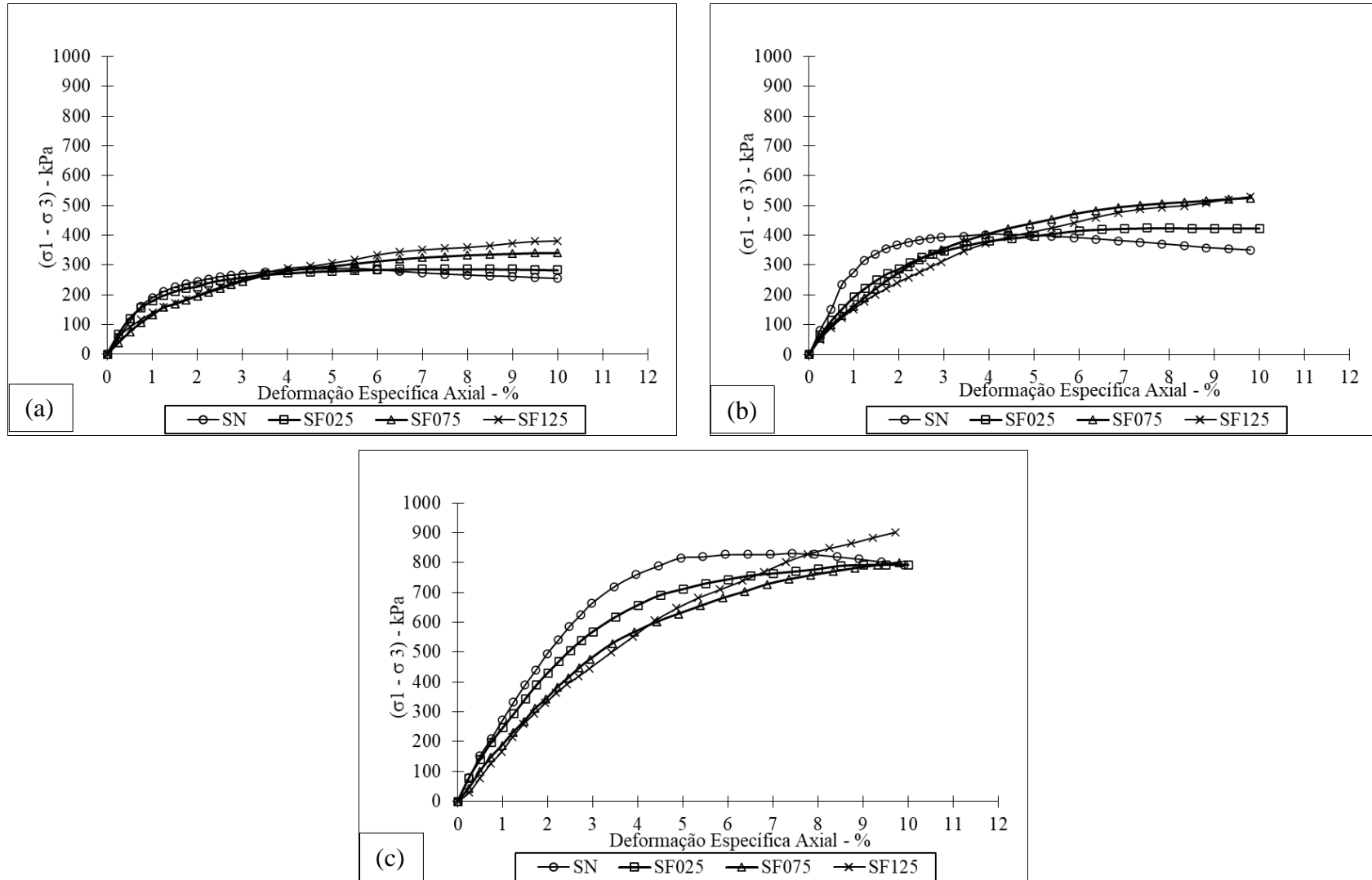


Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 54 são apresentadas as curvas de deformação axial e tensão desvio separadas por tensão confinante aplicada para as amostras na umidade ótima. Observa-se que não há alterações significativas em termos de resistência quando comparadas com os resultados obtidos no ensaio de compressão triaxial saturado (Figura 52), indicando que a mudança na condição de saturação para este caso é pequena. Contudo, a amostra SF125 também apresentou melhor desempenho quanto à resistência.

Tal fato pode ser justificado pelas amostras na umidade ótima já serem próximas da umidade de saturação, ocasionando pouca ou nenhuma interferência na resistência. Esse comportamento semelhante entre os resultados do ensaio saturado e não-saturado na umidade ótima é verificado para todos os teores de fibras e mais evidente para tensões confinantes menores.

Figura 54 - Curvas Tensão-Deformação Axial para amostras na umidade ótima por tensão confinante (a) $\sigma_3=50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3=100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3=200\text{kPa}$

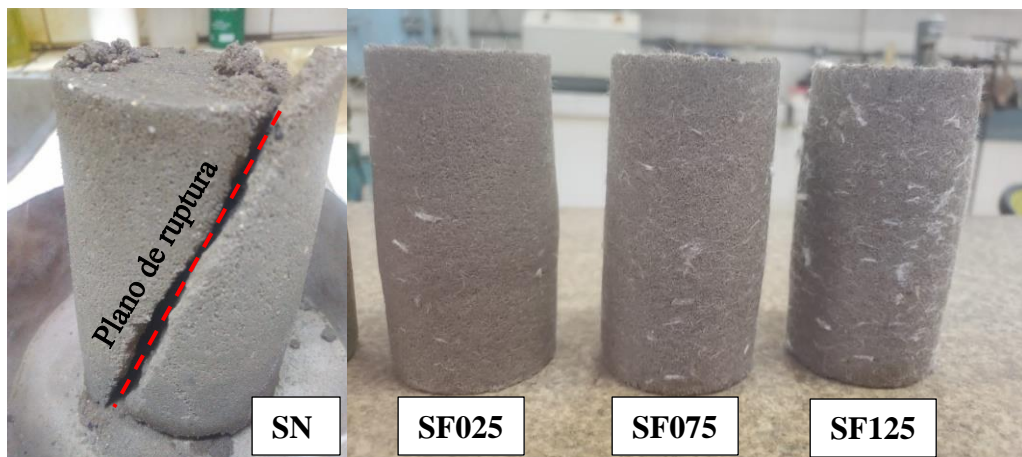


Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.4.6 Influência da variação do teor de fibras na condição não saturada abaixo da umidade ótima

Um aspecto relevante a respeito da influência da variação do teor de fibras na condição não saturada abaixo da umidade ótima dos ensaios de compressão triaxial refere-se ao surgimento do plano de ruptura bem definido para o solo natural, enquanto que para as misturas de solo-fibra o plano de ruptura não é identificado, conforme ilustra a Figura 55. Com isso, é reforçado o comportamento das curvas tensão-deformação e indica o aumento da ductibilidade do solo com a incorporação das fibras.

Figura 55 - Corpos de prova obtidos dos ensaios de compressão triaxial não saturado abaixo da umidade ótima após a fase de cisalhamento

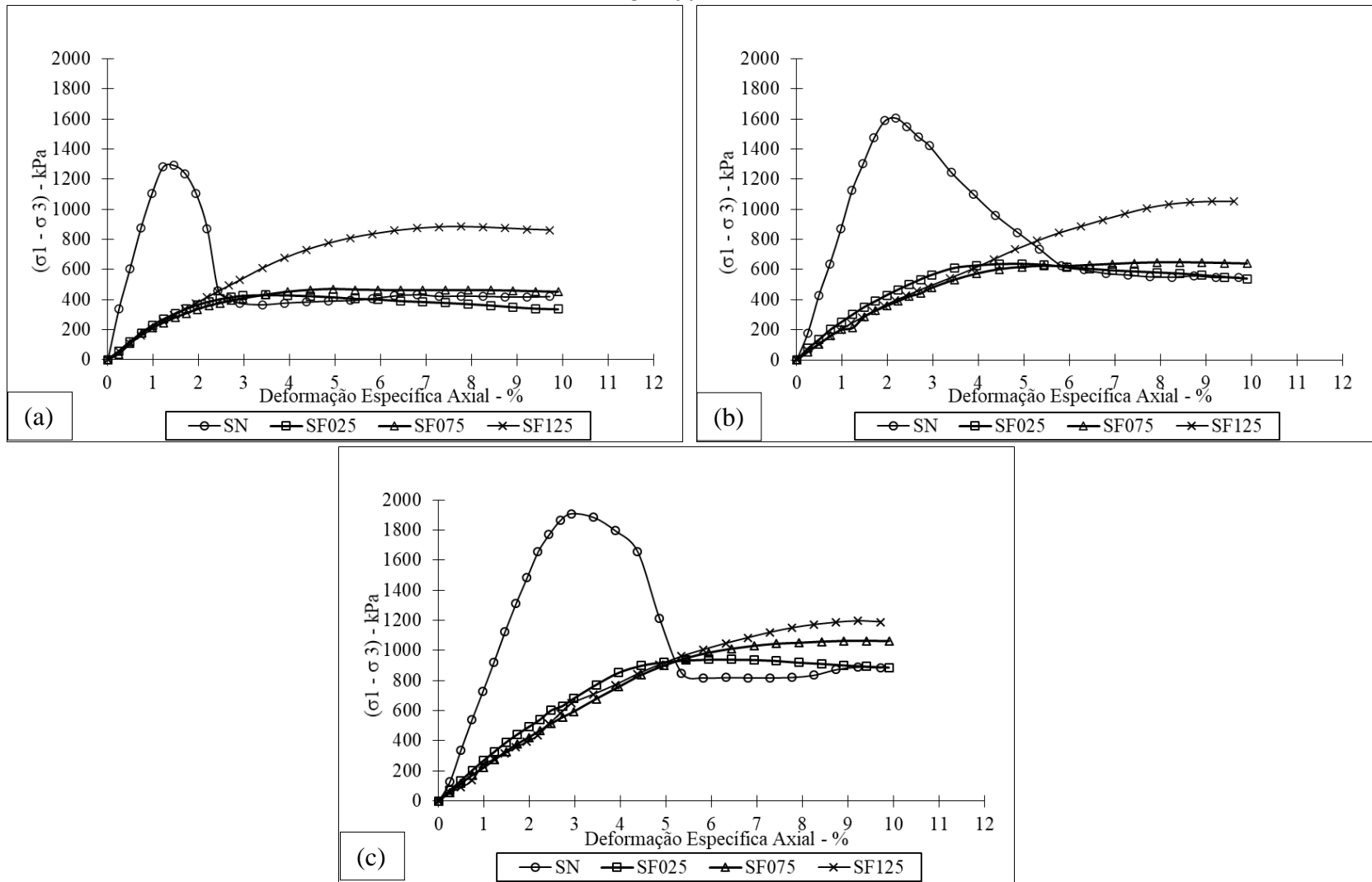


Fonte: Elaborada pela autora.

Na condição de saturação na qual as amostras foram ensaiadas abaixo da umidade ótima, mostrada na Figura 56, verifica-se que solo natural apresenta resistência considerável e maior do que todas as amostras reforçadas nesta condição de saturação. Tal fato pode ser atribuído a cimentação ocorrida no solo devido à presença dos óxidos de ferro e alumínio encontrados no ensaio de fluorescência de raio X. Ao comparar as amostras reforçadas entre si, tem-se que a amostra SF125 apresenta melhor desempenho quanto à resistência.

Um efeito importante na inclusão das fibras considerando a condição não saturada abaixo da umidade ótima diz respeito a mudança do comportamento das curvas tensão-deformação, pois as amostras reforçadas não apresentam resistência de pico pronunciada seguida de queda grande e brusca, sugerindo alterações nos mecanismos de ruptura com a adição das fibras.

Figura 56 - Curvas Tensão-Deformação Axial para amostras abaixo da umidade ótima por tensão confinante (a) $\sigma_3=50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3=100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3=200\text{kPa}$



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.4.7 Influência da variação da condição de saturação no comportamento das curvas tensão versus deformação

Com objetivo de analisar o comportamento do solo natural e das misturas solo-fibra para as condições não saturação na umidade ótima ($\tilde{N}Sat1$) e abaixo da umidade ótima ($\tilde{N}Sat2$) e compará-las com a condição saturada, são apresentadas as Figuras 57, 58, 59 e 60. As curvas tensão-deformação serão organizadas por amostra e tensão confinante, sendo estas informações fixas, enquanto a condição de saturação será variável. Vale ressaltar que as todas as análises das curvas tensão *versus* deformação foram feitas para a deformação axial máxima de 10%.

Para o solo natural, exposto na Figura 57, observa-se que o comportamento da curva tensão-deformação na condição saturada e não saturada na umidade ótima são praticamente coincidentes para a tensão de confinamento 100 kPa. Em contrapartida, existe um ganho de resistência para as tensões confinantes de 50kPa e 200kPa, aproximadamente de 15% e 20% em relação a condição saturada, respectivamente. Já para as curvas na condição não saturada abaixo da umidade ótima, verifica-se um aumento considerável na resistência do solo natural e mudança no comportamento da curva quando comparado as outras condições de saturação, como já mencionado anteriormente.

Para a amostra SF025 (Figura 58) verifica-se que há ganho de resistência da condição saturada para a condição não saturada na umidade ótima da ordem de 18% para as tensões de confinamento de 50kPa e 200kPa, enquanto para a tensão confinante de 100kPa, esse aumento de resistência é de aproximadamente 8%. Com relação ao ganho de resistência da condição não saturada abaixo da ótima quando comparada a condição saturada, tem-se aumento de resistência de 79%, 63% e 40% para as tensões confinantes de 50kPa, 100kPa e 200kPa, respectivamente. Ao comparar as condições não saturadas, observou um acréscimo de resistência de aproximadamente 50% para as tensões confinantes 50kPa e 100kPa, já para a tensão confinante de 200kPa verificou-se um ganho de resistência na ordem de 19%.

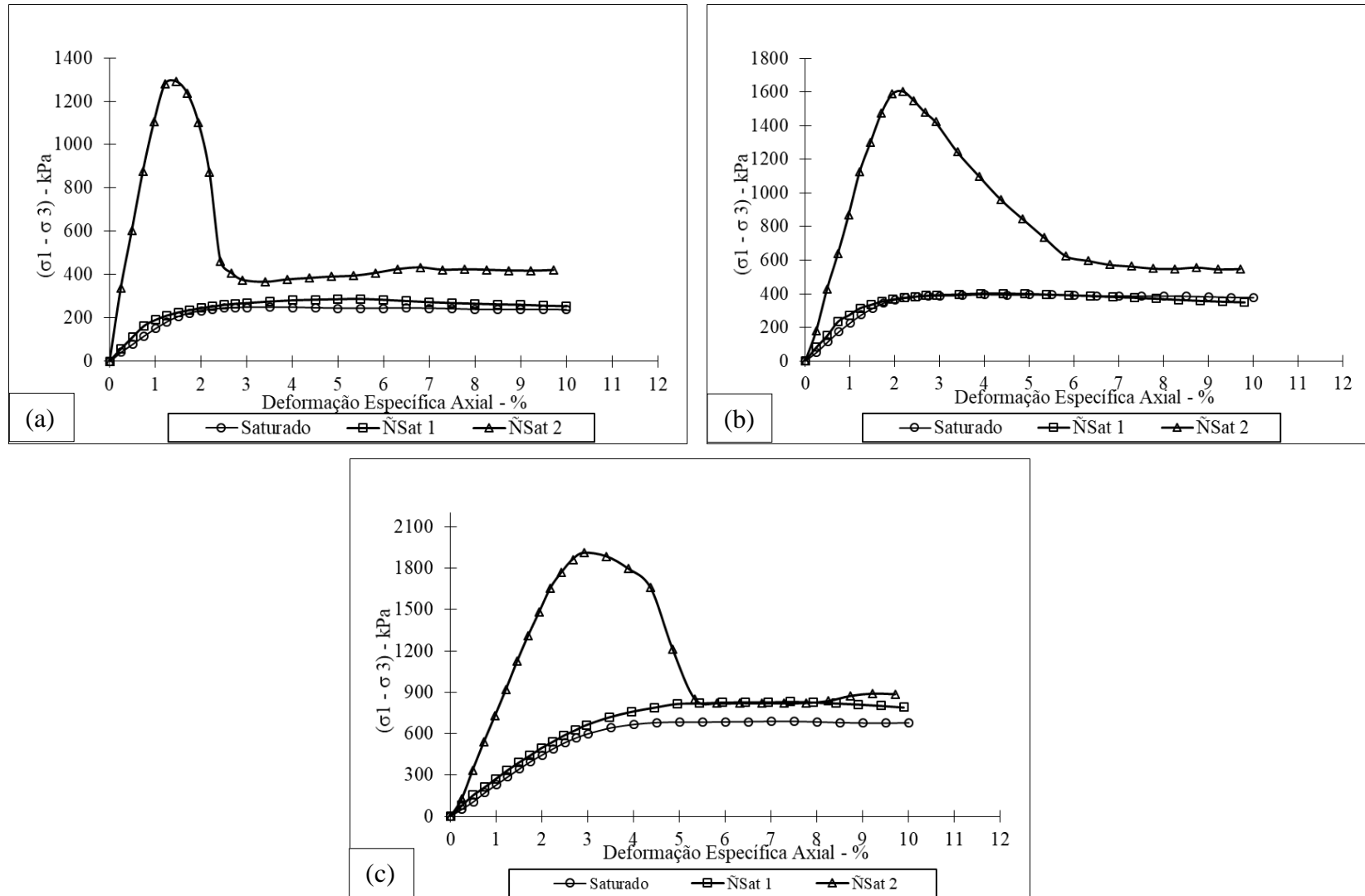
Com relação as amostras SF075, verificou-se um ganho de resistência na condição não saturada na umidade ótima da ordem de 4% nas tensões confinantes de 50kPa e 100kPa quando comparada a condição saturada. Já para a tensão confinante de 200kPa esse aumento equivale a aproximadamente 17%. Por outro lado, comparando as condições não saturadas tem-se um acréscimo médio de resistência na condição não saturada abaixo da umidade ótima de aproximadamente 31% em relação a condição a condição não saturada na umidade ótima (Figura 59).

Na amostra SF125 (Figura 60), verificou que até a deformação axial de 4% as curvas tensão-deformação praticamente sobrepostas, no entanto a partir de 4% de deformação axial a amostra SF125 apresentou maior resistência na condição saturada que na condição não saturada na umidade ótima, para as tensões 50kPa e 100kPa, tal comportamento não era esperado. Já para a tensão confinante 200kPa, tem um ganho de resistência da condição não saturada na umidade ótima de 6% em relação à condição saturada. O acréscimo de resistência da condição não saturada na umidade ótima para a condição não saturada abaixo da umidade ótima apresentou valores mais elevados se comparado as outras amostras reforçadas, principalmente para as tensões de confinamento de 50kPa e 100kPa, atingindo a aumentos de 131% e 99%, respectivamente. Enquanto o aumento de resistência verificado para a tensão confinante de 200kPa foi de aproximadamente de 33% e em relação a condição não saturada na umidade ótima.

De maneira geral, para todas as amostras, a influência da variação da condição de saturação no comportamento das curvas tensão *versus* deformação foi mais expressiva na condição não saturada abaixo da umidade ótima, sendo observada maior ganho de resistência em relação as demais condições de saturação, indicando a influência da sucção presente nas amostras ensaiadas. Além disso, o solo natural apresentou-se mais rígido na condição não saturada abaixo da ótima, sendo observada uma cimentação das partículas devido à presença de óxidos de ferro e alumínio, característicos de solos de regiões tropicais. Ainda, pode-se constatar considerável aproximação do comportamento das curvas tensão deformação entre a condição saturada e não saturada na umidade ótima atribuída à proximidade das umidades dos ensaios triaxiais realizados nestas condições.

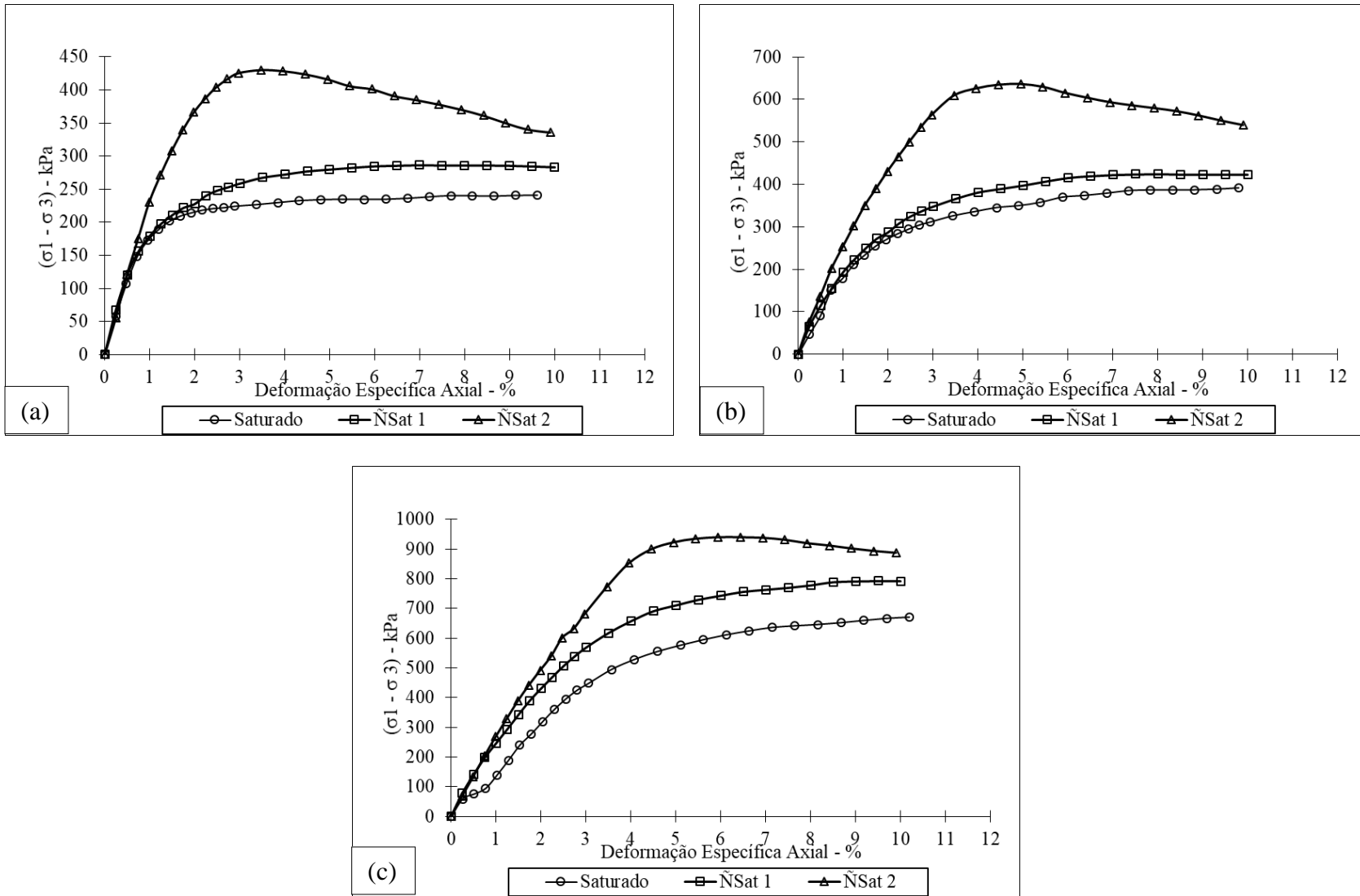
Ainda, ao comparar as amostras reforçadas com fibras de polipropileno constatou-se um aumento da resistência com a diminuição da saturação, para todos os teores de fibras, sem alcançar a condição de ruptura, para a deformação máxima de 10%.

Figura 57 - Efeito da Variação da condição de saturação do solo natural por tensão confinante (a) $\sigma_3 = 50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3 = 200\text{kPa}$



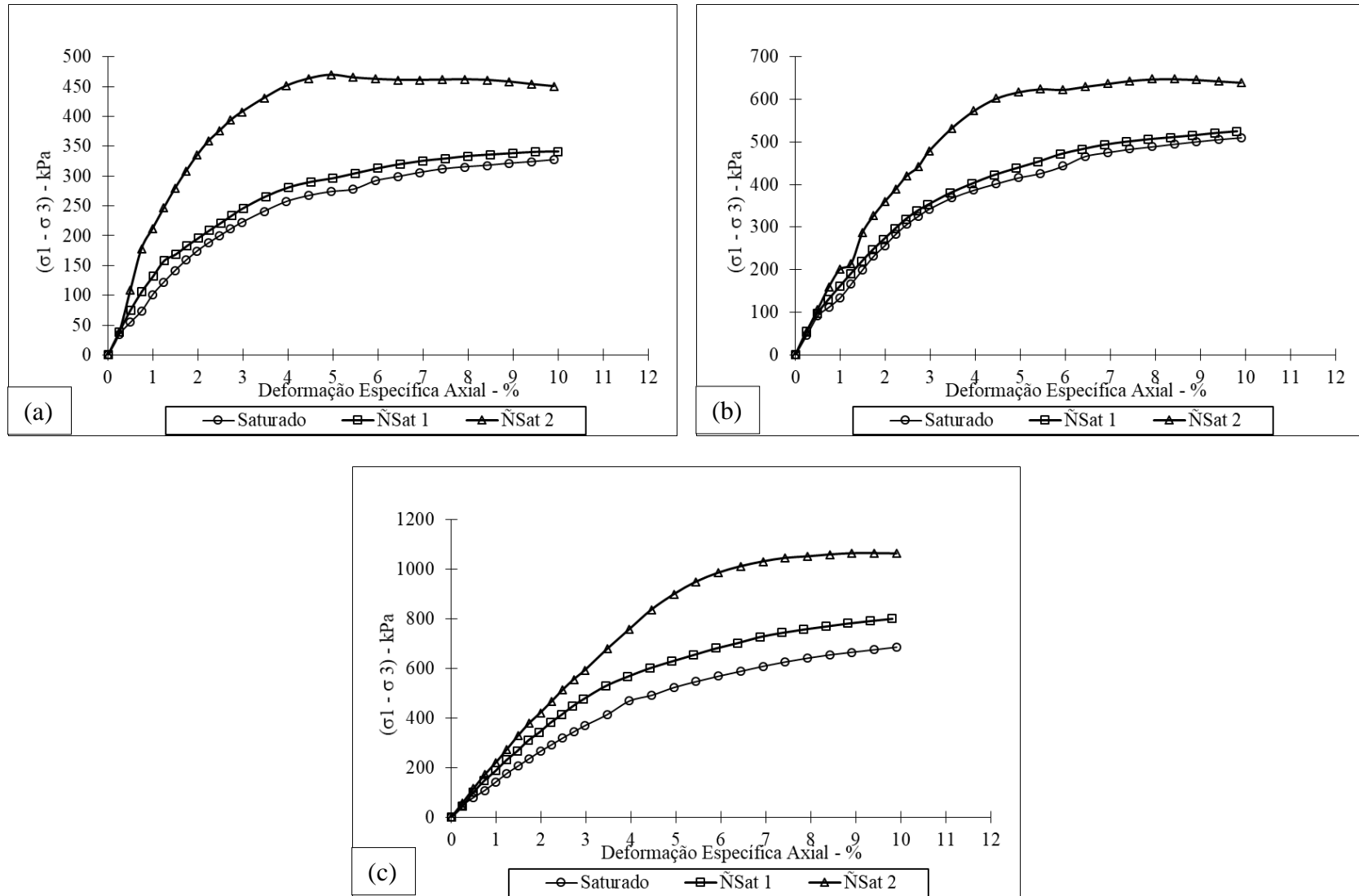
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 58 - Efeito da Variação da condição de saturação da amostra SF025 por tensão confinante (a) $\sigma_3 = 50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3 = 200\text{kPa}$



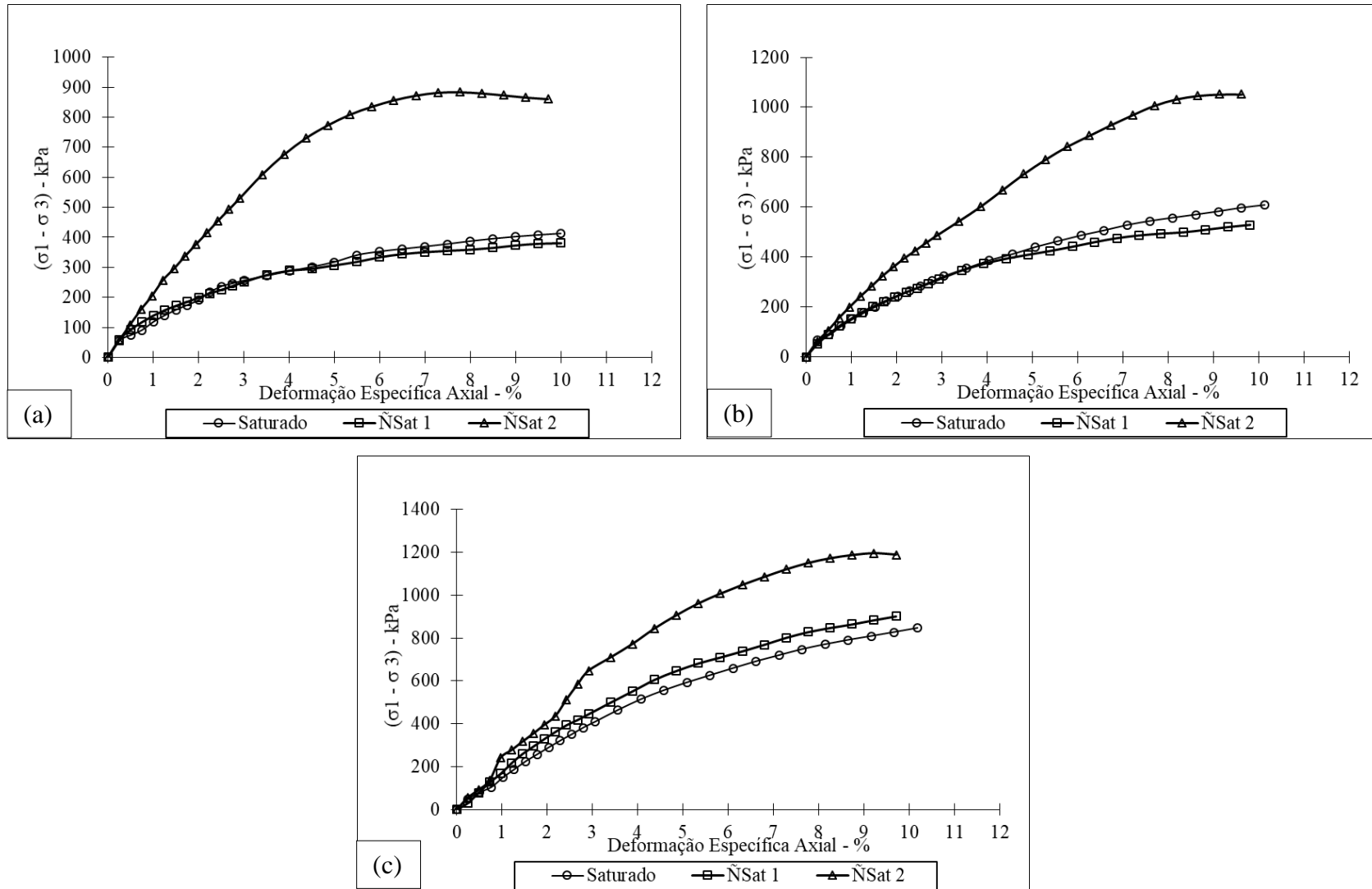
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 59 - Efeito da Variação da condição de saturação da amostra SF075 por tensão confinante (a) $\sigma_3 = 50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3 = 200\text{kPa}$



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 60 - Efeito da Variação da condição de saturação da amostra SF125 por tensão confinante (a) $\sigma_3 = 50\text{kPa}$, (b) $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ e (c) $\sigma_3 = 200\text{kPa}$

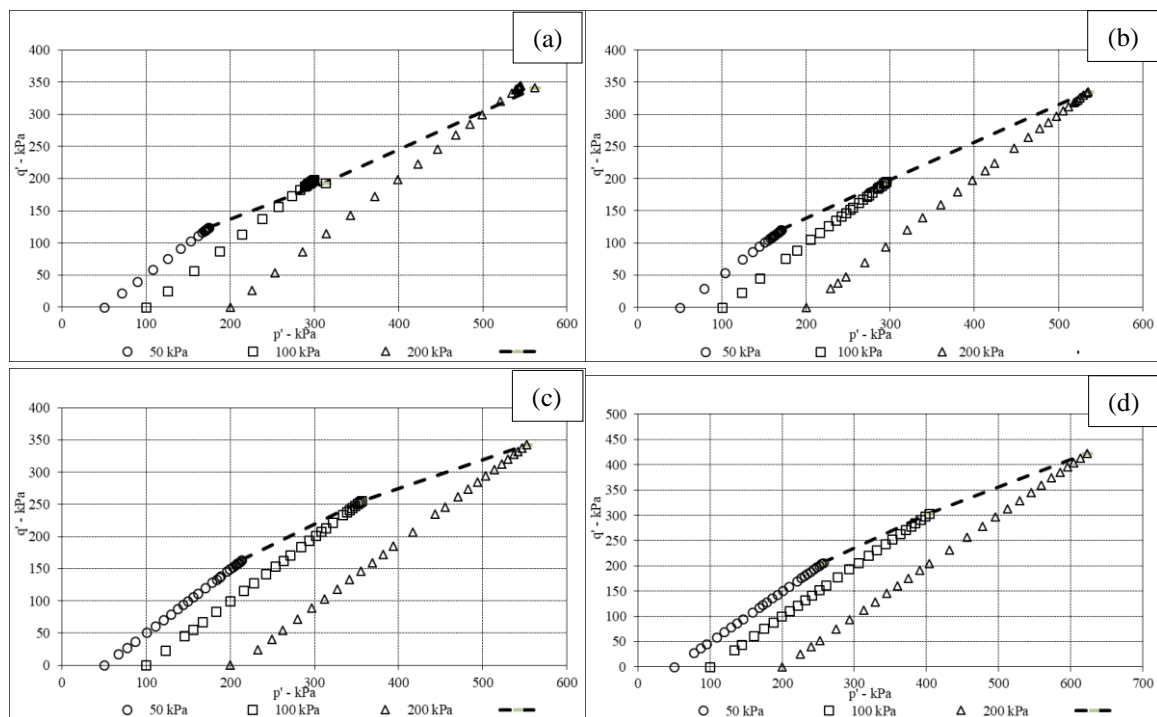


Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.5 Trajetórias de tensões

A Figura 61 apresentada a seguir, mostra as trajetórias de tensões efetivas nos ensaios triaxiais drenados saturados para o solo natural (SN) compactado e para as amostras de solo-fibra: SF025, SF075 e SF125, respectivamente. Vale ressaltar que a condição de drenagem foi satisfatoriamente assegurada durante todo o ensaio, através do monitoramento da poropressão na base do corpo de prova durante toda a fase de cisalhamento do ensaio.

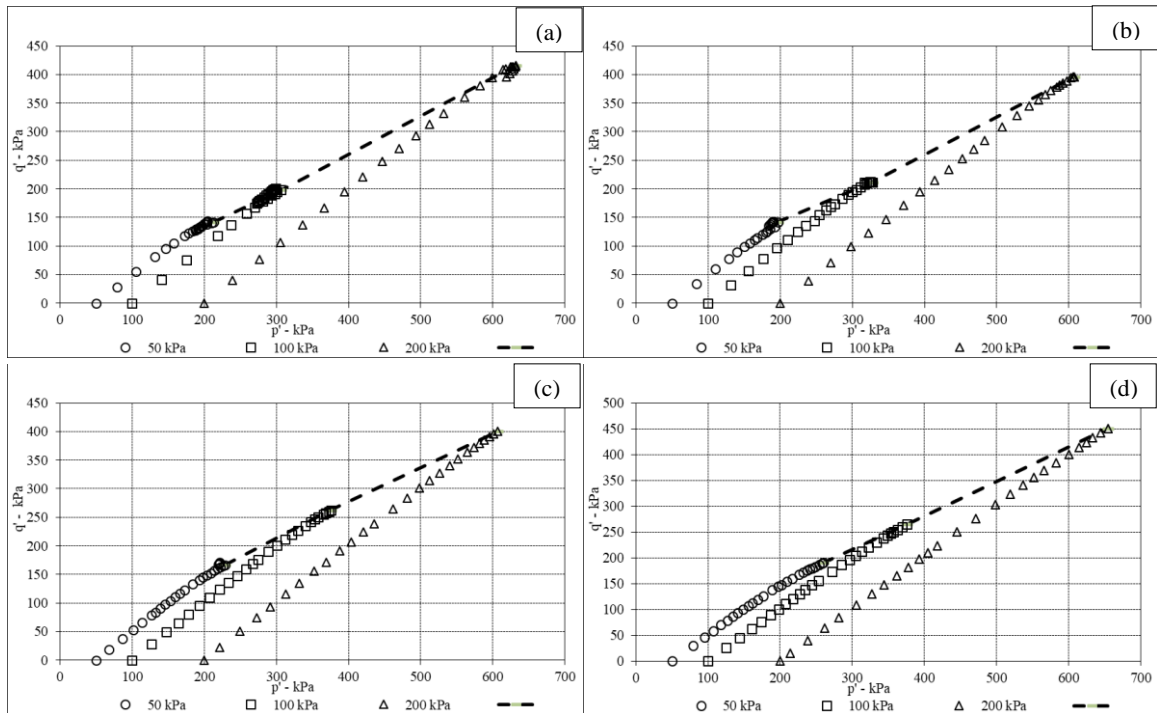
Figura 61 - Trajetória de tensões - Saturados (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125



Fonte: Elaborada pela autora.

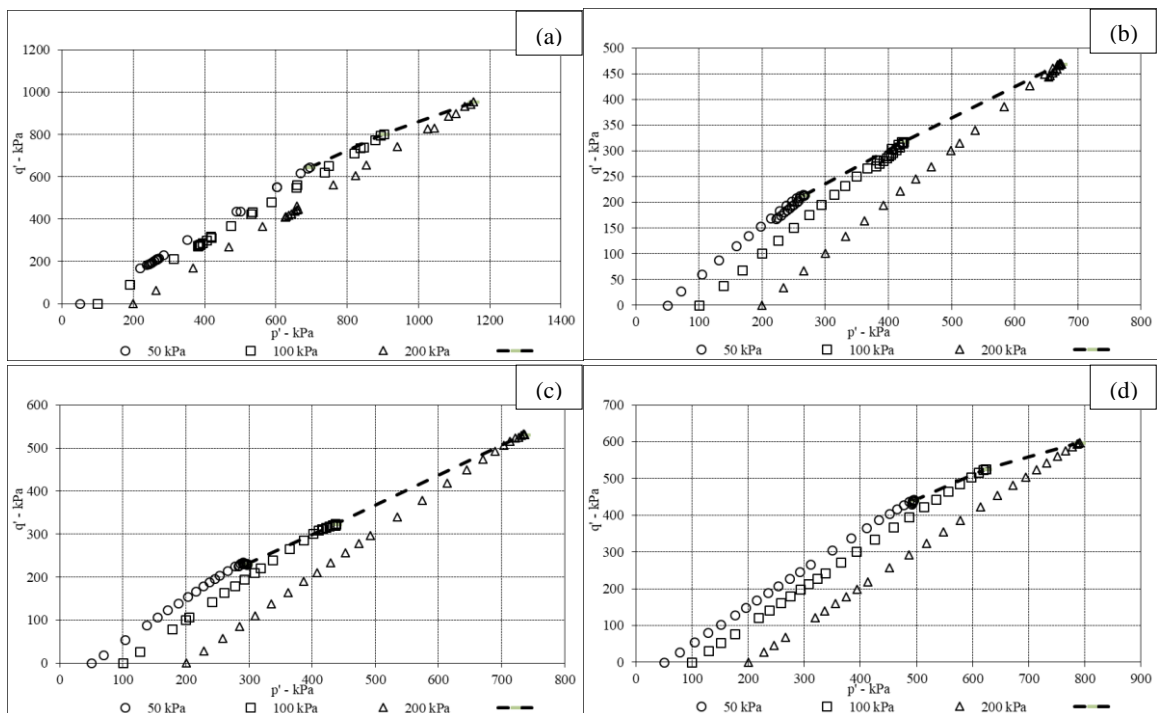
Na Figura 62 e 63 são apresentadas as trajetórias de tensões efetivas na condição não saturada na umidade ótima e não saturada abaixo da umidade ótima, respectivamente.

Figura 62 - Trajetórias de tensões - Não saturados na umidade ótima (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 63 - Trajetórias de tensões - Não saturados abaixo da umidade ótima (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.6 Análise da rigidez inicial

A análise da rigidez inicial das amostras de solo natural e das misturas de solo-fibra foi realizada através do módulo de deformação secante (E_s), definido pelo quociente entre a variação da tensão desvio e a variação da deformação axial correspondente, num determinado segmento da curva tensão-deformação.

A variação do módulo secante foi medida a 0,5% de deformação axial para as tensões confinantes e condições de saturação estudadas para o solo e para as misturas solo-fibra e é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Módulo de deformação secante (0,5%) - MPa

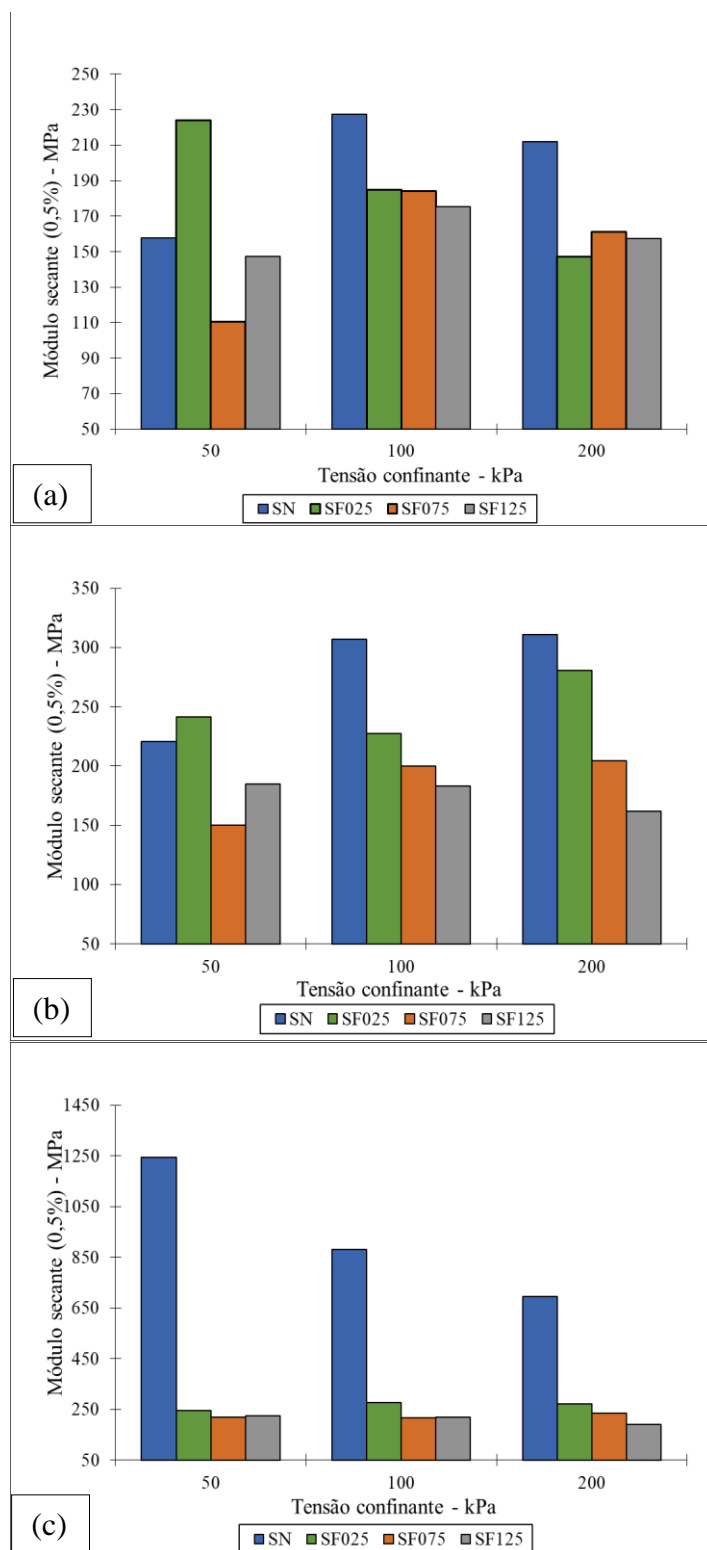
Ensaio	Amostras	Tensão confinante		
		50kPa	100kPa	200kPa
Saturados	SN	157,65	227,51	212,05
	SF025	223,79	184,78	147,21
	SF075	110,53	184,21	161,11
	SF125	147,14	175,29	157,39
Não-Saturados na umidade ótima	SN	220,71	307,13	310,97
	SF025	241,11	227,51	280,68
	SF075	150,23	199,92	204,33
	SF125	184,85	182,89	161,77
Não-Saturados abaixo da umidade ótima	SN	1243,16	880,95	693,71
	SF025	244,16	275,38	271,63
	SF075	219,18	215,43	234,17
	SF125	223,54	218,65	191,06

Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 64 apresenta graficamente os módulos de deformação secante separados por condição de saturação. Observa-se uma variabilidade considerável dos módulos de deformação secante, no entanto, de maioria dos casos, a adição das fibras de polipropileno provoca uma redução do módulo de deformação secante, esta redução é mais evidente para tensões confinantes maiores e para a condição de saturação abaixo da umidade ótima. Pode-se dizer que o solo natural apresentou maior rigidez inicial quando comparado as amostras reforçadas e que houve mudanças na estrutura do material devido a incorporação das fibras.

Além disso, a queda de rigidez inicial mais expressiva é observada na condição não saturada abaixo da umidade ótima, que pode ser atribuída à maior sucção presente nas amostras.

Figura 64 - Módulos de deformação secante a 0,5% para condição (a) Saturada, (b) Não saturado na umidade ótima e (c) Não saturado abaixo da umidade ótima



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.7 Envoltórias e Parâmetros de Resistência

Os parâmetros de resistência, intercepto coesivo e ângulo de atrito, do solo natural e das misturas solo-fibra serão analisados e foram definidos através de suas envoltórias de ruptura e apresentados a seguir, na Tabela 17. Uma vez que as curvas tensão *versus* deformação axial não apresentarem resistência de pico para todos os ensaios, adotou-se como critério de ruptura a deformação axial máxima de 10%, ou seja, o intercepto coesivo e ângulo de atrito interno foram especificados para este nível de deformação, podendo não representar a resistência máxima do material estudado.

A adição das fibras, na condição saturada, não provocou aumento significativo no intercepto coesivo do material, variando entre 20kPa e 22kPa, tendo pequena variação do ângulo de atrito, com exceção da amostra SF125 que teve o ângulo de atrito aumentado 7% com relação as demais.

Tabela 17 - Quadro Resumo dos Parâmetros de Resistência

Amostra	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA					
			Não Saturado			
	Saturado		Umidade ótima		Abaixo da umidade ótima	
	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
SN	20	37,4	28	38,9	250	41,6
SF025	22	37,1	30	39,2	60	39,8
SF075	21	36,9	30	40,1	65	41,2
SF125	20	40	24	41,4	135	36,5

Fonte: Elaborada pela autora.

Para a condição não saturada na umidade ótima, os parâmetros de resistência foram aproximados para o solo natural e para as misturas de solo-fibra até 0,75%. Nesta condição de saturação, pode-se dizer as alterações mais significativas ocorreram na amostra SF0125, na qual houve uma queda no intercepto coesivo de aproximadamente 20% com relação as outras amostras reforçadas. Com relação ao ângulo de atrito interno, houve um pequeno aumento com acréscimo dos teores de fibras. Em todos os casos, solo natural e misturas solo-fibra, houve um leve aumento do intercepto coesivo e do ângulo do atrito da condição saturada para a condição não saturada na umidade ótima.

Analisando-se os parâmetros de resistência obtidos na condição não saturada abaixo da umidade ótima, percebe-se que um aumento significativo no intercepto coesivo do solo

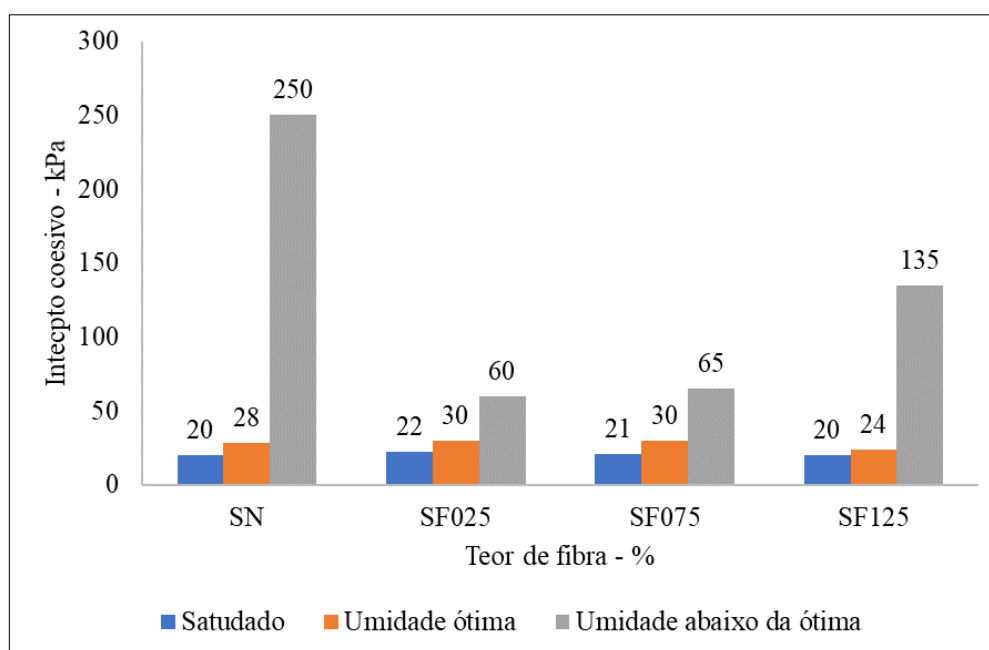
natural, atingindo 250kPa. As amostras SF025 e SF075 também apresentaram interceptos coesivos superiores às condições anteriores, de 60kPa e 65kPa, respectivamente. Enquanto a amostra SF125 apresentou um intercepto coesivo mais elevado entre as amostras reforçadas, com 135kPa, para esta condição de saturação. Com relação ao ângulo de atrito, o solo natural e as amostras reforçadas apresentaram valores próximos, com exceção da amostra SF125 que teve seu ângulo de atrito reduzido da ordem de 11% com relação as demais amostras.

Para melhorar a visualização dos resultados, a seguir as Figura 65 e 66 mostram graficamente a variação dos parâmetros de resistência, intercepto coesivo e ângulo de atrito, respectivamente, para os teores de fibra analisados e condições de saturação considerados.

Nota-se que existe uma tendência de crescimento dos interceptos coesivos com a variação da condição de saturação, sendo esse crescimento mais pronunciado passando da condição não saturada na umidade ótima para a condição não saturada abaixo da umidade ótima. Os valores de ângulo de atrito também apresentaram tendência ao crescimento, ao comparar as três condições de saturação estudadas, com exceção da amostra SF125 que teve uma redução do ângulo de atrito da ordem de 6% em relação as demais condições de saturação.

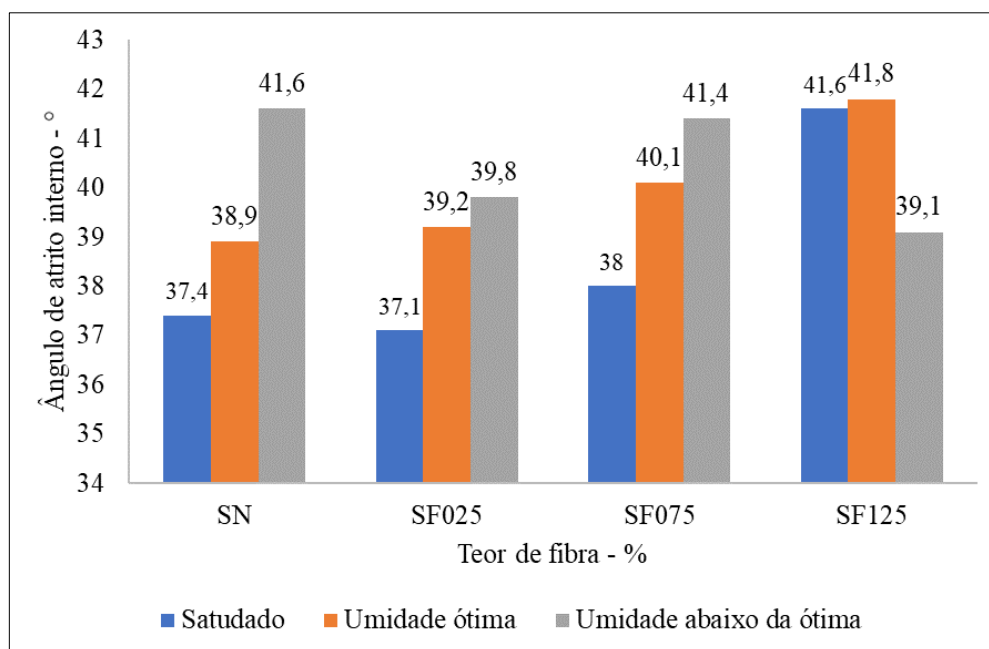
Os parâmetros de resistência encontrados foram concordantes com o comportamento das curvas tensão deformação discutidos anteriormente, cujo ganhos de resistência foram mais expressivos na condição não saturada abaixo da umidade ótima, na qual há o aumento da sucção que o solo adquire quando se torna mais seco.

Figura 65 - Relação entre o teor de fibra e intercepto coesivo



Fonte: Elaborada pela autora.

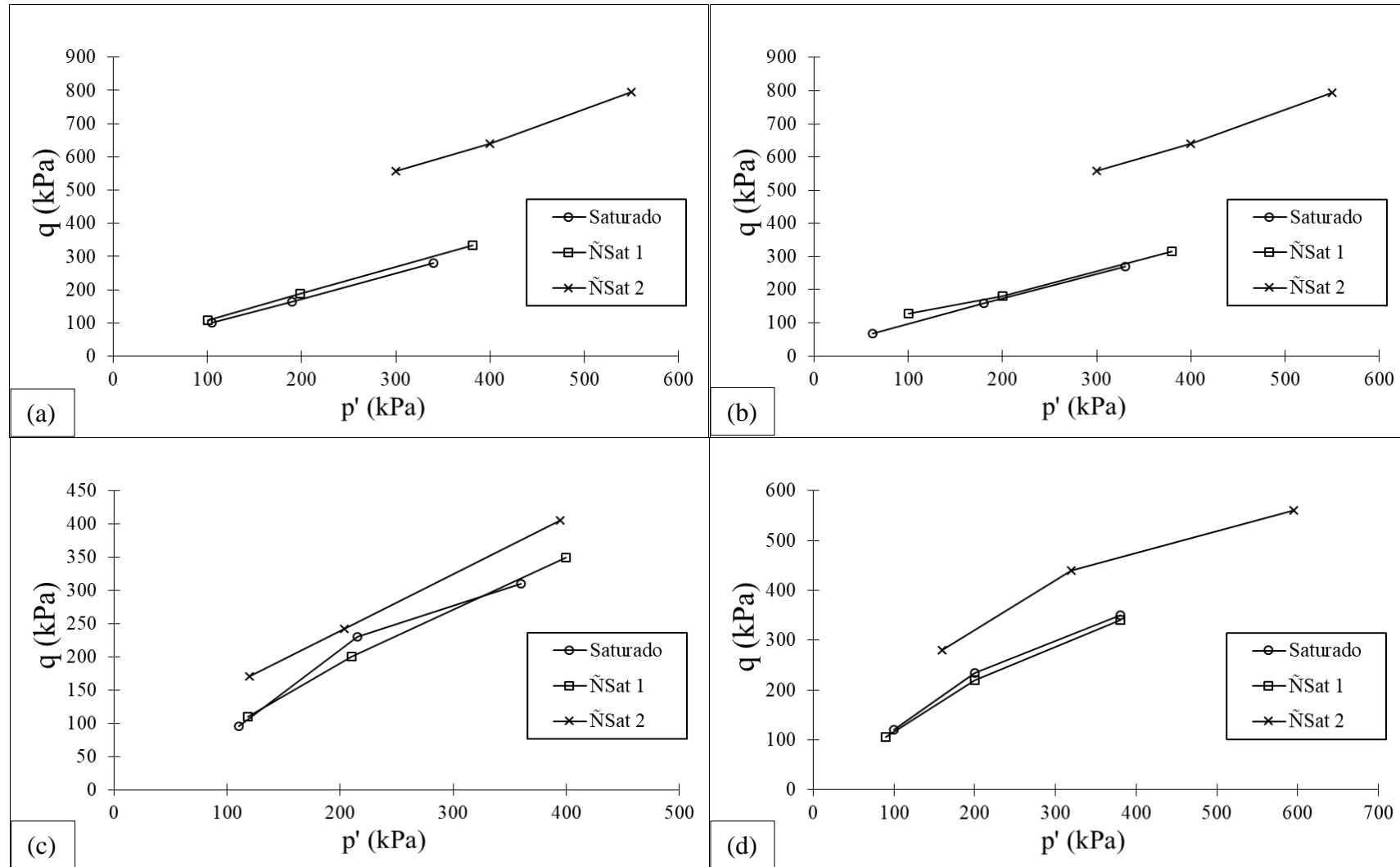
Figura 66 - Relação entre o teor de fibra e ângulo de atrito interno



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 67 apresenta as envoltórias de resistência do solo natural e para as amostras de solo-fibra nas condições de saturação estudadas. Constata-se que a maioria das envoltórias obtidas são essencialmente lineares para os níveis tensão e deformação ensaiadas, com exceção da amostra SF075 na condição saturada e a amostra SF125 em todas as condições de saturação. Segundo Teodoro (1999), no solo arenoso as envoltórias tendem a ser bilineares à medida em que o teor e o comprimento das fibras aumentam. Neste caso, justifica-se a bilinearidade da envoltória para as amostras com maiores teores de fibra, sendo possível identificar uma tensão confinante crítica, na qual provavelmente ocorre mudança no comportamento do material.

Figura 67 - Envoltórias de resistência das amostras (a) SN, (b) SF025, (c) SF075 e (d) SF125 nas condições de saturação estudadas



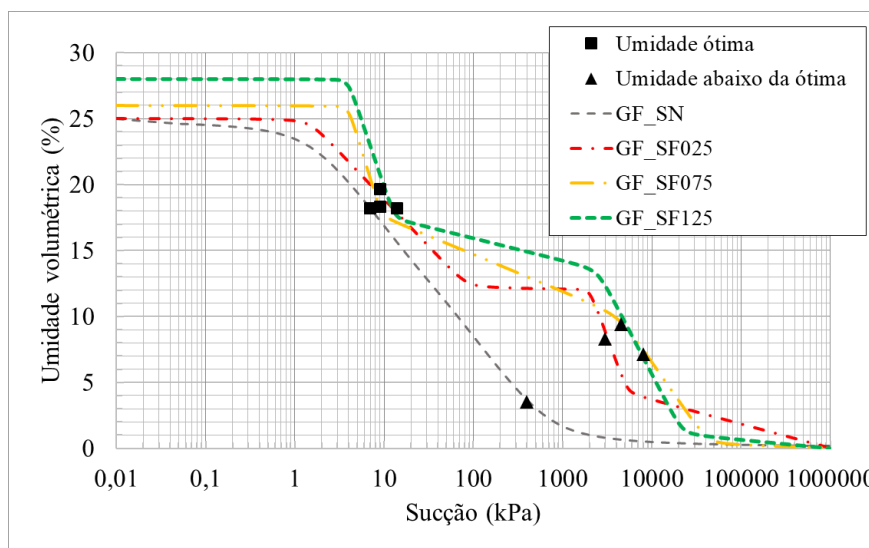
Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.8 Parâmetros de resistência não saturada

Os ensaios triaxiais não saturados na umidade ótima e não saturados abaixo da umidade ótima foram realizados com umidades volumétricas localizadas entre os trechos de valor de entrada de ar e os valores residuais de sucção.

Para a obtenção da sucção, as umidades dos corpos de prova dos ensaios triaxiais serão relacionadas com as respectivas curvas de retenção das amostras, obtidas pelo método de ajuste de Gitirana e Fredlund (2004), das quais serão obtidas graficamente os valores de sucção, como pode ser visto na Figura 68 a seguir.

Figura 68 - Curvas de retenção e umidades dos ensaios triaxiais



Fonte: Elaborada pela autora.

A Tabela 18 apresenta as sucções encontradas relacionadas com o intercepto coesivo de cada amostra. Para a condição saturada, considerou-se que a sucção é nula.

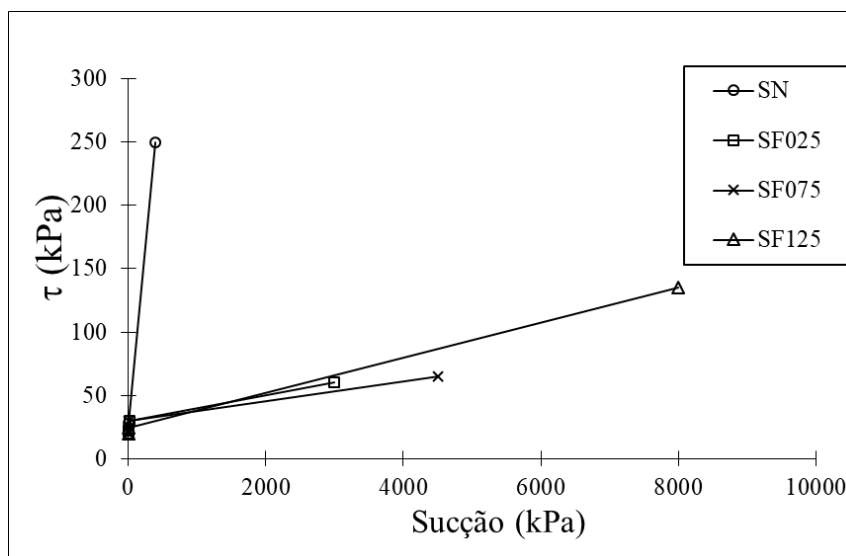
Tabela 18 - Sucções encontradas pelas curvas de retenção

Amostra	SUCÇÃO					
	Saturado		Não Saturado			
			Umidade ótima		Abaixo da umidade ótima	
	c' (kPa)	Ψ (kPa)	c' (kPa)	Ψ (kPa)	c' (kPa)	Ψ (kPa)
SN	20	0	28	7	250	400
SF025	22	0	30	14	60	3000
SF075	21	0	30	9	65	4500
SF125	20	0	24	9	135	8000

Fonte: Elaborada pela autora.

Para a determinação do parâmetro de resistência ao cisalhamento não saturado (ϕ_b) das amostras, os resultados são plotados no plano tensão cisalhante *versus* sucção e apresentadas na Figura 69.

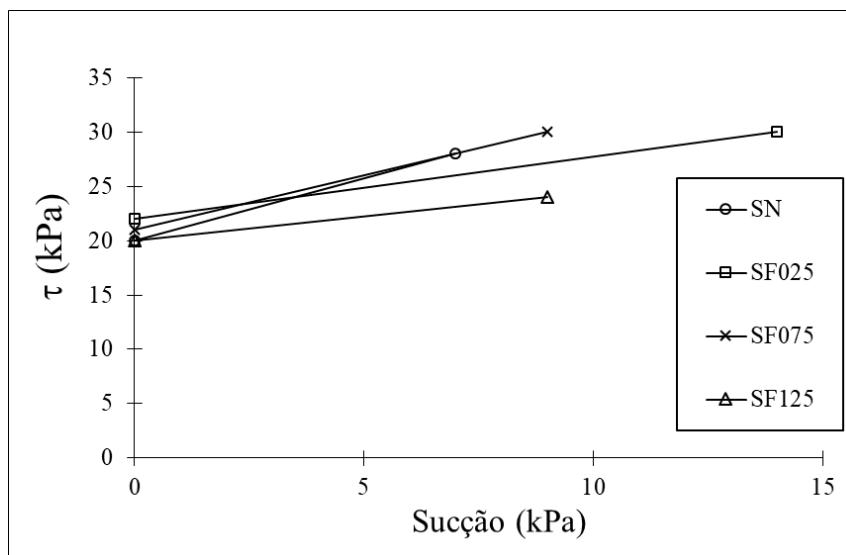
Figura 69 - Envoltórias de ruptura não saturada



Fonte: Elaborada pela autora.

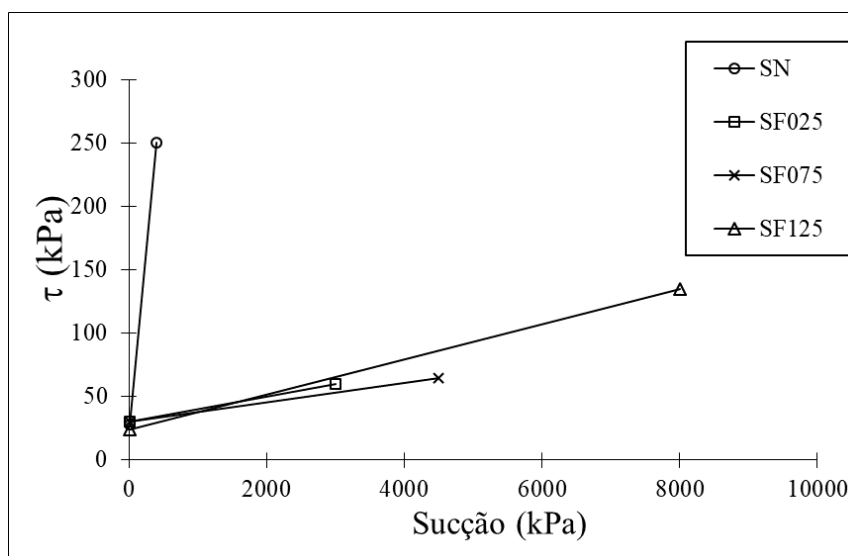
Nota-se a dificuldade da obtenção do parâmetro (ϕ_b) devido aos altos níveis de sucção obtidos. Dessa forma, optou-se por dividir por intervalos de sucção, um trecho definido entre 0 e 15 kPa (Figura 70) e um outro entre 15 kPa e 8000 kPa (Figura 71), sendo o parâmetro (ϕ_b) avaliado para estes intervalos.

Figura 70 - Envoltória de ruptura não saturada - intervalo entre 0 e 15kPa



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 71 - Envoltória de ruptura não saturada - intervalo entre 15 e 8000kPa



Fonte: Elaborada pela autora.

Os valores do parâmetro (ϕ^b) encontrados são apresentadas na Tabela 19. É possível observar que para baixos valores de sucção existe uma variação considerável de ϕ^b em função da inclusão das fibras. Com a adição dos teores de fibra de 0,25%, 0,75% e 1,25%, tem-se uma redução do parâmetro ϕ^b de aproximadamente 8%, 40% e 51% em relação ao solo natural, respectivamente. Com isso, nota-se que o parâmetro ϕ^b decresce com o aumento do teor de fibras, indicando que a razão do aumento da resistência não saturada diminui em função da presença das fibras.

Em outras palavras, o aumento da resistência não saturada das misturas solo-fibra tende a diminuir sob o efeito da sucção. Além disso, para sucções menores, constata-se que parâmetro ϕ^b é superior que parâmetro ϕ^s para as amostras SN e SF025, resultados que também foram encontrados por Pereira (2006) e Feuerhermel (2007) para um solo coluvionar de arenito.

Tabela 19 - Parâmetro de resistência não saturado (ϕ^b) por intervalos de sucção

Amostra	Sucção 0 - 15kPa	Sucção 15 - 8000 kPa
	ϕ^b (°)	ϕ^b (°)
SN	48,8	29,5
SF025	45,0	0,6
SF075	29,7	0,4
SF125	24,0	0,8

Fonte: Elaborada pela autora.

Para o intervalo de sucção maiores, verificou-se que há uma diminuição, em torno de 40%, do parâmetro ϕ^b do solo natural em comparação ao intervalo de sucção menor, esse resultado era esperado, uma vez que a influência da sucção na resistência ao cisalhamento diminui à medida que o teor de umidade do solo diminui.

Os resultados do parâmetro ϕ^b para o intervalo de sucções maiores apresentaram valores extremamente baixos quando comparados ao intervalo anterior para as amostras de solo-fibra. Esse resultado pode ser atribuído a grande faixa de sucção adotada, e conseqüentemente, a existência de valores desconhecidos de sucção intermediários que não foram analisados, impossibilitando a obtenção do parâmetro ϕ^b mais representativo.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho consistiu em estudar o comportamento hidráulico e mecânico de camadas de um solo reforçado com a adição de fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente, considerando a condição não saturada. Foram realizadas a caracterização geotécnica e mineralógica do solo, assim como obter parâmetros de compactação do solo e das misturas solo-fibra. Avaliou-se a influência da adição de fibras de polipropileno, com comprimento de 6mm e teores de fibras de 0; 0,25; 0,5. 0,75; 1; 1,25% (em relação ao peso de solo seco), nas curvas de retenção de água e na modificação da macroporosidade e microporosidade das amostras com a inclusão das fibras. Adicionalmente, foi feita uma análise tensão *versus* deformação com obtenção dos parâmetros de resistência saturados e não saturados do solo natural e das misturas solo-fibra, para teores de fibras de 0; 0,25; 0,75 e 1,25%, considerando a deformação axial máxima de 10% , como também uma análise da rigidez inicial do solo natural e do solo reforçado. A influência da sucção no solo reforçado com fibras de polipropileno foi realizada através da determinação do parâmetro não saturado ϕ^b e comparada com o solo natural.

A seguir são apresentadas as conclusões obtidas através das análises desenvolvidas nesta pesquisa. Na sequência, são apresentadas as sugestões para pesquisas futuras, como complementação dos resultados e conclusões aqui apresentadas.

5.1 Conclusões

Com a análise dos resultados de caracterização geotécnica, tem-se que o solo utilizado consiste em uma areia siltosa mal graduada, classificada como SM-SP segundo a classificação SUCS e A-3 de acordo com o sistema TRB. O solo apresentou características de um material não plástico e densidade real dos grãos de 2,56. A partir dos ensaios de compactação, verificou-se que os parâmetros encontrados nas curvas de compactação apresentaram uma tendência de redução dos pesos específicos aparente seco máximo e aumento da umidade ótima com o acréscimo dos teores de fibras de polipropileno, isto indica o aumento da porosidade das amostras, mantendo-se a energia de compactação constante.

Na caracterização mineralógica do solo foi possível identificar predominantemente a presença de minerais de quartzo e caulinita. Este resultado foi reforçado pela análise de fluorescência de raio X que identificou a predominância de óxido de sílica (SiO_2), alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3). Além disso, a amostra de solo apresentou teor de matéria orgânica

médio de 1,9%. Segundo Rawi (2017), não é recomendável a realização de fundações em solos que contenham mais de 2% de teor matéria orgânica, desse modo, o solo em questão pode ser considerado adequado.

A técnica do papel filtro se mostrou apropriada para a obtenção das curvas de retenção do solo natural e das misturas solo-fibra, pois os resultados experimentais encontrados foram concordantes com a literatura consultada, considerando o tipo de solo estudado e as propriedades das amostras reforçadas com fibras.

O método de ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) se mostrou mais adequado para esta pesquisa, por se aproximar melhor dos pontos experimentais obtidos. A curva de retenção de água do solo muda seu formato de unimodal para bimodal quando são reforçados com fibras de polipropileno para os teores de fibra estudados, sugerindo que a macroestrutura e a microestrutura do solo foram influenciadas pela inclusão das fibras, e conseqüentemente influencia no comportamento hidromecânico do solo. Ainda, constatou-se que o aumento do teor de fibras não altera significativamente o formato da curva de retenção de água dos solos reforçados.

Da análise da microscopia eletrônica de varredura foi possível identificar uma concentração considerável de vazios e a forma irregular das partículas do solo. Para as amostras de solo-fibra, verifica-se predominância de aglomerações de solo e fibras, com vazios aparentemente maiores comparados ao solo natural.

Na interface solo-fibra, é possível constatar maior concentração de vazios e pouca adesão dos materiais, com formação de aglomerações de fibras que dificultam a conexão e intertravamento entre as partículas de solo e as fibras.

Os resultados do ensaio de macroporosidade e microporosidade, através da mesa de tensão, indicaram que o acréscimo do teor de fibras adicionadas ao solo acarreta um crescimento da macroporosidade das amostras reforçadas.

De forma geral, constata-se que a influência do teor de fibra é significativa na resistência do solo. A resistência da amostra reforçada tende a crescer com o aumento da deformação axial, assim espera-se que exista ganho de resistência para maiores deformações. Além disso, as amostras reforçadas apresentam um comportamento mais dúctil em relação ao solo natural. Ainda, os resultados apontam que a resistência é melhorada significativamente para as amostras SF075 e SF125, indicando que os teores de fibra de 0,75% e 1,25% contribuem satisfatoriamente na resistência e continua a crescer para maiores deformações.

A análise das curvas tensão-deformação para o solo natural mostrou uma mudança de comportamento quando a condição de saturação é alterada. Nas condições saturada e não

saturada na umidade ótima, as curvas possuem comportamentos aproximados, tendendo a atingir um valor de pico e manter este valor para o aumento da deformação axial, caracterizado uma ruptura dúctil. No entanto, quando o solo natural é submetido ao ensaio de compressão triaxial não saturado na condição de umidade abaixo da ótima, apresenta resistência de pico bem pronunciada seguida de uma queda grande e brusca pós-pico, indicando uma ruptura frágil. Além disso, o solo apresentou-se mais rígido na condição não saturada abaixo da ótima, sendo observada uma cimentação das partículas devido à presença de óxidos de ferro e alumínio, característicos de solos de regiões tropicais.

Para mistura SF025 não se observou uma melhora de resistência muito significativa em relação ao solo natural. O comportamento da curva tensão-deformação das amostras com maiores teores de fibras, SF075 e SF125, se mostraram similares, sendo que para a condição saturada e não saturada na umidade ótima apresentam um pequeno ganho de resistência, não sendo observado picos, com a tensão desviadora mantendo um crescimento aproximadamente constante com a deformação axial. Já para a condição não saturada abaixo da umidade ótima, observou-se uma tendência ao surgimento de pico com uma leve queda pós-pico para teores de fibra menores, enquanto para teores de fibras maiores foi verificado a estabilização das tensões desviadoras com o aumento da deformação axial.

Vale ressaltar, que ao comparar as amostras reforçadas entre si, tem-se ganhos consideráveis de resistência para o nível de deformação estudado, com tendência de existência de continuidade de acréscimos de resistência para deformações maiores. Dessa forma, conclui-se que a incorporação das fibras de polipropileno melhora as propriedades mecânicas, aumentam a ductibilidade e tenacidade do solo utilizado.

A análise da rigidez inicial das amostras de solo natural e das misturas de solo-fibra foi realizada através do módulo de deformação secante (E_s) medido a 0,5% de deformação axial, que apresentou grande variabilidade. No entanto, de uma forma geral, a adição das fibras de polipropileno provocou uma redução do módulo de deformação secante, sendo que esta redução é mais evidente para tensões confinantes maiores e para a condição de saturação abaixo da umidade ótima. Dessa forma, verificou-se que o solo natural apresentou maior rigidez inicial quando comparado às amostras reforçadas e que a queda da rigidez é mais significativa para a condição não saturada abaixo da umidade ótima, que pode ser atribuída à presença de sucção nas amostras.

Com relação aos parâmetros de resistência, vale ressaltar que se adotou o mesmo critério de ruptura para todas as amostras, no qual o intercepto coesivo e ângulo de atrito interno foram especificados para 10% de deformação axial, podendo não representar a resistência

máxima do material estudado, em alguns casos. Exposto isto, conclui-se que a incorporação das fibras de polipropileno ao solo, na condição saturada, não provocou aumento significativo no intercepto coesivo do material, variando entre 20kPa e 22kPa, tendo pequena variação do ângulo de atrito, com exceção da amostra SF125 que teve o ângulo de atrito aumentado 7% com relação as demais.

Para a condição não saturada na umidade ótima, as alterações mais significativas ocorreram no intercepto coesivo da amostra SF125, na qual houve uma queda de aproximadamente 20% com relação à condição saturada. Com relação ao ângulo de atrito interno, houve um aumento crescente no ângulo de atrito interno com acréscimo dos teores de fibras. Já os parâmetros de resistência obtidos na condição não saturada abaixo da umidade ótima, percebe-se que um aumento significativo no intercepto coesivo do solo natural, correspondente à 250kPa. As amostras SF025 e SF075 também apresentaram elevados interceptos coesivos de 60kPa e 65kPa, respectivamente, porém em ordem de grandeza menor. Enquanto a amostra SF125 apresentou um intercepto coesivo mais expressivo entre as amostras reforçadas, com 135kPa de intercepto coesivo, correspondendo aproximadamente ao dobro do valor das demais amostras solo-fibras ensaiadas. Com relação ao ângulo de atrito, o solo natural e as amostras reforçadas apresentaram valores aproximados, com exceção da amostra SF125 que teve seu ângulo de atrito reduzido da ordem de 11% com relação as demais amostras.

De modo geral, conclui-se que existe uma tendência de crescimento dos interceptos coesivos e ângulos de atrito com a variação da condição de saturação, sendo esse crescimento mais pronunciado passando da condição não saturada na umidade ótima para a condição não saturada abaixo da umidade ótima. A amostra SF125 foi a única que apresentou uma tendência divergente no valor de ângulo de atrito, na qual teve uma redução do ângulo de atrito da ordem de 6% em relação as demais condições de saturação.

A maioria das envoltórias de resistência são essencialmente lineares para os níveis tensão e deformação ensaiadas, com exceção da amostra SF075 na condição saturada e a amostra SF125 em todas as condições de saturação. Desse modo, a bilinearidade das envoltórias de resistência é verificada apenas para maiores teores de fibras, sendo possível identificar uma tensão confinante crítica, na qual provavelmente ocorre mudança no comportamento do material.

A resistência não saturada foi avaliada através do parâmetro ϕ^b , definido para intervalos de sucção. Observou-se que o parâmetro de resistência não saturado, para baixos níveis de sucção, é reduzido com a incorporação das fibras, tendendo a decrescer com o

aumento do teor de fibras, sugerindo que para valores baixos de sucção ocorre uma diminuição na contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento do solo.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com objetivo de ampliar os conhecimentos e estudos na área de solos reforçados na condição não saturada são apresentadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Estudo experimental do comportamento hidromecânico para maiores comprimentos de fibras e diferentes teores, considerando a condição não saturada;
- Estudo do comportamento de solos reforçados em campo a partir dos resultados obtidos no programa experimental desta pesquisa;
- Estudo do fenômeno da histerese nas curvas de retenção para solos reforçados com fibras de polipropileno;
- Estudo experimental da resistência não saturada das misturas solo-fibra através de ensaios triaxiais com sucção controlada;
- Verificar a resistência não saturada das misturas de solo-fibra para grandes deformações;
- Avaliação da eficiência da interação solo-fibra na homogeneização dos materiais, principalmente para maiores teores de fibras.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, F., BATENI, F., AZMI, M. Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 1, p. 93-99, 2010.
- AL-REFEAI, T. O. Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 10, n. 4, p. 319-333, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D5298: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- ARAÚJO, M. **Natural and man-made fibres: Physical and mechanical properties**. In: FANGUEIRO, 3. ed. rev. *Fibrous and composite materials for civil engineering applications*. Woodhead Publishing, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13600: **Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C**. Rio de Janeiro, 2p. 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6457: **Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 8p, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459: **Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 5p. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6502: **Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 18p, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7180: **Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 3p, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181: **Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 12p, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7182: **Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 9p, 2016.
- BICALHO K. V., GOMES C. A., FERREIRA S., FLEUREAU J. M, MARINHO F. A. M. **Filter Paper Method of Soil Suction Measurement**. In: XIII PANAMERICAN

CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, Margarita, v. 1, n. 2, p. 1 - 6, 2007.

BRAIDA, J. A., REICHERT, J. M., VEIGA, M., REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 30, n. 2, p. 605 - 614, 2006.

BULUT R., LYTTON R. L., WRAY, W. K. **Soil Suction Measurements by Filter Paper**. In: Conference: Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations. p. 243 - 261, 2001.

BURGER, C. A., SHACKELFORD, C. D. Soil-water characteristic curves and dual porosity of sand-diatomaceous earth mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 12, n. 7, p. 790 - 800, 2001.

CAMPOS, T. M. P. Resistência ao cisalhamento de solos não saturados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3., 1997, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: 1997. p. 399 - 417. v. 2.

CARVALHO, L. M. C. **Comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras naturais submetido a ensaios de cisalhamento direto em média escala**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Brasília - UnB, Brasília, 2019.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2005.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2001.

CHANDLER, R. J., GUTIERREZ C. I. The Filter Paper Method of Suction Measurement. **Géotechnique**, v. 1, n. 36, p. 265 - 268, 1986.

CHEN, M. et al. Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 43, n. 6, p. 515 - 523, 2015.

CONSOLI N. C., CASAGRANDE M. D. T., COOP, M. R. Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. **Géotechnique**, v. 57, n. 9, p. 751 - 756, 2007.

CONSOLI, N. C., FESTUGATO, L., HEINECK, K. S. Strain-hardening behaviour of fibre-reinforced sand in view of filament geometry. **Geosynthetics International**, v. 16, n. 2, p. 109 - 115, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 093/94 – **Solos - Determinação da densidade real**. 1994.

DONATO, M. **Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2007.

FALORCA I. M., C. F. G., PINTO, M. I. M. Effect of short, randomly distributed, polypropylene microfibres on shear strength behaviour of soils. **Geosynthetics International**, v. 18, n. 1, p. 2 - 11, 2011.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro - reforçado com fibras de distintos índices de aspecto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2008.

FESTUGATO, L. **Comportamento de hidratação e resposta cisalhante cíclica de resíduo de mineração cimentado reforçado com fibras**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2011.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2000.

FREDLUND D. G., MORGENSTERN N. R., WIDGER R.A. The Shear Strength of Unsaturated Soils, **Canadian Geotechnical Journal**, v. 15, n. 3, p. 313 - 321, 1978.

FREDLUND, D. G. Use of the soil-water characteristic curve in the implementation of unsaturated soil mechanics. In: **Proceedings**: Third International Conference on Unsaturated Soils, Recife, Brasil, p. 10 - 13, 2002.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. John Wiley and Sons, New York, 1993.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley & Sons, New Jersey, 926p., 2012.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 1, p. 521 - 532, 1994.

FREDLUND, D.; MORGENSTERN, N. Stress state variables for unsaturated soils. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, v. 103, n. 1, p. 447 - 466, 1977.

GIRARDELLO, V. **Ensaio de placa em areia não saturada reforçada com fibras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2010.

GITIRANA JR, G.F.N., FREDLUND, D. G. Soil-water characteristic curve equation with independent properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 2, p. 209 - 212, 2004.

GOMES, J. E. S. **Estudo sobre fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2007.

HANNANT, L. **Fiber-reinforced cements and concretes**. In: J. M. ILLSTON. Construction Materials; their nature and behavior. 2. ed. London: J. M. Illston/E & FNSpon, p. 359 - 403, 1994.

KRISHNA RAO, S. V., & NASR, A. M. A. Laboratory Study on the Relative Performance of Silty-Sand Soils Reinforced with Linen Fiber. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 30, n. 1, p. 63 - 74, 2011.

LAMBE, T. W., WHITMAN, R. **Soil Mechanics**, 2. ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1995.

LEME, R. F. **Influência da sucção mátrica nas condições de fluxo e estabilidade de taludes da barragem pesqueiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2009.

LEONG, E. C., HE L., RAHARDJO, H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. **Geotechnical Testing Journal**, v. 25, n. 3, p. 322 - 333, 2002.

LEONG, E. C. Soil-water characteristic curves - Determination, estimation and application. **Japanese Geotechnical Society Special Publication**, v. 7, n. 2, p. 21 - 30, 2019.

- LI X., LI J. H., ZHANG, L. M. Predicting bimodal soil-water characteristic curves and permeability functions using physically based parameters. **Computers and Geotechnics**, v. 57, n. 1, p. 85 - 96, 2014.
- LI X., ZHANG L. M. Characterization of dual-structure pore-size distribution of soil. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 46, n. 1, p. 129 - 141, 2009.
- LU N., LIKOS W. **Unsaturated soil mechanics**. John Wiley and Sons, New York, NY, USA, 2004.
- MARINHO F. A. M. **A técnica do papel filtro para medição de sucção**. In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 2., Rio Grande do Sul, 1995.
- MARINHO, F. A. M. **Medição de Sucção em Solos**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3., 1997, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: 1997. p. 373 – 398. v. 2.
- MARINHO, F. A. M. **Soil Suction Measurement in Soils and Porous Materials**. In: UNSATURATED SOILS IN ENGINEERING PRACTICE – SHORT COURSE NOTES, ASCE, Denver, Colorado, 2000.
- MICHALOWSKI R. L., ČERMÁK, J. Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 2, p. 125 -136, 2003.
- MIGUEL, M. G., BONDER, B. H. Soil Water Characteristic Curves Obtained for a Colluvial and Lateritic Soil Profile Considering the Macro and Micro Porosity. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 30, n. 6, p. 1405 - 1420, 2012.
- MILLER, C. J., YESILLER, N., YALDO, K., & MERAYYAN, S. Impact of Soil Type and Compaction Conditions on Soil Water Characteristic. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 128, n. 9, p. 733 - 742, 2002.
- OLIVEIRA, O. & FERNANDO, F. M. **Evaluation of Filter Paper Calibration**. Unsaturated Soils, 2006.
- PALMEIRA, E. M. Evolução dos geossintéticos no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS, 2., 1995, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: 1995.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 294p, 2018.

PARK, S. S. Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 1134 - 1138, 2011.

PEREIRA, A. **Comportamento Mecânico Saturado e Não Saturado de um Solo Coluvionar de Arenito**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2012.

PRIONO, RAHARDJO, H., CHATTERJEA, K., LEONG, E.C., WANG, J.Y. Effect of hydraulic anisotropy on soil water characteristic curve. **Soils and Foundations**, v. 56, n. 2, p. 228 - 239, 2016.

PUPPALA, A. J., PUNTHUTAECHA, K., & VANAPALLI, S. K. Soil Water Characteristic Curves of Stabilized Expansive Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 132, n. 6, p. 736 - 751, 2006.

RAWI, A. O., ASSAF, N. M., RAWASHDEH, T. Effect of Organic Content on The Engineering Properties of Jordanian Clayey Soils. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 8, n. 11, p. 1018 - 1026, 2017.

RIOS, M. G. F. **Comportamento de um aterro compactado em campo e laboratório**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

SAAD, S. S. E., **Mechanical behaviour of fibre reinforced unsaturated clay**. Thesis (PhD in Civil Engineering). University of Bradford, United Kingdom – UK, 2016.

SATYANAGA, A., RAHARDJO, H., LEONG E.C., WANG, J. Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution. **Computers and Geotechnics**, v. 48, n. 1, p. 51 - 61, 2013.

SILLERS, W. S., FREDLUND, D. G. Statistical assessment of soil-water characteristic curve models for geotechnical engineering. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 38, n. 6, p. 1297 - 1313, 2001.

SOUTHEN, J., ROWE, R. Evaluation of the water retention curve for geosynthetic clay liners. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 25. n. 1, p. 2 - 9, 2007.

TARANTINO, A. A water retention model for deformable soils. **Géotechnique**, v. 59, n. 9, p. 751 - 762, 2009.

TAYLOR, G. D. **Materials in Construction**. London: Longman Scientific & Technical, 2. ed., 284 p, 1994.

TEODORO, J. M. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 1999.

TRINDADE, T. I., et al. Estudos laboratoriais do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais. **Revista Arvore**, v. 30, n. 2, p. 215 - 222, 2006.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2003.

WANG, W., ZHANG, C., GUO, J., LI, N., Li, Y., ZHOU, H., LIU, Y. Investigation on the Triaxial Mechanical Characteristics of Cement-Treated Subgrade Soil Admixed with Polypropylene Fiber. **Applied Sciences**, v. 9, n. 21, p. 1 - 16, 2019.

WIJAYA, M., & LEONG, E. C. Modelling the effect of density on the unimodal soil-water characteristic curve. **Géotechnique**, v. 67, n. 7, p. 637 - 645, 2017.

WIJAYA, M., LEONG, E.C. Equation for unimodal and bimodal soil-water characteristic curves. **Soils and Foundations**, v. 56, n. 2, p. 291 - 300, 2016.

YILMAZ, Y. Experimental investigation of the strength properties of sand–clay mixtures reinforced with randomly distributed discrete polypropylene fibers. **Geosynthetics International**, v. 16, n. 5, p. 354 - 363, 2009.

ZHAI, Q., RAHARDJO, H. Determination of soil–water characteristic curve variables. **Computers and Geotechnics**, v. 42, n. 1, p. 37 - 43, 2012.

ZHANG, L. M., CHEN, Q. Predicting bimodal soil-water characteristic curves. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 131, n. 1, p. 666 - 670, 2005.

ZOU, L. **Effects of grain-size distribution and hysteresis on soil-water characteristic curve**. PhD thesis, Nanyang Technological University, Singapore, 2018.