



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 2 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID36763>



Comportamento hidromecânico de misturas de solos areno argilosos com fibras de polipropileno

Hydromechanical behavior of sandy-clayey soil mixtures with polypropylene fibers

Ana Kelly Fernandes Merville¹; Anderson Borghetti Soares²;

¹ Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia/Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza/CE, Brasil.
Email: kelly-merville@outlook.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5559-3899>

² Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia/Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza/CE, Brasil.
Email: borghetti@ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0708-3702>

Resumo: O uso de fibras de polipropileno como reforço de 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 trazer melhorias como o aumento da resistência ao cisalhamento e diminuição da compressibilidade do solo. Com relação à permeabilidade ocorre aumento no solo adicionado com fibras, esse efeito pode não representar um ponto negativo, desde que a permeabilidade da mistura seja adequada à aplicação em campo. Este 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, em diferentes teores e comprimentos de fibra e verificar a influência nos parâmetros geotécnicos do solo de camada de cobertura de aterro sanitário. Como parte da pesquisa, foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização geotécnica e mineralógica. Foram utilizadas fibras de polipropileno de 6 e 12 mm de comprimento, nos teores gravimétricos de 0,25%, 0,75% e 1,25%. Os resultados indicaram ganhos de resistência com a adição de fibras. A permeabilidade aumentou progressivamente com o aumento do teor de fibras, mas o compósito ainda pode ser utilizado como camada impermeabilizante na cobertura de aterros.

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

Abstract: Using polypropylene fibers as soil reinforcement is applicable when the soil in its natural state does not have the necessary geotechnical properties to withstand the expected stresses in the field. Fibers can bring improvements such as increasing shear resistance and decreasing soil compressibility. Regarding permeability, there is an increase in soil added with fibers; this effect may not represent a negative point as long as the permeability of the mixture is suitable for field application. This work aims to study the hydromechanical behavior of sandy-clay soil used as covering material for a landfill in the State of Ceará, with the insertion of polypropylene fibers in different fiber contents and lengths and to verify the influence on geotechnical parameters in soil layers of dry covers. As part of the research, laboratory tests for geotechnical and mineralogical characterization were carried out. Polypropylene fibers 6 and 12 mm long were used, with gravimetric contents from 0,25%, 0,75% and 1.25%. The results indicated gains in resistance with adding fibers. Permeability increased progressively with increasing fiber content, but the composite can still be used as a waterproofing layer to cover landfills.

Keywords: Reinforced soil; Polypropylene fibers; Hydromechanical.

Recebido: 26/06/2024; Aceito: 26/08/2024; Publicado: 19/12/2024.

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.

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, camadas de cobertura de aterros sanitários, estabilização de taludes, dentre outros. Essa prática tem tido muita eficiência devido a melhoria na resistência do material resultante, sobretudo na resistência ao cisalhamento

Há uma grande variedade de fibras que podem ser utilizadas em compósitos fibrosos. 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.

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; SHAHROUZI, 2021), de vidro (RABAB'AH et al., 2021; SUJATHA et al., 2020) de borracha (JARAMILLO et al., 2022; MEDDAH; MERZOUG, 2017; ROCHA et al., 2021), de vegetais (LEOCÁDIO, 2005; LOPES, 2019; SILVEIRA, 2018) e de polipropileno (CASAGRANDE, 2001, 2005; FESTUGATO, 2008; SOUSA et al., 2020; TEODORO, 1999; TRINDADE et al., 2004, 2006; VENDRUSCOLO, 2003).

O comprimento das fibras presentes em um compósito influencia diretamente em sua resistência. 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, o qual será considerado ideal. A definição do comprimento ideal de fibras deve ser realizada laboratorialmente, considerando as especificidades de cada solo e fibra, visto que não há uma dosagem predefinida (HEINECK, 2003; ROQUE, 2017; TEODORO, 1999; TRINDADE et al., 2004). De acordo com os autores, o teor ótimo de fibras não é um valor muito elevado, em torno de 10 a 25 mm, entretanto, é necessário realizar ensaios laboratoriais para definir esse valor precisamente, visto que as variáveis (tipo de solo e de fibra), devem ser consideradas.

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, a adição de resíduos, a adição de aditivos e o carregamento aplicado para a realização do ensaio.

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. Os autores relatam com frequência que ao aumentar do teor de fibras, há a diminuição da densidade aparente seca e aumento da umidade ótima, esse comportamento foi observado por Rocha (2019), Castro (2020), Barboza et al. (2022).

Quanto a resistência ao cisalhamento, o aumento devido a inclusão de fibras é relatado por diversos autores (BIANCHINI, 2013; BUENO et al., 1996; GRAY; OHASHI, 1983; SENEZ, 2016). Alguns autores relatam o aumento do ângulo de atrito e do intercepto coesivo com o aumento do teor de fibras (BUENO et al., 1996; GRAY; OHASHI, 1983). Entretanto, outros autores relatam apenas o aumento do intercepto coesivo (CASAGRANDE, 2001; LEOCÁDIO, 2005; TEODORO, 1999; TRINDADE et al., 2006). Há também os que evidenciam somente o aumento do ângulo de atrito (HEINECK, 2002; MARÇAL, 2019; TEODORO, 1999).

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 caminhos preferenciais por onde o fluido possa percolar com maior facilidade (pelas fibras).

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. Este estudo utilizou um solo de cobertura de aterro sanitário, para verificar a influência sobre os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) com a inserção de fibras e se a inclusão de fibras permite a aplicação como solo de cobertura de um aterro sanitário.

2. Metodologia

O solo é oriundo de uma jazida utilizada como material da cobertura final do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC), localizado em Caucaia, na região metropolitana de Fortaleza, Ceará no Nordeste do Brasil. 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).

Para os ensaios envolvendo a mistura solo+fibra (compactação, resistência ao cisalhamento, permeabilidade e MEV), 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.

As propriedades das fibras de polipropileno estão descritas na Tabela 1. As fibras selecionadas para o estudo possuem comprimentos de 6 e 12 mm, como indicado na Figura 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas das fibras de polipropileno.

Propriedades Físicas	Comprimentos
	6 e 12 mm
Diâmetro (μm)	18
Alongamento (%)	80
Massa específica (kN/m^3)	9,1
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 (2016).

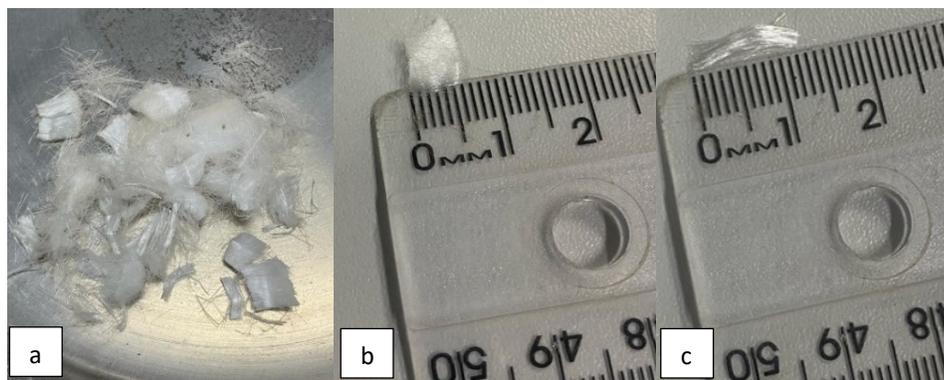


Figura 1 – a) Fibras de polipropileno; b) Fibras de 6 mm; c) Fibras de 12mm.

Fonte: Autores (2024).

2.1 Caracterização geotécnica

Nesse item são apresentadas as caracterizações geotécnicas realizadas no solo e no compósito. A curva granulométrica foi obtida seguindo a NBR 7181 (ABNT, 2016b). A densidade real dos grãos com o uso do picnômetro seguiu o descrito pelo ME 093 (DNER, 1994). Os limites de Atterberg, foram realizados de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 2016c) e NBR 6459 (ABNT, 2016d).

Para a realização dos ensaios de compactação, no solo puro e misturas de solo e fibra, 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 a energia Proctor normal, que prevê o uso de um soquete grande de 4,5 kg, 5 camadas, altura de queda de 0,45 m e aplicação de 12 golpes por camada.

Para realizar 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 dos teores de fibras foi baseada em dados obtidos em trabalhos utilizando misturas solo- fibra (CASAGRANDE, 2005; CASTRO, 2020). Teores muito baixos de fibras não proporcionam ganhos de resistência significativos, teores muito altos provocam dificuldade de homogeneização.

2.2 Ensaios hidromecânicos

Para a realização dos ensaios de permeabilidade utilizou-se um permeâmetro de parede rígida e o ensaio seguiu o método B da NBR 14545 (ABNT, 2021d), pelo solo se tratar de um material com permeabilidade inferior a 10^{-5} m/s. Os corpos de prova foram moldados na energia Proctor normal e no teor de umidade ótimo, obtido por meio do ensaio de compactação. A saturação foi efetuada em fluxo ascendente. Foram realizados ensaios no solo puro e no solo com adição de 0,25%; 0,75% e 1,25% de fibras em relação a massa seca do solo. As amostras foram ensaiadas em triplicatas, onde o fluido percolante utilizado foi a água de abastecimento público.

Para a obtenção dos parâmetros de resistência utilizou-se o procedimento descrito pela D3080-04 (ASTM, 2012). Nos ensaios, utilizou-se o material passante na peneira com abertura de malha de 2 mm (n° 10). A compactação dos corpos de prova foi feita no cilindro pequeno do ensaio de compactação, utilizando a energia Proctor normal e na umidade ótima, seguido pela talhagem das amostras nas dimensões do molde específico para o ensaio de cisalhamento direto, com 0,05 m de diâmetro e 0,02 m de altura. As amostras foram ensaiadas para três cargas, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, com velocidade de cisalhamento de $5,105 \cdot 10^{-6}$ m/s. 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.

2.3 Caracterização mineralógica

Para obter dados sobre a mineralogia e a estrutura do solo estudado, realizaram-se os ensaios de difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura (MEV), respectivamente. A difratometria de raios-x é uma das técnicas fundamentais para a caracterização microestrutural de materiais cristalinos. A amostra submetida a análise foi previamente peneirada na peneira 2,0 mm e colocada na estufa a 105°C para secagem. Utilizou-se 20 g do material em pó. O equipamento utilizado para a análise foi o difratômetro para amostras policristalinas modelo X'Pert Pro – Panalytical. 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 análises foram feitas para as amostras com teores de 0 a 1,25%. O equipamento utilizado foi Microscópio Eletrônico de Varredura com detector EDS modelo TM3000, da marca Hitachi. O ensaio foi realizado para amostras de 5 x 5 mm, utilizando solo puro e misturas de solo+fibra nos teores de 0,50%, 0,75% e 1,25%.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização do solo

Os resultados dos ensaios de caracterização dos solos estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas do solo.

Propriedades	Valores
Densidade real dos grãos, Gs	2,68
Pedregulho (Diâmetro > 4,2 mm)	8,10 %
Areia grossa (0,6 < Diâmetro < 2 mm)	13,30 %
Areia média (0,2 < Diâmetro < 0,6 mm)	8,44 %
Areia fina (0,06 < Diâmetro < 0,2)	24,33 %
Silte (0,002 < Diâmetro < 0,06 mm)	13,37 %
Argila (Diâmetro < 0,002 mm)	16,73 %
Limite de Liquidez	37 %
Limite de Plasticidade	18 %
Índice de Plasticidade	19 %
Peso Específico Aparente Seco Máximo	1,892 g/cm ³
Umidade Ótima	11,83%
Índice de Atividade	1,13
Classificação AASHTO	Solo argiloso (A-6)
Classificação SUCS	Areia argilosa (SC)

Fonte: Autores (2024).

O valor da densidade real define o solo como uma areia siltosa. Por meio da curva granulométrica foi possível realizar 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), pela AASHTO foi classificado como solo argiloso (A-6). Utilizando os resultados dos ensaios dos limites de consistência e consultando a tabela de plasticidade proposta por Atterberg, o solo pode ser classificado como altamente plástico, por possuir um IP >15%.

3.2 Compactação

As curvas de compactação obtidas para o solo natural e para as misturas solo-fibra estão indicadas nas Figuras 2 e 3, para diferentes teores e comprimentos de fibra. Observa-se que as curvas de compactação para as misturas de solo com a fibra 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 (CASTRO, 2020; TRINDADE *et al.*, 2004). Para as misturas de solo com a fibra de 12 mm observou-se uma diminuição na massa específica aparente seca com o aumento do teor de fibras, comportamento similar ao encontrado para a fibra de 6 mm. No entanto, com relação à umidade ótima foi verificada uma diminuição da mesma em relação ao solo puro com o compósito apresentando 0,25% de fibras. Posteriormente foi observado um decréscimo na umidade ótima com o aumento do teor de fibras.

Além disso, foi observado que para todos os teores de fibras, que a mistura de solo com as fibras de 6 mm resultou em valores da massa específica aparente seca mais elevados que para a mistura de solo com as fibras de 12 mm, para os mesmos teores de fibras, com até 1,7% de aumento. O mesmo efeito foi observado com a umidade ótima, exceto para o teor de 1,25% de fibras. Como hipótese pelo fato de as fibras de 12 mm terem o dobro do comprimento das fibras de 6 mm, pode ter havido a formação de vazios maiores. Ao longo da realização dos ensaios foi observado que para a fibra de 12 mm, a homogeneização do solo com fibras foi realizada com maior dificuldade, devido a formação de aglomerados.

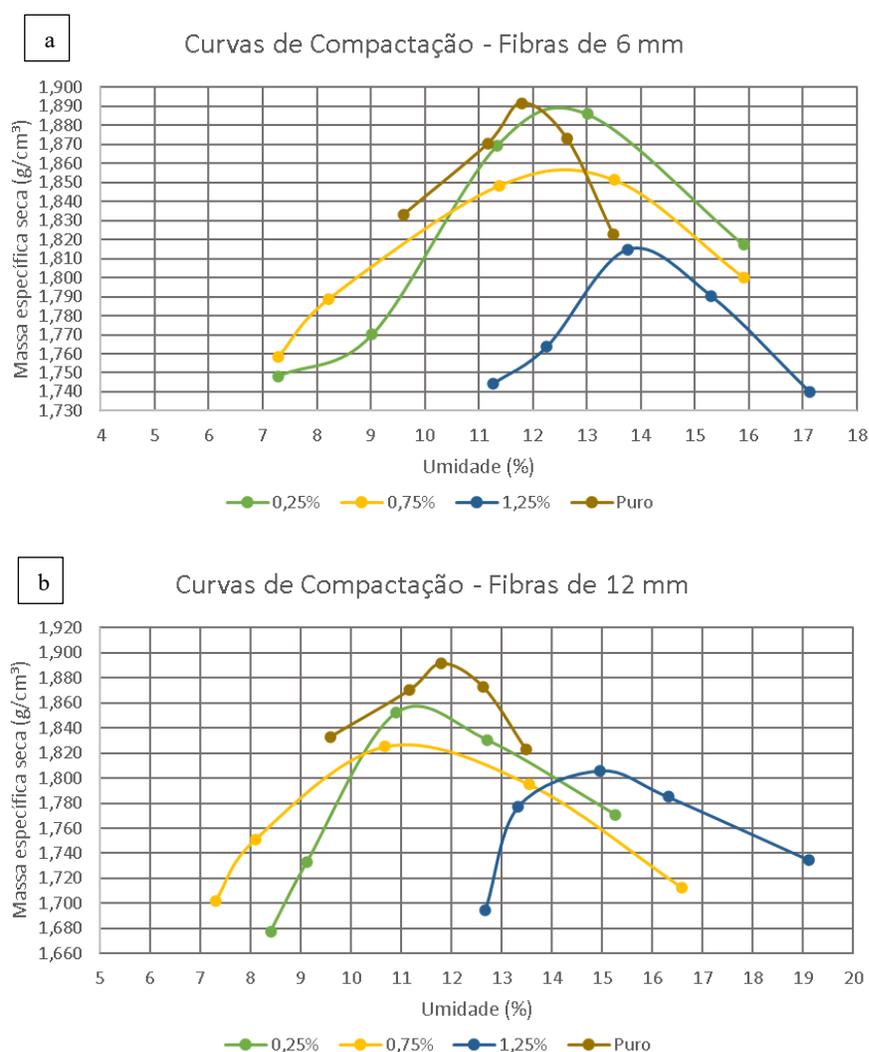


Figura 2 – Curva de compactação; (a) Solos com adição de fibras de 6 mm; (b) Solos com adição de fibras de 12 mm.
Fonte: Autores (2024).

3.3 Permeabilidade

Os coeficientes de permeabilidade obtidos para as misturas de solo+fibras, tiveram comportamento similar ao observado na literatura (BUENO *et al.*, 1996; ISAIAS, 2022; MAHER; HO, 1994), que mostraram um aumento do coeficiente de permeabilidade do compósito, com o aumento do teor de fibras. O solo natural apresentou coeficiente de permeabilidade de $9,8 \cdot 10^{-10}$ m/s e a inclusão de fibras ao solo, para um teor de fibras de 1,25%, aumentou a permeabilidade para $8,2 \cdot 10^{-8}$ m/s, para a fibra de 6 mm, e $4,2 \cdot 10^{-8}$ m/s para a fibra de 12 mm.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos pelos ensaios de permeabilidade, considerando o solo puro e as misturas com diferentes teores e comprimentos de fibra. De acordo com a Figura 4, nota-se que os resultados indicaram que a mistura de solo com fibra de 6 mm resultou em coeficientes de permeabilidade superiores aos obtidos pela mistura de solo com fibra de 12 mm, considerando o mesmo teor de fibras. Como hipótese pode-se admitir que as fibras não são 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. O aumento máximo da

permeabilidade do solo devido a inclusão de fibras foi de quase duas ordens de grandeza, o que pode ter ocorrido em função do surgimento de caminhos preferenciais ao fluxo criados pela fibra, os quais facilitam a passagem de fluidos. Entretanto, é importante destacar que mesmo com o aumento do coeficiente de permeabilidade, o material ainda pode ser utilizado em camadas de cobertura. 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 mais 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.

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 $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Considerando que os valores dos ensaios estão dentro do exigido para solos de forma geral, podemos 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 na Figura 3.

Tabela 3 – Coeficientes de permeabilidade em m/s.

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

Fonte: Autores (2024).

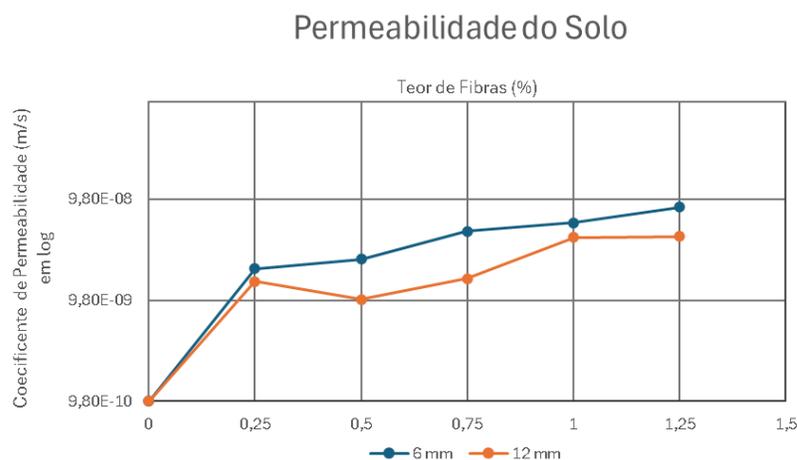


Figura 3 – Permeabilidade do solo com adição de fibras.

Fonte: Autores (2024).

3.4 Resistência ao cisalhamento

A Figura 4 mostra as envoltórias de resistência do solo reforçado, com fibras em diferentes comprimentos. Para o solo misturado com fibra de 6 mm e 12mm, a resistência ao cisalhamento foi maior para o teor de fibras de 1,25%, podendo ser considerado o teor ideal para melhoria da resistência do solo para ambos os comprimentos. 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%.

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., porém, este aumento ou redução da resistência depende da distribuição das fibras na superfície de ruptura do ensaio.

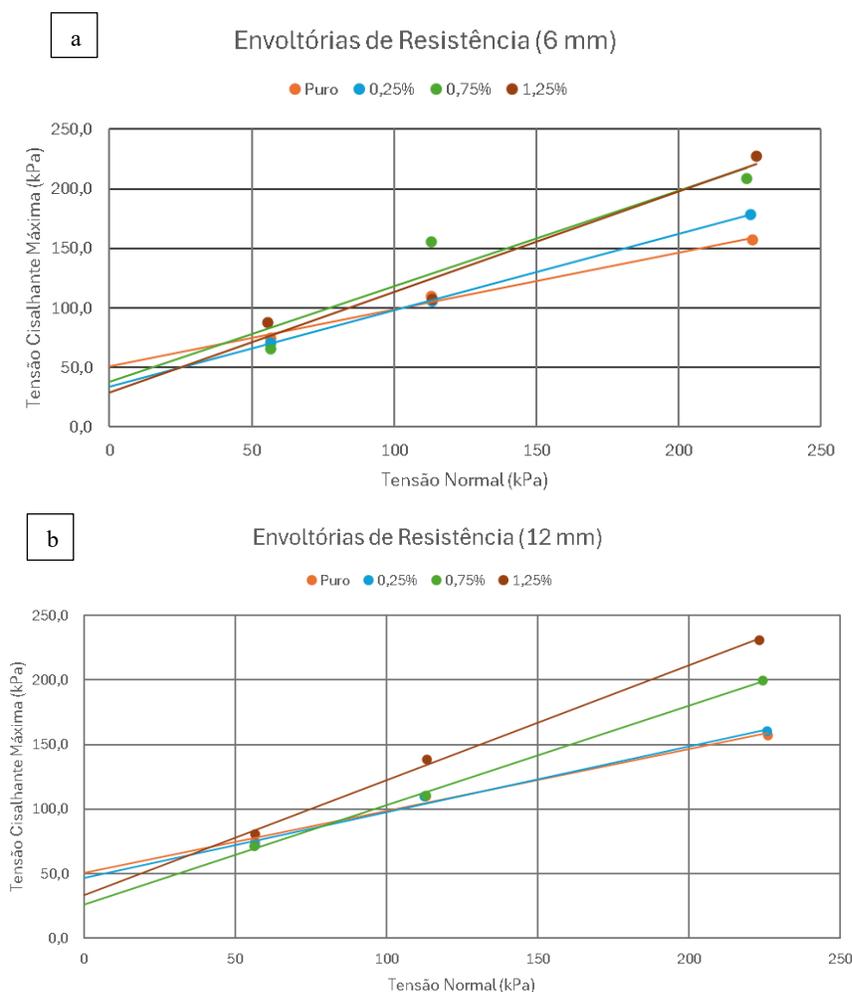


Figura 4 – Envoltória de resistência do solo puro e do solo com adições de fibras; a) fibras de 6 mm; b) fibras de 12 mm.

Fonte: Autores (2024).

A figura 5 (a, b e c) mostram a variação da tensão cisalhante pela deformação horizontal, para as amostras de solo com fibras de 12 mm, nas porcentagens de 0, 0,25, 0,75 e 1,25% submetidas as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. É possível observar a tendência de aumento da tensão de cisalhamento máxima com o aumento do teor de fibras. Observa-se que o acréscimo do teor de fibras um enrijecimento (“strain hardening”), com tensões cisalhamento crescentes com os deslocamentos. Neste caso, o critério de ruptura adotou um deslocamento limite, para permitir as comparações, de 6mm.

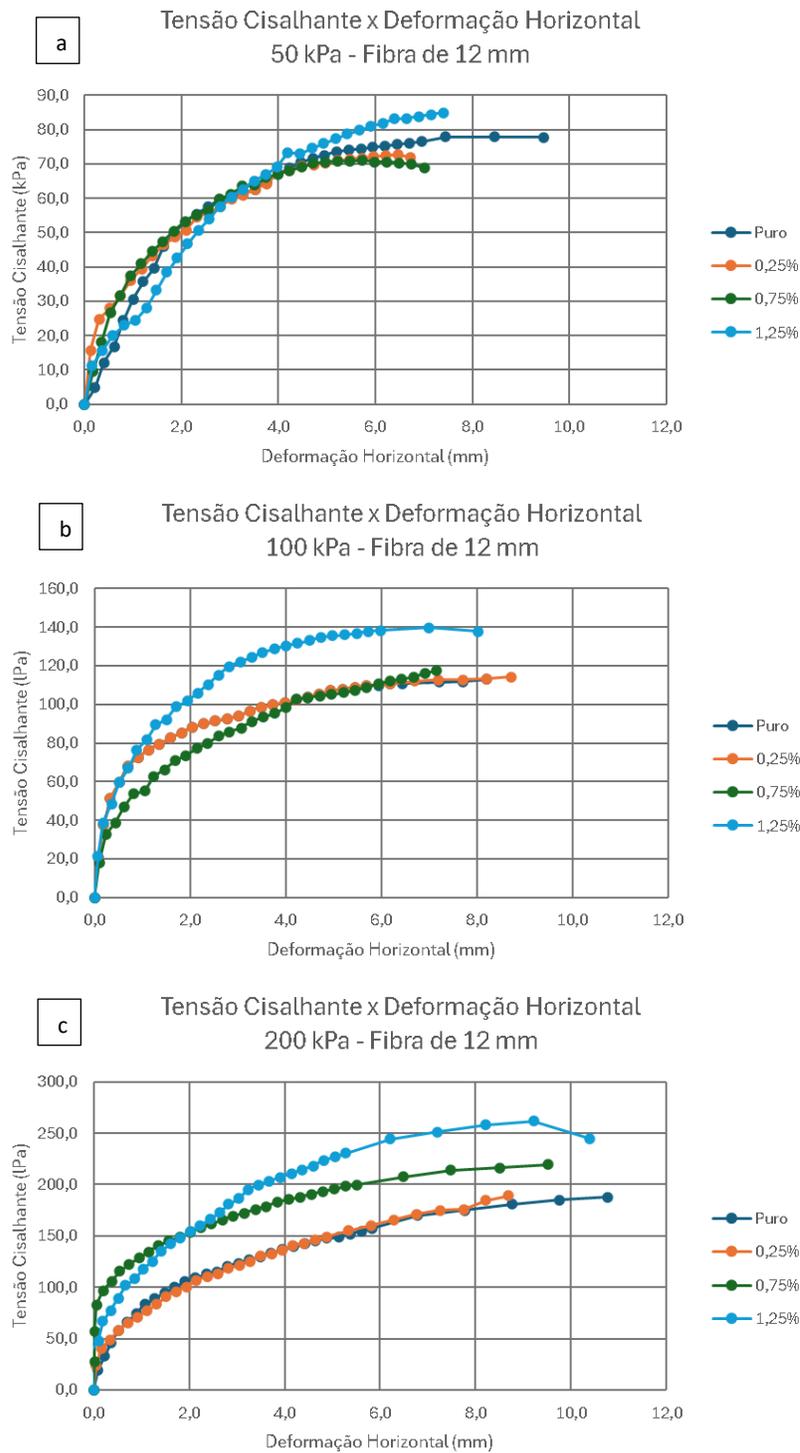


Figura 5 – Comparativo entre as curvas de tensão cisalhante x deformação horizontal do solo puro e do solo com adições de fibras de 12 mm, submetido a tensão normal de; a) 50 kPa; b) 100 kPa; c) 200 kPa.

Fonte: Autores (2024).

Na Tabela 4 estão indicadas as resistências ao cisalhamento para o critério de ruptura adotado no ensaio de cisalhamento direto. Para a mistura de solo com fibra de 6 mm observou-se um aumento da tensão de cisalhamento máxima com o aumento do teor de fibras, atingindo um valor máximo para o teor de fibras de 1,25%. No que diz respeito ao comportamento da mistura de solo com a fibra de 12 mm, houve um aumento da tensão de cisalhamento máxima com o aumento do teor de fibras, atingido o máximo para um teor de fibras de 1,25%. Esses resultados refletem um aumento da resistência do solo com a inclusão de fibras de polipropileno.

Tabela 4 – Resistências alcançadas para a deformação horizontal de 6 mm.

Tensão normal (kPa)	Puro	6 mm			12 mm		
		0,25%	0,75%	1,25%	0,25%	0,75%	1,25%
Tensão cisalhante máx. (kPa)							
50	74,8	70,7	65,6	87,5	72,1	71,1	80,9
100	109,9	105,5	155,2	107,4	109,6	110,7	138,2
200	157,3	178,5	208,8	227,1	160,1	199,5	230,6

Fonte: Autores (2024).

Na Figura 6 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. Na Figura 7 observamos que há uma tendência de aumento do ângulo de atrito com a inclusão de fibras. O aumento do ângulo de atrito e a diminuição do intercepto coesivo também foi relatado por Marçal (2019). Heineck (2002)) evidenciou em seu trabalho que o acréscimo de fibras contribuiu somente para o aumento do ângulo de atrito.

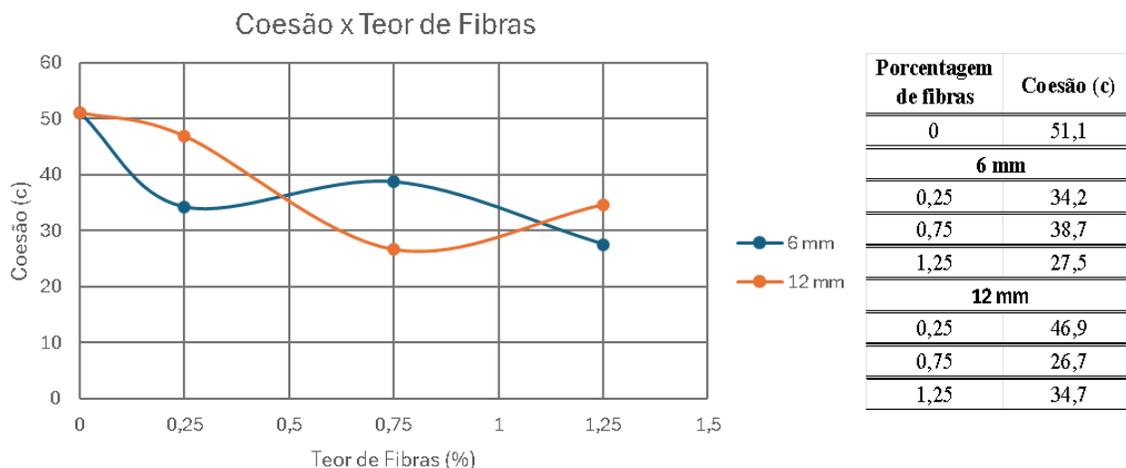
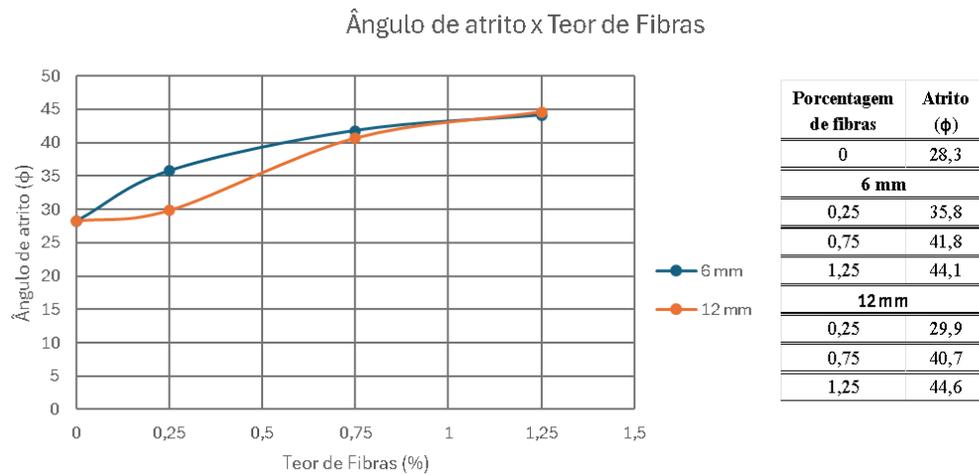


Figura 6 – Coesão x Teor de fibras.

Fonte: Autores (2024).



*Figura 7 – Ângulo de atrito x Teor de fibras.
Fonte: Autores (2024).*

Ao analisar a influência do comprimento das fibras sobre a resistência, para os teores de fibras de 0,25 e 0,75% (Figura 8- a e Figura 8- b), observou-se uma tendência da mistura com a fibra de 6mm apresentar uma resistência mais elevada do que a mistura com fibra de 12mm. Para o teor de fibras de 1,25% (Figura 8- c) a mistura de solo com as fibras de 12 mm, em geral apresentou maior tensão cisalhante máxima, exceto para a tensão de 50 kPa, que foi similar a mistura de solo com fibras de 6 mm. Portanto, tem-se que as misturas com maior ganho de resistência foram as com adição de 1,25% de fibras, para ambos os comprimentos.

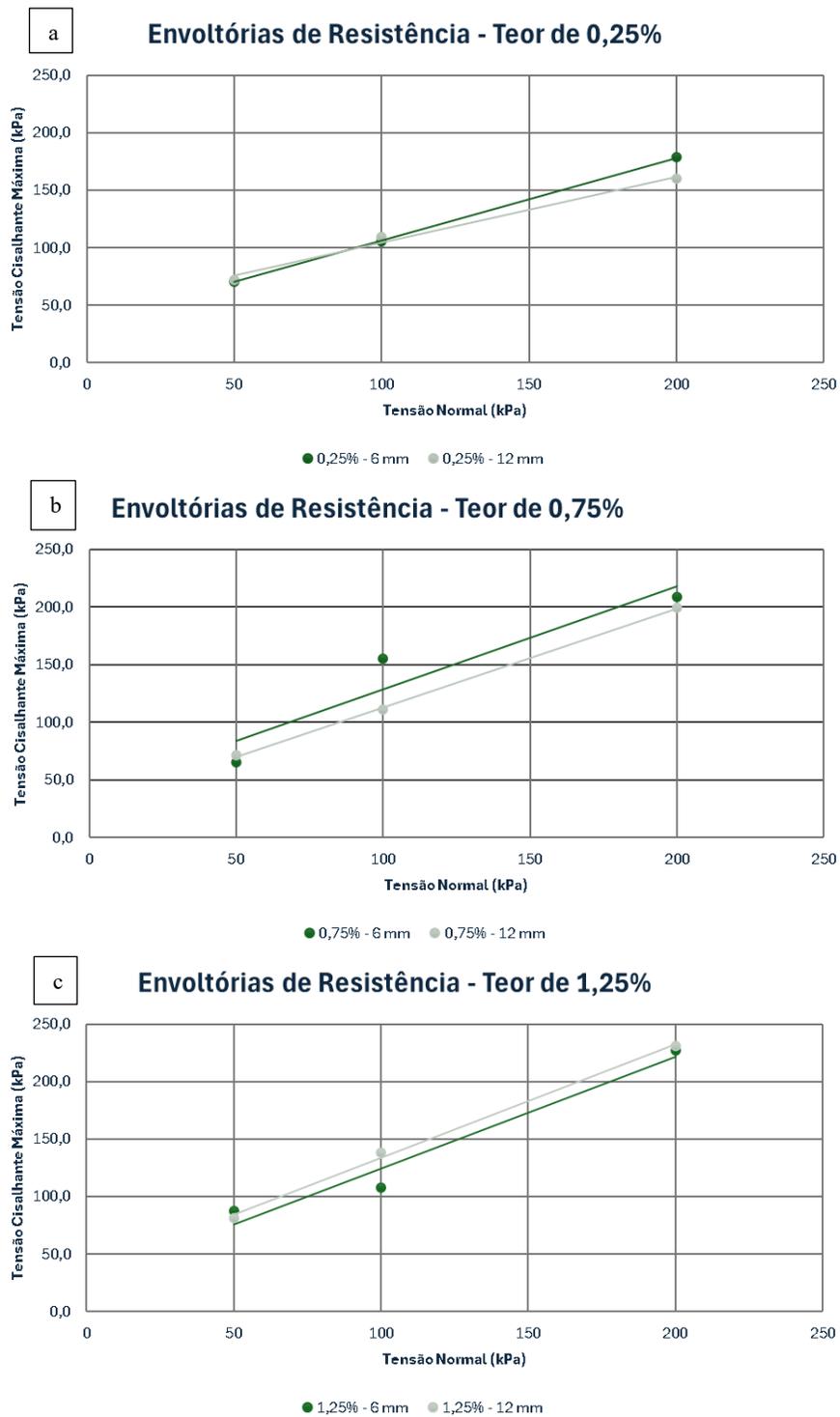


Figura 8 – Envoltórias de resistência; a) teor de 0,25%; b) teor de 0,75%; c) teor de 1,25%.
 Fonte: Autores (2024).

3.5 Difração de raios-x e Microscopia eletrônica de varredura

Os resultados do ensaio de difração de raios-x permitiram identificar que o solo possui uma fração predominante de argilomineral caulínico, com porcentagem de areia e silte, podendo haver a presença de quartzo e feldspato.

Por meio da microscopia eletrônica de varredura foi possível observar as características morfológicas do solo e das misturas de solo com fibras, para tentar compreender a estrutura, textura e a adesão entre os materiais. A Figura 9 apresenta a microscopia do solo puro compactado com um aumento de 200x, na qual podemos observar as aglomerações das partículas e partículas esféricas.

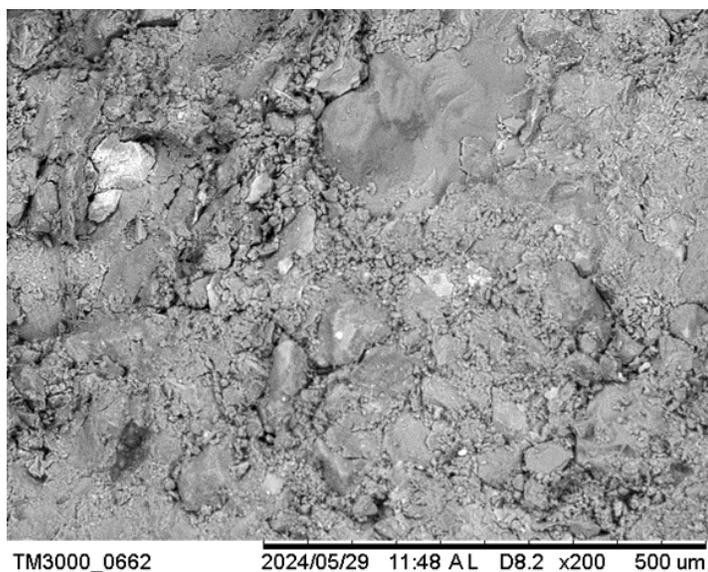


Figura 9 – Microscopia eletrônica do solo puro.
Fonte: Autores (2024).

Os resultados dos ensaios indicaram que para teores inferiores ao ideal (0,75%, para a fibra de 6 mm e 1,25% para a fibra de 12 mm) com relação a aumento de resistência, a interação entre as fibras e o solo não ocorre de forma adequada, sendo possível observar, tanto para misturas de solo com fibras de 6 mm quanto de 12 mm, a presença de vazios, como pode ser observado na figura 9, com aumento de 100x.

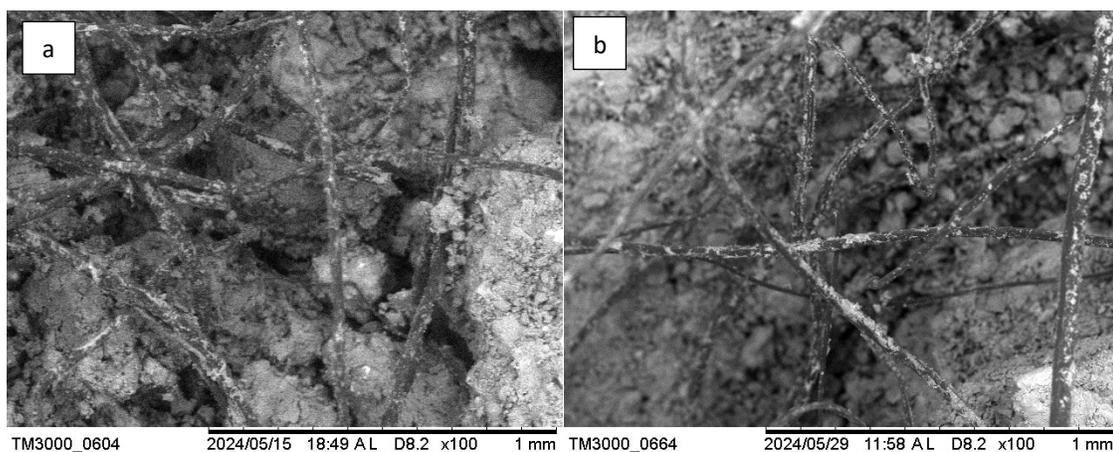


Figura 10 – Microscopia eletrônica de amostras de solo+fibra no teor de 0,50%; a) 6 mm; b) 12 mm.
Fonte: Autores (2024).

Para ambos os comprimentos de fibras (6 e 12 mm) os teores ótimos de fibras, ou seja, em que foram observadas as maiores resistências, foram de 1,25%. Para esse teor, nota-se uma maior adesão solo-fibra, como pode ser observado nas figuras abaixo.

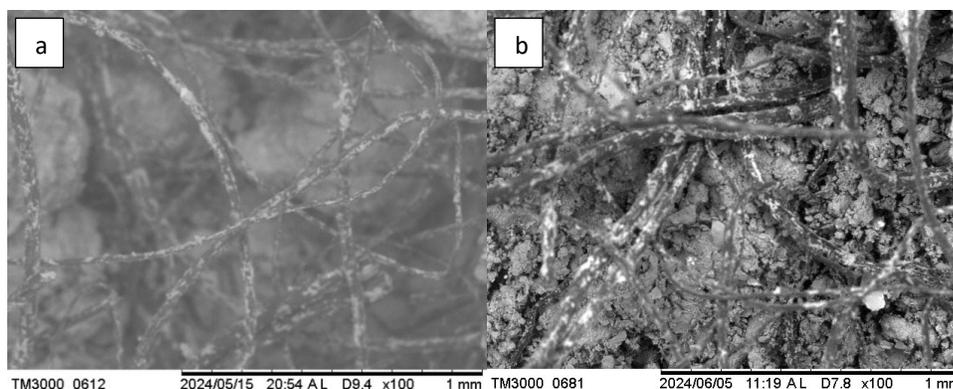


Figura 11 – Microscopia eletrônica de varredura; a) amostra com teor de 1,25% e 6 mm de comprimento; b) amostra com teor de 1,25% e 12 mm de comprimento.

Fonte: Autores (2024).

Com relação ao teor de fibra, não é possível ser conclusivo sobre as modificações da estrutura com o aumento do teor de fibras, 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.

4. Considerações finais

Este trabalho apresentou resultados de propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso utilizado como cobertura de aterro sanitário misturado com fibras de polipropileno. A inclusão das fibras aumentou a resistência do solo em relação ao solo natural, sendo crescente com o aumento do teor de fibras. Com relação a permeabilidade, a inclusão de fibras levou ao aumento da permeabilidade do solo, que pode estar relacionado à diminuição da massa específica aparente seca da mistura, observado nos ensaios de compactação, e ao surgimento de caminhos preferências de fluxo pela inserção da fibra, os quais facilitam a passagem de fluidos. Observou-se que o aumento da permeabilidade, para um mesmo teor de fibras, foi maior na fibra de 6mm. Ao trabalhar com as fibras de 12 mm, foi observado uma maior dificuldade de homogeneização quando comparado as fibras de 6 mm. Este comportamento foi observado principalmente para teores maiores de fibras, 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 formação espalhamento ao longo do solo de caminhos de fluxo pelos aglomerados de fibras. Esse aumento na permeabilidade observado nos compósitos, não inviabiliza o uso do material como cobertura de aterros de resíduos, pois atinge valores adequados para utilização da camada com esse fim (citar uma referência pelo menos), além de obter um compósito com maior resistência para suportar as solicitações em campo.

O ensaio de resistência ao cisalhamento indicou a existência do teor ótimo de fibra, que o compósito exibiu o maior aumento de resistência, para ambos os comprimentos. Para ambos os comprimentos de fibra o teor ideal foi de 1,25%. Além disso, a inclusão de fibras gerou uma tendência de redução inicial do intercepto coesivo em relação ao solo natural, seguido de um leve aumento, para os dois comprimentos. O ângulo de atrito mostrou uma tendência de elevação com o aumento do teor de fibras. Para os dois comprimentos, o ângulo de atrito foi superior ao do solo puro, sendo a parâmetro de resistência responsável pelo aumento da resistência do compósito em relação ao solo natural.

Ao analisar a microscopia eletrônica de varredura foi possível identificar diferenças na adesão solo fibra com diferentes teores de fibras. Nos teores de 1,25% para ambos os comprimentos 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. Times New Roman (10), justificado, com espaçamento simples e recuo da primeira linha (Especial) de 0,5cm.

Agradecimentos

À FUNCAP e à CAPES pelo apoio financeiro que possibilitou a realização desta pesquisa.

Referências

- 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.
- 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; PELIZZOLI, Luigi Nascimento; FRAGOMENI, Luiza Keller; PACHECO, Lysiane Menezes; FLORIANO, Cleber de Freitas. 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.
- BIANCHINI, Micheli Kaufmann. *Estudo da resistência ao cisalhamento de um solo argilo-arenoso com a inclusão de fibras de polipropileno*. 2013. 92 f. Dissertação (Mestrado) - 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*. In: Third International Symposium on Environmental Geotechnolgy, 1996, San Diego-USA. *Anais*, 1996. v. I. p. 878-884.
- 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.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *ME 093: Solos - Determinação da densidade real*. Brasília, 1994. 4 p.
- 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.
- GRAY, Donald H.; OHASHI, Harukazu. *Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand*. Journal Of Geotechnical Engineering, v. 109, n. 3, p. 335-353, mar. 1983.
- 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.
- 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*, 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>.
- 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.
- 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*, 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)).
- 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.
- 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.
- NOURI, Hesam Haji Hosseini; SHAHROUZI, Mohsen. Experimental evaluation of compressive strength of steel fiber reinforced soil. *Journal Of Engineering Sciences And Innovation*, v. 6, n. 2, p. 121-136, maio 2021.
- 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.
- 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*, v. 14, p. 1-27, jun. 2021. Disponível em: <https://doi-org.ez11.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.cscm.2020.e00485>. Acesso em: 4 abr. 2024.

- 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, Larissa Santos da; ANJOS, Rafaella Oliveira dos; SOBRAL, Anderson da Conceição Santos. *Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE*, v. 7, n. 1, p. 11–30, 2021. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/10327>. Acesso em: 27 mar. 2024.
- 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.
- 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 Pagliari Valerio dos; DEMETRIO, Leonardo; FRANÇA, Maria Júlia Ibidi Limongi; LAVOIE, Fernando Luiz; SCHEFFER, Daniel Kashiwamura. Avaliação de Resultados de Ensaios 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.
- 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.
- 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 AMBIENTAL, 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.
- 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*, v. 22, n. 10, p. 2384-2395, 26 mar. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2020.1746387>.
- TALEB, Talal; UNSEVER, Yesim S.. Study on Strength and Swell Behavioral Change and Properties of the Clay–Fiber Mixtures. *Sustainability*, v. 14, n. 11, p. 6767, 1 jun. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su14116767>.
- 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.
- 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*, 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.

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*, 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>.