

Comportamento Mecânico de um Solo Tropical Reforçado com Resíduos Têxteis

Mayara Luana de Jesus Santos 1

Doutoranda, Universidade de Brasília, Brasília/DF, Brasil, mayaraluana.ml@gmail.com

Juliana Rangel de Moraes Pimentel 2

Doutoranda, Universidade de Brasília, Brasília/DF, Brasil, jrangel.eng@gmail.com

Kássio Gomes Fialho 3

Mestrando, Universidade de Brasília, Brasília/DF, Brasil, kassiogf@hotmail.com

Arthur Henrique Moizinho 4

Mestrando, Universidade de Brasília, Brasília/DF, Brasil, ahmoizinho@hotmail.com

Michéle Dal Toé Casagrande 5

Professora Titular, Universidade de Brasília, Brasília/DF, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

RESUMO: A indústria têxtil, de vestuário e moda, juntas, motivadas pelo conceito “*fast fashion*”, fabricam toneladas de roupas por ano, e, pelo descarte indiscriminado dessas peças em lixões a céu aberto, vem provocando prejuízos ambientais e sociais no mundo todo. Nesse sentido, estudiosos de diversas áreas do conhecimento vêm se dedicando a encontrar novas soluções de mitigação desse problema. Uma dessas áreas é a geotecnia ambiental, que contribui com pesquisas que envolvem o uso de materiais alternativos como materiais para reforço de solos, como é o caso das fibras têxteis, visando a melhoria do comportamento mecânico do solo. O presente estudo realizou ensaios mecânicos de compactação e de resistência à compressão não confinada, com análises microestruturais, em corpos de prova moldados com solo tropical e resíduos têxteis, de composição de fibras 100% algodão, coletados a partir de roupas e tecidos oriundos de descartes de confecções localizadas no Polo de Moda do Distrito Federal, no intuito de se observar a influência dessa fibra têxtil, seus teores o comprimento dessas fibras quando misturadas ao solo. Foram obtidos resultados satisfatórios nos compósitos solo-fibras têxteis, obtendo-se o aumento de resistência de pico e a queda de resistência pós-pico nos compósitos estudados.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos têxteis, Fibras de algodão, Resistência à compressão não confinada Geotecnia ambiental.

ABSTRACT: The textile apparel and fashion industries, driven by the concept of fast fashion, collectively manufacture tons of clothing per year. Due to the indiscriminate disposal of these garments in open landfills, they have been causing environmental and social damages worldwide. In this regard, scholars from various fields of knowledge have been dedicated to finding new solutions to mitigate this problem. One of these areas is environmental geotechnics, which contributes to research involving the use of alternative materials such as textile fibers for soil reinforcement, aiming to improve the mechanical behavior of the soil. This study conducted mechanical tests of compaction and unconfined compressive strength, with analyses of the failure plane, on specimens molded with tropical soil and textile waste composed of 100% cotton fibers. These fibers were collected from clothing and fabrics discarded by manufacturers located in the Fashion Hub of the Federal District. The aim was to observe the influence of these textile fibers, their content, and length when mixed with the soil. Satisfactory results were obtained in the soil-textile fiber composites, showing an increase in peak strength and a decrease in post-peak strength in the studied composites.

KEYWORDS: Textile waste, Cotton fibers, Unconfined compressive strength, Environmental geotechnics.

1 INTRODUÇÃO

Dados anunciados pela Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção apontou que o Brasil foi classificado como o quarto maior produtor global de vestuário e o quinto em manufatura têxtil. Os dados revelaram ainda, que o país abrigava mais de 32 mil empresas, sendo que mais de 80% delas eram confecções de pequeno e médio porte, distribuídas em todo o território nacional. Além disso, o Brasil é considerado um dos cinco maiores produtores mundiais da fibra natural mais consumida no mundo, o algodão. Cerca de 60% dessa fibra é destinada à produção de peças de vestuário (ABIT, 2020).

Essa grande produção de peças de vestuário pode ocasionar efeitos nocivos à sociedade, pois se atrelada a uma má gestão de resíduos, pode provocar impactos negativos tanto no meio ambiente quanto na saúde pública. A ausência de um sistema eficaz de logística reversa apresenta uma série de desafios, exigindo planejamento e tomada de decisões, como garantir uma cobertura adequada das coletas, determinar destinos finais específicos para esses resíduos, adotar práticas sustentáveis eficientes, demonstrar interesse em utilizar matérias-primas secundárias, bem como realizar investimentos adequados e disponibilizar recursos necessários para os processos (ABRELPE, 2022). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei 12.305/2010, regula a prática da logística reversa. Essa política se fundamenta na obrigação legal de os geradores de resíduos garantirem sua destinação final correta após o consumo, permitindo seu retorno ao início da cadeia produtiva. Além disso, a PNRS aborda o papel do poder público, que tem responsabilidades definidas, e promove acordos setoriais entre entidades públicas e privadas para garantir o cumprimento das obrigações legais. No entanto, há lacunas nesses acordos que, de certa forma, transferem ao consumidor a responsabilidade pela coleta, o que pode ser problemático.

Por isso, se faz necessário explorar alternativas para a destinação ou reutilização desses resíduos, uma vez que frequentemente são descartados de forma indevida em aterros sanitários ou em lixões a céu aberto, devido à falta de opções adequadas para seu destino final. Nesse sentido, a pesquisa por novos materiais geotécnicos tem como um de seus principais objetivos viabilizar o uso de materiais com potencial significativo, porém subutilizados, para a construção de obras de terra, além de outros propósitos.

Segundo Pereira (2009), a indústria têxtil faz uso de uma variedade de fibras naturais de origem vegetal, animal e mineral, além de fibras manufaturadas artificiais e sintéticas. De acordo com Taylor (2013), o uso de fibras é uma alternativa viável, apresentando um desempenho satisfatório quando empregadas como reforço de solo. Elas têm a capacidade de absorver energia de forma eficiente, o que resulta em um aumento na resistência e rigidez do material compósito, além de reduzir a formação e espaçamento de fissuras. O verdadeiro potencial dos materiais compósitos fibrosos é alcançado após o ponto de pico, quando as fibras desempenham um papel crucial no aumento da resistência do material e, conseqüentemente, na capacidade de absorção de energia (Casagrande, 2005).

Este artigo tem como objetivo realizar uma análise abrangente do comportamento de compósitos compostos por solo tropical, fortalecidos com fibras de algodão provenientes de resíduos têxteis. Essas fibras são dispersas de maneira aleatória dentro da matriz de solo seco. O estudo visa aprofundar a compreensão sobre como essas fibras influenciam as propriedades mecânicas dos compósitos, com o propósito de explorar amplamente seu potencial como uma alternativa eficaz de reforço para o solo, além de se apresentar como uma solução viável para reduzir o descarte inadequado de resíduos têxteis.

2 RESÍDUOS TÊXTEIS

Resíduo têxtil é o produto de descarte de todo material sólido produzido pela indústria têxtil, de vestuário e moda. No Brasil, segundo estudo sobre viabilidade de resíduos têxteis, aproximadamente 170 mil toneladas desses resíduos são geradas todos os anos por esses segmentos,. Esse mesma pesquisa também mostrou que apenas 20% desses resíduos são reciclados, sendo os 80% restantes destinados para aterros sanitários ou descartados inadequadamente (SEBRAE, 2023).

Esses resíduos têxteis chegam nos aterros sanitários, em sua maioria, sob a forma de peças de vestuário, apresentando em suas composições misturas de matérias-primas diversas, como o algodão, a viscose, o poliéster, a poliamida e o elastano, por exemplo. Dentre esses componentes têxteis, o algodão se destaca por ser o principal insumo na fabricação do tecido denim, que é utilizado na confecção de peças de roupas jeans, fazendo com que o Brasil ocupe posições entre os cinco maiores produtores e consumidores desse tecido (ABIT, 2023).

2.1 Fibras, Fios e Tecidos de composição 100% Algodão

Fibra têxtil é um termo genérico para se referir a materiais de origem natural ou manufaturada, que são utilizados para fins têxteis. A escolha desses materiais depende, principalmente, de características físicas como comprimento, espessura, resistência, absorção e alongamento. Esse conhecimento auxilia no processo de fabricação de artigos têxteis que se deseja produzir, para atender a uma determinada finalidade (Aguiar Neto, 1996).

Conforme Echer (2022), dentre as fibras naturais, o algodão representa cerca de 97% da matéria-prima consumida pela indústria têxtil brasileira. Ela é extraída da semente (capulho) de uma planta de mesmo nome, e, por isso, deve ser classificada como uma fibra natural vegetal. O tipo de solo, a região de cultivo e o clima propício para o seu plantio são fatores determinantes para a qualidade de suas características físicas (ABRAPA, 2015).

Já os fios têxteis são definidos como um conjunto de fibras paralelizadas, distribuídas ao longo de seu comprimento e torcidas entre si. Essa distribuição de massa ao longo do comprimento representa a espessura de um fio (Aguiar Neto, 1996; Garcia, 1995). Esses fios quando possuem em sua composição 100% fibras de algodão são formados por meio de operações indispensáveis que vão desde a limpeza, a abertura e a homogeneização dessa matéria-prima fibrosa, passando por uma regularização e redução de massa por unidade de comprimento, até a coesão linear dessas fibras (Araújo & Castro, 1986).

Na sequência, têm-se os tecidos, que são produtos gerados pelo processo de tecelagem, a partir do entrelaçamento de fios, por meio de mecanismos sincronizados de maquinários específicos denominados de tear. Dentre os tipos de tecido existentes, os mais utilizados na confecção de peças de roupa são os planos e os de malha. Os fios utilizados na fabricação dos tecidos planos, geralmente, são mais resistentes que os fios utilizados na fabricação dos tecidos de malha, por apresentarem maiores torções. Os tecidos planos de composição 100% algodão mais consumidos pelo segmento de vestuário são denim, brim, tricoline e cambraia (Araújo & Castro, 1986; Ribeiro, 1984).

Assim, o Brasil, com essa verticalização da cadeia produtiva têxtil e de vestuário, que se inicia com a seleção de matéria-prima fibrosa, passando pelos processos de fiação, tecelagem e beneficiamento, até chegar à indústria de confecção, se classifica como um dos maiores produtores mundiais dos setores têxtil e confeccionista, destacando-se como um importante produtor de tecidos denim e malha. Apesar desses setores serem altamente lucrativos, a cadeia produtiva têxtil gera impactos consideráveis ao meio ambiente. Particularmente, a porção final dessa cadeia é problemática: toneladas de resíduos têxteis são descartadas diariamente nos grandes polos têxteis e confeccionistas do país. Esse acúmulo de resíduos é um grande problema para agências governamentais e particulares que gerenciam o resíduo urbano. Uma maneira de mitigar essa situação é a reutilização e reciclagem têxtil (SEBRAE, 2023).

Como resultado disso, têm-se que a indústria têxtil é o segundo maior poluente do mundo devido as poucas técnicas de reutilização e reciclagem que acarretam grandes impactos ambientais. Um dos problemas ambientais dominantes para a indústria do vestuário é a produção de resíduos durante os processos de corte. Embora todos os sistemas contemporâneos de gestão de resíduos considerem o aterro a pior opção, essa continua sendo a forma preferida de remoção e descarte desses resíduos têxteis (Velicko *et al.*, 2020). Além disso, os estudos recentemente mostraram que a reutilização e a reciclagem de têxteis (Figura 1) em geral podem reduzir o impacto ambiental em comparação com a incineração e a destinação aos aterros (Sandin & Peters, 2018; Zhang *et al.*, 2018; Yousef *et al.*, 2019).



Figura 1. Produção de estopa a partir de resíduo têxtil de composição 100% algodão (SEBRAE, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa de testes estabelecido para os ensaios realizados nos corpos de prova solo-fibras teve como objetivo principal examinar e determinar como a inclusão de fibras de resíduos têxteis, 100% algodão, afeta as propriedades mecânicas de um solo tropical laterítico argiloso. Por conseguinte, foi elaborado um plano experimental dividido em duas fases distintas:

- I. A primeira fase se concentrou na análise das características físicas e na caracterização do solo;
- II. Na segunda fase, foi conduzido um estudo sobre o comportamento mecânico dos materiais por meio de testes laboratoriais de ensaios de compressão não confinada em compósitos solo-fibras de resíduos têxteis, com a velocidade da prensa de 1,27 mm/mm, conforme a NBR 12770 (ABNT, 2022).

Foram fabricados corpos de prova utilizando moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro, os quais continham diferentes teores de fibras variando de 0,5%, 1,0% e 2,0% em relação ao peso do solo seco. Adicionalmente, foram produzidos corpos de prova sem adição de fibras para fins de comparação. Para fim de reprodutibilidade, foram feitos três corpos para cada teor de fibra, totalizando 9 corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão não confinada.

O processo de confecção dos corpos de prova seguiu 4 etapas:

- a) Foi pesado e separado a quantidade de solo seco, das fibras de resíduos têxteis e da água de acordo com o teor a ser analisado;
- b) Foi realizada a mistura do solo seco com as fibras de resíduos têxteis em um recipiente, a água é adicionada aos poucos no processo de mistura;
- c) A mistura foi adicionada ao cilindro para a realização da compactação dos corpos de provas;
- d) Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão não confinada.

As figuras abaixo apresentam o processo de confecção dos corpos de prova.

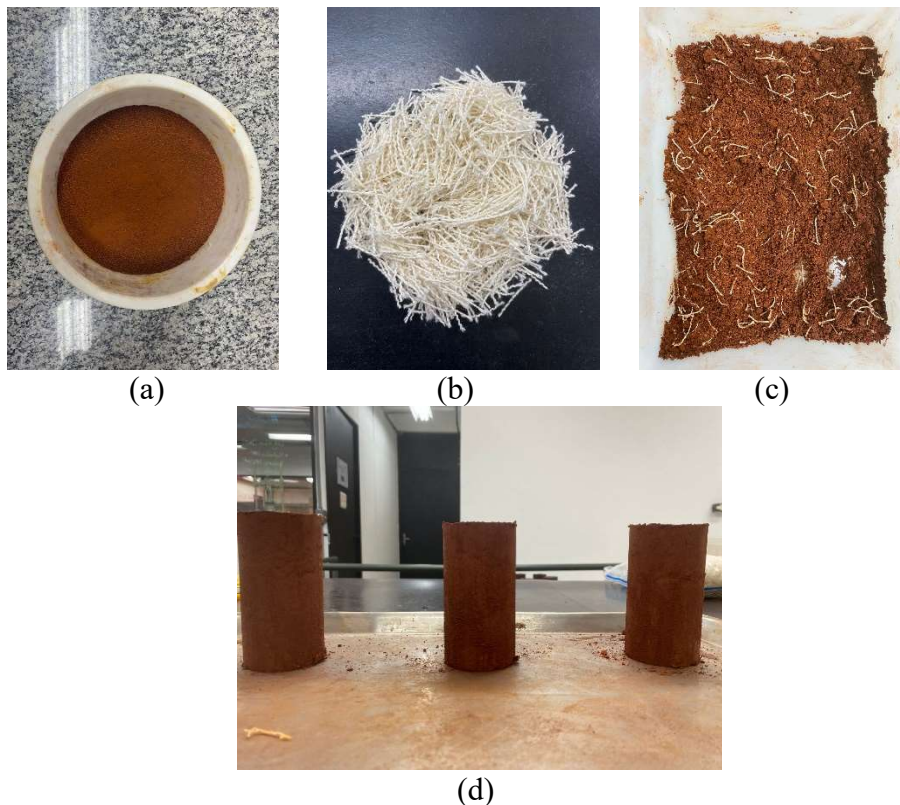


Figura 2. (a) Solo tropical laterítico argiloso. (b) Fibras de algodão obtidas a partir de resíduos têxteis. (c) Mistura solo-fibras. (d) Corpos de prova solo-fibras.

4 RESULTADOS

4.1 Solo Tropical Argiloso

Foi encontrada uma densidade relativa dos grãos (GS) do solo puro sem adição de fibras de 2,69. Os valores obtidos para o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP) foram de 42% e 27%, respectivamente, resultando em um Índice de Plasticidade (IP) calculado de 15, o que caracteriza um solo com uma plasticidade de média a alta. A análise granulométrica revelou que o solo consiste em 41,3% de argila, 34,5% de areia e 24,2% de silte, conforme demonstrado na Figura 3. Classificado como ML de acordo com a classificação SUCS, o solo é identificado como um tipo de silte com baixa compressibilidade. E, seguindo a classificação AASHTO, pertence ao grupo A-7-6, caracterizado por um comportamento considerado limitado a inadequado para uso como camada de suporte. Além disso, com base nos estudos de Carvalho (2019), é classificado como LG', indicando um solo laterítico argiloso de acordo com a classificação MCT. Esses solos apresentam alta capacidade de suporte, baixa expansão e média a alta contração, além de baixa permeabilidade.

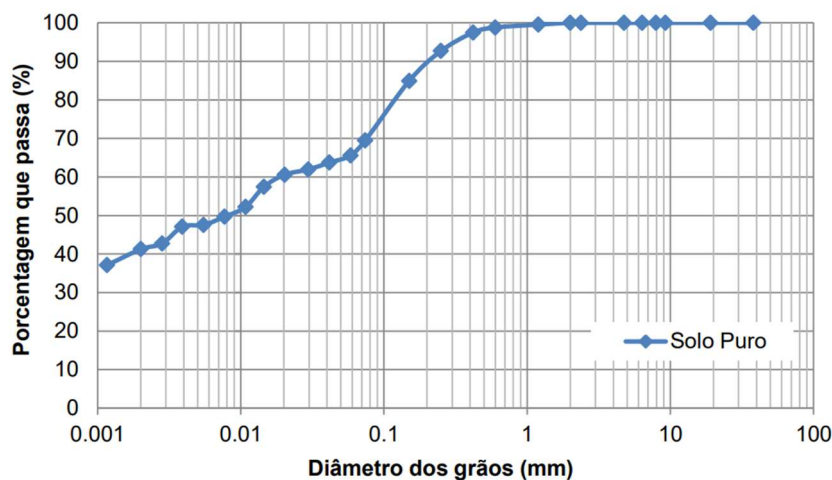


Figura 3. Análise granulométrica feita no solo sem adição de fibras.

4.2 Resistência à Compressão Simples de Solo Reforçado com Fibras de Resíduos Têxteis

A Figura 4, é possível observar as curvas tensão-deformação obtidas com os resultados do ensaio de resistência à compressão simples do solo puro e solos-fibra com 0,5%, 1,0% e 2,0% de fibras de resíduos têxteis de algodão cru. Em todos os três casos, foi constatado que ocorreu aumento da tensão máxima suportada pelo corpo de prova. O solo reforçado com 0,5% de fibras apresentou a resistência máxima de 168,82 kPa, um aumento em relação aos 148,49 kPa do solo puro, resultando em uma resistência de pico do compósito de 114% do solo sem reforço. Já o compósito solo-fibra com adição de 1%, teve um aumento ainda maior, chegando a 230,64 kPa, resultando em uma resistência de pico de 155% do solo puro. E, elevando ainda mais a carga suportada, o compósito com 2% de massa em fibra, apresentou 297,25 kPa de tensão máxima atingida, o que mostra uma resistência de pico de 200% do solo sem nenhuma adição de fibra.

Ainda em relação as curvas de tensão-deformação, percebeu-se, também, que ocorreu uma variação nas deformações dos quando se adicionou as fibras. O solo puro teve uma deformação na tensão de pico de 2,25%, já os compósitos com 0,5% e 1,0%, apresentaram um pequeno aumento da deformação da tensão de pico foi de 2,51% e 2,40%, respectivamente. E para o solo reforçado com 2,0% de fibra teve um considerável aumento na deformação, chegando ao valor 5,10% na tensão de pico, mais que o dobro do solo sem reforço.

Outro parâmetro muito afetado pela adição das fibras de resíduos têxteis foi a resistência pós-pico. No solo sem reforço foi observado que ocorre uma queda na resistência após a ruptura, chegando a valores menores que 50kPa de tensão suportada. Já nos solos reforçados a resistência pós-pico não apresenta uma queda significativa, mantendo grande parte da resistência após a ruptura. O efeito de conservação da resistência de pico é mais evidente no compósito solo-fibra com 2,0%, onde se observa que mesmo com 6,0% de deformação o corpo de prova ainda suporta 284 kPa de compressão. Os solos reforçados com 1,0% e 0,5% de

fibra quando chegam a 6,0% de deformação, apresentem 173kPa e 126kPa de resistência a compressão, respectivamente.

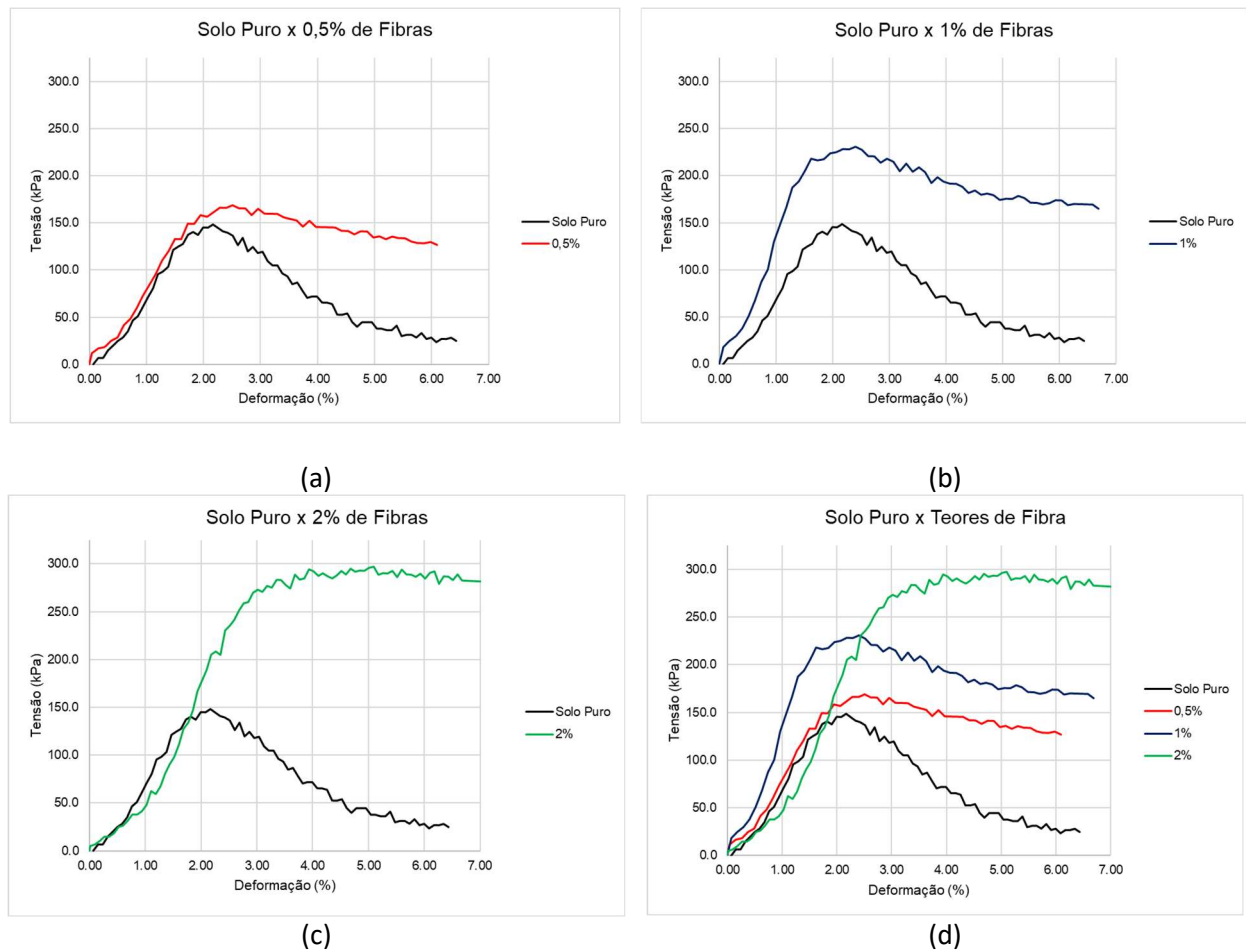


Figura 4. Curvas tensão-deformação para corpos de prova de solo puro e com fibras de resíduos têxteis: (a) 0,5% de fibra; (b) 1,0% de fibra; (c) 2,0% de fibra; (d) comparação entre todas as porcentagens de fibra.

A Figura 5 apresenta como o corpo de prova sem reforço se despedaçou após a ruptura, demonstrando a perda de resistência, já os corpos de prova que foram reforçados com fibras de resíduos têxteis, mesmo com grande deformação, ainda se mantêm unidos. Além disso, percebe-se a mudança no modo de ruptura que dos compostos não reforçados e reforçados com os teores de resíduo têxtil de algodão.

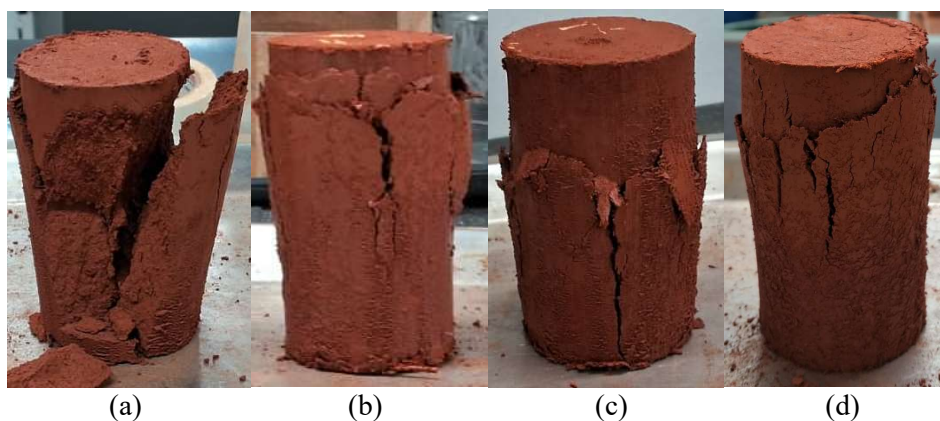


Figura 5. Formas de ruptura dos corpos de prova do: (a) solo natural sem reforço, (b) solo reforçado com 0,5% de fibra, (c) solo reforçado com 1,0% de fibra e (d) solo reforçado com 2,0% de fibra.

5 CONCLUSÃO

Foi observado que a adição de resíduos têxteis de composição 100% algodão em um solo residual laterítico apresenta um resultado satisfatório, melhorando a resistência a compressão simples máxima suportada pelo solo. Constata-se, também, que o compósito solo-fibra apresentou uma melhora na resistência pós-pico em relação ao solo sem reforço, mantendo-se com valores perto da resistência máxima, mesmo após a ruptura. Dessa forma, entende-se que esse material fibroso pode ter um bom indicativo de contribuição positiva para o uso como reforço de solo em obras geotécnicas, de forma técnica e ambiental, corroborando com as ações de mitigação de descarte desses resíduos têxteis. De forma subsidiária, é de suma relevância aprofundar o entendimento sobre a degradabilidade do material, pois trata-se de um reforço natural que, portanto, é um fator crucial e preponderante. Sugere-se, assim, como uma possível pesquisa futura, no âmbito dos estudos com novos materiais geotécnicos.

AGRADECIMENTOS

A todos que fizeram parte desse projeto, ao Programa de Pós Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, ao Cobramseg, pela disponibilidade em forçar esse espaço para apresentar nossos estudos e à Cnpq pelo apoio e subsídio a pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (2022). Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. NBR ISSO 12770. Rio de Janeiro
- ABIT, Perfil do Setor. Disponível em: Abit - Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. Acessado em 21/01/2024.
- ABRAPA. Algodão no Cerrado do Brasil. Editor técnico: Eleusio Curvelo Freire, 3ª edição revisada e ampliada. Brasília: Positiva, 2015.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos. Panorama dos resíduos sólidos. Ano de 2022.
- Aguilar Neto, Pedro Pita. Fibras Têxteis, v. 1. Rio de Janeiro: SENAI-DN: SENAI-CETIQT: IBICT: PADCT: TIB, 1996.
- Araújo, Mário de.; MELO e CASTRO, Ernesto Manuel de. Manual de Engenharia Têxtil, v. 1. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1987.
- Brasil, Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). European Commission, (1996).
- Casagrande, M. (2005) Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 219 p.
- Carvalho, L. M. de C. (2019). Comportamento Mecânico De Um Solo Arenoso Reforçado Com Fibras Naturais Submetido A Ensaio De Cisalhamento Direto Em Média Escala. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 105 p.
- Echer, Fábio Rafael. Algodão: natural e sustentável. Disponível em: <https://www.unoeste.br/noticias/2022/11/algodao-natural-e-sustentavel>. Acessado em 21/01/2024.
- Garcia, Suruapi Jorge. Fiação: cálculos fundamentais. Rio de Janeiro: SENAI-CETIQT, SENAI-DN, CNPq, IBICT, PADCT, TIB, 1995.
- Pereira, Gislaíne de Souza. Introdução à tecnologia têxtil. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina-Unidade de Ensino de Araranguá. ed. Santa Catarina: Ministério da Educação-Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica, 2009
- Ribeiro, L. G. Introdução à Tecnologia Têxtil, v. 2. Rio de Janeiro: SENAI – CETIQT, 1984.

- Sandin, G., & Peters, G. M. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling e a review. *Journal of Cleaner Production*, 184, 353-365.
- SEBRAE, Estudo de Viabilidade de Resíduos Têxteis. Goiânia: Agência Entremeios Comunicação, 2023.
- Taylor, G. D. (2013). *Materials in Construction: An Introduction* (3o ed). Routledge, 334 p.
<https://doi.org/10.4324/9781315839158>
- Velicko, A. J., Amrginski, R. L., Hemkemeier, M. (2020). Aternatives of reusing textile waste. *Research, Society and Development*, v. 9, n.11.
- Yousef, S., Tatarants, M., Tichonovas, M., Sarwar, Z., Jonu I. S., & Kliucininkas, L. (2019). A new strategy for using textile waste as a sustainable source of recovered cotton. *Resources, conservation and recycling*, 145, 359-369.
- Zhang, H., Gao, Z., Liu, Y., Ran, C., Mao, X., Kang, Q., Ao, W., Fu, J., Li, J., Liu, G., & Dai, J. (2018). Microwave-assisted pyrolysis of textile dyeing sludge, and migration and distribution of heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, 355, 128-135.