



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

ANA KELLY FERNANDES MERVILLE

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO DE MISTURAS DE SOLO
ARENO ARGILOSO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**

FORTALEZA

2024

ANA KELLY FERNANDES MERVILLE

ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO DE MISTURAS DE SOLO
ARENO ARGILOSO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

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

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

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

M539e Merville, Ana Kelly Fernandes.
Estudo do comportamento hidromecânico de misturas de solo areno argiloso com fibras de polipropileno
/ Ana Kelly Fernandes Merville. – 2024.
96 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

1. Solo reforçado. 2. Fibras de polipropileno. 3. Hidromecânico. I. Título.

CDD 624.15

ANA KELLY FERNANDES MERVILLE

ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO DE MISTURAS DE SOLO
ARENO ARGILOSO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

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

Aprovada em: 17 / 07 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof^ª. Dra. Mariana Vella Silveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dra. Teresa Raquel Lima Farias
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

*Dedico este trabalho à Deus e a minha família,
sem o amor e apoio de vocês nada seria
possível, obrigada por tudo.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por guiar o meu caminho, pela saúde, amor e por todas as bênçãos que tive ao longo de toda a minha vida.

À minha mãe Eliane que sempre me incentivou a estudar, certamente aquelas tardes fazendo “tarefinhas” me moldaram para que continuasse em busca de conhecimento. Ao meu pai Joel, por sempre me mostrar que o estudo era um bom caminho a ser seguido e por me apoiar em tudo que acreditei que seria correto para a minha formação. Sem vocês nada seria possível, obrigada por me apoiarem desde sempre.

As minhas irmãs Michelly e Mikaelly, por todo o amor, carinho, suporte e por serem uma parte tão importante de mim.

Ao meu companheiro de vida, Denilck, por me apoiar em tudo e por ter sido meu suporte durante toda essa jornada (e antes dela também), o seu amor me faz mais forte, obrigada por tudo.

Aos meus gatinhos, Kitty, Didi, Lulu, Nina, Tunico e Joana, por terem sido a luz da minha vida em meio aos dias nebulosos, as incontáveis cabeçadinhas, ronronados e amassados de pão de vocês preenchem meu coração e a minha vida de amor.

Aos meus amigos e irmãos de alma, Daiany, Amanda e Raphael, a amizade de vocês é uma das melhores partes dessa vida, obrigada por essa irmandade que já existe há tantos anos.

Ao meu orientador, Anderson Borghetti, por todo o conhecimento transmitido, pela paciência e compreensão ao longo dessa jornada.

A todos os laboratoristas que me auxiliaram durante a realização dessa pesquisa.

À FUNCAP pela concessão da bolsa que permitiu a realização dessa pesquisa.

“Cada pessoa é um mundo.”

– Clarice Lispector.

RESUMO

O uso de fibras de polipropileno para realizar o reforço dos solos é aplicável quando o solo em seu estado natural não possui as propriedades geotécnicas necessárias para suportar as solicitações previstas em campo. As fibras podem conduzir melhorias como o aumento da resistência ao cisalhamento e aumento da permeabilidade do solo. O presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso, utilizado como material de cobertura de aterro sanitário do Estado do Ceará, com inserção de fibras de polipropileno, com diferentes teores e comprimentos de fibra e verificar a influência nos parâmetros geotécnicos do solo de cobertura com a inserção de fibras. Como parte da pesquisa, foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização geotécnica e mineralógica. Foram utilizadas fibras de polipropileno de 6 mm e de 12 mm de comprimento, nos teores de 0, 0,25, 0,50, 0,75, 1 e 1,25% com relação ao peso do solo seco. Observou-se a redução do peso específico aparente seco, aumento da umidade ótima (exceto para os teores de 0,25% e 0,75% para a fibra de 12 mm) com o aumento da inclusão de fibras. Com a adição de mais fibras houve um aumento da permeabilidade do solo, tanto para a fibra de 6 mm quanto para a de 12 mm, mesmo com o aumento da permeabilidade o compósito ainda pode ser utilizado como camada de cobertura de aterros sanitários. As combinações com melhores desempenhos de resistência ao cisalhamento foram para o teor de 0,75% para a fibra de 6 mm e o teor de 1,25% para a fibra de 12 mm. A microscopia eletrônica de varredura mostra que para os teores de 0,75% (6 mm) e 1,25% (12 mm), a adesão entre o solo e a fibra ocorreu de forma adequada, o que justifica estes serem os teores que proporcionaram o maior ganho de resistência ao solo. Considerando a relevância do uso de fibras poliméricas para reforço de solos, este trabalho aspira contribuir no entendimento do comportamento mecânico de solos areno argilosos reforçados com fibras de polipropileno, avaliando o desempenho do solo reforçado com fibras analisando a variação dos teores e comprimentos.

Palavras-chave: Solo reforçado. Fibras de polipropileno. Hidromecânico.

ABSTRACT

The use of polypropylene fibers to reinforce soils is applicable when the soil in its natural state does not have the geotechnical properties necessary to support the expected field stresses. Fibers can drive improvements such as increased shear strength and increased soil permeability. The objective of this work is to study the hydromechanical behavior of a sandy-clayey soil, used as a landfill cover material in the State of Ceará, with the insertion of polypropylene fibers, with different fiber contents and lengths, and to verify the influence on the geotechnical parameters of the soil cover with the insertion of fibers. As part of the research, laboratory tests for geotechnical and mineralogical characterization were done. Polypropylene fibers of 6 mm and 12 mm in length were used, at the contents of 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1 and 1.25% in relation to the weight of the dry soil. A reduction in the dry apparent specific weight and an increase in the optimum moisture content (except for the 0.25% and 0.75% contents for the 12 mm fiber) were observed with the increase in fiber inclusion. With the addition of more fibers there was an increase in soil permeability, both for the 6 mm and 12 mm fibers, even with the increase in permeability the composite can still be used as a landfill cover layer. The combinations with the best shear strength performances were for the 0.75% content for the 6 mm fiber and the 1.25% content for the 12 mm fiber. Scanning electron microscopy shows that for the levels of 0.75% (6 mm) and 1.25% (12 mm), the adhesion between the soil and the fiber occurred adequately, which justifies these being the levels that provided the greatest gain in soil resistance. Considering the relevance of the use of polymeric fibers for soil reinforcement, this work aims to contribute to the understanding of the mechanical behavior of sandy clayey soils reinforced with polypropylene fibers, evaluating the performance of the soil reinforced with fibers by analyzing the variation in contents and lengths.

Keywords: Reinforced soil. Polypropylene fibers. Hydromechanical.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Novo aterro sanitário (ASMOC), localizado ao lado do antigo ASMOC.	42
Figura 2 - a) Fibras de polipropileno; b) fibra de 6 mm; c) fibra de 12 mm;	43
Figura 3 - Destorroamento do solo.	45
Figura 4 - Homogeneização da mistura solo+fibra.	45
Figura 5- Amostra de solo em fase de saturação em cilindro de parede rígida.	47
Figura 6 - Equipamento utilizado para a execução dos ensaios de cisalhamento direto.	48
Figura 7 - Amostra de solo com fibras no molde cisalhamento direto.	49
Figura 8 - Difratorômetro modelo X'Pert Pro – Panalytical.....	50
Figura 9 - Microscópio Eletrônico de Varredura.	51
Figura 10 - Amostras secando à tempera ambiente.	51
Figura 11 - Microscopia eletrônica de varredura em amostra de solo puro.	74
Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura para fibras de 6 mm. (a) 0,25% de fibras; (b) 0,50% de fibras; (c) 0,75% de fibras; (d) 1% de fibras; (e) 1,25% de fibras.	75
Figura 13 - Microscopia eletrônica de varredura para fibras de 12 mm. (a) 0,25% de fibras; (b) 0,50% de fibras; (c) 0,75% de fibras; (d) 1% de fibras; (e) 1,25% de fibras.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades dos polímeros utilizados como base.....	24
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das fibras de polipropileno utilizadas.	43
Tabela 2 - Laboratórios onde os ensaios experimentais foram realizados.	44
Tabela 4 - Parâmetros obtidos pelas curvas de compactação.	53
Tabela 3 - Coeficiente de permeabilidade em cm/s.	56
Tabela 5 - Tensões cisalhantes máximas e tensões normais - solo puro e do solo com adições de fibras de 6 mm.	60
Tabela 6 - Coesão e ângulo de atrito do solo puro e do solo com adições de fibras de 6 mm.	62
Tabela 7 - Tensões cisalhantes máximas e tensões normais - solo puro e do solo com adições de fibras de 12 mm.	65
Tabela 8 - Coesão e ângulo de atrito do solo puro e do solo com adições de fibras de 12 mm.	66
Tabela 9 - Coesão e o ângulo de atrito das amostras ensaiadas.	71
Tabela 10 - Resistência de pico alcançadas.	71

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do solo.	53
Gráfico 3 - Curva de compactação, solos com adição de fibras de 6 mm.	54
Gráfico 4 - Curva de compactação, solos com adição de fibras de 12 mm.	54
Gráfico 2 - Permeabilidade do solo com a adição de fibras.	56
Gráfico 5 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo Natural.	58
Gráfico 6 - Envoltória de resistência do solo puro.	58
Gráfico 7 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo com adição de 0,25% de fibras de 6 mm.	59
Gráfico 8 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo com adição de 0,75% de fibras de 6 mm.	59
Gráfico 9 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo com adição de 1,25% de fibras de 6 mm.	60
Gráfico 10 - Envoltória de resistência do solo puro e do solo com adições de fibras de 6 mm.	61
Gráfico 11 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo com adição de 0,25% de fibras de 12 mm.	63
Gráfico 12 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo com adição de 0,75% de fibras de 12 mm.	64
Gráfico 13 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo com adição de 1,25% de fibras de 12 mm.	64
Gráfico 14 - Envoltória de resistência do solo puro e do solo com adições de fibras de 12 mm.	65
Gráfico 15 - Comparativo entre as curvas de solo puro e de solo com adições de fibras de 6 mm, submetidos a tensão normal de 50 kPa.	67
Gráfico 16 - Comparativo entre as curvas de solo puro e de solo com adições de fibras de 12 mm, submetidos a tensão normal de 50 kPa.	67
Gráfico 17 - Comparativo entre as curvas de solo puro e de solo com adições de fibras de 6 mm, submetidos a tensão normal de 100 kPa.	68
Gráfico 18 - Comparativo entre as curvas de solo puro e de solo com adições de fibras de 12 mm, submetidos a tensão normal de 100 kPa.	68
Gráfico 19 - Comparativo entre as curvas de solo puro e de solo com adições de fibras de 6 mm, submetidos a tensão normal de 200 kPa.	69

Gráfico 20 - Comparativo entre as curvas de solo puro e de solo com adições de fibras de 12 mm, submetidos a tensão normal de 200 kPa.....	70
Gráfico 21 - Envoltórias de resistência; a) Teor de 0,25%; b) Teor de 0,75%; c) Teor de 1,25%	72
Gráfico 22 - Coesão x Teor de fibras.....	73
Gráfico 23 - Ângulo de atrito x Teor de Fibras.	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral.....	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.2	Estrutura da dissertação	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Tipos de fibras.....	20
2.1.1	Fibras minerais.....	20
2.1.2	Fibras vegetais	22
2.1.3	Fibras metálicas	23
2.1.4	Fibras poliméricas.....	23
2.2	Fibras utilizadas para reforço do solo	26
2.2.1	Fatores que interferem nas propriedades geotécnicas de solos reforçados com fibras	29
2.3	Influência da inclusão de fibras nas propriedades geotécnicas dos solos.....	35
2.3.1	Influência na curva de compactação	35
2.3.2	Influência na resistência ao cisalhamento	36
2.3.3	Influência na permeabilidade	37
2.3.4	Influência na deformabilidade do compósito.....	38
2.4	Fibras de polipropileno em obras geotécnicas: aplicações e estudos	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1	Materiais	42
3.1.1	Solo	42
3.1.2	Fibras de polipropileno	42
3.1.3	Água.....	43
3.2	Métodos de Pesquisa.....	43
3.2.1	Preparação das Amostras	44
3.2.2	Ensaio de Caracterização Geotécnica.....	46
3.2.3	Ensaio Mineralógicos	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1	Ensaio de caracterização geotécnica	52
4.1.1	Limites de Atterberg.....	52

4.1.2	Análise granulométrica	52
4.1.3	Densidade real dos grãos	53
4.1.4	Compactação	53
4.1.5	Permeabilidade.....	55
4.1.6	Resistência ao cisalhamento	57
4.2	Ensaio mineralógicos	74
4.2.1	Difração de Raios X.....	74
4.2.2	Microscopia eletrônica de varredura.....	74
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
5.1	CONCLUSÕES	78
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

Encontrar um solo com propriedades físico-mecânicas adequadas para uso é imprescindível na engenharia geotécnica. Entretanto, frequentemente solos disponíveis apresentam características insuficientes para utilização em obras geotécnicas, que satisfaçam as especificações técnicas dos projetos. O solo é um material heterogêneo, com comportamento complexo e variável, o que leva a necessidade de encontrar meios de melhorar as suas propriedades para que se adequem as necessidades de projeto.

As propriedades de um solo podem ser alteradas de diversas formas, pela compactação mecânica, estabilização físico-química e pelo reforço de solos com a inserção de elementos resistentes como geotêxteis, grelhas, tiras e fibras (Casagrande, 2005). Outra possibilidade é a de remover o material existente e realizar a substituição por outro solo que possua as propriedades desejadas.

O uso de técnicas de reforço do solo existe desde a antiguidade, quando utilizavam misturas de solo com raízes, toras ou lã para construções civis (Palmeira, 1993). A melhoria ou reforço dos solos é tida com o uso de processos físicos e/ou químicos que proporcionam melhores propriedades ao solo, principalmente no que se refere ao comportamento mecânico.

Os solos reforçados com fibras são denominados de compósitos, sendo com frequência utilizados em situações em que o solo possui baixa capacidade de suporte, para aplicações em fundações superficiais, coberturas de aterros sanitários, pavimentação, estruturas de contenção, estabilização de taludes, dentre outros. Essa prática tem tido muita eficiência devido a melhoria na resistência do material resultante, sobretudo na resistência ao cisalhamento.

O uso de fibras naturais e poliméricas para o reforço do solo foi estudado por diversos autores (Teodoro, 1999; Feuerharmel, 2000; Vendruscolo, 2003; Casagrande, 2001, 2005; Trindade *et al.*, 2004; Leocádio, 2005; Festugato, 2008; Biachini, 2013; Senez, 2016; Silveira, 2018; Lopes, 2019; Castro, 2020).

A técnica de reforço do solo com fibras utiliza as fibras distribuídas de forma aleatória no solo, as quais proporcionam aumentos na resistência, ductilidade, tenacidade e a diminuição da resistência pós pico (Feuerharmel, 2000; Casagrande, 2001; Festugato, 2008).

As fibras utilizadas para reforço de solos podem ser minerais, vegetais, metálicas ou poliméricas, sendo as poliméricas utilizadas com mais frequência, visto que possuem bom desempenho e baixo custo. Nesse contexto, estudos que analisem como a inserção de fibras altera as propriedades do solo tornam-se necessários, para que seja possível compreender seu

comportamento caso sejam aplicadas na prática.

Em função da relevância da aplicação de fibras poliméricas como reforço de solos, este estudo visa dar uma contribuição no entendimento do comportamento hidromecânico de solos areno argilosos reforçados com fibras de polipropileno, avaliando o desempenho do solo reforçado com diferentes teores e comprimentos de fibras.

É importante destacar que este estudo pretende analisar as propriedades geotécnicas de um solo de cobertura de aterro sanitário, para verificar a influência nos parâmetros geotécnicos com a inserção de fibras e se a inclusão de fibras permite a aplicação como solo de cobertura de aterro sanitário.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa consiste em analisar o comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso reforçado com fibras de polipropileno, considerando diferentes comprimentos e teores de fibras.

1.1.2 Objetivos específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram determinados os seguintes objetivos específicos.

- Caracterizar o solo areno-argiloso por meio de ensaios de granulometria, densidade real dos grãos e limites de consistência;
- Analisar a influência do comprimento das fibras sobre as propriedades hidromecânicas do compósito;
- Analisar a composição microestrutural do solo, utilizando a difração de raios X;
- Verificar a adesão entre o solo e a fibra, utilizando a microscopia eletrônica de varredura.
- Analisar se com a adição de fibras, o material pode ser aplicado como cobertura de aterro sanitário.

1.2 Estrutura da dissertação

O presente trabalho é composto por cinco capítulos. O capítulo um mostra a

contextualização da pesquisa de forma geral, os objetivos gerais e específicos.

O capítulo dois aborda a revisão bibliográfica, que dá embasamento teórico para a pesquisa, trazendo conceitos e definições, assim como resultados de pesquisas realizadas por outros autores e que são essenciais para este trabalho.

O capítulo três descreve os materiais utilizados e a metodologia adotada para a realização dos ensaios experimentais desta pesquisa.

O capítulo quatro apresenta os resultados dos ensaios realizados e apresenta as discussões e análises dos resultados.

O capítulo cinco reúne as principais conclusões do trabalho, assim como as sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O uso de fibras para reforço de solos é uma técnica que foi desenvolvida há milhares de anos. Por ser um material complexo e com grande variabilidade em suas propriedades, frequentemente ocorrem situações em que o solo não atende aos requisitos dos projetos de engenharia, tornando necessárias a aplicação de técnicas de reforço de solos, que tem como objetivo principal a melhoria dos parâmetros de resistência do solo.

Este capítulo apresenta os temas mais relevantes que fundamentarão a pesquisa, serão discutidos os conceitos de reforços de solos e das fibras de polipropileno, comumente utilizadas para acréscimo de reforço do solo, bem como aborda pesquisas anteriores com o uso de fibras no reforço de solos.

2.1 Tipos de fibras

Há uma grande variedade de fibras que podem ser utilizadas em compósitos fibrosos e o comportamento final do compósito está diretamente ligado as características das fibras da qual são compostos e de seu processo de fabricação.

Para definir o tipo de fibra a ser empregado, é necessário conhecer os mecanismos de interação entre a matriz e o reforço e como cada parcela vai contribuir no comportamento do compósito. A escolha da fibra dependerá da matriz que será reforçada, das características que se pretende obter no material compósito final e do custo de obtenção. Algumas características importantes devem ser consideradas ao escolher a fibra para reforço de materiais, como: a fibra ser quimicamente neutra e não deteriorável, não sofrer ataques de fungos, bactérias e álcalis, além de não prejudicar a saúde humana.

De acordo com o material de origem as fibras podem ser minerais (carbono, vidro e amianto), vegetais (coco, sisal, curauá, juta, piassava, pupunha, dentre outras), metálicas (aço) e poliméricas (polipropileno, polietileno, poliéster e poliamida). Suas propriedades físicas, químicas e mecânicas afetam diretamente o comportamento do material compósito.

2.1.1 Fibras minerais

As fibras minerais são originadas de rochas e possuem estrutura fibrosa, apresentando na sua composição predominantemente silicatos. As fibras minerais mais

conhecidas são as fibras de carbono, de vidro e de amianto que possuem como vantagem uma boa aderência a matriz.

As fibras de carbono possuem elevada resistência à tração, módulo de elasticidade elevado e baixa massa específica. Devido as suas ótimas propriedades mecânicas, térmicas e químicas, estas fibras possuem um alto custo no mercado. Oliveira (2016) menciona que suas principais vantagens são a alta resistência e rigidez; massa específica reduzida; alta resistência a fadiga; baixo coeficiente de dilatação térmica; ótima resistência a ataques químicos e corrosão; rapidez e facilidade de instalação. Como desvantagens temos, a baixa resistência ao impacto; baixa extensão de rotura; baixa resistência à compressão e o custo elevado (Levy Neto; Pardini, 2016). São comumente utilizadas como reforço de concreto armado e no setor aeroespacial (Arquez, 2010; Oliveira, 2018).

As fibras de vidro são produzidas em forma de “cachos” constituídos por fios compostos de centenas de filamentos individuais. O diâmetro dos filamentos varia de acordo com as propriedades do vidro, das dimensões do furo por onde serão extrusados e da velocidade de extrusão. Comumente possuem diâmetro da ordem de 10 μm (Taylor, 1994). Aproximadamente 99% das fibras de vidro são produzidas a partir do vidro tipo *E*, que é susceptível ao ataque de álcalis, que estão presentes no cimento Portland. Entretanto, há uma fibra de vidro conhecida comercialmente como “Cem-Fil” que possui resistência aos álcalis está sendo desenvolvida para uso em pastas cimentadas (Montardo, 1999). As fibras de vidro possuem diversas vantagens, podendo-se mencionar a alta resistência mecânica, alta resistência à tração, resistência ao impacto significativa, baixa absorção de água, resistência química a diversos micro-organismos e baixo coeficiente de dilatação térmica. Tem um alto custo com relação as fibras poliméricas, podendo ser considerado uma desvantagem (Santos *et al.*, 2016). São utilizadas como reforço estrutural, na indústria automotiva, na odontologia, como reforço em compósitos de PVC, dentre outros (Patriarca; Castro, 2018; Gutiérrez *et al.*, 2014; Aquino, 2013; Feltran; Diaz, 2007).

A fibra de amianto costumava ser muito comercializada devido as suas vantagens, como alta resistência mecânica, baixo peso, boa durabilidade, boa resistência química, resistência ao fogo e baixo custo (Ghavami *et al.*, 1999). Possuem diâmetro muito pequeno, da ordem de 1 μm , o que pode explicar sua excelente aderência a matrizes cimentadas (Taylor, 1994). Sua maior desvantagem está relacionada ao seu diâmetro muito pequeno, pois quando cortada, essa fibra libera partículas muito pequenas que causam problemas pulmonares sérios se aspiradas pelo homem, sendo por esta razão, seu uso é proibido em muitos países.

2.1.2 Fibras vegetais

O uso de fibras vegetais ou naturais como reforço de solo, tais como fibras de juta, piaçava, curauá, sisal, entre outras, é estudado na aplicação em obras de engenharia. Pode-se mencionar várias pesquisas que analisaram a melhoria do comportamento mecânico do solo com a adição de fibras naturais, utilizando fibras de curauá, coco e sisal (Silva, 2016, 2020; Reis, 2022).

A maior desvantagem das fibras naturais é a deterioração com o tempo, limitando o seu uso a obras temporárias. Para aumentar a sua durabilidade, técnicas para revestimento das fibras têm sido aplicadas com o intuito eliminar os efeitos da deterioração. Outro problema refere-se à heterogeneidade, pois as fibras vegetais possuem grande variabilidade de propriedades, mesmo entre as que são do mesmo tipo. Como vantagem pode-se citar o caso das fibras de curauá, linho e bambu possuem alta resistência à tração e um módulo de elasticidade acima de 20 MPa. Suas características mecânicas são consideradas como vantagens para o uso, visto que possuem alta resistência.

Essas fibras têm sido utilizadas como reforço devido a sua contribuição para a diminuição da emissão de carbono, pela disponibilidade abundante e pelo baixo custo. Além disso, Dittenber e Gangarao (2012) mencionam que essas fibras são mais fáceis de manusear, possuem boas propriedades mecânicas, geram poucos resíduos e precisam de menos energia em seu processo de produção.

Podem ser obtidas de diferentes partes da planta, podendo vir do caule, da folha, da semente ou do fruto das plantas. Dentre as fibras obtidas a partir do caule pode-se mencionar as de linho, de juta, cânhamo e bagaço de cana. Para as fibras obtidas a partir das folhas temos, sisal, rami, bananeira, curauá e abacaxi. As obtidas a partir das sementes englobam o algodão e kapok. Por fim, as fibras vegetais obtidas a partir do fruto, como a de coco.

O uso desse tipo de fibra traz como desvantagens a falta de uniformidade de suas propriedades, alta absorção de umidade, a baixa temperatura de processamento (limitada a 200°C) e a baixa durabilidade (caso a fibra não passe por nenhum tipo de tratamento), visto que é suscetível a degradação em ambientes naturais (Silva, 2003).

Essas fibras são utilizadas em reforços de argamassas, como reforço a matriz cimentícia, no tratamento de rejeitos radioativos, como reforço de solos, dentre outros (Picanço; Ghavami, 2008; Marques, 2009; Jesus, 2013; Lopes, 2019; Carvalho, 2019).

2.1.3 Fibras metálicas

As fibras metálicas são frequentemente utilizadas na melhoria das propriedades mecânicas dos materiais de construção civil, que as utiliza como reforço. Usualmente, utiliza-se as fibras de aço como reforço do concreto no estado endurecido, visto que possuem alta resistência e alto módulo de elasticidade (Moscatelli, 2011). Sua principal desvantagem é a possibilidade de apresentar graves problemas corrosivos se não forem cobertas com níquel.

Podem apresentar diferentes formatos, o que conseguindo aumentar a aderência com a matriz. Segundo Guimarães (2015), as fibras metálicas possuem grande capacidade de deformação e ductilidade. Como mencionado anteriormente, a sua aplicação mais frequente é como reforço de concreto (Suk; Ferrari, 2024)

2.1.4 Fibras poliméricas

As fibras sintéticas são fibras produzidas pelo homem, tendo como vantagem a possibilidade de alterar a sua estrutura química, sendo possível produzir fibras não degradáveis, com boas propriedades mecânicas, quimicamente neutras e que não sejam prejudiciais à saúde humana. Por não serem degradáveis e pela sua estrutura química (polímeros com diferentes tipos e comportamentos) o seu uso como reforço no solo é promissor em relação aos outros tipos de fibras (Casagrande, 2001; 2005).

As fibras poliméricas possuem diversos formatos. Por exemplo, as fibras denominadas de fibriladas apresentam um formato trançado e quando esticadas transversalmente, se abrem durante o processo de mistura do solo. Outro formato bastante utilizado são as malhas, que possibilitam um maior intertravamento com as partículas do solo. Além destas, há a fibra do tipo Texsol, que se trata de um filamento contínuo distribuído de forma aleatória dentro do solo.

De acordo com o tipo de material as fibras poliméricas podem ser subdivididas em fibras de polipropileno, polietileno, poliéster e de poliamida.

O Quadro 1 apresenta uma comparação qualitativa das propriedades que constituem os polímeros das fibras poliméricas. Observa-se que as fibras de poliésteres possuem maior resistência e melhor desempenho ao longo do tempo, já as fibras de polietileno e de polipropileno apresentam boa resistência contato com os ácidos graxos, as quais são utilizadas com frequência como reforço em solos.

Quadro 1 - Propriedades dos polímeros utilizados como base.

PROPRIEDADES	POLÍMEROS			
	Poliéster	Poliamida	Polietileno	Polipropileno
Resistência à tração	3	2	1	1
Rigidez	3	2	1	1
Deformação na rotura	2	2	3	3
Fluência	1	2	3	3
Densidade Relativa	3	2	1	1
Custo	3	2	1	1
Resistência à				
Radiações UV	Com estabilizadores	3	2	3
	Sem Estabilizadores	3	2	2
Bases	1	3	3	3
Fungos, Vermes, Insetos	2	2	2	3
Óleo	2	2	1	1
Detergentes	3	3	3	3

1 - Baixa; 2 - Média; 3 - Elevada;

Fonte: Adaptado de Lopes (1998).

a) Fibra de polipropileno

As fibras de polipropileno são compostas por um material que obtém consistência plástica com aumento da temperatura, que são denominados como termoplásticos. Os polímeros termoplásticos possuem séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas de forma que seja possível deslizar umas sobre as outras (Hollaway, 1994).

Existem diversos fatores que justificam o uso da fibra de polipropileno, que englobam desde as suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, como também o fato de ser um material quimicamente inerte, que não absorve umidade, imputrescível e que não oxida. Além disso, pode-se citar seu baixo custo, ampla disponibilidade e o manuseio não prejudica a saúde dos trabalhadores (Rodrigues; Montardo, 2002).

Devido a sua constituição, este tipo de fibra possui grande flexibilidade e tenacidade. Além disso, as fibras de polipropileno são resistentes ao ataque de diversas substâncias químicas e aos álcalis (Taylor, 1994). Essas fibras podem ser encontradas comercialmente em forma de monofilamentos picados ou na forma de malhas contínuas, sendo que esta possui um melhor imbricamento com a matriz, o que torna a probabilidade de arrancamento da matriz menor. São frequentemente utilizadas em reforço de solos, em reforço de bases de fundações (Trindade *et al.*, 2006; Vendruscolo, 2003; Júnior *et al.*, 2017).

b) Fibras de polietileno

As fibras de polietileno possuem um baixo módulo de elasticidade, têm fraca aderência a matriz cimentícia e são muito resistentes aos álcalis. Dispõem de alta durabilidade, porém apresentam maiores deformações por fluência, o que indica que se forem utilizadas para suportar altas tensões de forma permanente em um composto fissurado, podem ocorrer alongações e deflexões ao longo do tempo (Hannant, 1994). Como meio de atenuar o problema relacionado a baixa aderência e do módulo de elasticidade, pode-se utilizar uma fibra de polietileno de alta densidade. São utilizadas como reforço de concreto, em tratamentos odontológicos e reforço em pavimento rígido (Júnior *et al.*, 2017; Kaizer, 2003; Franco *et al.*, 2019).

c) Fibras de poliéster

As fibras de poliéster possuem alta densidade, rigidez e resistência. Possui o mesmo aspecto das fibras de polipropileno, podendo ser utilizada para os mesmos fins (Taylor, 1994). O poliéster, também conhecido como polietileno tereftalato (PET), é o material utilizado em garrafas plásticas de refrigerantes, águas minerais, óleos de cozinha, dentre outros. São aplicadas como reforço de argamassas cimentícias (Sousa *et al.*, 2019).

d) Fibras de poliamida

As fibras de poliamida são constituídas por polímeros com grandes cadeias de moléculas, que em geral, possuem baixa resistência e rigidez visto que suas moléculas são espiraladas e dobradas. Porém, caso as moléculas sejam espichadas e reforçadas durante a sua manufatura, podem alcançar alta resistência e módulo de elasticidade, como é o caso da fibra de poliamida Kevlar (Taylor, 1994).

A fibra de poliamida aromática, também conhecida como Kevlar, é uma fibra sintética frequentemente utilizada (Hollaway, 1994). O Kevlar possui ótimas propriedades físicas à tração, formidável estabilidade térmica e resistência à chama (Bernardi, 2003). Além de proporcionar uma boa tolerância a danos, baixa densidade e ótima resistência ao impacto. Devido a suas propriedades, são fibras utilizadas em capacetes militares blindados, veículos terrestres, na indústria de aviação (Cunha *et al.*, 2016).

2.2 Fibras utilizadas para reforço do solo

A técnica do solo reforçado com fibras é uma técnica utilizada há milhares de anos, entretanto, começou a ser mais estudada a partir da segunda metade do século XX, por meio de diversos estudos avaliando o efeito das raízes de plantas na resistência ao cisalhamento dos solos. A definição de solo reforçado foi desenvolvida na década de 60, pelo engenheiro francês Vidal (1969), que patenteou uma de suas descobertas e a chamou de “Terra Armada”, onde evidenciou que ao inserir um elemento de reforço na matriz do solo, haveria o aumento na resistência ao cisalhamento do solo. Considerando os princípios do reforço dos solos utilizando raízes, outras técnicas foram desenvolvidas com o intuito de obter os mesmos resultados.

Solos reforçados por fibras podem conduzir ao um melhoramento das suas propriedades mecânicas. Dentre as melhorias pode-se citar um aumento na resistência ao cisalhamento, a diminuição na compressibilidade e a depender do tipo de solo, pode gerar aumento ou diminuição na permeabilidade do solo.

O processo de reforço do solo é adequado de se aplicar quando o solo natural não apresenta as propriedades geotécnicas exigidas para as solicitações que estará submetida em campo. O reforço corresponde a mistura de dois materiais, a matriz (ex: solo, resíduo não reativo, etc.) e o reforço (ex: fibra, geotêxtil, geogrelha, etc.). Muitos materiais têm sido estudados recentemente para verificar a viabilidade de uso como reforço de solo. O termo material compósito refere-se à combinação de dois ou mais materiais distintos, com o intuito de obter um material final com propriedades mecânicas melhoradas à dos materiais separados. O termo compósito é comumente associado aos estudos de solos reforçados com fibras.

Com o desenvolvimento das indústrias químicas, os materiais sintéticos passaram a ter maior aplicação e com isso, surgiram mais estudos relacionados ao assunto (Zaimoglu e Yetimoglu, 2011; Feuerharmel, 2000; Ferreira *et al.*, 2021), devido a maior facilidade de obtenção em larga escala e a elevada resistência a agentes externos.

Nas últimas duas décadas houve um crescente aumento no número de estudos sobre a utilização de fibras, utilizando materiais como o aço, o vidro, a borracha e o plástico, para atuar como reforço de solo. Diversos estudos observaram um aumento de resistência do solo quando misturado com fibras, como de aço (Nouri e Shahrouzi, 2021), de vidro (Sujatha *et al.*, 2021, Rabab’ah *et al.*, 2021; Garcia, 2023); de borracha (Meddah; Merzoug, 2017; Rocha *et al.*, 2021, Jaramillo *et al.*, 2022), de vegetais (Leocádio, 2005; Silveira, 2018; Lopes, 2019; Silva *et al.*, 2019) e de polipropileno (Teodoro, 1999; Casagrande, 2001, 2005; Vendruscolo, 2003; Trindade *et al.*, 2004, 2006; Festugato, 2008; Sousa *et al.*, 2020).

Nouri e Shahrouzi (2021) utilizaram material reciclável para produzir fibras de aço, as quais foram inseridas no solo como reforço. O estudo examinou os efeitos de dois tipos de fibras (extremidade em forma de gancho simples e ondulada) adicionados a uma argila em diferentes porcentagens e relações de aspecto (comprimento (l)/ diâmetro (d)), que foram submetidos a ensaios de compressão uniaxial. Os resultados indicaram aumento de resistência à compressão do solo.

Sujatha *et al.* (2021) analisaram a influência do uso de dois tipos de fibra de vidro (fibras de vidro resistentes à álcalis e fibras de vidro de grau eletrônico) como reforço com o intuito de melhorar a resistência do solo. Os ensaios mostraram que a inserção de fibras confere ao solo um comportamento plástico. Além disso, o solo mostrou-se menos sensível a umidade e com comportamento dúctil. Houve melhora na resistência à compressão não confinada do solo e na capacidade de absorção de energia.

Rabab'ah *et al.* (2021) investigaram o efeito da fibra de vidro nas propriedades do solo expansivo, para uso como reforço de subleito em pavimentações. O teor de fibras variou entre 0,25% e 1% do peso seco do solo. Os resultados mostraram que a inserção de fibras melhora a resistência à compressão não confinada, a resistência à tração indireta e o índice de suporte califórnia. Os autores indicaram que a adição de fibras levaria a uma redução significativa na espessura do pavimento.

Garcia (2023) avaliou a influência da adição de fibras de vidro e de polipropileno no teor gravimétrico de 0,5% em um solo argiloso. Os ensaios constataram que as fibras de polipropileno não aumentaram a resistência a compressão, porém, as fibras de vidro mostram uma redução de 31% na resistência do solo reforçado. Para a situação em estudo, não houve justificativa viável para o uso de fibras como reforço. Acredita-se que a queda da resistência das fibras de vidro ocorreu devido a aderência insuficiente com os grãos do solo. Além disso, houve a redução dos contatos das partículas de solo com a inserção de fibras.

Meddah e Merzoug (2017) analisaram a viabilidade de utilizar fibras de borracha distribuídas aleatoriamente como reforço na areia de dunas. As fibras foram adicionadas nas porcentagens de 0,25% a 2% do peso seco da areia. Os resultados indicaram que a inclusão de fibras de borracha melhora a resistência ao cisalhamento, resistência máxima e residual, além de proporcionar mais ductilidade ao comportamento mecânico da areia.

Rocha *et al.* (2021) estudaram o comportamento mecânico de um solo arenoso com inserção de resíduos de borracha no reforço do solo, nos teores gravimétricos de 5%, 10% e 15%. Os resultados mostraram que houve aumento na resistência do índice de suporte califórnia

e aumento da compressibilidade do solo. A mistura com 10% de borracha teve o melhor desempenho.

Jaramillo *et al.* (2022) verificaram o comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com pedaços e fibras de borracha nos teores gravimétricos de 5%, 10% e 15%. De forma geral, tanto os pedaços quanto as fibras de pneu melhoraram o comportamento mecânico do solo. Os resultados indicaram melhoria no comportamento elástico do solo. Os teores de 5 e 10% resultaram em melhorias igualmente satisfatórias, o que mostra que a técnica de reforço é promissora tanto por ser um recurso técnico, quanto socioambiental (relacionado ao descarte de resíduos).

Silveira (2018) analisou o comportamento mecânico e a durabilidade da areia reforçada com fibras de curauá e sisal. As fibras tiveram períodos de exposição de 0, 60, 120 e 240 dias. Por meio das análises foi possível observar que o envelhecimento natural afeta de forma significativa as propriedades mecânicas da fibra natural, houve perdas significativas na resistência ao cisalhamento. As fibras foram tratadas com sílica coloidal, o que promoveu melhorias no comportamento mecânico do material e proporcionou uma maior vida útil as fibras naturais.

Teodoro (1999) observou o comportamento de dois solos (argila e areia) reforçados com fibras de polipropileno nos teores de 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4%, 1% e 2% e com relação ao peso seco do solo e com comprimentos de 5, 10, 20, 30 e 50 mm. Os resultados indicaram que a resistência do solo arenoso cresceu com o aumento do teor e do comprimento das fibras, o solo argiloso teve acréscimo de resistência até o comprimento de 10 mm.

Casagrande (2001) estudou o comportamento mecânico de um solo residual areno siltoso reforçado com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente, objetivando a aplicação em base de fundações superficiais. De forma geral, os resultados indicaram um aumento significativo da capacidade de suporte com a inclusão de fibras, houve ainda uma redução dos recalques quando comparado ao solo residual compactado sem adição de fibras.

Festugato (2008) estudou o comportamento mecânico de uma areia fina micro reforçada com fibras de polipropileno, com comprimentos de 12, 24, 36 e 50 mm e diâmetros de 0,023 e 0,100 mm. Os ensaios indicaram que há um notável ganho de resistência com a adição de fibras. Os valores do ângulo de atrito não foram influenciados pelo comprimento e diâmetro das fibras, porém, o intercepto coesivo é fortemente influenciado por essas variáveis. Além disso, a rigidez da areia não sofreu alterações com a inclusão de fibras.

Sousa *et al.* (2020) observaram o comportamento de um latossolo vermelho amarelo reforçado com fibras de polipropileno nos teores gravimétricos de 0,25, 0,50 e 0,75%.

Os resultados indicaram benefícios ao inserir fibras ao solo natural. A fibra de 0,25% desempenhou o melhor comportamento quando submetidas aos ensaios mecânicos (índice de suporte califórnia, compressão simples e compactação). O teor de 0,75% foi considerado inviável devido a fragilidade proporcionada ao solo com a inclusão excessiva de fibras.

Os demais estudos utilizando fibras que foram mencionados nesse tópico, desenvolveram-se outras partes dessa pesquisa.

A eficiência do reforço do solo depende de três fatores: as propriedades mecânicas do solo, as propriedades mecânicas do esforço utilizado, e do grau de interação entre o solo-reforço. Ao se reforçar um solo com fibras, não há um percentual (gravimétrico ou volumétrico) de fibras predefinido a ser adicionado, sendo necessário determinar para cada tipo de solo esse percentual em laboratório.

2.2.1 Fatores que interferem nas propriedades geotécnicas de solos reforçados com fibras

Conforme ressaltado anteriormente, o comportamento dos solos reforçados com fibras é controlado pelo teor e comprimento das fibras, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e pela aderência entre estes.

A seguir serão apresentados alguns dos fatores mais relevantes que interferem no comportamento dos solos reforçados.

a) Comprimento da fibra

O comprimento das fibras presentes em um compósito influencia diretamente na resistência do mesmo. Em fibras com comprimentos maiores, a área de contato é maior, o que implica em um maior atrito entre solo-fibra. Sendo assim, o aumento do comprimento implica em ganho de resistência, porém, esse ganho de resistência só foi observado até um determinado comprimento de fibra (Teodoro, 1999; Heineck, 2003; Trindade *et al.*, 2004; Roque, 2017). O comprimento ótimo das fibras deve ser determinado laboratorialmente, considerando as especificidades de cada solo a ser utilizado, visto que não há uma dosagem predefinida.

Bianchini (2013) estudou o comportamento mecânico de um solo argilo-arenoso com a inclusão de fibras de polipropileno de 6, 12 e 24 mm, por meio de ensaios de laboratório. Os resultados dos ensaios indicaram maiores ângulos de atritos em compósitos misturados com fibras com maiores comprimentos.

Trindade *et al.* (2006), realizou um estudo laboratorial do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras, com fibras de 10, 15, 20 e 30 mm de comprimento. Através desse estudo foi possível observar que o comprimento das fibras possui grande influência nos resultados dos ensaios de compactação, assim como na homogeneidade e umidade inicial da mistura. Ao trabalhar com fios mais longos (como fibras com 30 mm de comprimento), houve dificuldade para realizar a compactação a mistura solo-fibra, pois o compósito tornou-se quebradiço e formaram-se planos preferenciais de ruptura. Esse fenômeno é conhecido como laminação e tornou-se mais frequente com o aumento do comprimento das fibras. Além disso, as fibras mostraram uma tendência ao posicionamento nos planos horizontais, captando uma parcela da energia do processo de compactação, o que proporcionou ao material um comportamento mais resistente. De forma geral, foi observado que a adição de fibras aumentou significativamente a resistência mecânica do material, tendo sido o teor de 0,75% e o comprimento de 20 mm das fibras a melhor combinação, devido ao maior ganho de resistência.

Silva *et al.* (2019) estudou a viabilidade do uso de fibras naturais como reforço de solo (areia siltosa), por meio da inclusão de fibras de 25, 50 e 75 mm. O estudo concluiu que, dentre os três comprimentos de fibra, a fibra de 50 mm proporcionou um aumento mais significativo das propriedades mecânicas do solo, o que levou os autores a concluir que a fibra com comprimento de 50 mm seria ideal para utilização no tipo de solo estudado. Além disso, durante o ensaio de compactação, observou-se dificuldade de homogeneidade da mistura solo+fibra de 75 mm.

Vendrusculo (2003), estudou o comportamento de materiais compósitos fibrosos, utilizando como matriz um solo arenoso cimentado e não cimentado, com adição de fibras de polipropileno. Para a realização dos ensaios utilizou-se fibras de 12, 24 e 36 mm de comprimento e teores de 0, 0,25, 0,50 e 0,75% com relação a massa seca do solo. Posteriormente foram feitos ensaios de resistência (ensaios triaxiais, ensaios de placa e capacidade de carga). Por meio de seus estudos identificou que, o efeito da inclusão de fibras é mais notório para maiores comprimentos e teores de fibras, onde expressa maior resistência, além de contribuir para a redução da fragilidade e para o acréscimo da capacidade de absorção de energia, que foram identificados pela execução dos ensaios triaxiais.

b) Teor de fibras

Assim como o comprimento, o teor das fibras também está diretamente relacionado a resistência da mistura solo-fibra. De acordo com Santos *et al.* (2016), existem diversos teores ideais de fibra, visto que vários parâmetros podem alterar esse teor, como o tipo de fibra utilizada, o tipo de solo, região onde o estudo está sendo realizado, a adição de resíduos, a adição de aditivos e o carregamento aplicado para a realização do ensaio.

Silva (2020) investigou o comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras de carauá avaliando a influência do teor de fibras sobre a resistência do material compósito. Os comprimentos estudados foram 6, 15 e 30 mm e os teores gravimétricos foram 0,25, 0,50 e 0,75%. O material compósito apresentou ganho de resistência em todos os ensaios de resistência realizados, além do ganho de resistência foi observado que a adição de fibras aumentou a ductilidade do solo, o que possibilitou o alcance maior de deformações sem a queda brusca da resistência.

Com o intuito de estabilizar o solo, A Al-Saray *et al.* (2021) analisaram um solo arenoso com inclusão de fibras de polipropileno nos teores gravimétricos de 0,1, 0,3, 0,6 e 1%. As propriedades físicas analisadas foram o ângulo de atrito interno, a resistência ao cisalhamento, o CBR e a permeabilidade. Foi observado que quando comparados ao solo puro, a inclusão de fibras gerou aumentos no ângulo de atrito interno (24%), na resistência ao cisalhamento (20%) e no CBR (182,2%), para o teor de 0,6%. Porém, a permeabilidade reduziu em 26% para o teor de 0,1%.

Tiwari e Satyam (2019) estudaram como a inserção de fibras de polipropileno influenciam as propriedades de um solo argiloso que apresenta expansão e retração. Utilizando as porcentagens gravimétricas de 0,25%, 0,50% e 1% com comprimento de 12 mm, foi observado que a inclusão de fibras teve um efeito significativo na expansão e retração do solo. Com o aumento do teor de fibras a expansão diminuiu, tendo sido o percentual de 1% considerado o ideal para aplicação em campo.

Com o intuito de atender as condições de solo necessárias para projetos de engenharia, Barboza *et al.* (2022) coletaram solo de uma jazida e avaliaram o comportamento geomecânico de um solo residual de lamito com adição de fibras de polipropileno nos teores gravimétricos de 0,5%, 0,75% e 1%. A maior resistência obtida foi da adição de 0,5%. As fibras de 0,75% e 1%, geraram um aumento no índice de vazios e reduziram o ângulo de atrito interno, quando comparados aos valores do percentual de 0,5%.

O estudo realizado por Taha *et al.* (2020) investigou as implicações da adição de fibras de polipropileno no comportamento mecânico de um solo argiloso, para uso como reforço na Mongólia, interior da China. Uma série de amostras foram analisadas, com 0%, 1,5%, 2,25% e 3% de fibras com relação ao peso do solo, as quais foram submetidas aos ensaios de compactação, resistência ao cisalhamento, consolidação, California Bearing Ratio (CBR) e análises de microestrutura. Os resultados indicaram que a adição de fibras gerou melhorias na compactação, resistência ao cisalhamento, consolidação e taxa de suporte do solo. Com o aumento do teor de fibras, a densidade seca máxima aumentou e o teor de umidade ótimo diminuiu. O ângulo de atrito interno aumentou e a coesão diminuiu. O índice de vazios, coeficiente de consolidação e a condutividade hidráulica diminuíram.

Malekzadeh e Bilsel (2014) analisaram como a inclusão de fibras de polipropileno afeta a mudança de volume e as características da água do solo, com o interesse de aplicação em solos expansivos. Foram utilizadas fibras nos teores gravimétricos de 0%, 0,5% e 1%. Constatou-se que a inserção de fibras é muito eficaz na redução dos índices de compressão e inchamento e das pressões de inchamento, assim como na quantidade de inchamento unidimensional em condição saturada. Depois da dessecação, a retração do solo reduziu significativamente. Dessa forma, o reforço utilizando fibras de polipropileno, reduziu satisfatoriamente o movimento de expansão e contração de solos expansivos, tendo sido o melhor comportamento o da inclusão de 1%. A técnica é promissora para aliviar danos em edifícios e estradas devido aos movimentos de expansão e retração.

O estudo realizado por Marçal (2019) analisou a resistência mecânica de dois tipos de solo (arenoso e argiloso), nos quais foram adicionadas fibras de polipropileno nas porcentagens de 0,25, 0,50, 0,75, 1, 1,50 e 2% em relação à massa seca de solo. Por meio dos ensaios de resistência, notou-se que, houve um aumento de 52,27% e 48,12% da resistência à compressão uniaxial do solo arenoso e do argiloso (respectivamente?), com relação a resistência do solo sem adição de fibras. Com relação aos resultados de ensaios de cisalhamento direto, observou-se que os parâmetros de resistência aumentaram 126,49% (coesão) e 14,01% (ângulo de atrito), para o solo arenoso. Para o solo argiloso houve um pequeno decréscimo na coesão (17,9%) e aumento no ângulo de atrito (35,95%).

Júnior (2018) estudou o comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco, com teores de fibras de 0, 0,5, 1 e 2% em relação ao peso seco de solo. O autor observou que à medida que o teor de fibras aumentou, a densidade seca reduziu e o teor de umidade subiu, o que sugere que o aumento de fibras resulta em

misturas com maiores índices de vazios. Além disso, o aumento do teor de fibras também aumentou a compressibilidade das misturas.

Zaimoglu e Yetimoglu (2011) realizaram um estudo avaliando a influência do teor das fibras (0,25 a 1%) de polipropileno acrescido a um solo fino (silte de alta plasticidade), por meio do ensaio de compressão simples, o que permitiu observar um ganho de resistência com o aumento do teor de fibras, que foi mais significativo para a porcentagem de fibras de até 0,75% adicionado ao solo. Esses dados indicam que pode haver um teor ótimo de fibras a ser adicionado ao solo para atingir um máximo aumento de resistência, sendo esse comportamento já foi observado em pesquisas realizados por diferentes autores (Silveira, 2018; Leocádio, 2005; Trindade, 2004; Rocha, 2020) que observaram um teor ótimo de fibras, que resulta em uma maior resistência do compósito.

Ao analisar a bibliografia, foi possível identificar que diversos autores que estudam o uso de fibras para reforçar solos, utilizaram teores que variaram entre 0,25% e 1,25%, tanto para pesquisas com fibras naturais (Silva, 2020; Lopes, 2019; Carvalho, 2019; Motta, 2018; Leocádio, 2005) quanto com fibras sintéticas, como de polipropileno (Castro, 2020; Sousa *et al.*, 2020; Casagrande, 2005; Trindade *et al.*, 2004; Feuerhamel, 2000). Há relatos recorrentes de ganho de resistência com o aumento do teor de fibras, entretanto, esse efeito só é observado até o teor ideal, que varia de acordo com o material com que se está trabalhando.

c) Módulo de elasticidade das fibras

A adição de fibras ao solo gera diversos efeitos, que variam de acordo com os tipos e características das fibras e dos solos e o módulo de elasticidade também varia de acordo com esses fatores.

De acordo com Taylor (1994), um módulo de elasticidade elevado gera um efeito semelhante ao teor de fibras, ou seja, quanto maior o módulo de elasticidade, maior a probabilidade de ocorrer arrancamento da fibra. Isso ocorre, pois, caso uma fibra com alto módulo de elasticidade esteja inserida em um compósito onde a aderência entre a fibra e a matriz não é boa, haverá o arrancamento da fibra, visto que a mesma não irá romper, por essa razão, para impedir o arrancamento a aderência entre a fibra e a matriz também deve ser alta.

Casagrande (2005) analisou o comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno submetidos a grandes deformações e observou que o módulo de elasticidade da areia pura e da areia reforçada com fibras, diminuiu com o aumento da aplicação de carga, entretanto, a partir de um dado nível de pressões aplicadas o decréscimo do módulo de

elasticidade fica menor para a areia reforçada com fibras. Este efeito ocorre devido a absorção mais efetiva das tensões de tração pelas fibras.

Estudos realizados por Feuerharmel (2000), em areias, argilas e areias siltosas, com e sem cimento, reforçadas com fibras de polipropileno, indicaram que as fibras geram uma diminuição no módulo de elasticidade do solo, mas que essa diminuição varia de acordo com o tipo e características do solo. Ao adicionar cimento no compósito houve uma queda de resistência ocasionada pelas fibras. As alterações causadas pelas fibras são baseadas na adesão solo-fibra (para solos coesivos) e no potencial de engastamento das fibras nos grãos (para solos granulares). Com relação a adesão, sua importância se dá devido as características de adesividade das superfícies dos minerais que formam os solos e as fibras. O engastamento se baseia na textura granular do solo e na flexibilidade das fibras.

d) Aderência entre a fibra e a matriz

As características de resistência, deformação e padrões de ruptura de vários compósitos reforçados com fibras baseiam-se na aderência entre a fibra e a matriz. Ao obter uma alta aderência entre a fibra e a matriz haverá uma redução do tamanho das fissuras e uma ampliação da sua distribuição pelo compósito.

O estudo realizado por Silva (2020) analisou o uso de fibras vegetais como reforço de solo, variando os parâmetros do comprimento e o teor de fibra. O estudo concluiu que há perda de resistência do compósito quando são acrescidos teores muito elevados de fibras e para comprimentos maiores, que interferem na aderência entre o solo e a fibra.

e) Resistência da fibra

Aumentar a resistência das fibras eleva a ductilidade da mistura solo-fibra, considerando que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. Na prática, a escolha da resistência da fibra dependerá das características pós fissuração desejadas, do teor de fibra e das propriedades de aderência entre a fibra e a matriz.

Alguns autores mencionam que a contribuição de resistência fornecida pelas fibras naturais ao compósito diminui com o tempo devido a exposição a diversos fatores ambientais. Com isso, surgiu a necessidade de utilizar substâncias que diminuam o efeito dos fatores ambientais nas fibras naturais como soluções betuminosas para impermeabilizar as fibras.

2.3 Influência da inclusão de fibras nas propriedades geotécnicas dos solos

Serão apresentadas a seguir relatos encontrados na bibliografia acerca do da influência nas propriedades dos solos com a adição de fibras.

2.3.1 Influência na curva de compactação

Trindade *et al.* (2004) realizaram um estudo utilizando um latossolo vermelho-amarelo de textura argilo-areno-siltoso e fibras de polipropileno com comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm e teores de 0,25%, 0,50% e 0,75% com relação a massa de solo seco. Os resultados do ensaio de compactação mostraram uma tendência, que um maior o teor de fibras tende a reduzir progressivamente o peso específico aparente seco do solo, ao passo que há um aumento progressivo da umidade ótima do solo. A mesma tendência foi observada no estudo realizado por Castro (2020), com adições de 0,25 até 1,25% de fibras de polipropileno em solo arenoso.

Entretanto, autores como Casagrande (2001) e Heineck (2002), que estudaram a adição de fibras de polipropileno em areias siltosas, não observaram alterações significativas na umidade e no peso específico aparente seco do solo com a inclusão de fibras.

Isaias (2022) estudou a adição de fibras de polipropileno a um solo argiloso nas porcentagens de 0,5% e 1% e verificou que a inclusão de fibras gera uma leve redução da massa específica aparente seca máxima e um aumento da umidade ótima, que ocorre de acordo com o acréscimo de fibras na mistura.

Rocha (2019) adicionou fibras de polipropileno a um solo argiloso nos teores de 0,1% e 0,25% com relação a massa seca do solo. Por meio do ensaio de compactação o autor observou que, houve pequenas alterações na umidade ótima e massa específica seca máxima do solo. Embora as alterações tenham sido pequenas nos parâmetros de compactação, a umidade ótima aumentou com a maior inclusão de fibras e a massa específica seca máxima diminuiu. Esse mesmo comportamento foi observado nos estudos realizados por Barboza *et al.* (2022), que estudou a resistência ao cisalhamento de um solo residual de lamito com adições de fibras de polipropileno.

De forma geral, observa-se que os autores relatam com frequência que com o aumento do teor de fibras, há a diminuição da massa específica aparente seca e aumento da umidade ótima.

2.3.2 *Influência na resistência ao cisalhamento*

O aumento da resistência ao cisalhamento devido a inclusão de fibras é relatado por diversos autores (Gray e Ohashi, 1983; Bueno *et al.*, 1996; Bianchini, 2013; Senez, 2016). Alguns autores relatam o aumento do ângulo de atrito e do intercepto coesivo com o aumento do teor de fibras (Gray e Ohashi, 1983; Bueno *et al.*, 1996). Entretanto, outros autores relatam apenas o aumento do intercepto coesivo (Teodoro, 1999; Casagrande, 2001; Leocádio, 2005; Trindade *et al.*, 2006). Há também os que evidenciam somente o aumento do ângulo de atrito (Teodoro, 1999; Heineck, 2002; Marçal, 2019).

Leocádio (2005) realizou o reforço de solo laterítico com fibras de sisal distribuídas aleatoriamente, analisando os teores de 0,25 a 1% e os comprimentos de 10 a 25 mm. Verificou-se que a adição de fibras gerou um aumento da resistência de pico, sendo este mais significativo para maiores níveis de tensão normal no ensaio de cisalhamento direto. O ângulo de atrito ficou praticamente inalterado, porém, houve aumento significativo do intercepto coesivo.

Bianchini (2013) efetuou um estudo empregando um solo areno-argiloso com a inclusão de fibras de polipropileno com comprimentos de 6, 12 e 24 mm, nas porcentagens de 0,25%; 0,5% e 0,75%. Nesse estudo observou-se que a adição de fibras ao solo aumentou os parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico e a resistência pós-pico. O intercepto coesivo e o ângulo de atrito tiveram um aumento progressivo com o comprimento da fibra adicionada à mistura. A combinação ótima alcançada foi com o teor de 0,50% e o comprimento de 12 mm, visto que gerou o maior incremento de resistência.

Júnior *et al.* (2018) analisou a resistência ao cisalhamento de um solo argiloso reforçado com resíduos fibrosos oriundos da casca de coco nas porcentagens de 0, 0,5, 1 e 2%. Com relação aos parâmetros de resistência, concluiu que a inclusão de fibras tem mais influência no aumento do intercepto coesivo. Além disso, a inclusão aumentou a resistência de pico e reduziu a queda da resistência pós pico.

Lopes (2019) estudou o comportamento mecânico de amostras de solo arenoso e argiloso reforçado com fibras de açaí, nos teores 0,5% e 1% com relação ao peso seco do solo. Os resultados indicaram uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas do solo, gerando uma maior resistência de pico, diminuição da queda de resistência pós pico e maior resistência ao cisalhamento comparada ao solo puro. O solo argiloso teve maior ganho de resistência ao cisalhamento. O solo arenoso teve maior ganho no intercepto coesivo. Os resultados foram promissores tanto para o solo arenoso, quanto para o argiloso.

Marçal (2019) avaliou os parâmetros de resistência do solo (arenoso e argiloso) reforçado com fibras de polipropileno reciclado, em teores gravimétricos de 0,25, 0,50, 0,75, 1, 1,50 e 2%, com comprimento de 30 mm. Para o solo arenoso, a adição de fibras proporcionou o aumento do intercepto coesivo (em 126,49%) e do ângulo de atrito (em 14,01%). O acréscimo de resistência do intercepto coesivo ocorre devido as forças de ligação na interface solo-fibra, visto que em um solo arenoso há a predominância do atrito, em função do tamanho e do entrosamento dos grãos, o que faz com que as fibras na matriz sejam impedidas de deslizar, suportando os esforços à tração. Outra explicação provável está relacionada ao fato de que o ângulo de atrito é regido pelas propriedades do compósito. Para os solos argilosos a adição de fibras reduziu o intercepto coesivo (em 17,90%) e aumentou o ângulo de atrito (em 35,95%). A redução do intercepto coesivo pode ser atribuída ao fato de que o polipropileno em grandes quantidades prejudica as forças de atração na superfície das partículas de argila. A explicação para o aumento do ângulo de atrito é a mesma do solo arenoso.

Rocha (2019) investigou o comportamento de resistência de um solo argiloso com inclusão de fibras de polipropileno. Foi observado que a inclusão de fibras pequenas de polipropileno proporciona aumentos significativos no intercepto coesivo, porém, o ângulo de atrito aumentou moderadamente quando comparado ao do solo natural.

Gusmão e Jucá (2020) analisaram o efeito da inclusão de fibras de coco verde na resistência ao cisalhamento de um solo argiloso. O uso de fibras propiciou ganhos da ordem de 25% para a coesão e para o ângulo de atrito, com relação ao solo puro. Comportamentos semelhantes analisando diferentes solos e fibras foram observados por outros autores (Tang *et al.*, 2007; Nguyen *et al.*, 2013).

2.3.3 Influência na permeabilidade

Por meio do estudo realizado por Bueno *et al.* (1996), foi possível constatar que há um aumento da permeabilidade de solos argilosos devido a adição de fibras em diferentes teores; entretanto, em solos granulares houve uma redução de uma ordem de grandeza da permeabilidade. Pinto e Machado (2022) relatam que a adição de fibras poliméricas a uma areia aluvionar, não gerou alterações significativas na permeabilidade.

Solos argilosos possuem baixa permeabilidade, a presença das fibras aumenta essa permeabilidade devido a criação de um caminho preferencial por onde o fluido possa percolar com maior facilidade (pelas fibras), o inverso ocorre para os solos granulares, eles são

naturalmente permeáveis, a inclusão de fibras diminuiu essa permeabilidade por criar “barreiras” para o fluxo de fluidos.

De acordo com Maher e Ho (1994), as propriedades das argilas cauliniticas são significativamente afetadas pela adição de fibras. Os autores notaram que a adição de fibras aumentou a permeabilidade da argila, sendo que o aumento foi mais significativo para teores de fibra maiores.

Isaias (2022) analisou a permeabilidade de um solo argiloso com adição de fibras de polipropileno e concluiu que, houve aumento da permeabilidade com o aumento do teor de fibras; porém, o acréscimo de forma geral não foi tão significativo a ponto de modificar a ordem de magnitude do valor da permeabilidade.

Júnior (2020) observou em seu estudo que a condutividade hidráulica do material compósito aumenta proporcionalmente a porcentagem de fibras; entretanto, aumentos expressivos só foram observados para um teor de fibras superior a 1%. O mesmo comportamento foi observado por Maher e Ho (1994), Miller e Rifai (2004), Rangel (2018) e Júnior *et al.* (2019), é importante destacar que todos os autores trabalharam com solos argilosos.

2.3.4 Influência na deformabilidade do compósito

Maher e Ho (1994) observaram em seu estudo que quando se trata de argilas, a adição de fibras promove o aumento do módulo de deformação, que ocorre proporcionalmente ao aumento do teor de fibras. Entretanto, Casagrande (2001), que trabalhou com um solo areno siltoso, observou a diminuição do módulo de deformação com a inclusão de fibras.

Consoli *et al.* (2007) estudaram o comportamento da areia reforçada com fibras de polipropileno submetida a grandes tensões cisalhantes. Foi observado que a fibra gera um aumento significativo na resistência ao cisalhamento do solo, o aumento é função do comprimento da fibra, quanto mais longa a fibra, maior a resistência ao cisalhamento. Com a realização dos ensaios de cisalhamento foi possível observar que algumas fibras tinham sido alongadas e outras estavam quebradas, tendo sido observado uma tendência mais significativa de quebra para as fibras de comprimentos maiores. Quanto maior o deslocamento no ensaio de cisalhamento, maior a quantidade de fibras quebradas, o que reforça o fato de que as fibras sofreram grandes deformações plásticas antes de quebrar. Além disso, a resistência ao cisalhamento aumentou com o teor de fibras, o que pode ter ocorrido devido ao número crescente de contatos fibra-solo.

Li e Senetakis (2017) estudaram o comportamento dinâmico da areia reforçada com fibras de polipropileno utilizando percentuais de fibra na faixa de 0% a 2%. O objetivo do estudo é analisar o comportamento dinâmico da areia reforçada, focando no módulo de cisalhamento em deformações muito pequenas. Os testes dinâmicos indicaram que o G_{max} (módulo de cisalhamento para pequenas deformações) da areia reforçada reduziu com o aumento do teor de fibras, o que pode ter ocorrido devido a contribuição negativa das fibras na transferência de forças normais de contato, por meio do contato grão a grão, o que pode ter influenciado na redução da rigidez das amostras. Os resultados indicam que o reforço de fibras é mais eficiente para deformações maiores, para deformações menores a inclusão de fibras afeta negativamente a rigidez do solo.

Bueno *et al.* (1996) observaram que em solos argilosos a inclusão de fibras promove um aumento da compressibilidade. Dhar e Hussain (2018) relataram que, há diversos benefícios técnicos com a associação das fibras ao solo. Além da contribuição para o aumento da resistência e rigidez, há o aumento do módulo de elasticidade, tenacidade e ductilidade do solo.

2.4 Fibras de polipropileno em obras geotécnicas: aplicações e estudos

O uso de solos reforçados com fibras é uma técnica de melhoramento muito conhecida, devido a sua viabilidade. Na geotecnia essa técnica pode ser aplicada no reaterro de estruturas de contenção, para incremento da capacidade de carga de fundações, na construção de aterros sobre solos moles, na melhoria da erosão superficial, na prevenção de piping, no reforço de camadas para aplicação em estradas, em bases de fundações superficiais, estabilidade de taludes, dentre outros (Ziegler *et al.*, 1998; Casagrande, 2001; Trindade *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2007).

Hu *et al.* (2021) analisaram o desempenho de um solo reforçado com fibras de polipropileno para aplicação em pistas de pouso. Os resultados de seus estudos indicaram que a fibra de polipropileno de 12 mm na porcentagem de 0,3%, seria ideal para essa aplicação, visto que apresenta ótimo desempenho e custo econômico. O pavimento composto pelo solo reforçado atende aos requisitos de capacidade de carga para pistas de pouso, porém, suas características estão sujeitas a falha com o tempo.

Para compreender como o solo reforçado com fibras pode ser aplicado na prática, Yang *et al.* (2011) realizaram ensaios de compressão triaxial com o objetivo de estudar o efeito e o mecanismo de resistência do solo (argila arenosa) reforçado com fibras de polipropileno, em diferentes comprimentos (6, 12 e 19 mm) e teores (0,1, 0,2, 0,3 e 0,4%). Por meio dos

ensaios, foi observado que houve aumento da estabilidade do solo com relação ao solo puro. Além disso, houve melhoria da resistência com o aumento do teor de fibras, seguido por uma diminuição, ou seja, acredita-se que o teor ótimo (0,3%) foi obtido e para teores maiores a resistência caiu. Foi observado que a fibra de polipropileno tem mais efeito na coesão do que no ângulo de atrito, ao aumentar o teor de fibras a coesão aumenta e depois diminui, há um pico e depois um decréscimo. Com relação ao comprimento da fibra foi observado que os comportamentos são diferentes, mesmo que se trate do mesmo material. Acredita-se que a principal razão seja o entrelaçamento da fibra com as partículas do solo, os autores recomendam que o comprimento da fibra seja selecionado previamente em uma situação prática.

Silveira *et al.* (2021) investigou o comportamento de resistência ao cisalhamento-dilatação de dois solos lateríticos finos, reforçados com fibras curtas de polipropileno, nos teores gravimétricos de 0,1 e 0,25%, distribuídas aleatoriamente, com o objetivo de compreender o comportamento de solos lateríticos compactados com inserção de fibras. Os resultados indicaram um aumento na resistência ao cisalhamento do compósito em ambos os solos, observado pelo aumento do ângulo de atrito, tendo sido mais substancial para o teor de 0,25%. Foi possível observar na orientação das fibras na interface cisalhada. A presença de fibras limitou de forma considerável a tendência à contração. De forma geral, os resultados indicaram que a relação tensão-dilatância é afetada pela adição de fibras ao solo.

Gong *et al.* (2019) estudaram a estabilidade do talude de solo reforçado com fibras de polipropileno, submetidos a ciclos de congelamento e descongelamento. O teor e o comprimento ideal das fibras foram determinados por meio de ensaios de cisalhamento direto e pelos ciclos de congelamento e descongelamento. A análise da estabilidade do talude foi calculada com base no método dos elementos finitos. Os resultados dos ensaios de laboratório indicaram que a inserção de fibras aumenta a coesão e o ângulo de atrito sob ação de ciclos de congelamento e descongelamento. A combinação ideal foi alcançada utilizando o teor de fibras de 0,3% e o comprimento de 9 mm. A estabilidade do talude reforçado com fibras foi melhor que a do talude sem fibras.

Meddah *et al.* (2023) avaliaram o uso potencial de fibras de polipropileno para melhorar as propriedades de um solo problemático típico da Argélia. Para isso, utilizaram amostras brutas de argila reforçada com fibras e realizaram ensaios mecânicos utilizando teores variados a fim de se obter a melhor combinação. Os resultados indicaram que houve melhoria significativa nas características mecânicas e de compressibilidade da argila reforçada, a ductilidade da argila aumentou com o teor de fibras, enquanto o índice de compressão, o índice de recompressão, o coeficiente de compressibilidade e a fragilidade diminuíram. Os melhores

resultados foram encontrados para a adição de 1,2% de fibras de polipropileno com relação a massa seca de solo.

O solo marinho dragado é um material improvável de ser utilizado na geotecnia por ser um solo fraco e com baixa capacidade de suporte. Com o intuito de melhorar suas características, Rosman e Chan (2020) realizaram o reforço do solo com fibras de polipropileno e analisaram os efeitos da fibra na compressibilidade e consolidação do solo. Os estudos mostraram que a quantidade ideal de fibra é de 0,5%, pois resultou em um menor recalque e uma maior rigidez. Quanto a consolidação, os valores de c_v estão entre 0,05–0,5 e 0,5–10 m^2/ano , o que classifica o solo na faixa de argila de alta plasticidade e silte de plasticidade baixa-média. Ainda que os resultados indiquem a melhoria das características do solo com a adição de fibras, esse efeito não é suficientemente substancial. Para resultados mais relevantes os autores sugeriram adicionar teores superiores a 1% de fibras e misturar o solo com um agente ligante, como o cimento.

Plé e Lê (2012) observaram que em geral, para realizar o fechamento de aterros é necessário construir uma barreira com um revestimento de argila sedimentada compactada para garantir a segurança do local. Porém, essa barreira possui diversos problemas, principalmente relacionados ao recalque diferencial que leva ao surgimento de fissuras, sendo observados danos por tração e cisalhamento. Por esta razão, os autores propuseram a inserção de fibras de polipropileno como reforço ao solo para melhorar o seu desempenho mecânico. Por meio dos ensaios de resistência foi possível observar uma melhoria na resistência do solo e no índice de fragilidade da argila. Além de que, na compressão o material fica cada vez mais rígido. Ao realizar os testes de resistência à tração, foram observadas melhorias na ductilidade, que podem reduzir potenciais fissuras. De forma geral, a adição de fibras mostrou-se uma melhoria tecnicamente viável.

Apesar de ser um tema bastante abordado em estudos, a aplicação prática de fibras de polipropileno no reforço de solos ainda não é um tópico muito discutido na literatura. Existem diversos estudos contendo ensaios científicos, porém na escala de campo estes ainda são escassos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta informações sobre os materiais utilizados nessa pesquisa e as metodologias utilizadas para a realização dos experimentos laboratoriais.

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa é oriundo de uma jazida utilizada como material da cobertura final do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC), na unidade em operação (aterro novo), localizado em Caucaia, na região metropolitana de Fortaleza, Ceará. O material foi cedido pela gerência do aterro.

Figura 1 - Novo aterro sanitário (ASMOC), localizado ao lado do antigo ASMOC.



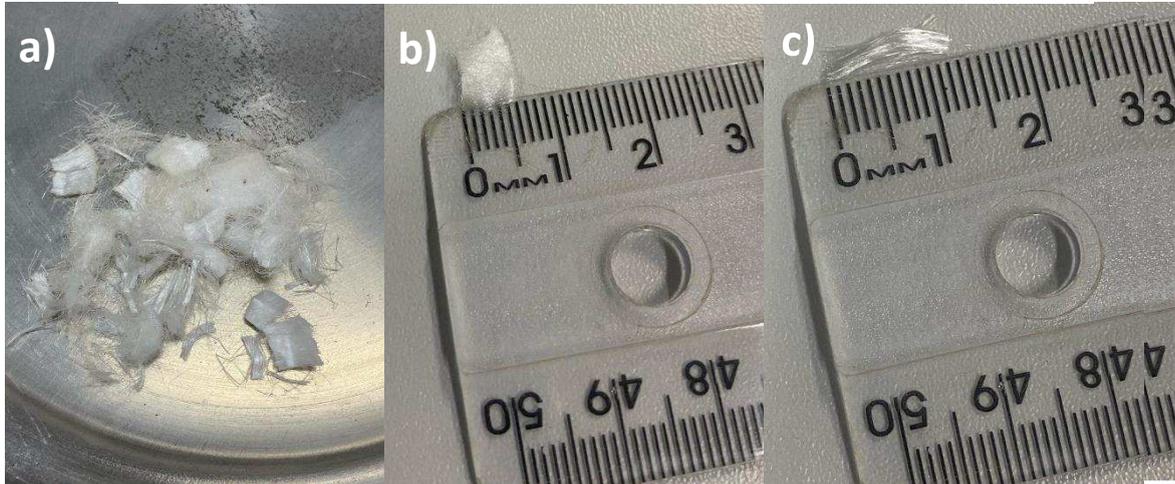
Fonte: Google Maps.

3.1.2 Fibras de polipropileno

Para a realização da pesquisa foram utilizadas as fibras de polipropileno comercializadas pela empresa Maccaferri Brasil, também conhecidas como FibroMac. As fibras

selecionadas para estudo possuem comprimentos de 6 e 12 mm, como indicado na Figura 2. As propriedades da fibra de polipropileno estão indicadas na Tabela 1.

Figura 2 - a) Fibras de polipropileno; b) fibra de 6 mm; c) fibra de 12 mm;



Fonte: Autora.

Tabela 1 - Propriedades das fibras de polipropileno utilizadas.

Propriedades Físicas	Comprimento (mm)
	6 e 12
Diâmetro (μm)	18
Alongamento (%)	80
Massa específica (g/cm^3)	0,91
Resistência à tração (MPa)	300
Módulo de Young (MPa)	3000
Temperatura de Fusão ($^{\circ}\text{C}$)	160
Temperatura de Ignição ($^{\circ}\text{C}$)	365

Fonte: Maccaferri.

3.1.3 Água

Para a realização dos ensaios, utilizou-se a água fornecida para consumo na cidade de Fortaleza/ Ceará pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE).

3.2 Métodos de Pesquisa

O método de pesquisa empregado para o desenvolvimento deste trabalho foi experimental, com a realização de ensaios de laboratório. Os tópicos a seguir descrevem a execução dos ensaios de caracterização geotécnica (granulometria, LL, LP, densidade real,

permeabilidade), compactação, resistência ao cisalhamento, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Na Tabela 2, apresenta-se os ensaios de laboratórios efetuados, como também as normas utilizadas para execução. Todos os ensaios foram executados com o apoio da equipe técnica dos laboratórios.

Tabela 2 - Laboratórios onde os ensaios experimentais foram realizados.

Ensaio	Normas	Laboratório	Departamento
Densidade Real dos Grãos	ME 093 (1994)	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP)	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA)
Granulometria	NBR 7181 (2016)	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP)	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA)
Limites de Atterberg (LL e LP)	NBR 7180 (2016) e NBR 6459 (2016)	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP)	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA)
Compactação	NBR 7182 (2016)	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP)	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA)
Permeabilidade	NBR 14545 (2021)	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP)	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA)
Cisalhamento Direto	ASTM D3080-04 (2012)	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP)	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA)
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	-	Laboratório de Microscopia Eletrônica	Departamento de Geologia
Difração de Raios X (DRX)	-	Laboratório de Raios X	Departamento de Física

Fonte: Autora.

3.2.1 Preparação das Amostras

As amostras de solo coletas in situ foram do tipo deformadas, sendo secas ao ar, limpas (removendo galhos e pedaços de plástico), destorroadas, peneiradas e armazenadas em sacos plásticos. O procedimento seguiu o descrito pela NBR 6457 (ABNT, 2024).

Figura 3 - Destorroamento do solo.



Fonte: Autora.

Para os ensaios envolvendo a mistura solo+fibra, foi necessário realizar a homogeneização do solo, a qual foi executada seguindo as recomendações de Casagrande (2001). Os componentes secos (solo e fibra) foram misturados, em seguida houve a adição de água. A mistura foi realizada manualmente até o ponto em que a homogeneidade foi observada visualmente. Ao longo dos ensaios observou-se que quanto maior o teor de fibras, maior a dificuldade de homogeneização, visto que há a formação de aglomerações de fibras durante o preparo das amostras.

Figura 4 - Homogeneização da mistura solo+fibra.



Fonte: Autora.

3.2.2 Ensaios de Caracterização Geotécnica

Os ensaios de granulometria, densidade real dos grãos e os limites de Atterberg foram realizados utilizando amostras do solo puro. Para os ensaios de permeabilidade, compactação e resistência ao cisalhamento, foram utilizadas amostras de solo puro e misturas de solo com fibra em diferentes porcentagens (0,25%, 0,50%, 0,75%, 1% e 1,25%). A escolha do teor de fibra foi realizada considerando o estudo realizado por Casagrande (2005) e Castro (2020).

a) Análise Granulométrica

A análise granulométrica englobou as etapas de peneiramento fino, peneiramento grosso e de sedimentação. Os procedimentos foram realizados seguindo o descrito pela NBR 7181 (ABNT, 2016b). Por meio da execução do ensaio, foi possível determinar a curva granulométrica e a porcentagem dos materiais que constituem o solo.

b) Densidade real dos grãos

A determinação da densidade real dos grãos foi realizada seguindo o descrito pelo ME 093 (DNER, 1994), com o uso do picnômetro.

c) Limites de Atterberg

Os limites de atterberg ou limites de consistência, referem-se ao limite de plasticidade e limite de liquidez, a realização dos ensaios seguiu os procedimentos descritos pelas NBR 7180 (ABNT, 2016c) e NBR 6459 (ABNT, 2016d).

d) Ensaio de Compactação

Para a realização dos ensaios de compactação, as amostras foram preparadas seguindo a NBR 6457 (ABNT, 2024). A execução do ensaio de compactação seguiu a NBR 7182 (ABNT, 2016a), o procedimento foi realizado com o reuso de material e compactado no cilindro grande, utilizando-se a energia Proctor normal, que prevê o uso de um soquete grande de 4,5 kg, 5 camadas, altura de queda de 45 cm e a aplicação de 12 golpes por camada.

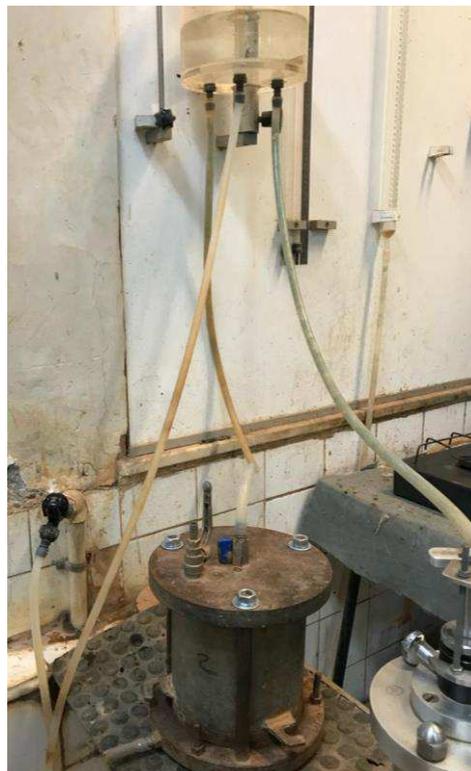
Foram efetuados ensaios de compactação para o solo puro e para a mistura solo-fibra (nos teores de 0,25%, 0,50% e 1,25%), com o intuito de determinar a curva de compactação, o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima das amostras.

e) Permeabilidade

Por se tratar de um solo com frações predominantes de argila, silte e areia fina, e por se tratar de amostras com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-3} cm/s, optou-se por seguir o método B da NBR 14545 (ABNT, 2021d), que descreve o método de determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Para a realização do ensaio utilizou-se um permeômetro de parede rígida, em amostras compactadas, sem a aplicação de pressão. A compactação foi realizada utilizando a energia Proctor normal no teor de umidade ótimo, obtido por meio do ensaio de compactação. A saturação foi efetuada em fluxo ascendente.

Foram realizadas análises para o solo puro, 0,25%, 0,50%, 0,75%, 1 e 1,25% de fibras com relação a massa de solo. As amostras foram ensaiadas em triplicatas, onde o fluido percolante foi a água da torneira. A Figura 5, apresenta uma visão do permeômetro na fase de saturação da amostra.

Figura 5- Amostra de solo em fase de saturação em cilindro de parede rígida.



Fonte: Autora.

f) Cisalhamento Direto

Com o intuito de obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo executou-se o ensaio de cisalhamento direto, que fornece os valores do ângulo de atrito (ϕ) e do intercepto coesivo (c). Não há uma norma brasileira que regulamente esse ensaio, optou-se por executar o ensaio seguindo o procedimento descrito pela D3080-04 (ASTM, 2012). Na figura 6, tem-se o equipamento utilizado para a execução do ensaio de cisalhamento direto.

Figura 6 - Equipamento utilizado para a execução dos ensaios de cisalhamento direto.



Fonte: Autora.

Para a realização do ensaio, utilizou-se o material passante na peneira com abertura de malha de 2 mm (n° 10). Para a obtenção de resultados mais precisos, optou-se pela compactação do material no cilindro pequeno utilizando a energia Proctor normal na umidade ótima e densidade específica seca máxima, seguido pela talhagem das amostras nas dimensões do molde específico para o ensaio, com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura. As amostras foram ensaiadas para três cargas, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, com velocidade de cisalhamento de 0,3063 mm/min.

Os ensaios foram realizados em amostras de solo puro e em misturas de solo-fibra nas porcentagens de 0,25%, 0,75% e 1,25% com relação a massa de solo. Na Figura 7, tem-se a amostra no molde utilizado para o ensaio de cisalhamento direto.

Figura 7 - Amostra de solo com fibras no molde cisalhamento direto.



Fonte: Autora.

3.2.3 *Ensaio Mineralógicos*

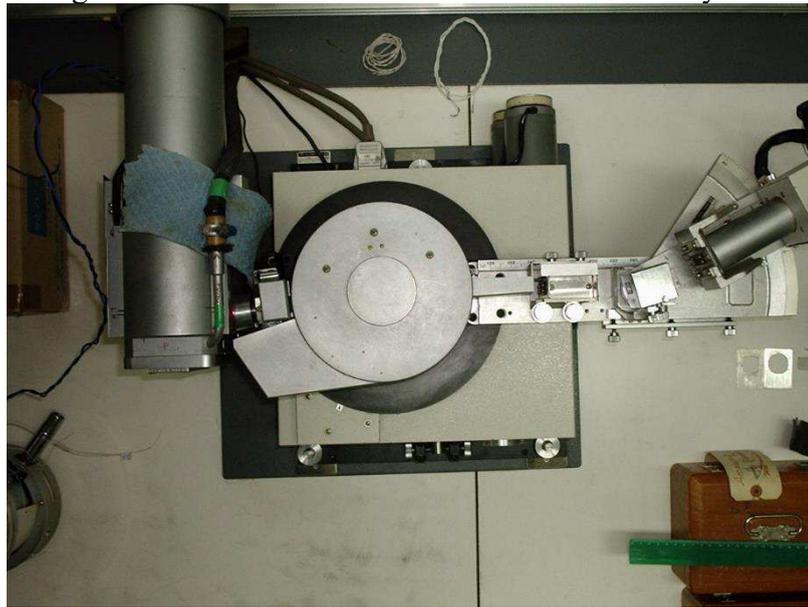
Com o intuito de obter mais informações sobre o solo estudado e o material compósito, realizaram-se os ensaios de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura (MEV), os quais são descritos a seguir.

a) Difração de raios X (DRX)

A difratometria de raios x é uma das técnicas fundamentais para a caracterização microestrutural de materiais cristalinos. Essa técnica se baseia em um padrão de difração da radiação que é particular em cada estrutura cristalina, o que permite identificar e quantificar as substâncias químicas sólidas cristalinas, o padrão de difração é como uma impressão digital da amostra.

A amostra submetida a análise foi previamente peneirada na peneira 2,0 mm e posta na estufa a 105°C para secagem completa. O ensaio foi realizado no Laboratório de Raios X, do Departamento de Física, o equipamento utilizado para a análise foi o difratômetro para amostras policristalinas modelo X'Pert Pro – Panalytical.

Figura 8 - Difratorômetro modelo X'Pert Pro – Panalytical.



Fonte: Laboratório de Raios X.

b) Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura possibilitou a observação da estrutura do solo e a visualização da distribuição e adesão das fibras ao solo, além do arranjo dos vazios no interior da amostra ensaiada.

As amostras ensaiadas passaram por uma preparação prévia, em que o material utilizado foi o passante pela peneira de abertura 2,00 mm, seguida pela compactação do material na umidade ótima, com a energia Proctor normal, em moldes de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura. As amostras foram secas a temperatura ambiente por 48 horas.

As análises foram feitas para as amostras com solo puro e as misturas de solo-fibra nas porcentagens de 0,25%, 0,50%, 0,75%, 1% e 1,25%. O equipamento utilizado foi Microscópio Eletrônico de Varredura com detector EDS, modelo TM3000, da marca Hitachi. O ensaio foi realizado no laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Departamento de Geologia.

Figura 9 - Microscópio Eletrônico de Varredura.



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura.

Na Figura 10, tem-se as amostras secando a temperatura ambiente, na primeira fileira temos as amostras de 0,25%, 0,50%, 0,75%, 1% e 1,25% moldadas com a fibra de 12 mm, na segunda fileira as amostras com as mesmas porcentagens, moldadas com a fibra de 6 mm e na terceira fileira, a amostra moldada com solo puro.

Figura 10 - Amostras secando à temperatura ambiente.



Fonte: Autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais realizados ao longo da pesquisa, tal como as análises e discussões destes resultados

4.1 Ensaios de caracterização geotécnica

4.1.1 *Limites de Atterberg*

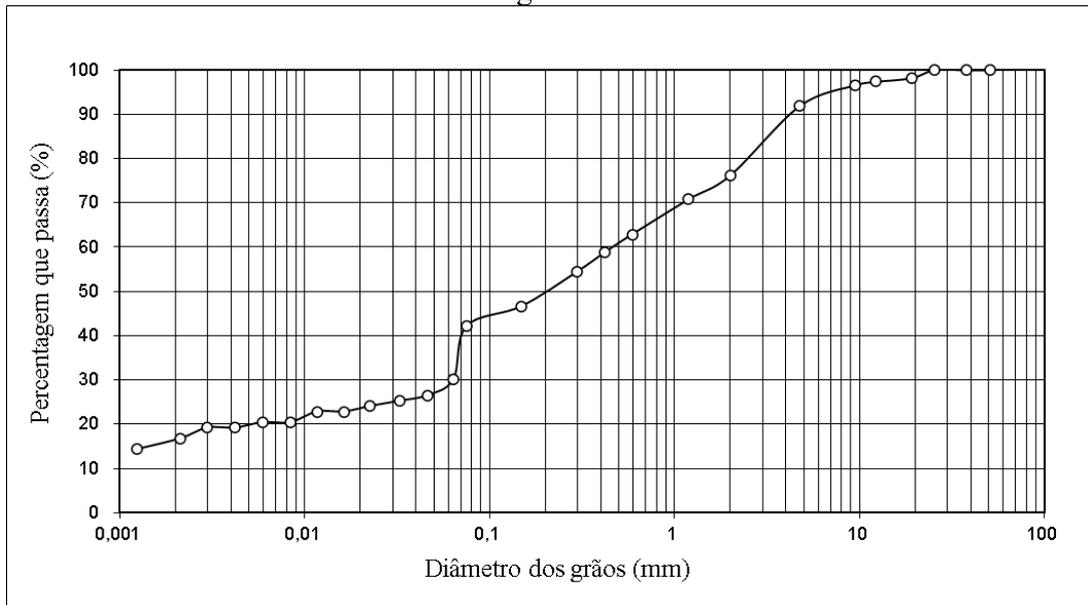
Os ensaios dos limites de consistência indicaram que o material se trata de um solo com limite de liquidez (LL) de 37%, limite de plasticidade (LP) de 18% e índice de plasticidade (IP) de 19%. Consultando a tabela de plasticidade proposta por Atterberg, o solo pode ser classificado como altamente plástico, por possuir um $IP > 15\%$.

4.1.2 *Análise granulométrica*

A curva granulométrica (Gráfico 1), foi obtida por meio do peneiramento e da sedimentação do solo. O solo é composto por 8,1% de pedregulho (grãos acima de 4,8 mm), 13,3% de areia grossa (grãos entre 2 e 0,60 mm), 8,44% de areia média (grãos entre 0,60 e 0,20 mm), 24,33% de areia fina (grãos entre 0,20 e 0,06 mm), 13,37% de silte (grãos entre 0,06 e 0,002 mm) e 16,73% de argila (grãos abaixo de 0,002 mm), conforme a NBR 6502 (ABNT, 2022).

A classificação do solo foi feita pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e pelo Sistema Rodoviário de Classificação, também conhecido como Highway Research Board (HRB). Por meio do SUCS o solo foi classificado como uma areia argilosa (SC), pelo HRB foi classificado como solo argiloso (A-6).

Gráfico 1 - Curva granulométrica do solo.



Fonte: Autora

4.1.3 Densidade real dos grãos

O ensaio para a determinação da densidade real dos grãos realizado por meio do método do picnômetro, indicou que o valor da densidade real (G_s) é de 2,68.

4.1.4 Compactação

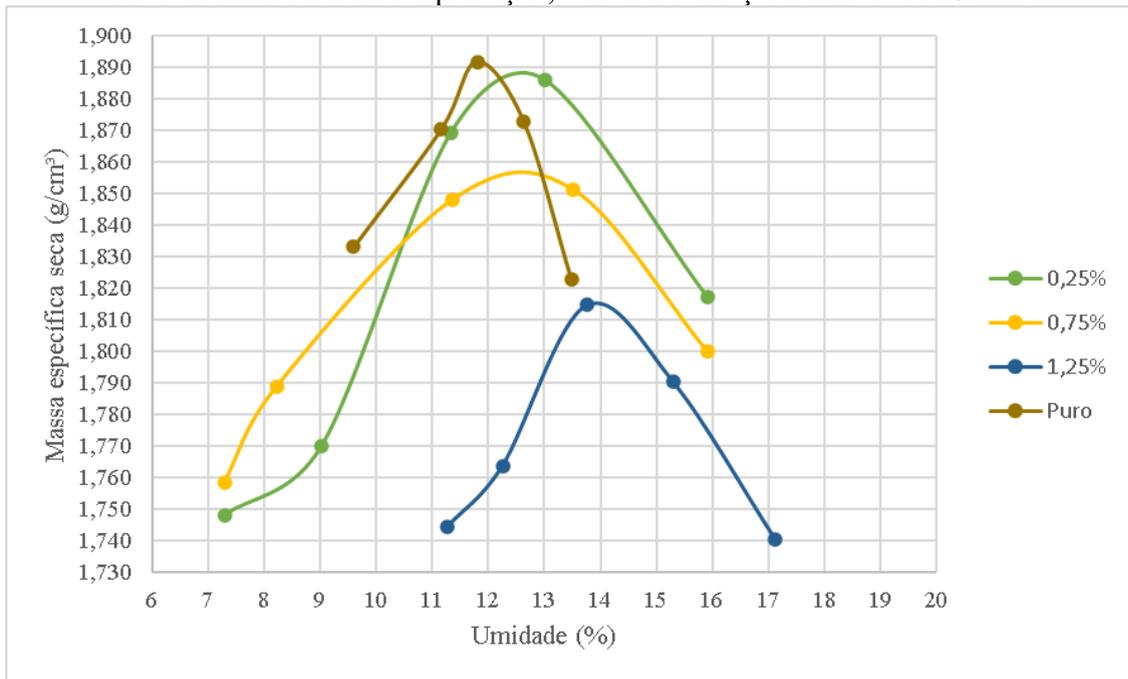
As curvas de compactação obtidas para o solo natural e para as misturas solo-fibra estão indicadas nos gráficos 3 (6 mm) e 4 (12 mm). Os valores das umidades ótimas e das massas específicas secas máximas estão indicados na Tabela 4.

Tabela 3 - Parâmetros obtidos pelas curvas de compactação.

Porcentagem de fibras (%)	6 mm		12 mm	
	Umidade ótima (%)	Massa esp. Seca máx (g/cm^3)	Umidade ótima (%)	Massa esp. Seca máx (g/cm^3)
Puro	11,830	1,892	11,830	1,892
0,25	12,500	1,890	11,250	1,859
0,75	12,600	1,858	11,000	1,828
1,25	13,900	1,818	15,000	1,809

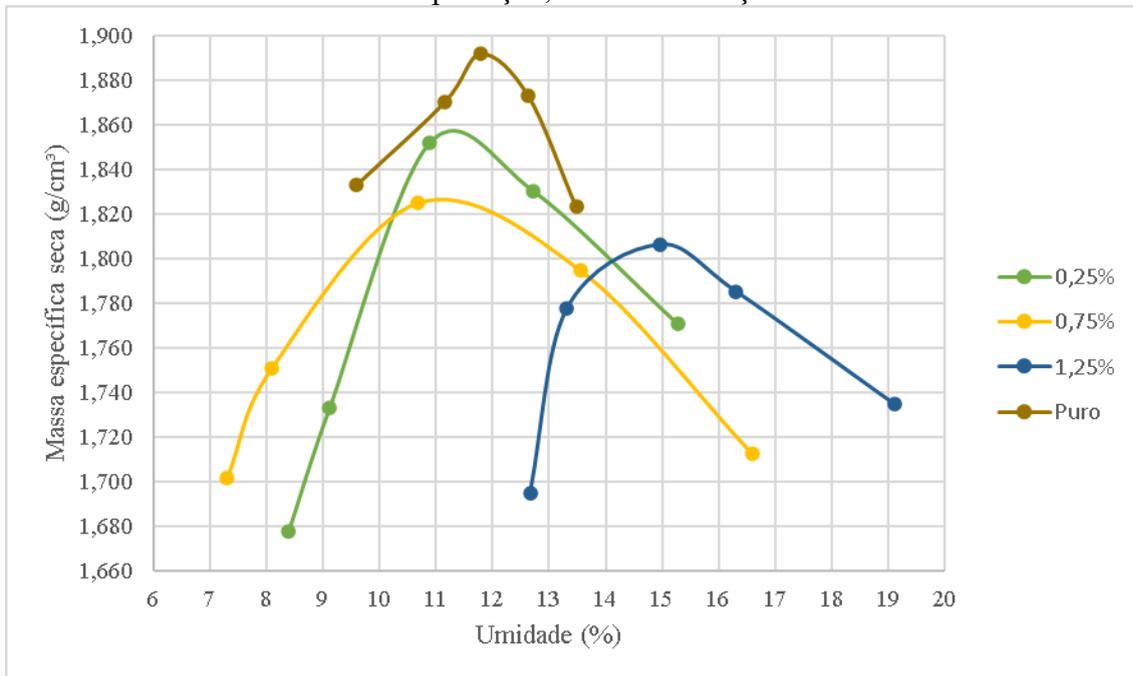
Fonte: Autora.

Gráfico 2 - Curva de compactação, solos com adição de fibras de 6 mm.



Fonte: Autora.

Gráfico 3 - Curva de compactação, solos com adição de fibras de 12 mm.



Fonte: Autora.

A análise da tabela 4 e dos gráficos 3 e 4, nos leva a observar que os valores encontrados para as fibras de 6 mm seguem o comportamento descrito por alguns autores, em que a adição de fibras leva a um aumento da umidade ótima e a diminuição da massa específica

e esse efeito ocorre progressivamente com o aumento do teor de fibras (Trindade *et al.*, 2004; Castro, 2020). Para a fibra de 12mm observou-se uma diminuição na massa específica aparente seca com o aumento do teor de fibras, comportamento similar ao encontrado para a fibra de 6mm. Ainda com relação a fibra de 12mm, foi verificada uma diminuição umidade ótima em relação ao solo puro com os compósitos apresentando 0,25% e 0,75% de fibras. Posteriormente foi observado um decréscimo na umidade ótima com o aumento do teor de fibras, o aumento da umidade foi somente para o teor de 1,25%.

Além disso, é possível observar que para todos os teores, a fibra de 6 mm resultou em valores da massa específica aparente seca maiores que para a fibra de 12 mm, para os mesmos teores de fibras. O mesmo efeito foi observado com a umidade ótima, exceto para o teor de 1,25%. É necessário considerar a hipótese de que devido a fibra de 12 mm ter o dobro do comprimento da fibra de 6 mm, há a criação de mais vazios preenchidos por fibras durante a compactação.

4.1.5 Permeabilidade

Ao realizar os ensaios para a obtenção do coeficiente de permeabilidade do solo e da mistura solo+fibras, foi possível identificar o que já havia sido encontrado na literatura (Bueno *et al.*, 1996; Maher e Ho, 1994; Isaias, 2022), que a adição de fibras aumenta o coeficiente de permeabilidade do compósito. Quanto maior o teor de fibras, mais permeável o solo fica. O solo natural tinha permeabilidade de $9,8 \cdot 10^{-8}$ cm/s. Para um teor de fibras de 1,25%, a mistura aumentou a permeabilidade do solo natural para $8,2 \cdot 10^{-6}$ cm/s, para a fibra de 6mm, e de $4,2 \cdot 10^{-6}$ cm/s, para a fibra de 12mm.

Por trabalhar com fibras de diferentes comprimentos, foi possível comparar a permeabilidade do compósito com a adição das fibras de 6 mm e de 12 mm. O aumento da permeabilidade do solo devido a inclusão de fibras pode ter ocorrido em função do surgimento de caminhos preferenciais ao fluxo criados pela fibra, os quais facilitam a passagem de fluidos. Durante a realização dos ensaios foi observado que ao para a fibra com maior comprimento (12 mm), a homogeneização do solo foi realizada com maior dificuldade, devido a formação de aglomerados de fibras (com o aumento da porcentagem de fibras o efeito ficou ainda mais evidente). Como hipótese, as fibras de 6 mm podem ter criados caminhos preferenciais pela forma homogênea no compósito, ao contrário das fibras de 12 mm, em que regiões do compósito apresentaram uma maior aglomeração de fibras. O que pode ter levado a maior permeabilidade do compósito com fibras de 6 mm.

A permeabilidade no solo pode variar de acordo com diversos fatores, como o tipo de solo, teor de fibras, comprimento de fibras, a forma como foram inseridas ao solo.

Não existem normas brasileiras que definam o coeficiente de permeabilidade da camada de cobertura impermeabilizante do aterro sanitário. Entretanto, Albright, Benson e Waugh (2010) relatam que o sistema de cobertura final deve ter uma permeabilidade inferior a 1.10^{-5} cm/s. Considerando que os valores dos ensaios estão dentro do exigido para solos de forma geral, pode-se considerar que o material compósito poderia ser aplicado utilizado com essa destinação.

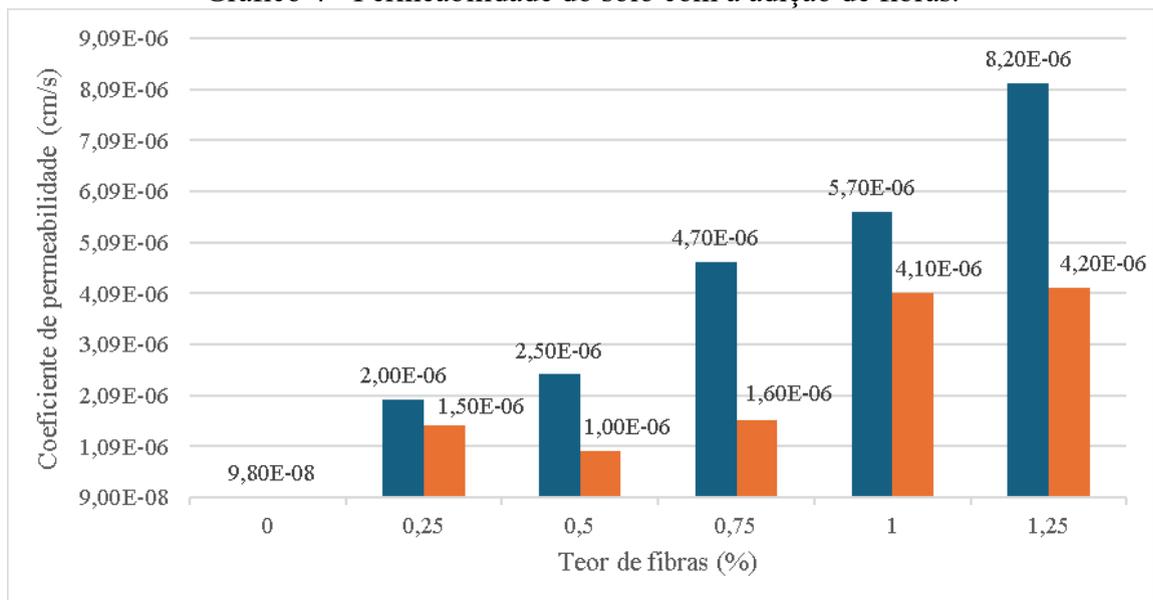
Os coeficientes de permeabilidade (k) encontrados por meio do ensaio estão indicados na Tabela 3 e no Gráfico 2.

Tabela 4 - Coeficiente de permeabilidade em cm/s.

Porcentagem de fibras (%)	Comprimento	
	6 mm	12 mm
0	9,80E-08	9,80E-08
0,25	2,00E-06	1,50E-06
0,5	2,50E-06	1,00E-06
0,75	4,70E-06	1,60E-06
1	5,70E-06	4,10E-06
1,25	8,20E-06	4,20E-06

Fonte: Autora.

Gráfico 4 - Permeabilidade do solo com a adição de fibras.



Fonte: Autora.

Os ensaios indicaram que o compósito com fibras de 6 mm possui o coeficiente de permeabilidade superior ao da fibra de 12 mm. A fibra não é um material impermeável, o que indica que a água pode percolar pela mesma. A fibra de 6 mm constitui um compósito mais homogêneo ao solo devido a sua facilidade de manuseio, ou seja, ao longo de todo o solo haverá fibras mais bem distribuídas criando caminhos preferenciais para a percolação da água, o que leva a sua maior permeabilidade.

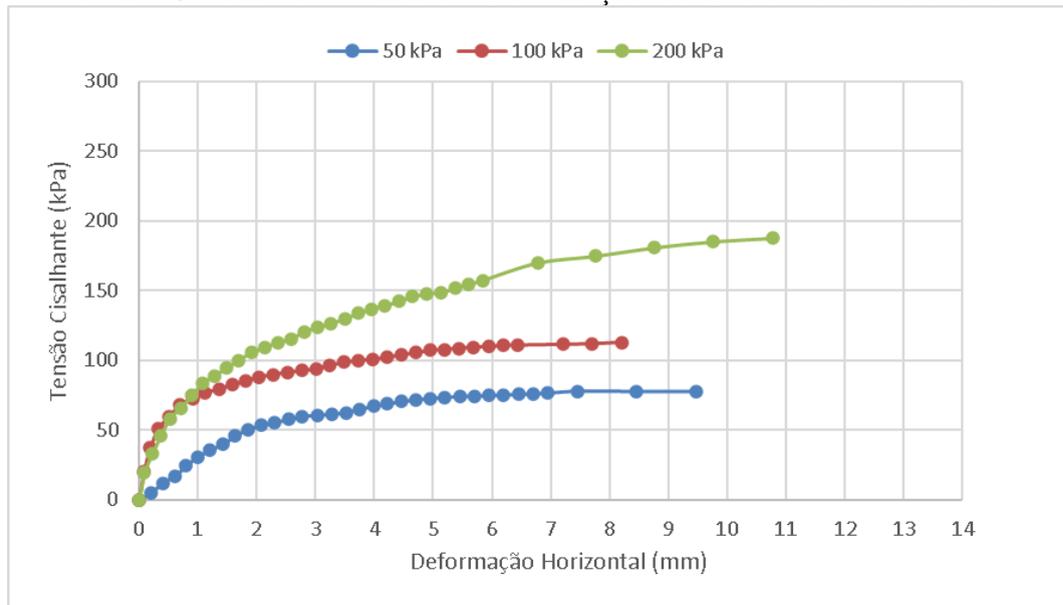
4.1.6 Resistência ao cisalhamento

Por meio do ensaio de resistência ao cisalhamento foram obtidos dois parâmetros, o ângulo de atrito interno (ϕ') e o intercepto coesivo entre as partículas (c'). Foram ensaiadas as amostras de solo natural e de solo com inclusões de fibras (nas porcentagens de 0,25%, 0,75% e 1,25%), nos comprimentos de 6 e 12 mm, com tensões normais (σ') aplicadas foram de 50, 100 e 200 kPa. O critério para definir a ruptura foi o máximo valor da tensão cisalhante.

a) Solo puro

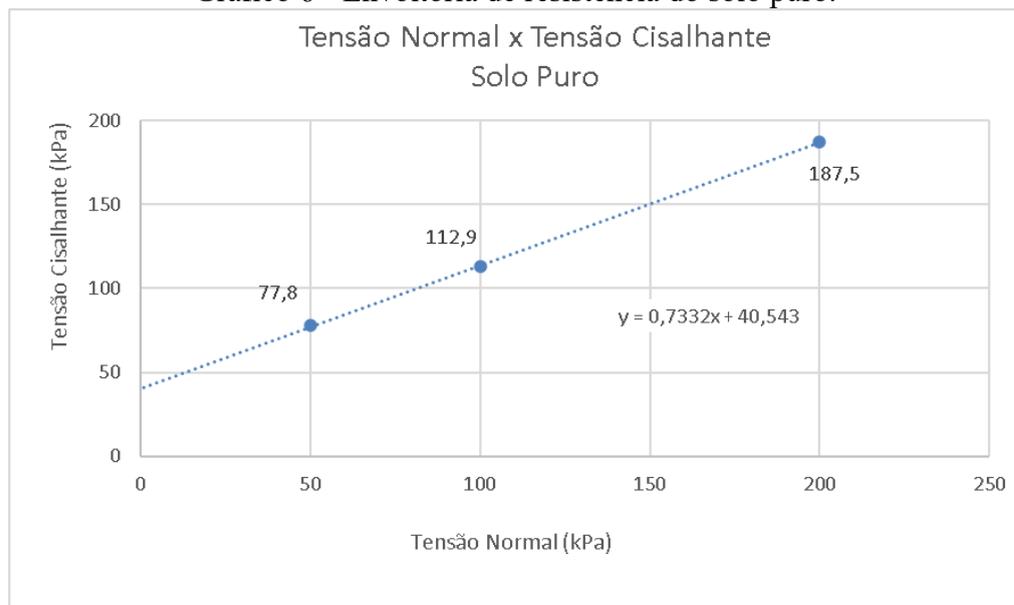
Inicialmente, foram ensaiadas três amostras de solo puro, com carregamento de tensão normal de 50, 100 e 200 kPa. O comportamento das amostras mostrou uma tensão que cresce progressivamente com a deformação horizontal, tendo ocorrido o aumento mais substancial com a aplicação da tensão normal de 200 kPa.

Gráfico 5 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo Natural.



Fonte: Autora.

Gráfico 6 - Envoltória de resistência do solo puro.



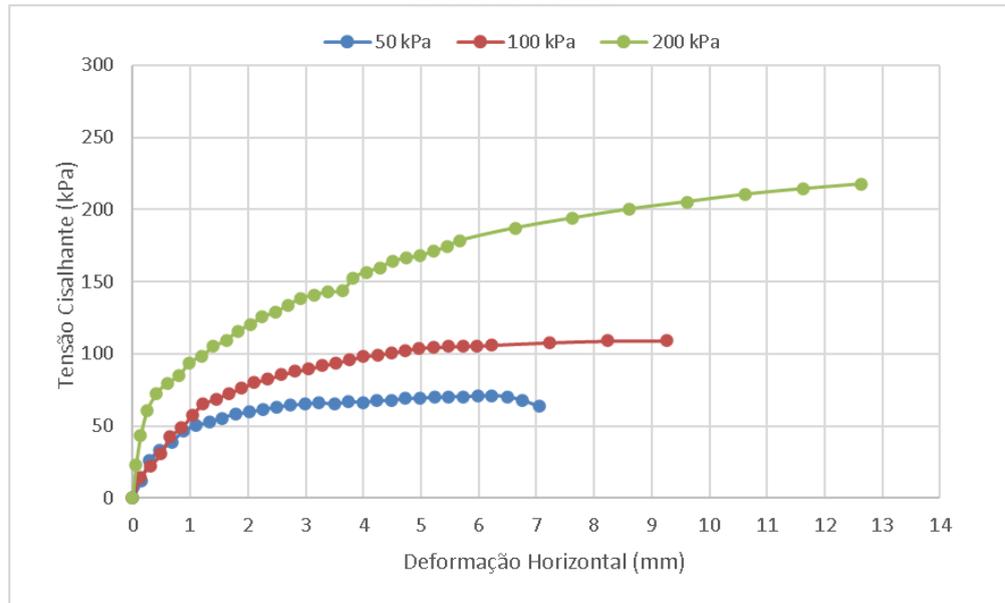
Fonte: Autora.

Por meio da envoltória de resistência obteve-se os valores do intercepto coesivo e do ângulo de atrito, que foram 40,5 kPa e 36,2°, respectivamente.

b) Solo + Fibras de 6 mm

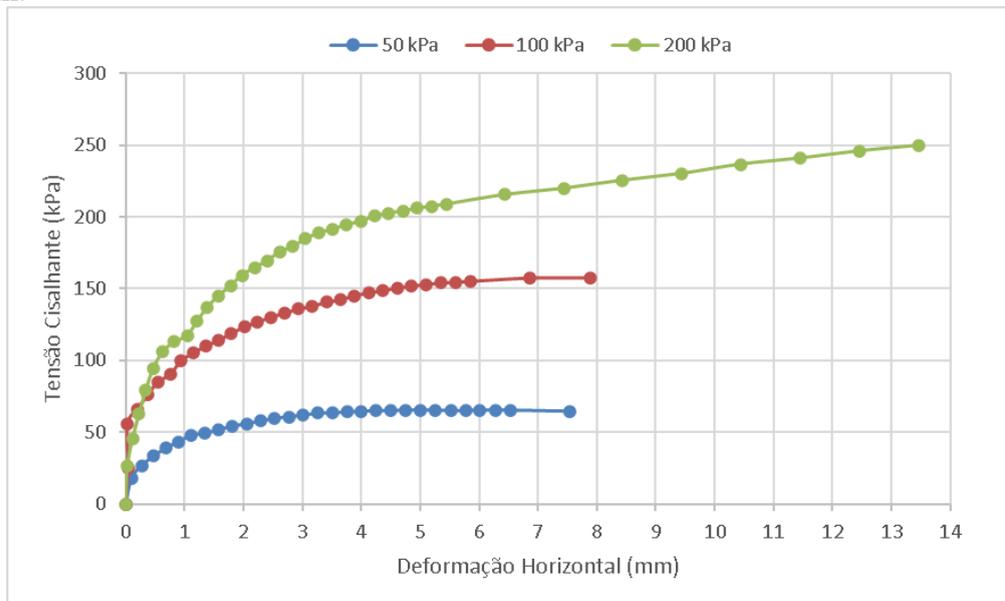
Para todas as porcentagens de fibras (0,25%, 0,75% e 1,25%), foram feitas três amostras, para serem ensaiadas a tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

Gráfico 7 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo com adição de 0,25% de fibras de 6 mm.



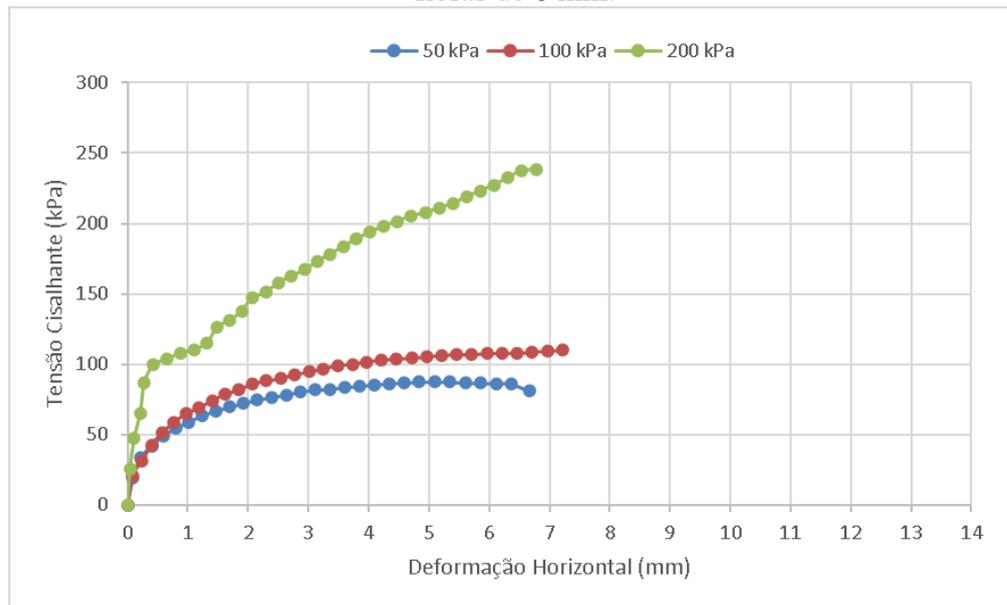
Fonte: Autora.

Gráfico 8 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo com adição de 0,75% de fibras de 6 mm.



Fonte: Autora

Gráfico 9 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo com adição de 1,25% de fibras de 6 mm.



Fonte: Autora

A partir da visualização dos gráficos anteriores, observou-se que, para todos os teores de fibras, houve um aumento considerável nos valores da tensão cisalhante máxima com o aumento da tensão normal aplicada. Ao comparar os valores obtidos, temos que a maior tensão de cisalhamento máxima foi para o teor de fibras de 0,75%, podendo ser considerado o comprimento ideal para a fibra de 6 mm de comprimento, quando se leva em conta a resistência ao cisalhamento.

Assim como no estudo realizado por Zaimoglu e Yetimoglu (2011), que estudaram solos finos com o teor de fibras variando entre 0,25 e 1%, o aumento de resistência mais significativo foi para o teor de 0,75%. Diversos autores relatam a existência de um teor ótimo de fibras a ser adicionado ao solo, o qual varia de acordo com as características do solo, tipo de fibra, teor, comprimento e da forma como a homogeneização foi realizada. Estudos realizados por Silveira (2018), Leocádio (2005), Trindade (2004), Rocha (2020), Yazici e Keskin (2024) indicaram que o ganho de resistência não é necessariamente proporcional ao aumento da quantidade de fibras, em certo ponto atinge-se a resistência máxima e o aumento de fibras faz com que haja a redução da resistência.

Tabela 5 - Tensões cisalhantes máximas e tensões normais - solo puro e do solo com adições

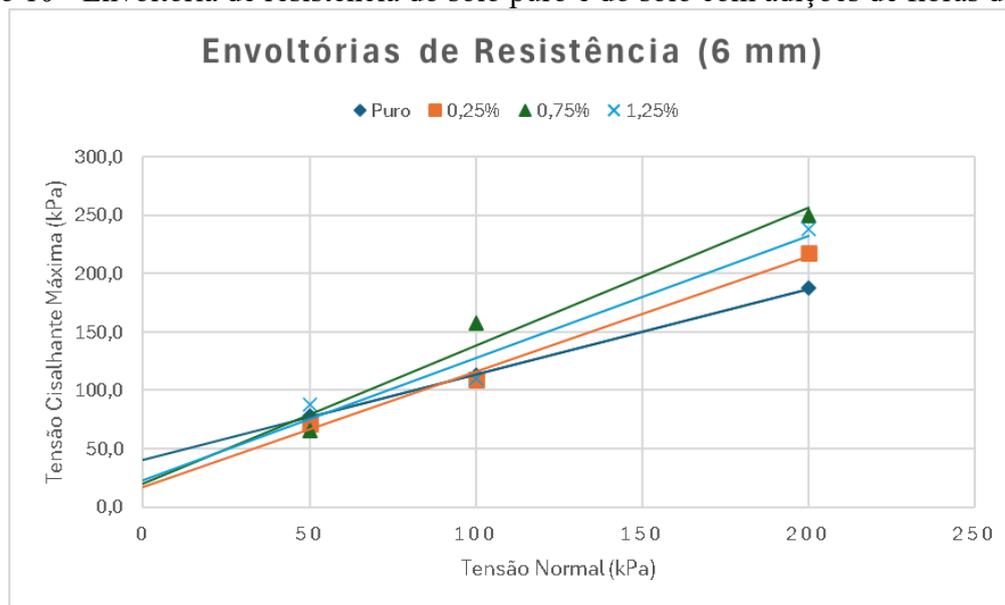
de fibras de 6 mm.

	Puro	0,25%	0,75%	1,25%
Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante Máxima (kPa)			
50	77,8	71,1	65,6	87,5
100	112,9	109,1	157,6	109,9
200	187,5	217,5	249,8	238,4

Fonte: Autora.

Na Tabela 5, é possível observar que exceto para a tensão normal de 50 kPa, o compósito com 0,75% apresentou a maior tensão cisalhante máxima em todos os ensaios. Por meio do Gráfico 10, é possível observar que a mistura de solo+fibras com melhor desempenho para a fibra de 6 mm, foi a com percentual de 0,75%.

Gráfico 10 - Envoltória de resistência do solo puro e do solo com adições de fibras de 6 mm.



Fonte: Autora.

Como indicado na Tabela 6, a adição de fibras de 6 mm ao solo provocou a redução da coesão e o aumento do ângulo de atrito, com o pico de aumento no ângulo de atrito para o teor de 0,75%. A diminuição do intercepto coesivo pode ser atribuída ao fato das fibras de polipropileno prejudicarem as forças de atração na superfície do solo areno-argiloso, visto que o polipropileno é inerte. O aumento do ângulo de atrito pode ser justificado pelo fato de que o ângulo de atrito é conduzido pelas propriedades do compósito (solo+fibra). Em solos arenosos

de forma geral, há a predominância do atrito, que ocorre em função do tamanho e entrosamento dos grãos, com a adição de fibras a matriz os grãos são impedidos de deslizar, levando a uma maior capacidade de suportar esforços de tração, assim como descrito por Marçal (2019). A diminuição do intercepto coesivo e o aumento do ângulo de atrito, também foi observado por Marçal (2019) em seu estudo com solo argiloso.

Tabela 6 - Coesão e ângulo de atrito do solo puro e do solo com adições de fibras de 6 mm.

Porcentagem de fibras	Coesão (c)	Atrito (Φ)	R ²
Puro	40,5	36,2	0,9998
0,25%	16,9	44,8	0,9936
0,75%	19,5	49,8	0,9675
1,25%	23,2	46,3	0,9624

Fonte: Autora.

Marçal *et al.* (2020) realizaram um estudo utilizando um solo argiloso com fibras de polipropileno nos teores de 0,25% a 2% com relação a massa de solo seco e com comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados para o comprimento de 30 mm, os resultados indicaram que, a inclusão de fibras levou ao aumento do ângulo de atrito e o intercepto coesivo ficou praticamente inalterado.

Kar e Pradhan (2011) realizaram um estudo com solo argiloso com adição de fibras de polipropileno de 15 mm, nos teores gravimétricos de 0 a 1%. Por meio do qual, observaram que a resistência ao cisalhamento do solo aumentou até o teor de 0,4%, além deste houve diminuição. Além disso, constataram que o ângulo de atrito e o intercepto coesivo aumentam até o teor ideal, depois diminuem ou permanecem quase o mesmo. Para este estudo, observou-se algo semelhante ao estudado neste trabalho, o ângulo de atrito aumentou até o teor ideal (0,75%) e depois teve uma pequena diminuição. Quanto ao intercepto coesivo o comportamento foi diferente, entretanto, deve-se considerar que se trata de outro tipo de solo, neste trabalho utilizamos um solo areno-argiloso, no qual houve redução significativa da coesão com a inclusão de fibras em relação ao solo natural. Quando se compara somente o solo misturado com fibras, observou-se um aumento da coesão com o aumento da quantidade, mas ainda permaneceu inferior ao do solo puro.

Girija (2013) analisou os efeitos da inserção de fibras de polipropileno de 15 mm nos teores gravimétricos de 0 a 0,7% em um solo argiloso. Por meio de seu estudo experimental, observou que a resistência ao cisalhamento aumenta com a inclusão de fibras até o teor de 0,4%, além disso diminui. O intercepto coesivo e o ângulo de atrito aumentam até a porcentagem ideal (0,4%), para maiores porcentagens seus valores de diminuem relativamente, permanecendo

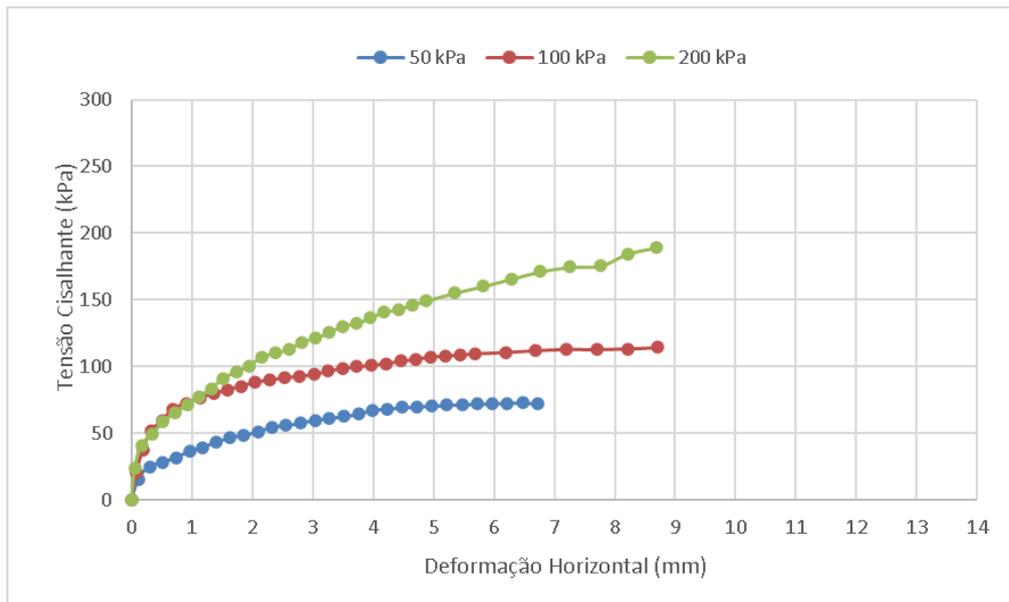
quase constante.

Yazici e Keskin (2024) estudaram um solo argiloso com baixa plasticidade com inclusão de fibras de polipropileno variando os teores gravimétricos (0.05%, 0.10%, 0.15% e 0.20%) e os comprimentos (6, 12 e 19 mm) das fibras. A análise da influência dos comprimentos das fibras nos parâmetros de cisalhamento indicou que, em amostras reforçadas com fibras de 6 mm a coesão diminui para todos os teores de fibras em comparação a do solo não reforçado. O ângulo de atrito interno mostrou uma tendência a aumentar de valor à medida que o comprimento das fibras aumentou.

c) Solo + Fibras de 12 mm

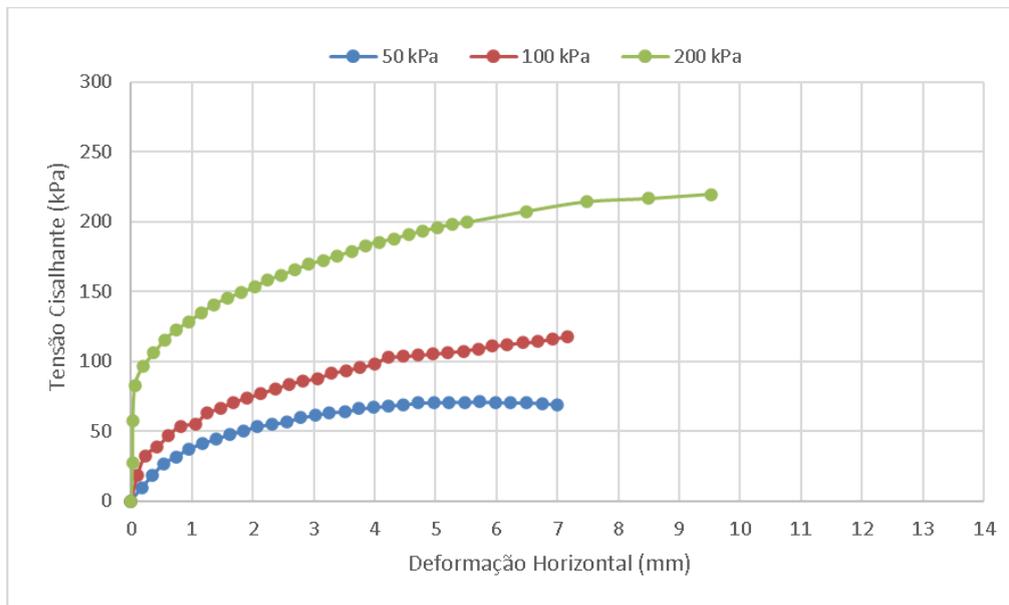
Para todas as porcentagens de fibras (0,25%, 0,75% e 1,25%), foram feitas três amostras, para serem ensaiadas a tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

Gráfico 11 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo com adição de 0,25% de fibras de 12 mm.



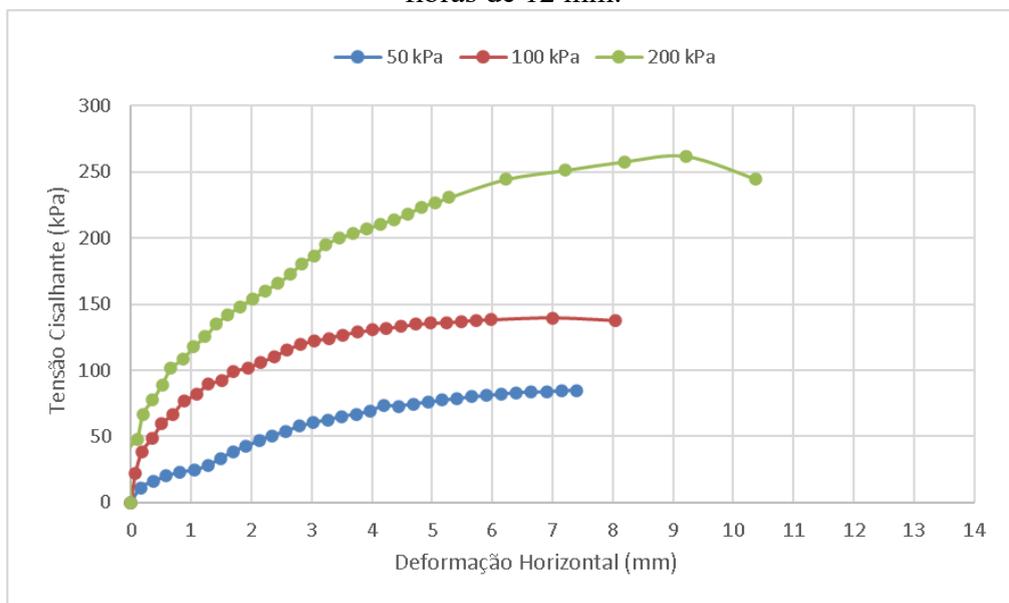
Fonte: Autora.

Gráfico 12 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo com adição de 0,75% de fibras de 12 mm.



Fonte: Autora.

Gráfico 13 - Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal do Solo com adição de 1,25% de fibras de 12 mm.



Fonte: Autora.

Ao analisar a Tabela 7, é possível observar que todos os teores mostraram um aumento na tensão cisalhante com a progressão da carga da tensão normal. O teor com melhor desempenho foi o de 1,25%, tendo a maior tensão cisalhante máxima em todas as aplicações de tensão normal.

Taleb e Unsever (2022) obtiveram um resultado semelhante para um solo argiloso

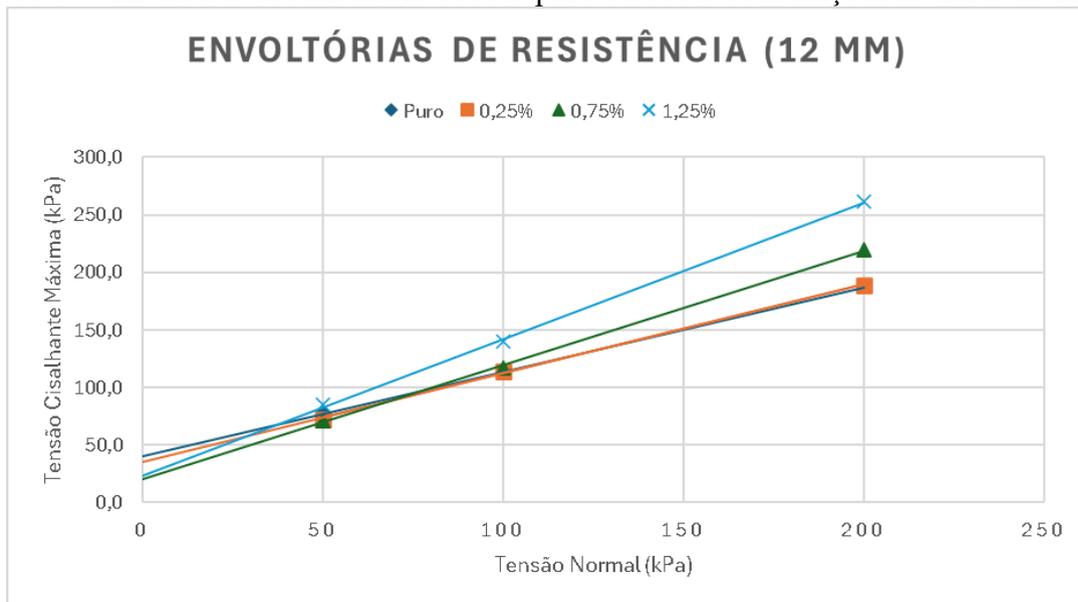
com fibras de polipropileno de 12 mm nos teores gravimétricos de 0%, 0,5%, 1% e 1,5%. A tensão cisalhante máxima para a mistura com maior teor de fibras (1,5%) se sobressaiu para todas as tensões normais quando comparado aos outros teores estudados pelos autores.

Tabela 7 - Tensões cisalhantes máximas e tensões normais - solo puro e do solo com adições de fibras de 12 mm.

	Puro	0,25%	0,75%	1,25%
Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante Máxima (kPa)			
50	77,8	72,7	71,1	84,9
100	112,9	114,3	117,3	139,7
200	187,5	189,3	219,5	261,9

Fonte: Autora

Gráfico 14 - Envoltória de resistência do solo puro e do solo com adições de fibras de 12 mm.



Fonte: Autora.

Como indicado na Tabela 8, a adição de fibras ao solo provocou a redução da coesão e o aumento do ângulo de atrito. O aumento do ângulo de atrito ocorreu de forma progressiva com o aumento da porcentagem de fibras adicionadas ao solo, já a coesão diminuiu até a porcentagem de 0,75%, tendo um pequeno aumento de seu valor para a porcentagem de 1,25%.

Tabela 8 - Coesão e ângulo de atrito do solo puro e do solo com adições de fibras de 12 mm.

Porcentagem de fibras	Coesão (c)	Atrito (ϕ)	R ²
Puro	40,5	36,2	0,9998
0,25%	35,2	37,7	0,9993
0,75%	20	44,8	0,9994
1,25%	23,8	49,9	0,9993

Fonte: Autora

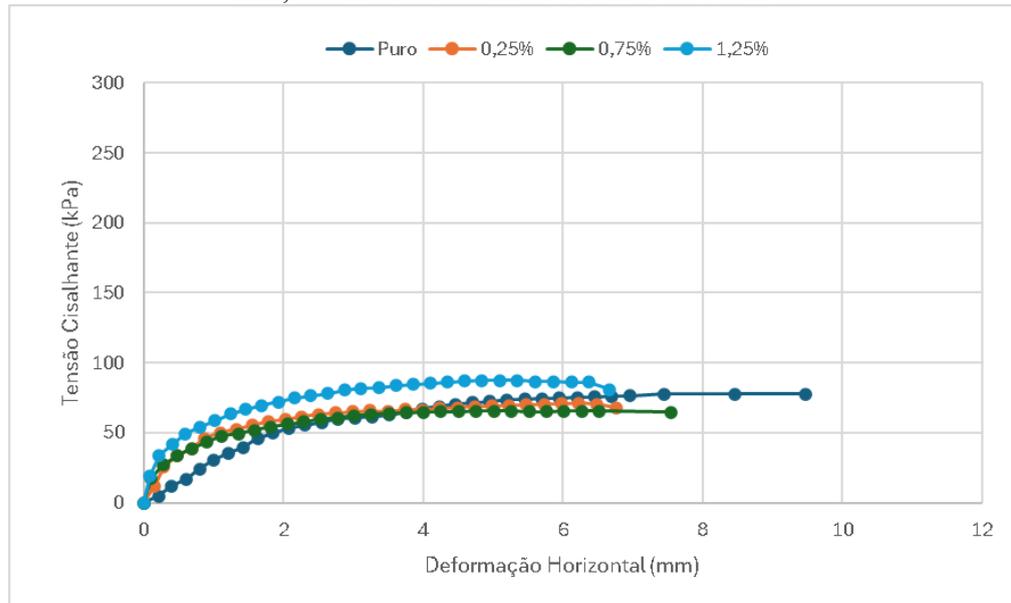
Esse comportamento também foi observado em dados experimentais obtidos por Heineck (2002) e Marçal (2019). Heineck (2002), que trabalhou com areia reforçada com fibras de polipropileno de 24 mm de comprimento, em teores gravimétricos de 0 e 0,5%, que caracterizou o ganho de resistência pelo acréscimo de fibras ao compósito, tendo esta contribuído apenas para o aumento do ângulo de atrito interno. Marçal (2019) relata o aumento do ângulo de atrito e a redução do intercepto coesivo em um solo argiloso com inclusão de fibras de 30 mm, nos teores gravimétricos de 0 e 1,50%. Marçal (2019) considerou que a redução do intercepto coesivo teria ocorrido devido as fibras prejudicarem as forças de atração da superfície do solo argiloso e que o aumento do ângulo de atrito ocorreu devido ao parâmetro que antes só era determinado pelas características do solo, agora ser orientado pelas propriedades do compósito solo + fibra.

Silveira *et al.* (2021) observaram que, para um solo areno-argiloso com inclusão de fibras de 18 mm nos teores de 0,1% e 0,25% com relação a massa seca do solo, a adição de fibras gerou o aumento do ângulo de atrito, que está associada com a mobilização das partículas do solo com as fibras de polipropileno e com o tamanho das partículas e dos grãos do solo.

d) Comparativo entre as fibras de 6 mm e 12 mm

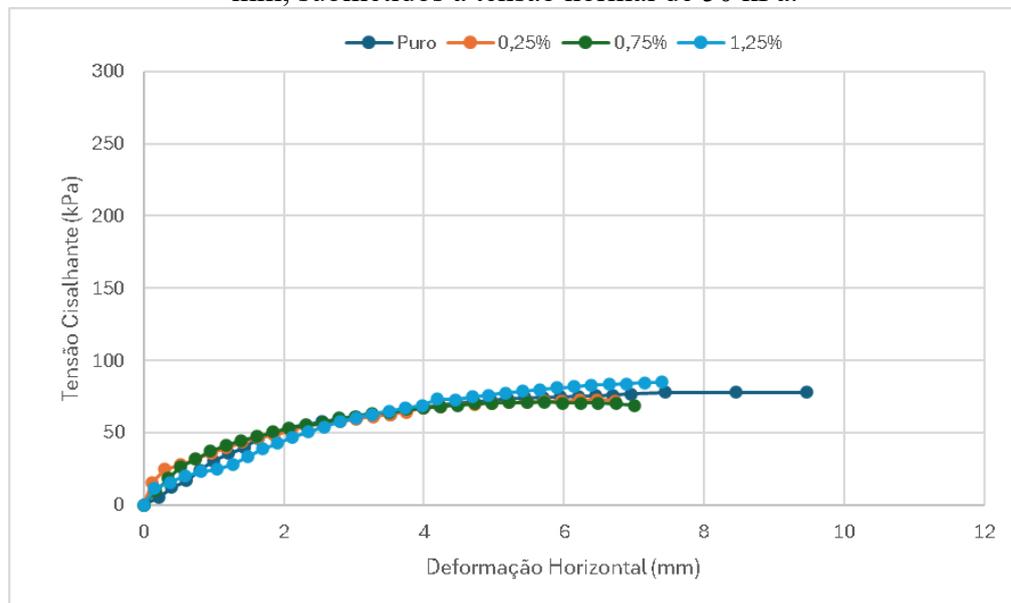
Os Gráficos 15 e 16 mostram a variação da tensão cisalhante pela deformação horizontal, para as amostras de solo com fibras de 6 e 12 mm, nas porcentagens de 0, 0,25, 0,75 e 1,25% submetidas a tensão normal de 50 kPa. Por meio da análise do gráfico, é possível observar que a única mistura que apresentou uma resistência de pico superior à do solo natural, para essa tensão normal, foi a mistura de solo + 1,25% de fibras, independente dos comprimentos das fibras testados (6 e 12 mm). A menor tensão de cisalhamento foi a da mistura de solo+0,75%, para ambos os comprimentos.

Gráfico 15 - Comparativo entre as curvas de solo puro e de solo com adições de fibras de 6 mm, submetidos a tensão normal de 50 kPa.



Fonte: Autora.

Gráfico 16 - Comparativo entre as curvas de solo puro e de solo com adições de fibras de 12 mm, submetidos a tensão normal de 50 kPa.

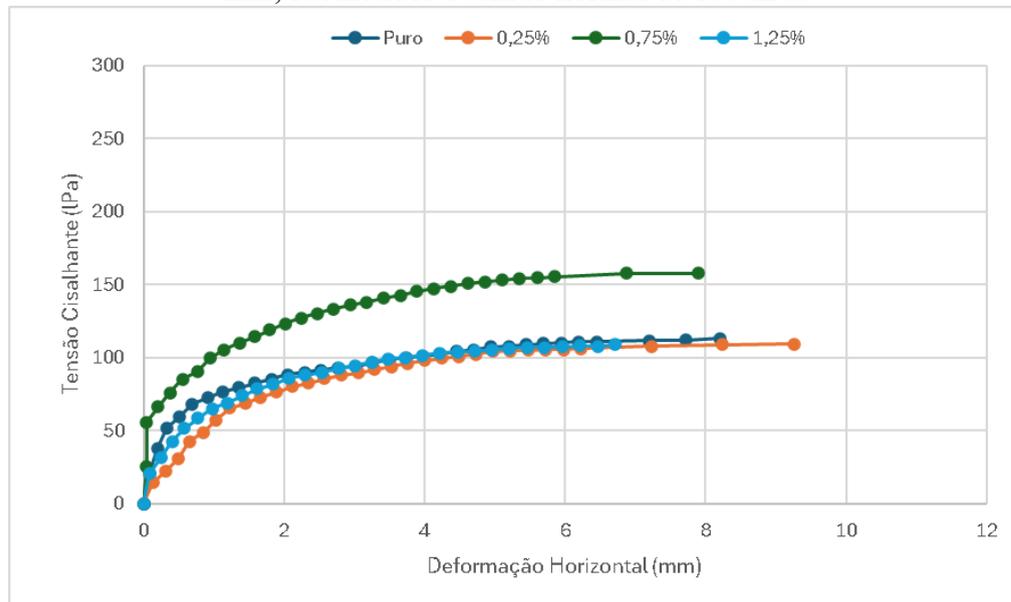


Fonte: Autora.

Os Gráficos 17 e 18 mostram a variação da tensão cisalhante pela deformação horizontal, para as amostras de solo com fibras de 6 e 12 mm, nas porcentagens de 0, 0,25, 0,75 e 1,25% submetidas a tensão normal de 100 kPa. Para a fibra de 6 mm a mistura que desempenhou o melhor resultado foi a de solo+ 0,75%. As outras misturas tiveram comportamentos semelhantes ao do solo puro.

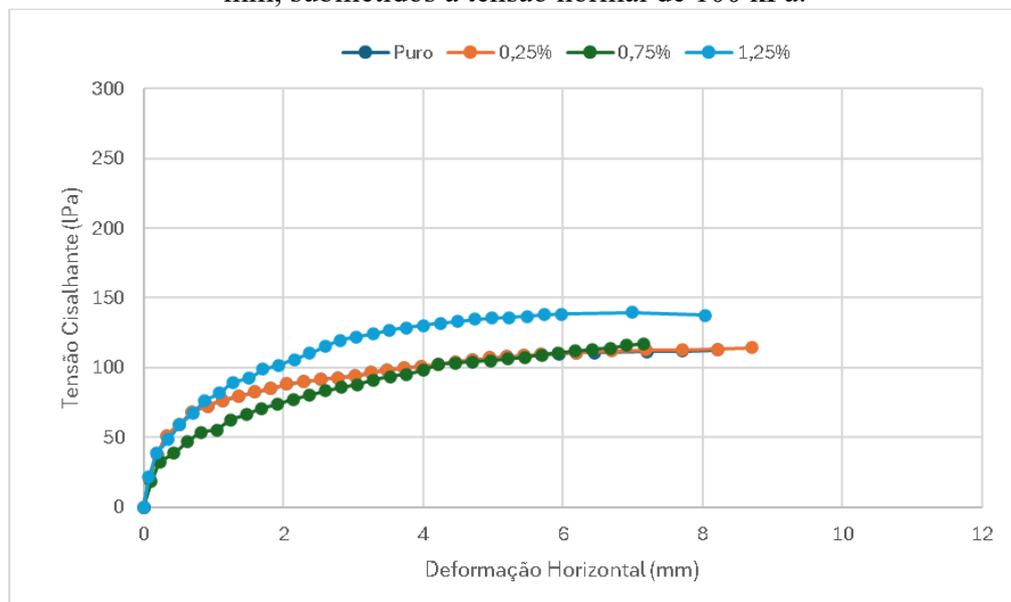
Para a fibra de 12 mm o melhor desempenho foi da mistura de 1,25%+solo. As outras misturas tiveram comportamentos semelhantes ao do solo puro.

Gráfico 17 - Comparativo entre as curvas de solo puro e de solo com adições de fibras de 6 mm, submetidos a tensão normal de 100 kPa.



Fonte: Autora.

Gráfico 18 - Comparativo entre as curvas de solo puro e de solo com adições de fibras de 12 mm, submetidos a tensão normal de 100 kPa.



Fonte: Autora.

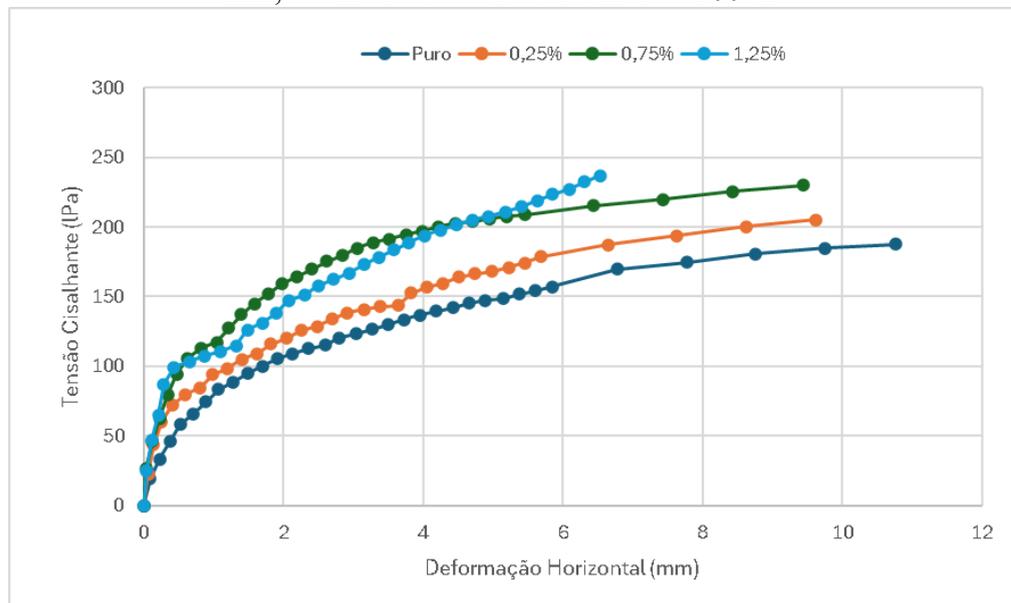
Os Gráficos 19 e 20 mostram a variação da tensão cisalhante pela deformação horizontal, para as amostras de solo com fibras de 6 e 12 mm, nas porcentagens de 0, 0,25, 0,75

e 1,25% submetidas a tensão normal de 200 kPa.

Para a fibra de 6 mm (Gráfico 19) o maior acréscimo de resistência foi para a mistura com 1,25% de fibras, nesse caso, o aumento da resistência ocorreu de forma progressiva com o aumento da inserção de fibras ao solo.

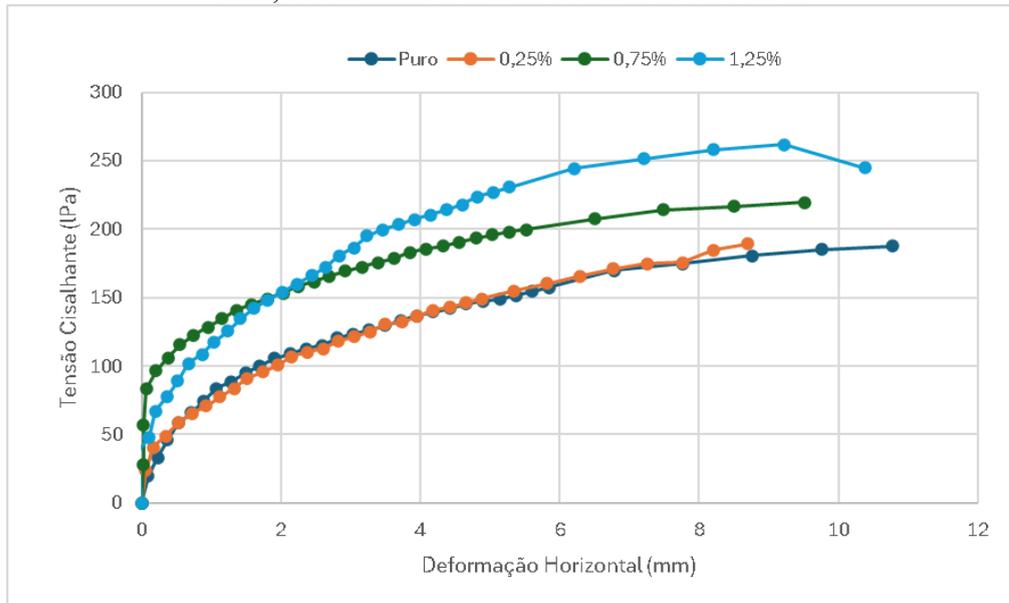
Para a fibra de 12 mm (Gráfico 20) o maior acréscimo de resistência foi para a mistura com 1,25% de fibras, entretanto, o ganho de resistência para a fibra de 0,25% foi muito sutil, tendo sido aproximadamente os mesmos valores do solo puro, o ganho de resistência foi mais significativo para as misturas de 0,75% e 1,25%, sendo esta última a maior.

Gráfico 19 - Comparativo entre as curvas de solo puro e de solo com adições de fibras de 6 mm, submetidos a tensão normal de 200 kPa.



Fonte: Autora.

Gráfico 20 - Comparativo entre as curvas de solo puro e de solo com adições de fibras de 12 mm, submetidos a tensão normal de 200 kPa.



Fonte: Autora

Com relação aos parâmetros de resistência, observa-se que, para a fibra de 6 mm de comprimento o intercepto coesivo diminuiu significativamente e o aumento do ângulo de atrito foi significativo com relação ao solo puro. Para a fibra de 12 mm a redução do intercepto coesivo ocorreu de forma sutil, tendo sido menor para o teor de 0,75%. Quanto ao intercepto coesivo, houve aumento progressivo com a inclusão de fibras.

Yazici e Keskin (2024) relataram em seu estudo que o comprimento e o teor de fibras afetam diretamente a interação entre as fibras e o solo. Para teores inferiores ao ideal, a área de contato entre as fibras e a partícula do solo é relativamente pequena, o que faz com que o aumento de resistência seja pequeno. Caso a quantidade de fibras ultrapasse o teor ideal, as fibras não conseguem se distribuir de forma uniforme, formando agrupamentos de fibras e aumentando o contato fibra-fibra. Para o teor ideal há a distribuição uniforme de fibras e o contato fibra-solo ocorre adequadamente, gerando o aumento de resistência mais significativo. Quanto ao comprimento das fibras, para fibras curtas a área de contato entre as fibras e a partícula do solo é pequena, o que faz com que as fibras sejam facilmente arrancadas quando o compósito é submetido a uma carga. Ademais, fibras muito pequenas não conseguem se entrelaçar e formar uma estrutura tridimensional de rede entre a fibra e o solo dado o seu comprimento, em razão disso, o acréscimo de resistência proporcionado pelas fibras curtas é pequeno. Além disso, os ensaios indicaram que há aumento da contribuição da fibra com relação a resistência quando há aumento da tensão confinante.

Tabela 9 - Coesão e o ângulo de atrito das amostras ensaiadas.

Porcentagem de fibras	Coesão (c)	Atrito (Φ)
Puro	40,5	36,2
6 mm		
0,25%	16,9	44,8
0,75%	19,5	49,8
1,25%	23,2	46,3
12 mm		
0,25%	35,2	37,7
0,75%	20	44,8
1,25%	23,8	49,9

Fonte: Autora.

Como indicado na Tabela 10, houve variação no crescimento das tensões de cisalhamento de pico, sendo que os melhores valores foram os das misturas de 0,75% para a fibra de 6 mm e 1,25% para a fibra de 12 mm.

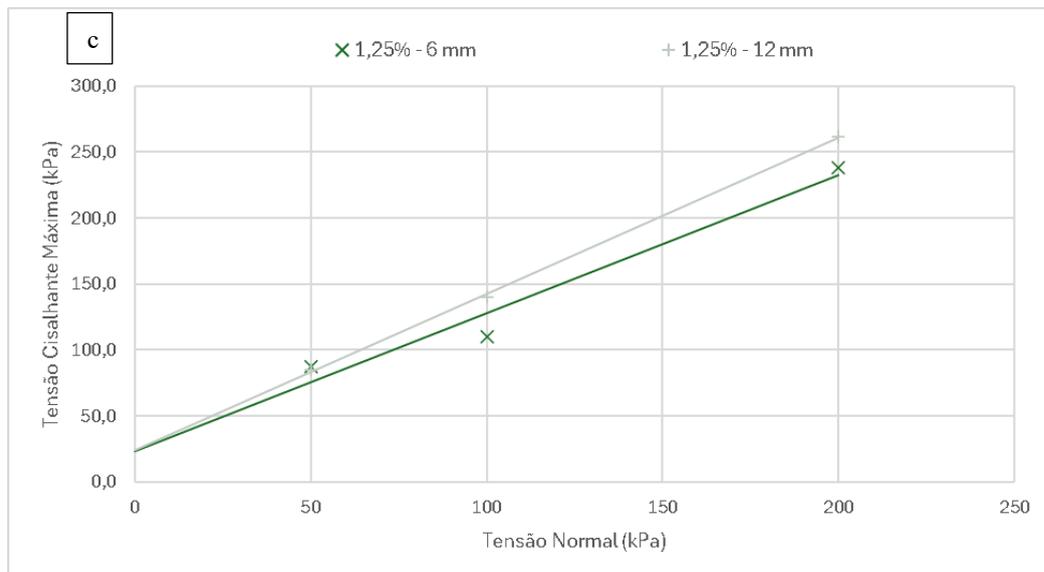
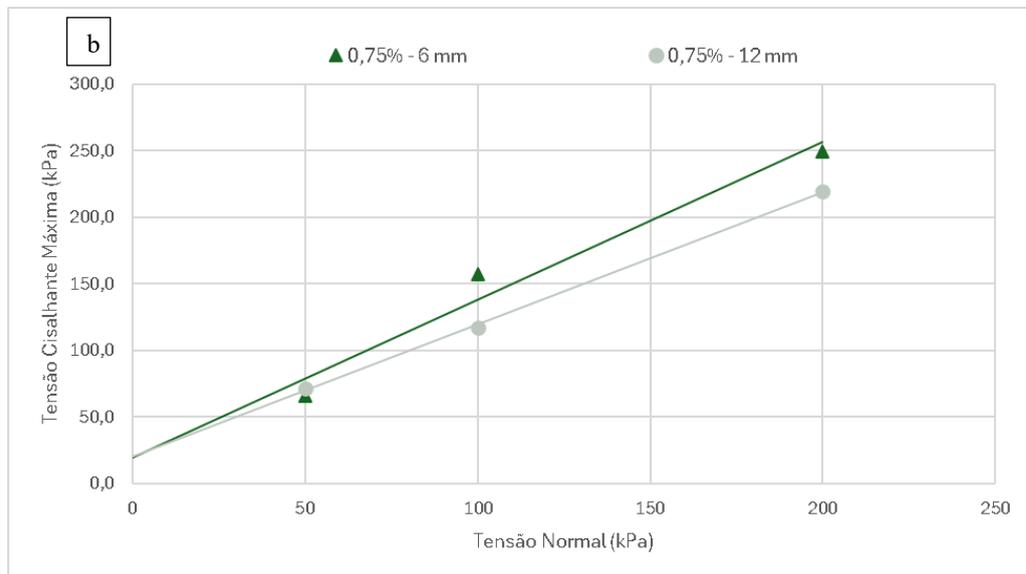
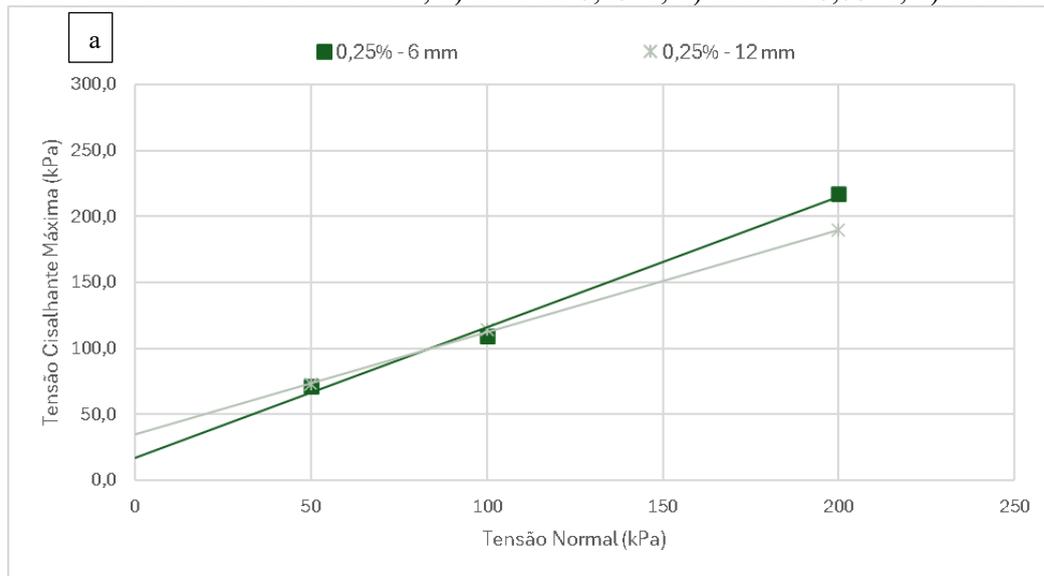
Tabela 10 - Resistência de pico alcançadas.

		6 mm			12 mm		
		0,25%	0,75%	1,25%	0,25%	0,75%	1,25%
Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante Máxima (kPa)						
50	77,8	71,1	65,6	87,5	72,7	71,1	84,9
100	112,9	109,1	157,6	109,9	114,3	117,3	139,7
200	187,5	217,5	249,8	238,4	189,3	219,5	261,9

Fonte: Autora.

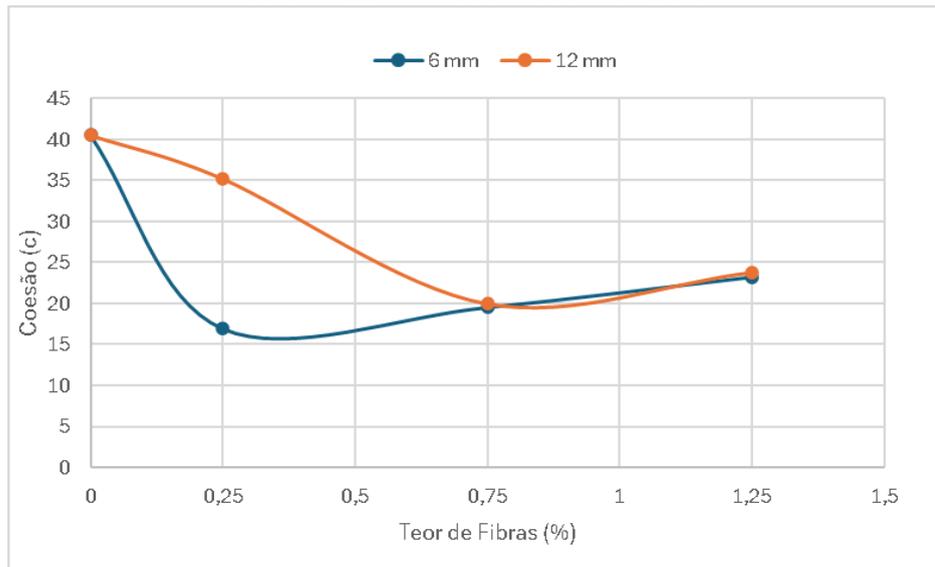
No Gráfico 21 são apresentadas as envoltórias de resistência obtidas por meio dos ensaios de cisalhamento direto. Ao analisar o teor de 0,25% (Gráfico 21- a) é possível observar que todas as tensões normais, exceto 200 kPa, a fibra de 12 mm possui uma maior tensão cisalhante máxima. Para o teor de 0,75% (Gráfico 21- b) em todas as tensões normais aplicadas, a fibra de 6 mm apresentou uma maior tensão cisalhante máxima, visto que esse é o teor ótimo para a fibra. Para o teor de 1,25% (Gráfico 21 - c) a fibra de 12 mm, para todas as tensões normais aplicadas, exceto para a de 50 kPa, a apresentou maior tensão cisalhante máxima. Portanto, tem-se que as melhores misturas foram as de 0,75% para a fibra de 6 mm e 1,25% para a fibra de 12 mm.

Gráfico 21 - Envoltórias de resistência; a) Teor de 0,25%; b) Teor de 0,75%; c) Teor de 1,25%



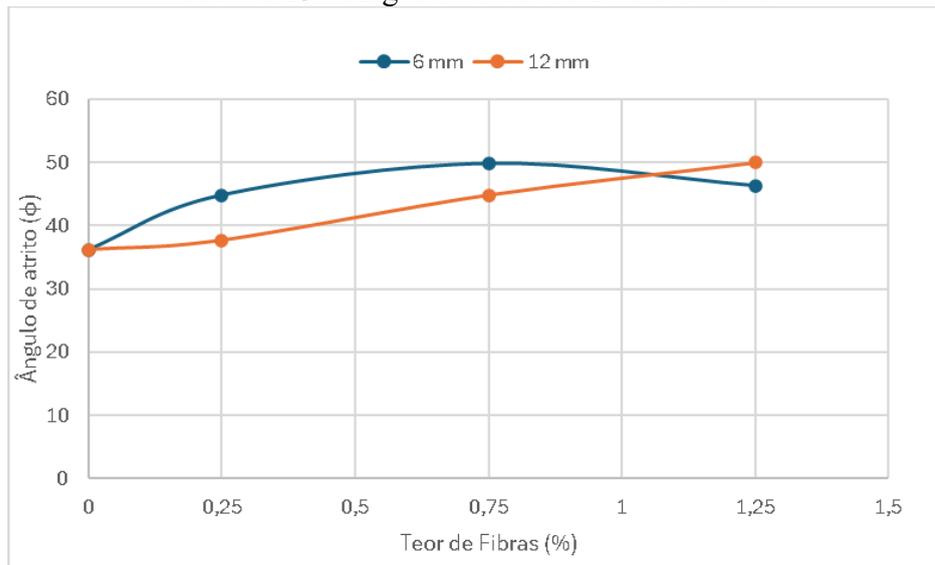
Fonte: Autora.

Gráfico 22 - Coesão x Teor de fibras.



Fonte: Autora.

Gráfico 23 - Ângulo de atrito x Teor de Fibras.



Fonte: Autora.

Por meio da análise do gráfico 22, é possível observar que para ambos os comprimentos de fibras houve uma tendência de redução da coesão seguido por um leve aumento. Porém, o aumento não foi significativo para superar o valor da coesão do solo puro. No gráfico 23, observamos que há uma tendência de aumento do ângulo de atrito, exceto para a fibra de 6mm que apresentou uma pequena redução para o teor de fibras de 1,25%. Para ambos os comprimentos de fibra o ângulo de atrito foi maior que o solo sem adição de fibras.

4.2 Ensaios mineralógicos

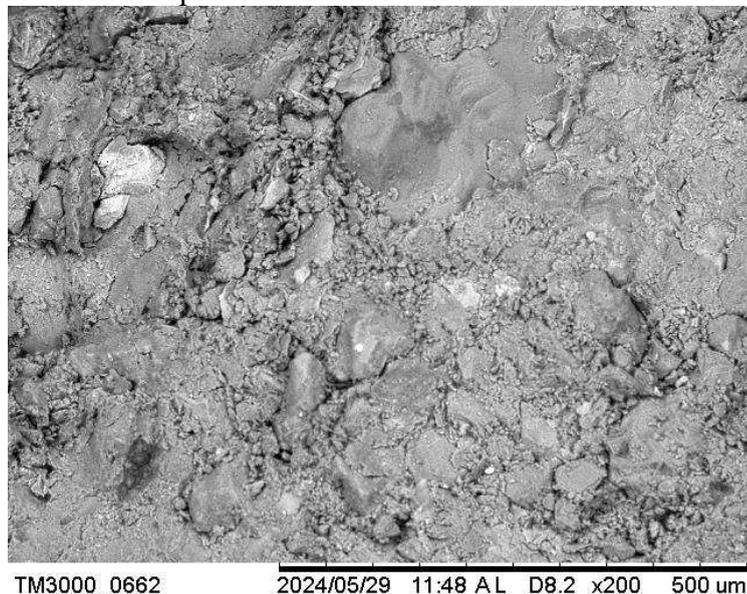
4.2.1 Difração de Raios X

A difração de raios x é um ensaio que permite a análise qualitativa do material a ser estudado. Por meio do qual foi possível identificar que o solo trabalhado possui uma fração predominante de argilomineral caulínico, com porcentagem de areia e silte, podendo haver a presença de quartzo e feldspato.

4.2.2 Microscopia eletrônica de varredura

Por meio da microscopia eletrônica de varredura conseguimos observar as características morfológicas, compreender a estrutura, textura e a adesão entre os materiais. O ensaio foi realizado para amostras com solo puro e para misturas de solo+fibra nos teores de 0,25%, 0,50%, 0,75% 1% e 1,25%. A Figura 11 apresenta a microscopia do solo puro compactado com um aumento de 200x, na qual podemos observar as aglomerações das partículas e partículas esféricas.

Figura 11 - Microscopia eletrônica de varredura em amostra de solo puro.



Fonte: Autora.

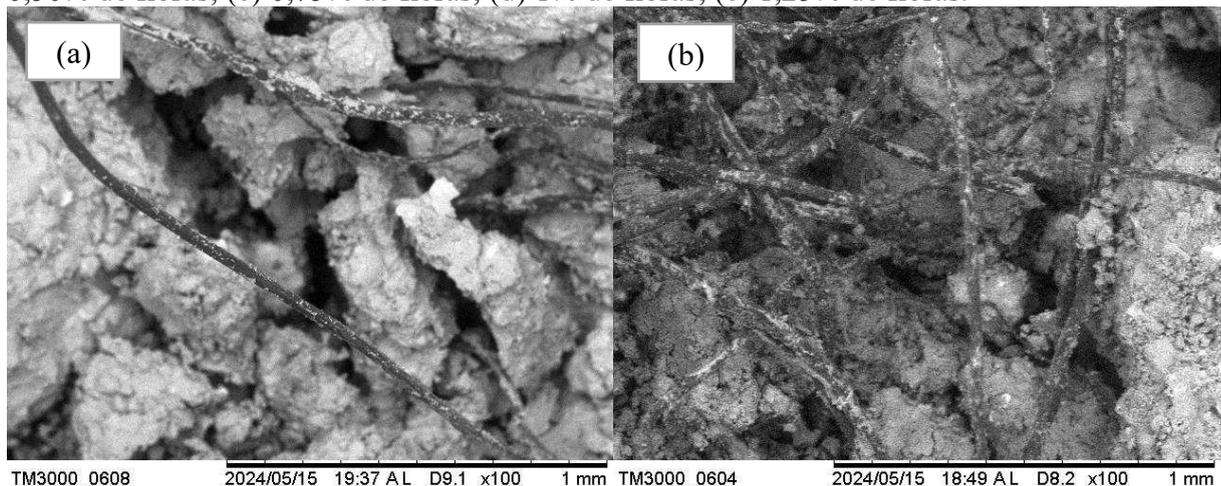
Ao adicionar fibras ao solo de forma uniforme, a interação entre as fibras e as partículas do solo afeta substancialmente a resistência do solo quando o material compósito está submetido a cargas. O compósito sob carga axial estará submetido a forças de fricção e/ou

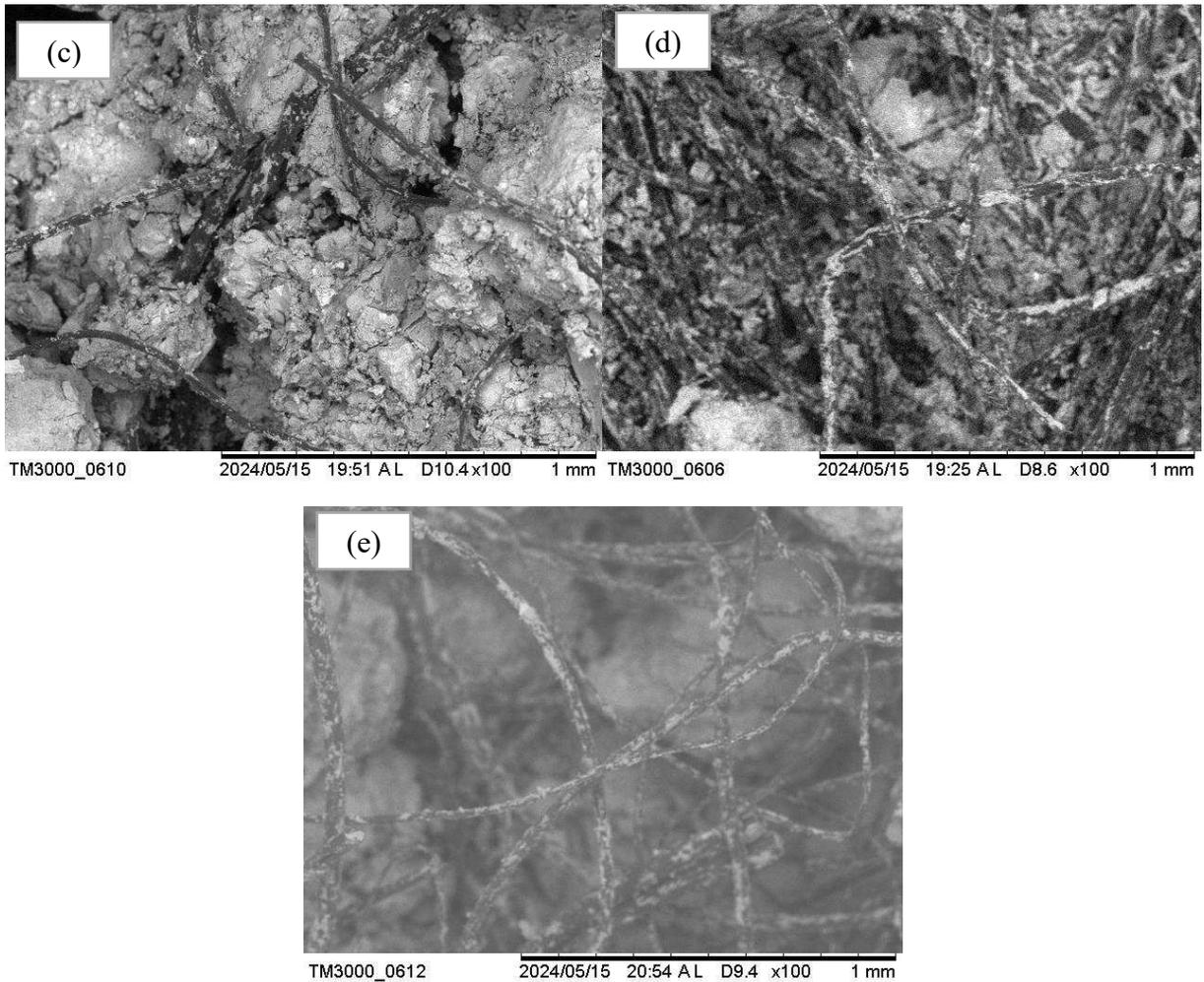
adesão, o que limita o movimento das partículas do solo. Por serem flexíveis, as fibras podem ser distribuídas de forma aleatória na matriz do solo. Devido a capacidade de entrelaçamento, as fibras podem criar uma rede tridimensional, que limita de forma eficaz a movimentação das partículas do solo (Yazici; Keskin, 2024).

Na Figura 12, apresenta-se a microscopia das amostras de solo com inserção de fibras de 6 mm com um aumento de 100x. Nos teores inferiores ao ideal (Figura 12 – a e b) a interação entre as fibras e o solo não ocorre de forma adequada, percebe-se a presença de vazios. Entretanto, ao analisar a figura do teor de 0,75%, que se considera como ideal, observa-se que a adesão entre a fibra e o solo ocorre de forma mais efetiva, observa-se o contato solo-fibra de forma mais adequada. Para os teores superiores a 0,75%, é possível observar o contato fibra-fibra, não há adesão efetiva com o solo, nas Figuras 12-d e 12-e o agrupamento de fibras fica evidente.

Observando as figuras 12 e 13, percebe-se que para teores de fibras inferiores a 0,75% (que seriam 0,25 e 0,5%) a adesão entre as fibras e o solo sugerem ser menos efetivas em comparação com teores maiores de fibras, sugerindo uma menor interação solo-fibras. Com relação ao teor de fibra, não é possível ser conclusivo, pois em função da heterogeneidade da mistura, podem ocorrer trechos em que há maior concentração de fibras do que outros, mesmo para teores maiores de fibras.

Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura para fibras de 6 mm. (a) 0,25% de fibras; (b) 0,50% de fibras; (c) 0,75% de fibras; (d) 1% de fibras; (e) 1,25% de fibras.

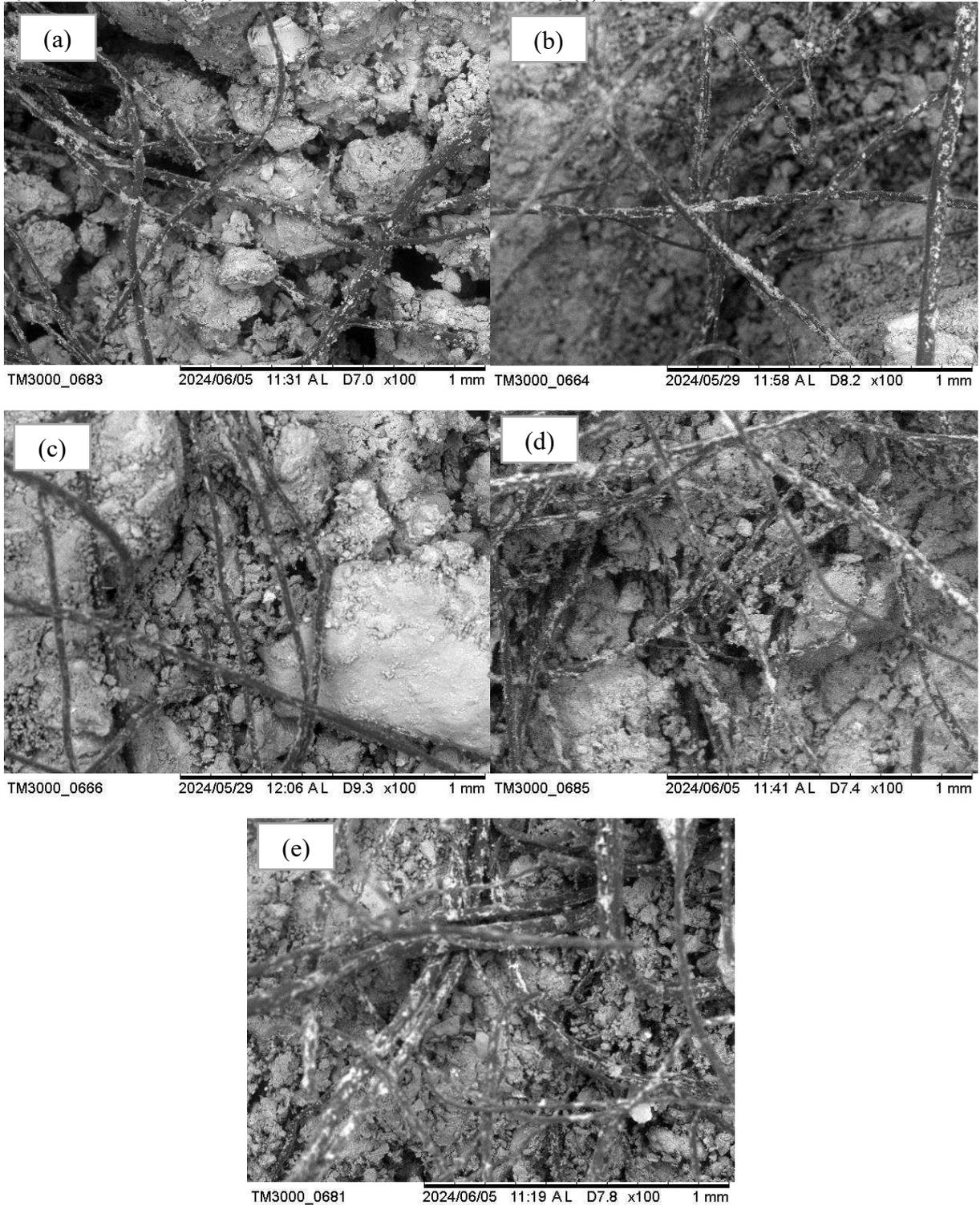




Fonte: Autora.

A Figura 13, apresenta a microscopia das amostras de solo com inserção de fibras de 12 mm com um aumento de 100x. Assim como ocorreu para fibra de 6 mm, podemos observar que para os teores inferiores ao ideal há a presença de vazios e a interação entre a fibra e solo não ocorre apropriadamente. Entretanto, para o teor de 1,25% (Figura 12 – e) observa-se que há adesão entre a fibra e o solo. A presença de vazios é visualmente inferior a dos outros teores.

Figura 13 - Microscopia eletrônica de varredura para fibras de 12 mm. (a) 0,25% de fibras; (b) 0,50% de fibras; (c) 0,75% de fibras; (d) 1% de fibras; (e) 1,25% de fibras.



Fonte: Autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos nesta pesquisa, podemos concluir que ao adicionar fibras de polipropileno (em diversos teores e comprimentos) uniformemente ao solo areno-argiloso, a resistência do solo será alterada.

A inclusão de fibras forma um material compósito com características próprias, que são diretamente influenciadas pelo tipo, comprimento e teor de fibras.

Com relação a permeabilidade, a inclusão de fibras levou ao aumento da permeabilidade do solo. O que pode estar relacionado ao surgimento de caminhos preferencias de fluxo pela inserção da fibra, os quais facilitam a passagem de fluidos. Ao trabalhar com as fibras de 12 mm, foi observado uma maior dificuldade de homogeneização quando comparado as fibras de 6 mm. O que foi observado principalmente para teores maiores, devido a formação de aglomerados de fibras. Como resultado, as fibras de 6 mm tiveram uma permeabilidade maior que as de 12 mm, o que pode ter ocorrido devido à dificuldade de fluxo pelos aglomerados de fibra.

O ensaio de compactação mostrou uma tendência para ambas as fibras, ao aumentar a quantidade de fibras inseridas no compósito a curva mostrou uma tendência a diminuir a massa específica e aumentar a umidade ótima, esse efeito foi observado para as fibras de ambos os comprimentos (6 e 12 mm).

O ensaio de resistência ao cisalhamento indicou a existência do teor ótimo de fibra para ambos os comprimentos, assim como já havia sido mencionado por outros autores. Para o comprimento de 6 mm, o teor ideal foi de 0,75%. Para o comprimento de 12 mm, o teor ideal foi de 1,25%. Além disso, a inclusão de fibras gerou uma tendência de redução do intercepto coesivo para os dois comprimentos. Para os dois comprimentos, o intercepto coesivo foi inferior ao do solo puro. O ângulo de atrito mostrou uma tendência de progressão com o aumento do teor de fibras, entretanto, para a fibra de 6 mm isso só ocorre até o teor ideal, depois desse ponto o ângulo de atrito reduziu. Para os dois comprimentos, o ângulo de atrito foi superior ao do solo puro.

Ao analisar a microscopia eletrônica de varredura foi possível compreender a existência dos teores ótimos. Nos teores de 0,75% (fibra de 6 mm) e 1,25% (fibra de 12 mm), a adesão entre o solo e a fibra ocorre de forma adequada, sugerindo que a interação proporciona um aumento de resistência do compósito quando submetido a cargas.

Ao trabalhar com fibras existem diversas variáveis que devem ser levadas em consideração, como o tipo de solo, tipo de fibras, teor e comprimento das fibras. Dessa forma, é fundamental que antes de realizar uma aplicação em campo, seja feito um estudo experimental, para que a inserção de fibras possa proporcionar o maior ganho de resistência possível.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de ampliar o conhecimento acerca do reforço de solos com o uso de fibras de polipropileno, sugere-se:

- Realizar ensaios triaxiais para obtenção da deformabilidade e dos parâmetros de resistência;
- Avaliar a influência das fibras de polipropileno em matrizes que incluam solos cimentados ou com acréscimo de cal, cinza volante ou casca de arroz;
- Realizar ensaios variando a compactação das amostras;
- Estudar o comportamento dos solos reforçados com fibras de polipropileno em campo.

REFERÊNCIAS

A AL-SARAY, Noor; SHAFIQU, Qassun s; A IBRAHIM, Mohammed. Improvement of strength characteristics for sandy soils by polypropylene fibers (PPF). **Journal Of Physics: Conference Series**, [S.L.], v. 1895, n. 1, p. 1201, maio 2021. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012016>.

ABDULLAH, N H H; A AZIZ, N H; JAAFAR, F F; OSMAN, N M; A AHMAD; A HAMID, S. Effect of different fibre reinforcement type to the shear strength of soft soil at varying moisture condition. **Journal Of Physics: Conference Series**, [S.L.], v. 1349, n. 1, p. 1-8, 1 nov. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1349/1/012126>.

AMARAL JÚNIOR, Josué Coelho do; SILVA, Luiza Caroline Ferreira; MORAVIA, Weber Guadagnin. Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 1-9, jan. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0112>.

ALBRIGHT, William H.; BENSON, Craig H.; WAUGH, W. Joseph. **Water Balance Covers for Waste Containment: principles and practice**. Reston, Virginia: Asce Press, 2010. 160 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D3080-04**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken, Pa, Usa, 2012.

AQUINO, Douglas Hernandez de. **Avaliação da resistência à tração de pinos de fibra de vidro: influência da utilização de pinos anatômicos em raízes com e sem aplicação de laser**. 2013. 27 f. TCC (Graduação) - Curso de Odontologia, Universidade Estadual Paulista, Araçatuba, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/5a3fca72-2277-4828-91e4-43b797a37fe8/download>. Acesso em: 4 abr. 2024.

ARQUEZ, Ana Paula. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2010. 242 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,

São Carlos, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2010.TDE-29062010-114146>. Acesso em: 4 abr. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Solos — Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. 3 ed. Rio de Janeiro, 2024. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo — Análise granulométrica. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016b. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo — Determinação do limite de liquidez. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016d. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. 2 ed. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Solos e rochas - Terminologia. 2 ed. Rio de Janeiro, 2022. 40 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016a. 13 p.

BARBOZA, Diones Uiliam; PELIZZOLI, Luigi Nascimento; FRAGOMENI, Luiza; PACHECO, Lysiane; FLORIANO, Cleber. Avaliação da Resistência ao Cisalhamento de um Solo Residual de Lamito com Adição de Fibras de Polipropileno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2022, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: Cobramseg, 2022. p. 6042-6049.

BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. 2003. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/3596>. Acesso em: 30 mar. 2024.

BIANCHINI, Micheli Kaufmann. **Estudo da resistência ao cisalhamento de um solo argilo-arenoso com a inclusão de fibras de polipropileno**. 2013. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2013.

BUENO, B. S. ; LIMA, D. C. ; TEIXEIRA, S. H. C. ; RIBEIRO, N. J. **Fiber Soil Reinforcement: Basic Understanding**. 3rd International Symposium On Environmental Geotechnology, San Diego, v. 1, p. 878-884, 1996.

CARVALHO, Leila Maria Coelho de. **Comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras naturais submetido a ensaios de cisalhamento direto em média escala**. 2019. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em: http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/35528/1/2019_LeilaMariaCoelhodeCarvalho.pdf. Acesso em: 2 abr. 2024.

CASAGRANDE, Michéle dal Toé. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. 2001. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/3349>. Acesso em: 5 jan. 2024

CASAGRANDE, Michéle dal Toé. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. 243 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CASTRO, Cíntia Lopes de. **Comportamento hidromecânico de solos reforçados com fibras considerando a condição não saturada**. 2020. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso

de Engenharia Civil, Deha, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/51882>. Acesso em: 5 dez. 2023.

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R.. Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. **Géotechnique**, [S.L.], v. 57, n. 9, p. 751-756, nov. 2007. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2007.57.9.751>.

CUNHA, R. D. da; FREIRE JUNIOR, R. C. S.; SANTOS, J. K. D. dos; AMORIM JÚNIOR, W. F. de; CUNHA, R. A. D. da. Resposta no compósito híbrido fibra de vidro/kevlar sob ação de impacto por queda de peso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22., 2016, Natal, Rn. **Anais [...]** . Natal: Cbecimat, 2016. p. 3355-3367. Disponível em: <https://www.metallum.com.br/22cbecimat/anais/PDF/205-087.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2024

DHAR, Subhradeep; HUSSAIN, Monowar. The strength behaviour of lime-stabilised plastic fibre-reinforced clayey soil. **Road Materials And Pavement Design**, [s. l], v. 8, n. 20, p. 1757-1778, maio 2018. [S.L]. <https://doi-org.ez11.periodicos.capes.gov.br/10.1080/14680629.2018.1468803>.

DITTENBER, David B.; GANGARAO, Hota V.s.. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S.L.], v. 43, n. 8, p. 1419-1429, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 093: Solos - Determinação da densidade real**. Brasília, 1994. 4 p.

EHRlich, M.; ALMEIDA, M.S.S.; CURCIO, D.. Hydro-mechanical behavior of a lateritic fiber-soil composite as a waste containment liner. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 47, n. 1, p. 42-47, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.09.005>.

FELTRAN, Murilo B.; DIAZ, Francisco R. V.. Compósitos de PVC reforçados com fibra de vidro: utilização de técnicas de processamento convencionais da indústria brasileira.

Polímeros, [S.L.], v. 17, n. 4, p. 276-283, dez. 2007. FapUNIFESP (SciELO).
<http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282007000400005>.

FERREIRA, José Wilson dos Santos; SENEZ, Phillipe Campello; CASAGRANDE, Michéle dal Toé. Pet fiber reinforced sand performance under triaxial and plate load tests. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 15, p. 1-13, dez. 2021. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00741>.

FESTUGATO, Lucas. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices de aspecto**. 2008. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FEUERHARMEL, Marcos Roberto. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

FRANCO, L. P. C. ; MOURA, S. C. D. ; OLIVEIRA, L. M. . Estudo do pavimento rígido com adição de fibras de polietileno tereftalato pós-consumo. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 33., 2019, Balneário Camboriú. **Anais [...]** . Balneário Camboriú: Anpet, 2019. p. 1-12.

GARCIA, Alioska Jessica Martínez. ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO ARGILOSO DA REGIÃO DE CURITIBA-PR COM ADIÇÕES DE FIBRAS DE VIDRO E POLIPROPILENO. **Tecnologias e Inovações na Construção Civil: os avanços em técnicas, materiais e processos de construção**, [S.L.], p. 25-42, 2023. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/230814172>.

GHAVAMI, Khosrow; TOLEDO FILHO, Romildo D.; BARBOSA, Normando P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 39-48, jan. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465\(98\)00033-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465(98)00033-x).

GIRIJA, K. M.. BEHAVIOUR OF RANDOMLY DISTRIBUTED FIBER-REINFORCED SOIL. **International Journal Of Research In Engineering And Technology**, [S.L.], v. 02,

n. 13, p. 456-458, 25 nov. 2013. ESAT Publishing House.
<http://dx.doi.org/10.15623/ijret.2013.0213086>

GONG, Yafeng; HE, Yulong; HAN, Chunpeng; SHEN, Yangfan; TAN, Guojin. Stability Analysis of Soil Embankment Slope Reinforced with Polypropylene Fiber under Freeze-Thaw Cycles. **Advances In Materials Science And Engineering**, [S.L.], v. 2019, p. 1-10, 21 jan. 2019. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2019/5725708>.

GRAY, Donald H.; OHASHI, Harukazu. Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. **Journal Of Geotechnical Engineering**, v. 109, n. 3, p. 335-353, mar. 1983.

GUIMARÃES, Diego. **Avaliação das propriedades de concretos reforçados com fibras de aço para utilização em pisos industriais**. 2015. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em:
<http://hdl.handle.net/10183/149264>. Acesso em: 1 fev. 2024.

GUSMÃO, Luciana Regina Cajaseiras de; JUCÁ, José Fernando Thomé. Influência de ciclos secagem-molhagem na resistência ao cisalhamento de solo puro e mistura com fibras de coco verde. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA (COBRAMSEG), 20., 2020, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: Abms, 2020. p. 1-8.

GUTIÉRREZ, Juan Carlos Horta; RUBIO, Juan Carlos Campos; FARIA, Paulo Eustáquio de; DAVIM, João Paulo. Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas. **Polímeros**, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 711-719, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1582>.

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.

HEINECK, Karla Salvagni. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002. 275 f. Tese (Doutorado) -

Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HEINECK, Karla Salvagni. Comportamento de solos micro-reforçados a pequeníssimas e grandes deformações cisalhantes. **Solos e Rochas**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 3-17, 2003.

HOLLAWAY, L. Polymers and polymer composites. In: J. M. ILLSTON. **Construction Materials**; their nature and behavior. London: J. M. Illston/E e FN Spon, 2ed. p.321-358, 1994.

HU, Cheng; WENG, Xingzhong; LIU, Cong; JIANG, Le; LIU, Junzhong; LI, Wenlei. Performance of Polypropylene Fiber-Reinforced Solidified Soil. **Advances In Civil Engineering**, [S.L.], v. 2021, p. 1-16, 7 abr. 2021. Hindawi Limited.
<http://dx.doi.org/10.1155/2021/8859358>.

ISAIAS, Adriano Feitosa. **Permeabilidade de misturas de solo argiloso e fibras de polipropileno**. 2022. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em:
<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/71820>. Acesso em: 2 abr. 2024.

JARAMILLO, Natalia Andrea Durán; FERREIRA, José Wilson dos Santos; MALKO, José Adriano Cardoso; CASAGRANDE, Michéle dal Toé. Mechanical Behavior of Clayey Soil Reinforced with Recycled Tire Rubber Using Chips and Fibers. **Geotechnical And Geological Engineering**, [S.L.], v. 40, n. 6, p. 3365-3378, 27 mar. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-022-02101-0>.

JESUS, Nella Nelci Mussugati de. **Remoção de céσιο e amerício utilizando fibra de coco para a aplicação no tratamento de rejeitos radioativos**. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Nuclear - Aplicações, Autarquia Associada À Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em:
http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Nella%20Nelci%20Mussugati%20de%20Jesus_M.pdf. Acesso em: 4 abr. 2024.

KAIZER, Osvaldo Bazzan. **Avaliação da resistência à fratura de dentes tratados endodonticamente restaurados com pinos dentários e com pinos de fibras de polietileno**.

2003. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Odontologia, Universidade de São Paulo, Bauru, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.25.2003.tde-07122004-085133>. Acesso em: 4 abr. 2024.

KAR, Rabindra; PRADHAN, Pradip. Strength and compressibility characteristics of randomly distributed fiber-reinforced soil. **International Journal Of Geotechnical Engineering**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 235-243, abr. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.3328/ijge.2011.05.02.235-243>.

LEOCÁDIO, Gislene Aparecida Santiago. **Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado**. 2005. 100 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais, <Http://Www.Repositorio.Ufop.Br/Handle/123456789/2550>, Ouro Preto, 2005. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2550>. Acesso em: 14 mar. 2024.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. 416 p.

LI, Haiwen; SENETAKIS, Kostas. Dynamic properties of polypropylene fibre-reinforced silica quarry sand. **Soil Dynamics And Earthquake Engineering**, [S.L.], v. 100, p. 224-232, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.05.035>.

LOPES, Matheus Machado. **Estudo do comportamento físico-mecânico de solos reforçados com fibras de açaí (*euterpe oleracea*)**. 2019. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

MAHER, M. H.; HO, Y. C.. Mechanical Properties of Kaolinite/Fiber Soil Composite. **Journal Of Geotechnical Engineering**, [S.L.], v. 120, n. 8, p. 1381-1393, ago. 1994. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1994\)120:8\(1381\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1994)120:8(1381)).

MALEKZADEH, Mona; BILSEL, Huriye. Hydro-mechanical behavior of polypropylene fiber reinforced expansive soils. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 18, n. 7, p.

2028-2033, 20 jun. 2014. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1007/s12205-014-0389-2>.

MARÇAL, Régis. **Avaliação de parâmetros de resistência de solos com fibras de polipropileno reciclado**. 2019. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.

MARÇAL, Régis; LODI, Paulo César; CORREIA, Natália de Souza; GIACHETI, Heraldo Luiz; RODRIGUES, Roger Augusto; MCCARTNEY, John S.. Reinforcing Effect of Polypropylene Waste Strips on Compacted Lateritic Soils. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 22, p. 9572, 17 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12229572>.

MARQUES, Maria Gorett dos Santos. **Caracterização das Propriedades da Fibra Vegetal de Arumã para aplicação como reforço a Matriz Cimentícia**. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009. Disponível em: <http://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3481>. Acesso em: 4 abr. 2024.

MEDDAH, Abdelaziz; MERZOUG, Karima. Feasibility of using rubber waste fibers as reinforcements for sandy soils. **Soil-Structure Interaction**, Egito, v. 2, n. 1, p. 1-12, fev. 2017.

MEDDAH, Abdelaziz; GOUFI, Abd Elmalik; CHAA, Khalissa. Effect of randomly distributed polypropylene fibers on unconfined compressive strength, shear strength, and compressibility characteristics of Algerian high plasticity clay soil. **Arabian Journal Of Geosciences**, [S.L.], v. 16, n. 8, p. 1-9, 10 jul. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-023-11575-y>.

MILLER, Carol J.; RIFAI, Sami. Fiber Reinforcement for Waste Containment Soil Liners. **Journal Of Environmental Engineering**, [S.L.], v. 130, n. 8, p. 891-895, ago. 2004. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2004\)130:8\(891\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2004)130:8(891)).

MONTARDO, Julio Portella. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. 1999. 150 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/221617>. Acesso em: 5 jan. 2024.

MOSCATELLI, Ivo. **Fibras de aço em concreto de cimento Portland aplicados a pavimento**. 2011. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

MOTTA, Thales Goretti. **Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras naturais (sisal, carauá e coco)**. 2018. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

NOURI, Hesam Haji Hosseini; SHAHROUZI, Mohsen. Experimental evaluation of compressive strength of steel fiber reinforced soil. **Journal Of Engineering Sciences And Innovation**, [s. l], v. 6, n. 2, p. 121-136, maio 2021.

NGUYEN, M.D.; YANG, K.H.; LEE, S.H.; WU, C.s.; TSAI, M.H.. Behavior of nonwoven-geotextile-reinforced sand and mobilization of reinforcement strain under triaxial compression. **Geosynthetics International**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 207-225, jun. 2013. Thomas Telford Ltda. <http://dx.doi.org/10.1680/gein.13.00012>.

OLIVEIRA JÚNIOR, Antônio Italcy de. **Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco**. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

OLIVEIRA JÚNIOR, Antônio Italcy de; JUCÁ, José Fernando; FERREIRA, Janilson Alves. Análise da Resistência ao Cisalhamento de Misturas de Solo Argiloso com Resíduos Fibrosos da Casca do Coco (Coco nucíferas). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA (COBRAMSEG), 19., 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Abms, 2018. p. 1-10.

OLIVEIRA JÚNIOR, Antônio Italcly de; JUCÁ, José Fernando Thomé; FERREIRA, Janilson Alves; GUILHERME, Laís Chaves. Geotechnical Behavior and Soil-Fiber Interaction of Clayey Soil Mixed with Randomly Dispersed Coconut Fibers. **Soils And Rocks**, [S.L.], v. 42, n. 2, p. 127-138, 31 ago. 2019. ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. <http://dx.doi.org/10.28927/sr.422127>.

OLIVEIRA JÚNIOR, Antônio Italcly de. Comportamento Geotécnico de Misturas Compactadas de Solos Argilosos com Fibras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2020, Campinas. **Anais [...]**. Campinas, Sp: Cobramseg, 2020. p. 724-731.

OLIVEIRA, Luis Fernando de. **Desenvolvimento de compósitos de fibra de carbono/resina benzoxazina para aplicações aeroespaciais**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/cf2ee9fb-1d5d-40ac-aa3b-b4e14587da96/download>. Acesso em: 4 abr. 2024.

OLIVEIRA, Gilson Carlos. **Análise das propriedades mecânicas das fibras adicionadas ao concreto**. 2016. 38 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2016.

PATRIARCA, Lorrán Augusto; CASTRO, Wesley de Oliveira. **Estudo do ganho de resistência da aplicação de manta de fibra de vidro em pilares de concreto simples**. 2018. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unievangélica, Anápolis, 2018.

Palmeira, Ennio Marques. **Curso de estabilização e reforço de solos: introdução à utilização de geossintéticos**. 1993. Publicação GAP002B/93, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 162 p.

PICANÇO, Marcelo de Souza; GHAVAMI, Khosrow. Comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras vegetais da Amazônia. **Rem: Revista Escola de Minas**, [S.L.], v. 61, n. 1, p. 13-18, mar. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672008000100003>.

PINTO, Camilla Maria Torres; MACHADO, Sandro Lemos. Comportamento Mecânico de uma Areia Aluvionar Reforçada com Fibras Poliméricas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2022, Campinas. **Anais [...]**. Campinas, Sp: Cobramseg, 2022. p. 7632-7639.

PLÉ, O.; LÊ, T.N.H.. Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 32, p. 111-116, jun. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.11.004>.

RABAB'AH, Samer; HATTAMLEH, Omar Al; ALDEEKY, Hussein; ALFOUL, Bilal Abu. Effect of glass fiber on the properties of expansive soil and its utilization as subgrade reinforcement in pavement applications. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 14, p. 1-27, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00485>

RANGEL, Ana Carolina Moraes. **Avaliação pedológica e geotécnica de solos modificados com fibra de cana de açúcar**. 2018. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos., Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

REIS, Antonio Felipe de Souza Machado. **Análise do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibra de coco**. 2022. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2022.

ROCHA, Sabrina Andrade. **Avaliação da influência de fibras de polipropileno na resistência efetiva de um solo argiloso**. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

ROCHA, Eduardo Vieira de Goes. **Solo siltoso da formação Guabirotuba reforçado com fibras de polipropileno**. 2020. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

ROCHA, Larissa; ANJOS, Rafaella Oliveira dos; SOBRAL, Anderson da Conceição Santos; GUILHERME, Laís Chaves. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 11–30, 2021. Disponível em:

<https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/10327>. Acesso em: 27 mar. 2024.

RODRIGUES, Púlio Penna Firme; MONTARDO, Julio P.. A Influência da Adição de Fibras de Polipropileno nas Propriedades dos Concretos para Pisos e Pavimentos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Minas Gerais. **Anais [...]** . Minas Gerais: Ibracon, 2002. p. 1-16. Disponível em: <https://lpsite-oficial1.websiteseuro.com/wp-content/uploads/2022/10/Fibras-de-Polipropileno-44o-IBRACON.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2024.

ROSMAN, Mohammad Zawawi; CHAN, Chee-Ming. Effect of polypropylene fiber inclusion on the compressibility and consolidation characteristics of dredged marine soil. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 333-338, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.091>.

ROQUE, Priscila Fiochi Bento. **Uso de materiais alternativos para melhoria de solos em pavimentação**. 2017. 124 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SANTOS, Gustavo dos; DEMETRIO, Leonardo; FRANÇA, Maria Júlia Limongi; LAVOIE, Fernando Luiz; SHEFFER, Daniel. Avaliação de Resultados de Ensaio à Tração de Vergalhões de Fibra de Vidro e de Aço para o Uso no Grampeamento da Frente de Escavação de Túneis em Maciços Terrosos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, 7., 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]** . Belo Horizonte: Cbmr/Abms e Isrm, 2016. p. 1-8.

SENEZ, Phillipe Campello. **Comportamento de uma areia reforçada com fibras de polietileno tereftalato (PET)**. 2016. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SILVA, Érico Rafael da. **Comportamento mecânico de solo reforçado com fibra de carauá (ananas erectifolius)**. 2020. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SILVA, Hellen Evenyn Fonseca da; CAMARGOS, Caio Soares; SOUZA, Matheus Viana de; GONGORA, Ivonne M.A.. Estudo da viabilidade do uso de fibras naturais como reforço de solos. **Geotechnical Engineering In The XXI Century: Lessons learned and future challenges**, Cancún, México, p. 1502-1509, jan. 2019.

SILVA, Rômulo Barbosa. **Reforço de solo com adição de fibra de sisal impermeabilizada com tinta asfáltica**. 2016. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2016.

SILVA, Rosana Vilarim da. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVEIRA, Mariana Vela. **Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal**. 2018. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SILVEIRA, Maitê Rocha; ROCHA, Sabrina Andrade; CORREIA, Natália de Souza; RODRIGUES, Roger Augusto; GIACHETI, Heraldo Luiz; LODI, Paulo César. Effect of Polypropylene Fibers on the Shear Strength–Dilation Behavior of Compacted Lateritic Soils. **Sustainability**, [S.L.], v. 13, n. 22, p. 12603-12618, 15 nov. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su132212603>.

SOUSA, Wendel da Silva Vieira de; SANTOS, Ana Paula Felício; SOUZA, Marcus Vinicius Ribeiro e; LIMA, Selton Fernandes de Sousa. Uso de Fibras de Polipropileno para Reforço de Solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTA, 9., 2019, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: Abms, 2020. p. 309-315. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/341734901_USO_DE_FIBRAS_DE_POLIPROPILENO_PARA_REFORCO_DE_SOLO. Acesso em: 2 abr. 2024.

SOUSA, Luís Felipe; SANTOS JUNIOR, Artur Goes; SANTOS, Maria Luiza Lopes Oliveira. Avaliação do desempenho de argamassas cimentícias reforçadas com fibras de poliéster.

Brazilian Applied Science Review, [S.L.], v. 3, n. 6, p. 2565-2576, 2019. Brazilian Applied Science Review. <http://dx.doi.org/10.34115/basrv3n6-022>.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. 2000. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/118555>. Acesso em: 5 jan. 2024.

SUJATHA, E. R.; ATCHAYA, P.; DARSHAN, S.; SUBHASHINI, S.. Mechanical Properties of Glass Fibre Reinforced Soil and Its Application as Subgrade Reinforcement. **Road Materials And Pavement Design**, [S.L.], v. 22, p. 2384-2395, out. 2021.

SUK, Diego Andrey; FERRARI, Vladimir. Aplicação do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) em vigas submetidas ao cisalhamento. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 24, p. 1-18, dez. 2024. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212024000100722>.

TAHA, Mazahir M. M.; FENG, Cheng Pei; AHMED, Sara H. S.. Influence of Polypropylene Fibre (PF) Reinforcement on Mechanical Properties of Clay Soil. **Advances In Polymer Technology**, [S.L.], v. 2020, p. 1-15, 19 maio 2020. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2020/9512839>.

TALEB, Talal; UNSEVER, Yesim S.. Study on Strength and Swell Behavioral Change and Properties of the Clay-Fiber Mixtures. **Sustainability**, [S.L.], v. 14, n. 11, p. 6767, 1 jun. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su14116767>.

TANG, Chaosheng; SHI, Bin; GAO, Wei; CHEN, Fengjun; CAI, Yi. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 194-202, jun. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.11.002>.

TAYLOR, G. D.. **Materials in Construction**. 2. ed. Inglaterra: Pearson Education Limited, 1994. 284 p.

TANG, Chao-Sheng; SHI, Bin; ZHAO, Li-Zheng. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 54-62, fev. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.001>.

TEODORO, Janice Mesquita. Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas. 1999. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

TIWARI, Nitin; SATYAM, Neelima. Experimental Study on the Influence of Polypropylene Fiber on the Swelling Pressure Expansion Attributes of Silica Fume Stabilized Clayey Soil. **Geosciences**, [S.L.], v. 9, n. 9, p. 377, 29 ago. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/geosciences9090377>.

TRINDADE, Tiago Pinto da; IASBIK, Israel; LIMA, Dario Cardoso de; SILVA, Cláudio Henrique Carvalho; BARBOSA, Paulo Sérgio de Almeida. **Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo em laboratório**. Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 57, n. 1, p. 53-58, mar. 2004.

TRINDADE, Tiago Pinto da; IASBIK, Israel; LIMA, Dario Cardoso de; MINETTE, Enivaldo; SILVA, Cláudio Henrique de Carvalho; CARVALHO, Carlos Alexandre Braz de; BUENO, Benedito de Souza; MACHADO, Carlos Cardoso. Estudos laboratoriais do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 30, n. 2, p. 215-222, abr. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622006000200008>.

VENDRUSCOLO, Márcio Antônio. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. 248 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VIDAL, Henri. The principle of reinforced earth. **Highway Research Record**, Washington, D.C., n. 282, p. 1-16, 1969.

YANG, Yun-Hua; CHENG, Sheng-Guo; GU, Jian-Yun; HU, Xiang-Hui. Triaxial tests

research on strength properties of the polypropylene fiber reinforced soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIMEDIA TECHNOLOGY, 11., 2011, Hangzhou. **Anais [...]** . Hangzhou, China: Ieee, 2011. p. 1869-1872. <http://dx.doi.org/10.1109/icmt.2011.6003219>.

YAZICI, Mehmet Fatih; KESKIN, Siddika Nilay. Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Clay Soil and Development of Predictive Models: effects of fiber length and fiber content. **Arabian Journal For Science And Engineering**, [S.L.], v. 49, n. 6, p. 19, 5 fev. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13369-023-08688-7>.

ZAIMOGLU, A. Sahin; YETIMOGLU, Temel. Strength Behavior of Fine Grained Soil Reinforced with Randomly Distributed Polypropylene Fibers. **Geotechnical And Geological Engineering**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 197-203, 16 out. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-011-9462-5>.

ZIEGLER, Stacy; LESHCHINSKY, Dov; LING, Hoe I.; PERRY, Edward B.. Effect of Short Polymeric Fibers on Crack Development in Clays. **Soils And Foundations**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 247-253, mar. 1998. Elsevier BV. <https://doi.org/10.3208/sandf.38.247>.