



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

HITALO JOSÉ TAVARES DE ARAÚJO

**INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRAS DE PNEU NO COMPORTAMENTO  
HIDROMECÂNICO E NA MITIGAÇÃO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURAS EM  
SOLO EXPANSIVO**

Recife

2023

HITALO JOSÉ TAVARES DE ARAÚJO

**INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRAS DE PNEU NO COMPORTAMENTO  
HIDROMECÂNICO E NA MITIGAÇÃO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURAS EM  
SOLO EXPANSIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Recife

2023

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

A663i Araújo, Hitalo José Tavares de.  
Influência do uso de fibras de pneu no comportamento hidromecânico e na mitigação de propagação de fissuras em solo expansivo / Hitalo José Tavares de Araújo. – 2023.  
134 f.: il., fig., tab., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.  
Inclui referências e apêndice.

1. Engenharia civil. 2. Solos não-saturados. 3. Solos expansivos. 4. Resíduo de pneus. 5. Fissuração. 6. Melhoramento de solos. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2023-112

HITALO JOSÉ TAVARES DE ARAÚJO

**INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRAS DE PNEU NO COMPORTAMENTO  
HIDROMECÂNICO E NA MITIGAÇÃO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURAS EM  
SOLO EXPANSIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 24/02/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Maria Odete Holanda Mariano (Examinadora Interna)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira (Examinador Externo)  
Universidade Católica de Pernambuco

---

Profa. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha família. Aos meus pais, Osman e Maria, e aos meus irmãos, Hugo e Heitor.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente aos meus pais, Maria e Osman, por todo o amor, dedicação, incentivo, paciência e principalmente pela dádiva da vida.

Aos meus irmãos, Heitor e Hugo, por estarem do meu lado em todos os momentos.

À minha namorada, Jéssica, por todo o amor, compreensão e encorajamento dado a mim desde o momento em que nos conhecemos.

Ao meu orientador, professor Silvio Ferreira, pela confiança, ensinamentos, paciência e compreensão durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu colega de pós-graduação e amigo, Otávio Faustino, pelo companheirismo durante as aulas da pós, parceria no desenvolvimento deste trabalho e pelas boas conversas.

Às colegas do grupo de pesquisa de Solos Não Saturados da Universidade Federal de Pernambuco, Aline, Izabela e Débora, pelo auxílio e compartilhamento de conhecimentos sobre os ensaios realizados neste trabalho.

Ao laboratorista Gutemberg e ao Engenheiro Antônio Brito pela convivência, colaboração e ensinamentos sobre a execução dos ensaios desta pesquisa.

À professora Maria Odete, ao professor Joaquim Teodoro e à professora Maria Isabela por terem aceitado fazer parte da banca examinadora e por suas colaborações que muito enriqueceram a versão final dessa dissertação.

A todos os colegas e professores da área de Geotecnia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, assim como aos funcionários da universidade que fazem essa instituição tão importante para a sociedade funcionar.

A todos os cientistas e pesquisadores cujos trabalhos serviram de base para o desenvolvimento dessa dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A ciência é muito mais do que um corpo de conhecimento. É uma maneira de pensar. E isso é fundamental para o seu sucesso. A ciência nos convida a aceitar os fatos, mesmo quando eles não estão de acordo com nossas concepções. Ela nos aconselha a considerar hipóteses alternativas e ver quais são as que melhor correspondem aos fatos. Impõe-nos um bom equilíbrio entre a abertura sem restrições a novas ideias, por mais heréticas que sejam, e o mais rigoroso escrutínio cético de tudo – novas ideias e sabedorias estabelecidas. Precisamos da ampla apreciação desse tipo de pensamento. Funciona. É uma ferramenta essencial para uma democracia em uma era de mudança. Nossa tarefa não é apenas treinar mais cientistas, mas também aprofundar a compreensão pública da ciência (SAGAN, 1993, tradução nossa).

## RESUMO

Os solos expansivos se destacam como alguns dos solos mais problemáticos devido à grande possibilidade de causar patologias em construções por conta da sua natureza de mudança volumétrica com a variação de sua umidade. O uso de técnicas de estabilização de solos para mudar suas características geotécnicas indesejadas mostra-se necessário. A incorporação de fibra de pneu no solo tem se mostrado uma opção interessante por possibilitar o reuso de pneus inservíveis. Este trabalho apresenta uma análise do comportamento hidromecânico, a capacidade de mitigação das mudanças volumétricas e fissurações que podem surgir num solo expansivo de Paulista-PE com a inserção de fibras de pneu com misturas de 0,25%, 0,5%, 1% e 2% em relação ao peso do solo seco. O programa de investigação contou com a preparação, caracterização física e investigação do comportamento hidromecânico das amostras de solo e das misturas com fibras de pneu, verificando as alterações das propriedades do solo. Comparando com o solo natural, todos os teores de fibras de pneu mantiveram a mesma ordem de grandeza de  $10^{-8}$  cm/s para a condutividade hidráulica. No ensaio squeeze-flow, na umidade do limite de liquidez, a tensão de escoamento e tensão inicial de enrijecimento, com o teor de 2%, obtiveram os maiores valores: 7,75 e 3,67 vezes acima, respectivamente. Na umidade do limite de plasticidade, o maior valor da tensão inicial de enrijecimento se deu com 1%: 2,37 vezes maior. A expansão “livre” obteve o menor valor nas amostras de teor 2%: redução de 23,56%. A tensão de expansão teve o menor valor com teor de 1%: 19,53% menor. A resistência à compressão não confinada teve maior valor com 1%: aumento de 19,46%. Para a resistência à tração, o teor de 2% apresentou maior valor: 31,32% acima. O teor de 2% obteve as maiores resistências ao cisalhamento para todas as tensões normais. Para 200 kPa, aumentou 7,23%. As misturas com fibras retiveram mais água que o solo natural para valores de sucção acima de 80kPa. Nos ensaios de fissuração por secagem, a amostra de teor 1% resultou em maior redução do CIF: 21,16% menor. Assim, a inclusão de fibras de pneu promoveu melhoras em características geotécnicas do solo expansivo, assim como uma redução da fissuração do solo. O teor ideal de fibras de pneu ficou entre 1% e 2%.

Palavras-chave: solos não-saturados; solos expansivos; resíduo de pneus; fissuração; melhoramento de solos.

## ABSTRACT

Expansive soils stand out as some of the most problematic soils due to the great possibility of causing pathologies in constructions due to their nature of volumetric change with the variation of their humidity. The use of soil stabilization techniques to change their unwanted geotechnical characteristics is necessary. The incorporation of tire fiber in the soil has proved to be an interesting option as it makes it possible to reuse waste tires. This work presents an analysis of the hydromechanical behavior, the mitigation capacity of the volumetric changes and cracking that can appear in an expansive soil of Paulista-PE with the insertion of tire fibers with mixtures of 0.25%, 0.5%, 1% and 2% in relation to the dry soil weight. The research program included the preparation, physical characterization and investigation of the hydromechanical behavior of soil samples and mixtures with tire fibers, verifying changes in soil properties. Comparing with natural soil, all tire fiber contents maintained the same order of magnitude of  $10^{-8}$  cm/s for hydraulic conductivity. In the squeeze-flow test, at the liquid limit humidity, the yield stress and initial stiffening stress, with the 2% content, obtained the highest values: 7.75 and 3.67 times above, respectively. At the plasticity limit humidity, the highest value of the initial stiffening stress occurred with 1%: 2.37 times greater. The "free" expansion had the lowest value in the 2% content samples: a reduction of 23.56%. The expansion stress had the lowest value with a content of 1%: 19.53% lower. The unconfined compressive strength had a higher value with 1%: an increase of 19.46%. For tensile strength, the 2% content had the highest value: 31.32% above. The 2% content obtained the highest shear strengths for all normal stresses. For 200 kPa, it increased by 7.23%. Mixtures with fibers retained more water than the natural soil for suction values above 80kPa. In the drying cracking tests, the 1% sample resulted in a greater reduction in the CIF: 21.16% lower. Therefore, the inclusion of tire fibers promoted improvements in geotechnical characteristics of the expansive soil, as well as a reduction in soil cracking. The ideal tire fiber content was between 1% and 2%.

Keywords: unsaturated soils; expansive soils; tire waste; cracking; soil improvement.

## LISTA DE FIGURAS

|             |                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 –  | Representação dos principais tipos de argilominerais .....                                                                                                                                                                               | 26 |
| Figura 2 –  | Processo de formação de fissuras .....                                                                                                                                                                                                   | 30 |
| Figura 3 –  | Exemplos de equipamentos desenvolvidos por (a) Costa (2015), (b) Araújo (2020) e (c) Ammour e Bouhanna (2016) para ensaio de fissuração por ressecamento .....                                                                           | 32 |
| Figura 4 –  | Estágios do processamento de imagem: (a) imagem original, (b) imagem em escala de cinza e (c) imagem binária .....                                                                                                                       | 33 |
| Figura 5 –  | Principais componentes de um pneu .....                                                                                                                                                                                                  | 34 |
| Figura 6 –  | Ciclo de vida dos pneus .....                                                                                                                                                                                                            | 36 |
| Figura 7 –  | Produtos de processamentos de pneus inservíveis .....                                                                                                                                                                                    | 37 |
| Figura 8 –  | Programa de investigação .....                                                                                                                                                                                                           | 42 |
| Figura 9 –  | Amostra do solo expansivo de Paulista-PE .....                                                                                                                                                                                           | 43 |
| Figura 10 – | Amostra de fibras de pneus utilizados na pesquisa .....                                                                                                                                                                                  | 44 |
| Figura 11 – | Solo em processo de destorroamento com almofariz e mão de gal .....                                                                                                                                                                      | 45 |
| Figura 12 – | Execução dos ensaios de limite de liquidez (a) e limite de plasticidade (b) .....                                                                                                                                                        | 46 |
| Figura 13 – | Corpo de prova de uma mistura de solo com 2% de fibras de pneu para ensaio de compactação .....                                                                                                                                          | 47 |
| Figura 14 – | Conjunto de equipamentos utilizados para moldagem das amostras para o ensaio squeeze-flow: (a) gabarito; (b) placa superior; (c) espátula; (d) anel de moldagem 100,2 mm de diâmetro interno e 10 mm de altura; (e) placa inferior ..... | 48 |
| Figura 15 – | Pesagem de uma porção de solo/fibra de pneu para ensaio squeeze-flow (a) e corpo de prova na umidade de limite de plasticidade moldado para ensaio (b) .....                                                                             | 49 |
| Figura 16 – | Corpo de prova no início do ensaio squeeze-flow (a) e no fim do ensaio (b) para uma amostra com umidade no limite de liquidez .....                                                                                                      | 50 |
| Figura 17 – | Demonstração dos três estágios do comportamento reológico em curva carga versus deslocamento .....                                                                                                                                       | 51 |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 18 – | Pesagem de um corpo de prova para ensaio de condutividade hidráulica .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 52 |
| Figura 19 – | Permeâmetro utilizado no ensaio de condutividade hidráulica (a) e corpo de prova posicionado na célula de ensaio (b) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 52 |
| Figura 20 – | Moldagem de amostra em anel metálico (a), células e prensas de adensamento (b) e ensaio de tensão de expansão em andamento (c) .....                                                                                                                                                                                                                                                                        | 54 |
| Figura 21 – | Execução de ensaio de compressão simples (a), amostra desmoldada para ensaio de compressão (b) e execução de ensaio de compressão diametral (c) .....                                                                                                                                                                                                                                                       | 55 |
| Figura 22 – | Moldagem do corpo de prova (a) e corpo de prova no fim do ensaio de cisalhamento direto (b) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 56 |
| Figura 23 – | Ensaio de cisalhamento direto em execução .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 57 |
| Figura 24 – | Vista Frontal do aparato montado para análise da propagação de fissuras cujos elementos são: (1) a caixa em MDF; (2) Luminárias laterais; (3) balança de precisão; (4) conjunto solo-placa de Petri principal; (5) webcam; (6) haste de suporte da webcam; (7) base de madeira; (8) haste de suporte das luminárias; (9) bancada; (11) conjuntos solo-placa de Petri pequenas; (12) luminária central ..... | 58 |
| Figura 25 – | Aparato do ensaio de propagação de fissuras montado em laboratório .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 59 |
| Figura 26 – | Amostra de mistura solo-fibras de pneu devidamente preparada e moldada na placa de Petri principal .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 60 |
| Figura 27 – | Imagem do início do surgimento de fissuras do ensaio de propagação de fissuras de amostras com 0,25% de fibras capturada pelo software Auto Screenshot Picture .....                                                                                                                                                                                                                                        | 61 |
| Figura 28 – | Escalonamento de imagem no software ImageJ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 62 |
| Figura 29 – | Processo de binarização em preto em branco de imagem no software ImageJ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 62 |
| Figura 30 – | Determinação da área fissurada no software ImageJ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 63 |
| Figura 31 – | Determinação do número de segmentos de fissuras no software ImageJ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 64 |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 32 – | Preparo de uma amostra para a obtenção de sua sucção matricial. (a) papel filtro utilizado nos ensaios; (b) amostra com papel filtro em contato direto e envolta em plástico filme; (c) amostra embrulhada em alumínio, pronta para equalização da temperatura e umidade com o papel filtro ..... | 65 |
| Figura 33 – | Pesagem dos papéis filtro em balança analítica .....                                                                                                                                                                                                                                              | 66 |
| Figura 34 – | Distribuição granulométrica do solo expansivo de Paulista-PE .....                                                                                                                                                                                                                                | 68 |
| Figura 35 – | Gráfico da variação do limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade para o solo e suas misturas com fibras de pneu .....                                                                                                                                                   | 72 |
| Figura 36 – | Curvas de compactação do solo natural e suas respectivas misturas com fibras .....                                                                                                                                                                                                                | 73 |
| Figura 37 – | Curvas de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para o solo e suas misturas .....                                                                                                                                                                                                  | 73 |
| Figura 38 – | Gráfico das curvas de carga versus deslocamento dos ensaios de squeeze flow para o solo natural e suas misturas com fibra para as umidades de limite de liquidez .....                                                                                                                            | 75 |
| Figura 39 – | Variação da tensão de escoamento e da tensão inicial de enrijecimento com o teor de fibras de pneu e suas respectivas umidades de limite de liquidez .....                                                                                                                                        | 77 |
| Figura 40 – | Variação da tensão de escoamento com o teor de fibras e suas respectivas umidades de limite de liquidez para fibras de polipropileno (SILVA, 2023) e coco verde (FAUSTINO, 2022) utilizados no solo expansivo de Paulista-PE .....                                                                | 78 |
| Figura 41 – | Gráfico das curvas de carga versus deslocamento dos ensaios de squeeze flow para o solo natural e suas misturas com fibra para as umidades de limite de plasticidade .....                                                                                                                        | 79 |
| Figura 42 – | Variação da tensão inicial de enrijecimento com os teores de fibras e suas respectivas umidades nos limites de plasticidade .....                                                                                                                                                                 | 80 |
| Figura 43 – | Condutividade hidráulica do solo e de suas misturas com teores de fibras de pneu na condição saturada .....                                                                                                                                                                                       | 81 |

|             |                                                                                                                                                                                               |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 44 – | Curvas de deformação específica com o tempo para os ensaios de expansão “livre” .....                                                                                                         | 82 |
| Figura 45 – | Curvas de deformação específica versus teor de fibras para os ensaios de expansão “livre” na fibra de pneu, fibra de coco verde (FAUSTINO, 2022) e fibra de polipropileno (SILVA, 2023) ..... | 83 |
| Figura 46 – | Tensão de expansão versus teor de fibra de pneu em conjunto com a classificação de Jimenez (1980) .....                                                                                       | 85 |
| Figura 47 – | Curvas de resistência à compressão não confinada (compressão simples) para o solo natural e suas misturas com fibras de pneu .....                                                            | 86 |
| Figura 48 – | Corpos de prova rompidos nos ensaios de compressão simples e seus ângulos de superfície de ruptura do tipo cisalhado para todas as misturas .....                                             | 87 |
| Figura 49 – | Curvas de resistência à tração versus deformação específica resultantes do ensaio de compressão diametral (a) e imagem dos corpos de provas rompidos após ensaio (b) .....                    | 89 |
| Figura 50 – | Resistências à tração máxima versus teor de fibras para as fibras de pneu, coco verde (FAUSTINO, 2022) e polipropileno (SILVA, 2023) obtidas por ensaio de compressão diametral .....         | 91 |
| Figura 51 – | Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal resultantes dos ensaios de cisalhamento direto para tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa .....                                | 92 |
| Figura 52 – | Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal resultantes dos ensaios de cisalhamento direto para tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa .....                            | 94 |
| Figura 53 – | Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para cada tensão normal de 50, 100, 150 e 200 kPa e teores de fibras dos ensaios de cisalhamento direto .....                      | 95 |
| Figura 54 – | Envoltórias de Mohr-Coulomb dos ensaios de cisalhamento direto para a tensão cisalhante máxima (a) e tensão cisalhante residual quando $\epsilon=14\text{mm}$ (b) .....                       | 96 |

|             |                                                                                                                                                                                          |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 55 – | Relações entre coesão e ângulo de atrito para a tensão cisalhante máxima (a) e tensão cisalhante residual quando $\epsilon=14\text{mm}$ (b) com os teores de fibras de pneu .....        | 97  |
| Figura 56 – | Surgimento das primeiras fissuras nas amostras dos ensaios de fissuração por ressecamento. $W_{if}$ = umidade de início de fissurações; $T_{if}$ = tempo de início das fissurações ..... | 100 |
| Figura 57 – | Evolução das fissuras em função do tempo de ensaio para a amostra de solo natural e amostras com reforço de fibras de pneu .....                                                         | 102 |
| Figura 58 – | Relação entre o CIF e a umidade gravimétrica para as amostras de solo natural e de solos com reforço de fibras de pneu com seus respectivos teores .....                                 | 103 |
| Figura 59 – | Visualização de fibras de pneus atuando nas fissuras na amostra de solo reforçado com 2% de fibras .....                                                                                 | 105 |
| Figura 60 – | Curvas de retenção de água na relação umidade volumétrica versus sucção matricial para os teores de fibras de pneu .....                                                                 | 106 |

## LISTA DE TABELAS

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 –  | Resumo dos métodos de identificação de solos expansivos .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 28 |
| Tabela 2 –  | Ensaio de caracterização realizados .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 46 |
| Tabela 3 –  | Composições granulométricas do solo expansivo de Paulista-PE obtidas em literaturas .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 69 |
| Tabela 4 –  | Densidade real dos grãos do solo expansivo de Paulista-PE obtidas em literaturas .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 69 |
| Tabela 5 –  | Resumo da caracterização física do solo de Paulista-PE .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 70 |
| Tabela 6 –  | Resumo da caracterização física das fibras de pneu .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 70 |
| Tabela 7 –  | Valores de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade para o solo e suas misturas com fibras de pneu .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 71 |
| Tabela 8 –  | Valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para o solo e suas misturas .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 74 |
| Tabela 9 –  | Dados e índices do comportamento reológico do solo natural e das misturas com fibras de pneu no limite de liquidez. $Q_{Esc}$ = carga de escoamento; $d_{Esc}$ = deslocamento de escoamento; $Q_{Enrij}$ = carga inicial de enrijecimento; $d_{Enrij}$ = deslocamento inicial de enrijecimento; $\sigma_{Esc}$ = tensão de escoamento; $\sigma_{Enrij}$ = tensão inicial de enrijecimento; $Q_{Final}$ = carga no deslocamento máximo ..... | 76 |
| Tabela 10 – | Dados e índices do comportamento reológico do solo natural e das misturas com fibras de pneu no limite de plasticidade. $Q_{Enrij}$ = carga inicial de enrijecimento; $d_{Enrij}$ = deslocamento inicial de enrijecimento; $\sigma_{Enrij}$ = tensão inicial de enrijecimento; $Q_{Final}$ = carga no deslocamento máximo.....                                                                                                              | 80 |
| Tabela 11 – | Critérios de Seed et al. (1962) para a classificação do grau de expansividade de um solo argiloso .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 83 |
| Tabela 12 – | Dados dos ensaios de tensão de expansão pelo método do volume constante .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 84 |
| Tabela 13 – | Critérios de Jimenez (1980) para possíveis danos .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 84 |
| Tabela 14 – | Dados dos ensaios de compressão simples .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 87 |
| Tabela 15 – | Dados dos ensaios de compressão diametral .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 90 |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 16 – | Dados dos ensaios de cisalhamento direto para as tensões máximas de cisalhamento .....                                                                                                                                                                                                | 98  |
| Tabela 17 – | Dados dos ensaios de cisalhamento direto para as tensões de cisalhamento quando $\epsilon=14\text{mm}$ .....                                                                                                                                                                          | 98  |
| Tabela 18 – | Dados relativos às primeiras fissuras das amostras dos ensaios de fissuração por ressecamento. $w_o$ = umidade no início do ensaio; $T_{if}$ = tempo de início das fissurações; $w_{if}$ = umidade de início das fissurações; $w_p$ = perda de umidade até início de fissuração ..... | 99  |
| Tabela 19 – | Resumo dos principais dados e índices das análises de formação e propagação de fissuras para a amostra de solo natural e misturas de solo com reforço de fibras de pneu .....                                                                                                         | 104 |
| Tabela 20 – | Parâmetros dos ajustes de curvas de retenção de água de Van Genuchten (1980). $\Psi_{ar}$ = Sucção do solo para entrada de ar; $\theta_r$ = umidade residual; $\theta_s$ = umidade de saturação; $\alpha$ , $n$ , $m$ = índices de ajustes do modelo de Van Genuchten (1980) .....    | 107 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |                                                                           |
|--------|---------------------------------------------------------------------------|
| ABNT   | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                  |
| AASHTO | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> |
| ASTM   | <i>American Society for Testing and Materials</i>                         |
| NBR    | Norma Brasileira                                                          |
| SUCS   | Sistema Unificado de Classificação dos Solos                              |
| UFPE   | Universidade Federal de Pernambuco                                        |
| URA    | Umidade relativa do ar                                                    |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                        |                                                         |
|------------------------|---------------------------------------------------------|
| $\text{\AA}$           | Angstrom                                                |
| $Q_{\text{Esc}}$       | Carga de escoamento                                     |
| $Q_{\text{Enrij}}$     | Carga inicial de enrijecimento                          |
| $dS/m$                 | DeciSiemens por metro                                   |
| $d_{\text{Esc}}$       | Deslocamento de escoamento                              |
| $\epsilon$             | Deslocamento horizontal                                 |
| $d_{\text{Enrij}}$     | Deslocamento inicial de enrijecimento                   |
| $e_o$                  | Índice de vazios inicial                                |
| $\alpha, n, m$         | Parâmetros de ajustes do modelo de Van Genuchten (1980) |
| $w_p$                  | Perda de umidade até fissuração                         |
| $\gamma_{\text{dmáx}}$ | Peso específico aparente seco máximo                    |
| $\Psi$                 | Sucção do solo                                          |
| $\Psi_{\text{ar}}$     | Sucção do solo para entrada de ar                       |
| $T_{\text{if}}$        | Tempo de início das fissurações                         |
| $w_{\text{if}}$        | Umidade de início das fissurações                       |
| $\theta_s$             | Umidade de saturação                                    |
| $w_o$                  | Umidade inicial                                         |
| $w_{\text{ótima}}$     | Umidade ótima                                           |
| $\theta_r$             | Umidade residual                                        |
| $\theta$               | Umidade volumétrica                                     |

## SUMÁRIO

|               |                                                                  |           |
|---------------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>      | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                          | <b>21</b> |
| 1.1           | RELEVÂNCIA DO TEMA .....                                         | 22        |
| 1.2           | OBJETIVOS .....                                                  | 23        |
| <b>1.2.1</b>  | <b>Objetivo Geral</b> .....                                      | <b>23</b> |
| <b>1.2.2</b>  | <b>Objetivos Específicos</b> .....                               | <b>24</b> |
| 1.3           | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....                                   | 24        |
| <b>2</b>      | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                               | <b>26</b> |
| 2.1           | SOLOS EXPANSIVOS .....                                           | 26        |
| 2.2           | FISSURAÇÃO E CONTRAÇÃO DOS SOLOS CAUSADO POR<br>SECAGEM .....    | 29        |
| <b>2.2.1</b>  | <b>Determinação dos índices geométricos de fissuras</b> .....    | <b>31</b> |
| 2.3           | PNEUMÁTICOS .....                                                | 33        |
| <b>2.3.1</b>  | <b>Caracterização dos pneumáticos</b> .....                      | <b>33</b> |
| <b>2.3.2</b>  | <b>Reutilização de pneus inservíveis</b> .....                   | <b>35</b> |
| 2.4           | ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS .....                          | 38        |
| <b>3</b>      | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                                 | <b>41</b> |
| 3.1           | PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO .....                                   | 41        |
| 3.2           | MATERIAIS UTILIZADOS .....                                       | 42        |
| <b>3.2.1</b>  | <b>Solo expansivo de Paulista-PE</b> .....                       | <b>42</b> |
| <b>3.2.2</b>  | <b>Fibras de pneus</b> .....                                     | <b>43</b> |
| 3.3           | PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....                                    | 44        |
| 3.4           | ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS .....           | 45        |
| 3.5           | ENSAIO SQUEEZE-FLOW .....                                        | 48        |
| 3.6           | ENSAIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA .....                         | 51        |
| 3.7           | ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA EXPANSÃO .....                    | 53        |
| 3.8           | ENSAIOS DE COMPRESSÃO .....                                      | 54        |
| 3.9           | ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO .....                              | 56        |
| 3.10          | ENSAIO DE FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO .....                      | 57        |
| <b>3.10.1</b> | <b>Procedimentos e equipamentos empregados</b> .....             | <b>58</b> |
| <b>3.10.2</b> | <b>Moldagem dos corpos de prova e execução dos ensaios</b> ..... | <b>59</b> |
| <b>3.10.3</b> | <b>Aquisição e análise das imagens</b> .....                     | <b>60</b> |

|          |                                                                                                                                       |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.10.4   | Determinação das curvas de retenção de água .....                                                                                     | 64         |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>                                                                                                    | <b>68</b>  |
| 4.1      | CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....                                                                                                           | 68         |
| 4.1.1    | Caracterização física do solo expansivo e das fibras de pneu .....                                                                    | 68         |
| 4.1.2    | Caracterização física das misturas solo/fibra de pneu e<br>comparação com o solo natural .....                                        | 71         |
| 4.2      | CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA .....                                                                                                        | 74         |
| 4.3      | COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE .....                                                                                                   | 80         |
| 4.4      | AVALIAÇÃO DA EXPANSIVIDADE .....                                                                                                      | 81         |
| 4.4.1    | Ensaio de expansão “livre” .....                                                                                                      | 81         |
| 4.4.2    | Ensaio de tensão de expansão .....                                                                                                    | 84         |
| 4.5      | AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA .....                                                                                                        | 86         |
| 4.5.1    | Resistência à compressão não confinada (compressão<br>simples) .....                                                                  | 86         |
| 4.5.2    | Resistência à tração por compressão diametral .....                                                                                   | 88         |
| 4.5.3    | Resistência ao cisalhamento por ensaio de cisalhamento<br>direto .....                                                                | 91         |
| 4.6      | PROCESSO DE FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FISSURAS<br>POR RESSECAMENTO .....                                                               | 99         |
| 4.6.1    | Análise do surgimento das primeiras fissuras .....                                                                                    | 99         |
| 4.6.2    | Análise da formação e propagação das fissuras nas<br>amostras .....                                                                   | 100        |
| 4.7      | AVALIAÇÃO DAS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA .....                                                                                        | 105        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>                                                                                                   | <b>108</b> |
| 5.1      | CONCLUSÕES .....                                                                                                                      | 108        |
| 5.2      | SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....                                                                                                | 109        |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                              | <b>111</b> |
|          | <b>APÊNDICE A - ANÁLISE INDIVIDUAL DO PROCESSO DE<br/>PROPAGAÇÃO DE FISSURAS DO SOLO E DAS MISTURAS<br/>SOLO/FIBRAS DE PNEU .....</b> | <b>123</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Solos expansivos são solos problemáticos devido à alta compressibilidade, baixa resistência e um alto potencial de expansão, quando úmidos, e contração que ocasiona fissuras em sua estrutura, quando secos. Devido a isso, são solos que não são adequados para o uso na maioria das obras de engenharia (DIF; BLUEMEL, 1991; NALBANTOGLU, 2006; ESTABRAGH; MOGHADAS; JAVADI, 2013). Ao serem expostos às condições climáticas, que alteram a umidade, apresentam tendências a aumentar ou diminuir o seu volume, ou seja, provocam levantamentos e assentamentos que causam instabilidades nas estruturas lançadas sobre o solo. Algumas patologias podem surgir e com isso o custo de manutenção da obra torna-se elevada. Algumas soluções para reduzir os danos socioeconômicos são propostas em literaturas (JONES; JEFFERSON, 2012).

Os solos expansivos causam danos consideráveis em países de todos os continentes da Terra, como, por exemplo, Austrália, China, Índia, Reino Unido e EUA. Só nos Estados Unidos o montante total de danos devido a solos expansivos é estimado em torno de US\$ 15 bilhões por ano (LI et al., 2014).

O crescimento populacional, urbanização acelerada, produção de bens de consumo descartáveis em expansão, dentre outros fatores resultantes das ações humanas, têm contribuído com o aumento acelerado de geração de resíduos, principalmente por não existirem políticas eficientes que controlem e mitiguem a sua produção. O descarte de resíduos apresenta impactos diretos consideráveis à sociedade. A quantidade de solo que é preciso para se manter e decompor estes materiais é um dos problemas mais agravantes, uma vez que estes espaços podem ser vistos como recursos naturais desperdiçados pois poderiam ser áreas produtivas (MACEDO, 2016).

Entre esses resíduos gerados pela humanidade está o pneu inservível. Estima-se que a Austrália produza mais de 500.000 toneladas de resíduos de pneus a cada ano (SABERIAN et al. 2019). Os Estados Unidos têm atualmente 2 bilhões de pneus inservíveis, com uma taxa de crescimento de 200 a 250 milhões de pneus por ano, dos quais menos de 10% podem ser reciclados localmente (SABERIAN et al. 2019).

Entre as formas mais comuns de destinação aos pneus inservíveis no mundo está a incineração ao ar livre, porém esses materiais queimam muito rapidamente, emitem gases perigosos e tendem a poluir o solo e os lençóis freáticos quando não

há tecnologias para evitar resíduos e poluições (GHENI et al., 2019). Outra maneira comum é o enterro de pneus usados em aterros sanitários, que não é recomendado pois eles ocupam uma grande parte do espaço valioso nos aterros, armazenam água e criam um habitat de reprodução para roedores e insetos e correm um risco considerável de exposição ao fogo e combustão (ABBASPOUR; AFLAKI; NEJAD, 2019; THOMAS; GUPTA, 2016).

O Brasil é o sétimo país que mais produz pneus para automóveis do mundo e o quinto em produção de pneus para caminhões e ônibus (ANIP, 2021). Desde 1999 segue cumprindo suas responsabilidades ambientais no que tange os pneumáticos e tem se tornado uma referência mundial na logística reversa, onde o pneu inservível retorna do consumidor para pontos de coleta e em seguida levados para reaproveitamento (ANIP, 2021).

Uma opção para a reutilização de pneus inservíveis é o seu aproveitamento como reforço em solos. A mistura de solo com pneu foi utilizada, por exemplo, para melhorar a resistência a tração e ao cisalhamento em estabilidade de talude e em pavimentos (EDINÇLILER; AYHAN, 2010; FRANCO, 2012; RAMIREZ, 2012; CHRUSCIAK, 2013; MACEDO et al., 2016).

Nessa pesquisa analisou-se o comportamento hidromecânico e a capacidade de mitigação das mudanças volumétricas e fissurações que podem surgir num solo expansivo com a inserção de fibras de pneu como material alternativo para aplicações geotécnicas.

## 1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

A principal causa da elevada mudança de volume dos solos quando em processos de mudança de umidade é a presença de argilominerais expansivos que podem promover prejuízos às construções que se encontram sobre o solo. Quando secam, os solos expansivos apresentam uma grande tendência a contrair e, conseqüentemente, fissurar. As fissuras no solo alteram as condições de fluxo e comportamento mecânico, podendo comprometer pavimentos, canais, contaminar os sistemas de água subterrâneos, gerar prejuízos financeiros, causar acidentes e danos à saúde humana (ESTABRAGH; MOGHADAS; JAVADI, 2013).

Um sistema de estabilização de solo adequado é aquele que encontra um equilíbrio entre performance estrutural, custos, impactos sociais e preservação do

meio ambiente (ZHANG et al., 2019). Uma estabilização sustentável é aquela que reutiliza despejos sólidos como parte do sistema de infraestrutura, mais especificamente como substitutos dos agentes convencionais de estabilização. Alguns elementos que mostram boa capacidade de serem utilizados como insumo de estabilizações são os resíduos têxteis, resíduos de demolição e borrachas recicladas de pneus (MIRZABABAEI et al., 2013; ARULRAJAH et al., 2017; KUA et al., 2017; MIRZABABAEI et al., 2018; PHUMMIPHAN et al., 2018; SOLTANI et al., 2019a).

Devido a algumas características como resistência à tração, boa tenacidade, durabilidade e boa resistência ao envelhecimento material, o pneu inservível tem sido estudado como um material aplicável a alguns campos da engenharia. A engenharia geotécnica e geoambiental são os dois campos principais que estão usando cada vez mais os pneus como material de reforço. Algumas das principais aplicações de pneus usados nesses campos são: construção de aterros (EDINÇLILER; BAYKAL; SAYGILI, 2010; DJADOUNI et al., 2019), mitigação de liquefação (SHARIATMADARI; KARIMPOUR-FARD; SHARGH, 2017; MITTAL; GILL, 2016), melhoria do solo (LIU; CAI; LIU, 2018; SABERIAN; LI, 2018), capacidade de carga das fundações (ANVARI; SHOOSH PASHA, 2016; MITTAL; GILL, 2018) e preenchimentos de lixiviado (ROWE; BABCOCK, 2008).

A inclusão de fibras de pneu em solos expansivos mostra-se uma opção interessante para a melhora de aspectos negativos desse tipo de solo assim como pode ser uma forma de reaproveitamento dos pneus inservíveis. Para isso, uma análise das características hidromecânicas e do comportamento expansivo do solo com adições de fibras de pneu mostra-se necessária para a averiguação da viabilidade técnica.

## 1.2 OBJETIVOS

A seguir é apresentado o objetivo geral e objetivos específicos desse trabalho.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar o comportamento hidromecânico e o processo de formação de fissuras em solo expansivo reforçado com fibras de pneu para aplicações geotécnicas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de se alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- a) Avaliar as propriedades físicas do solo expansivo e da fibra de pneu escolhidos para a pesquisa.
- b) Avaliar o desempenho do comportamento de resistência ao cisalhamento, resistência à compressão, retenção de água, expansividade, permeabilidade, resistência à tração e comportamento reológico do solo expansivo e suas misturas com adição de fibras de pneu.
- c) Investigar a influência da incorporação de fibras de pneu no comportamento físico e hidromecânico do solo expansivo.
- d) Avaliar o processo de formação e propagação de fissuras do solo natural e de suas misturas com fibras de pneu em ensaio de fissuração por ressecamento.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O texto da dissertação está organizado em cinco capítulos. No primeiro há uma introdução com a apresentação do tema e relevância, definição dos objetivos e a estrutura do texto da dissertação.

O Capítulo 2 consiste da revisão bibliográfica, abrangendo uma apresentação do conceito de solos expansivos e sua localização, problemática da fissuração e contração dos solos causados por perda de umidade, estabilização de solos expansivos, conceito de pneumáticos e uma abordagem do pneu como um passivo ambiental e sua reutilização na engenharia geotécnica.

O Capítulo 3 aborda os métodos e materiais utilizados para a realização do estudo, apresentando a preparação dos materiais, as metodologias dos ensaios executados e as normas empregadas.

No Capítulo 4 são expostos os resultados e as análises obtidas a partir da realização dos ensaios laboratoriais. Apresenta-se as avaliações e os dados da inserção de fibras de pneu ao solo.

Por último, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões no que se refere à pesquisa, tal qual sugestões para trabalhos futuros.

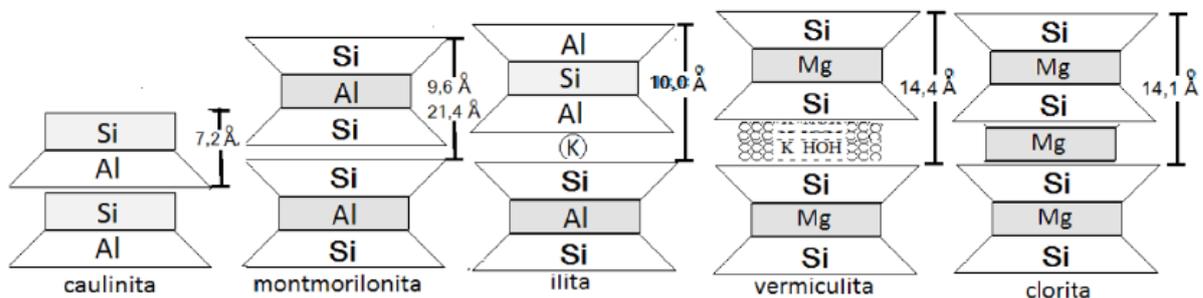
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o conceito de solos expansivos e sua localização, problemática da fissuração e contração dos solos causados por perda de umidade, estabilização de solos expansivos, conceito de pneumáticos e uma abordagem de sua reutilização na engenharia geotécnica.

### 2.1 SOLOS EXPANSIVOS

Solos expansivos são solos não-saturados argilosos que experimentam um aumento de volume quando submetidos a um acréscimo de água em seu conteúdo e sofrem um decréscimo de volume quando água é eliminada da sua massa (MITCHELL, 1976). Pereira (2004) classifica um solo como expansivo quando apresenta variação de volume superior a 1% sem qualquer variação de cargas aplicadas ao solo, apenas por meio da alteração da umidade ou sucção. Possuem em sua composição argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1 majoritariamente do grupo esmectitas (com montmorilonitas e vermiculitas em maior destaque). Sua estrutura é composta por uma camada de octaédrica de  $Al_2(OH)_6$  e duas camadas tetraédricas de  $SiO_4$  (MITCHELL, 1976). A Figura 1 apresenta os principais argilominerais.

Figura 1 – Representação dos principais tipos de argilominerais.



Fonte: Carvalho (1997).

Solos expansivos podem ser encontrados em todo o globo terrestre, com casos confirmados em países como Argentina, Irã, Austrália, México, Marrocos, Canadá, Cuba, África do Sul, Etiópia, Espanha, Gana, Turquia, Índia, Estados Unidos, Israel, Venezuela, Arábia Saudita, Chile, China, França, Nigéria, Zimbábwe e Brasil (CHEN, 1988; MAHLER, 1994). No Brasil, podem ser encontrados em várias regiões. Um

levantamento foi realizado por Ferreira et al. (2012) onde foram identificados esses solos nas regiões Sul-Sudeste, nos estados de Santa Catarina, São Paulo e Paraná e no Nordeste, do norte da Bahia, cruzando por Pernambuco e chegando até o Ceará.

No município pernambucano de Paulista encontra-se um solo expansivo que vem sendo muito estudado por vários autores. Costa et al. (1982), Jucá et al. (1992), Bastos (1994), Silva (2004), Santos (2008), Paiva (2009), Delmiro (2013), Paiva (2016), Silva (2016), Constantino (2018), Barbosa (2019), Barbosa et al. (2019), Bezerra (2020), Araújo et al. (2020) e Ferreira et al. (2020) buscaram compreender as diversas características e comportamentos da argila expansiva que se encontra no município.

Para a região, as ocorrências de solos expansivos estão associadas a ação principal do intemperismo físico sobre argilitos, folhelhos e calcários e ação do intemperismo químico sobre basaltos. O solo é uma argila siltosa de elevada plasticidade e mineralogicamente constituída de montmorilonita e caulinita de grande suscetibilidade à expansibilidade com pequenas variações de umidade (COSTA et al., 1982). É uma argila inorgânica de alta plasticidade com IP variando entre 40% e 65%, atividade normal entre 0,75 e 1,05. Nas análises químicas, há predominância de cátions adsorvidos  $Ca^{+++}$   $Mg^{++}$  em relação ao  $Na^{+}$ . A condutividade elétrica apresentou um máximo de 1,21 dS/m, portanto um solo de baixo grau de salinidade. O solo também apresentou baixo teor de matéria orgânica para as camadas menos superficiais. O pH é ácido em todas as profundidades, com valores inferiores a 4,7. Com relação à mineralogia, foram identificados o grupo da Caulinita (mineral 1:1) e interestratificados não regulares envolvendo diferentes grupos (minerais 1:1 e 2:1). Apenas em camadas mais profundas – aproximadamente 6 metros – é que o solo aparece representado pelo grupo da Esmectita, ou seja, mineral 2:1 expansivo (SILVA, 2004).

Ferreira (1999) declara que a identificação de solos expansivos é um estágio importante no sucesso de projetos de engenharia, devido aos consequentes danos causados por negligenciamento da presença desse tipo de solo. A inobservância pode causar a instabilidade geral da edificação ou a necessidade de recuperação. A identificação e classificação da expansividade de um solo podem ser realizadas através de duas etapas: a primeira é uma pesquisa *in loco* para obtenção de informações como topografia, vegetação, sinais de contração no solo, fissuras nas

edificações e informações com os moradores da região. A segunda etapa abrange a interpretação de ensaios de laboratório e o uso de métodos de identificação.

Segundo Schreiner (1987) e Ferreira (1995), solos expansivos podem ser identificados através de métodos diretos e indiretos. Métodos diretos são baseados nos parâmetros de Expansão “Livre” e Tensão de Expansão. Métodos indiretos são aqueles que recorrem à identificação através de ensaios de laboratório como, por exemplo, análise granulométrica, limites de consistência e índices ligados à textura, índices físicos, composição e comportamento do solo. Na Tabela 1 se encontra um resumo desses métodos.

Tabela 1 – Resumo dos métodos de identificação de solos expansivos.

| <b>Métodos</b>   | <b>Subdivisões</b> | <b>Critério</b>                                                                                                           |
|------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>INDIRETOS</b> | Identificativos    | Difração e raio-X, Microscopia eletrônica de varredura, Análise termo-diferencial e Adsorção de etilenoglicol e glicerina |
|                  |                    | Físico-químico                                                                                                            |
|                  | Orientativos       | Granulometria, Consistência e Índices físicos e Classificação Geotécnica                                                  |
|                  | Qualitativos       | Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Identificação visual                                                                 |
| <b>DIRETOS</b>   | Avaliativos        | Ensaio de Expansão de Lambe                                                                                               |
|                  | Quantitativos      | Expansão “livre” e Tensão de Expansão, Ensaios Edométricos Duplos e Simples, placa, Expansocolapsômetro                   |
|                  |                    | Ensaios Edométricos de Sucção controlada                                                                                  |

Fonte: Ferreira (1995).

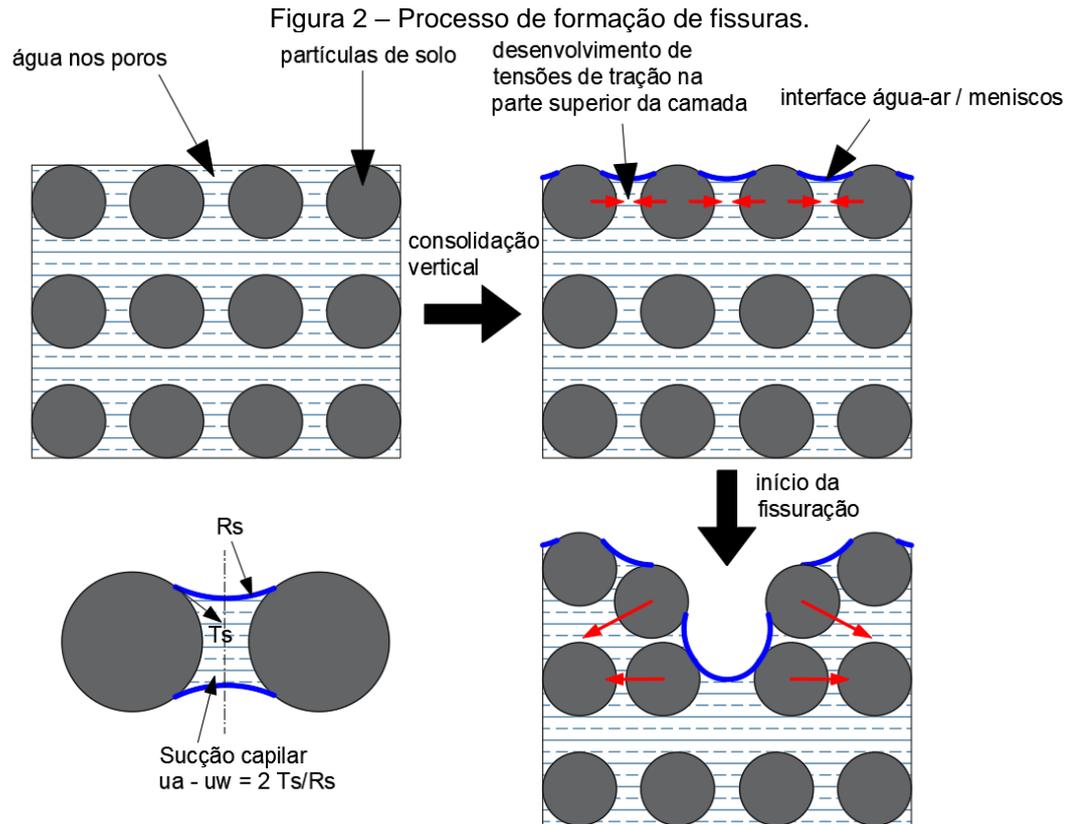
Solos expansivos têm sido alvos de várias pesquisas devido a suas propriedades incomuns, como a expansão volumétrica quando umedecidos e contração volumétrica e fissuração quando secos posteriormente. Investigações têm sido realizadas para tentar compreender e explicar suas características e propriedades (CHEN, 1988; MARQUES et al., 2014; FERREIRA; FERREIRA, 2009). Esses comportamentos não são evitáveis porque existe um conjunto de fatores relacionados ao próprio solo (distribuição de partículas de argila, estrutura, orientação mineralógica, cimentação, perfil estratigráfico, espessura do solo, descontinuidade litológica, etc.) que designam a potencialidade da capacidade expansiva e outros

fatores externos como clima, disponibilidade de água, biota e ação antrópica (manejo, uso e ocupação) que determinam se o potencial expansivo é considerável ou não (CHEN, 1988; CORRÊA et al., 2003; FERREIRA; FERREIRA, 2009).

Um solo argiloso expansivo experimenta mudanças volumétricas durante sua interação com a água. Ele incha quando absorve água e encolhe quando a água é drenada / evapora. Por causa dessa natureza de aumento e redução, os solos argilosos se destacam como alguns dos solos mais problemáticos. Os desafios em lidar com solos argilosos surgem principalmente por causa de sua dependência de fatores elementares e ambientais, como histórico de tensões, estado de tensões e condições de umidade in situ. Da mesma forma, o estado mineralógico inerente e o comportamento do solo em seu nível microscópico também afetam o desempenho geral do solo argiloso. A conectividade dos poros do solo permite a hidratação das partículas do solo, o que potencializa ou reduz o comportamento expansivo. Esses fatores influenciam consideravelmente os solos argilosos (NAYAK, 2001; BOWLES, 1979).

## 2.2 FISSURAÇÃO E CONTRAÇÃO DOS SOLOS CAUSADO POR SECAGEM

O mecanismo de contração e fissuração da argila saturada começa pela secagem do filme de água na superfície, que evapora primeiro e a estrutura e o estado de tensão-deformação do solo se mantêm praticamente inalterados. Conforme a interface água/ar atinge a superfície da camada de solo, a formação de um menisco começa e a sucção capilar começa a se desenvolver. A camada de argila se comprime e se contrai. A continuação da evaporação aumenta a curvatura do menisco capilar e, assim, aumenta a sucção matricial e a tensão efetiva entre as partículas de argila. Quando essas tensões excedem a resistência à tração do solo, aparecem as primeiras fissuras. Após o surgimento da fissuração, a propagação de fissuras será orientada pelo estado de tensões existente no interior do solo e por sua capacidade de dissipar as energias. Dessa forma, apesar da resistência à tração ser quem determina o início da fissuração, é a mecânica da fratura que tende a dar continuação à propagação das trincas. (TANG et al., 2011). A Figura 2 ilustra o processo de formação de fissuras.



Fonte: Adaptado de Costa (2015); Tang et al. (2011).

O processo de fissuramento do solo é um fenômeno muito complexo que engloba parâmetros físicos, químicos, mecânicos e hidráulicos do solo. As fissuras surgem nos solos à medida que eles perdem umidade, formando um padrão complexo e aleatório, porém único. Uma ou várias fissuras podem iniciar concomitantemente nos estágios iniciais de perda de umidade. Novas fissuras secundárias são formadas e as fissuras primárias se propagam e aumentam à medida que o processo continua (LAKSHMIKANTHA, 2009).

A formação e propagação de fissuras no solo é um processo natural causado pela secagem resultante de variações ambientais sazonais, com mudanças de períodos secos e úmidos. Durante os períodos de seca, o solo se retrai, formando rachaduras. A presença de rachaduras de dessecação no solo altera suas propriedades mecânicas e hidráulicas (LI; ZHANG, 2011; LI et al., 2012; SHI et al., 2014; CHADUVULA et al., 2017). Além da infiltração de lixiviado em aterros compactados, a rachadura reduz a resistência, cria fluxo preferencial e aumenta a taxa de infiltração (ALBRIGHT et al., 2006; GHAZIZADE; SAFARI, 2017). Na construção civil, a presença de fissuras causa impactos negativos nas camadas que têm como principal objetivo a impermeabilização. Essas fissuras alteram as condições

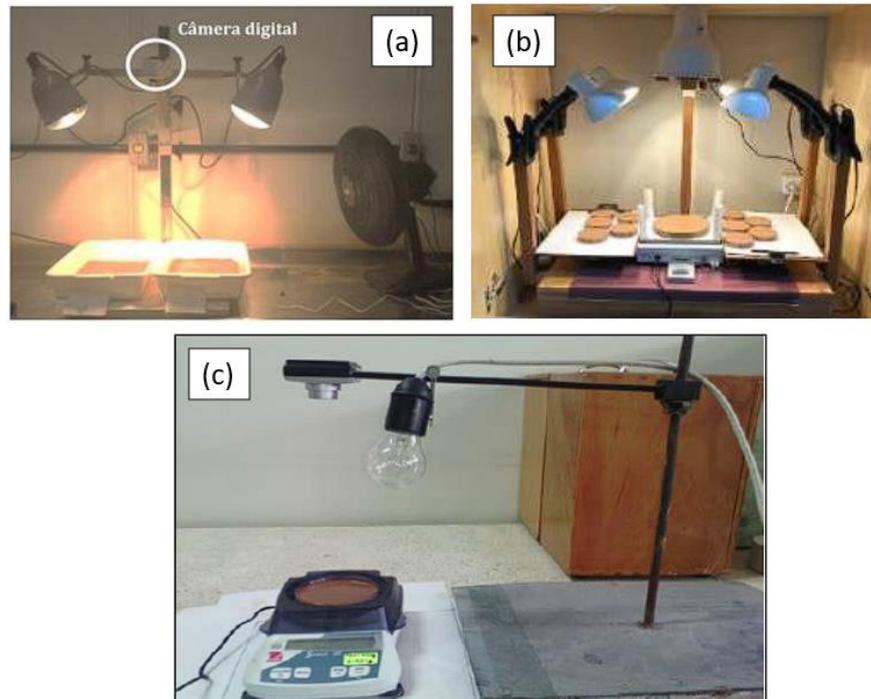
de fluxo e o comportamento mecânico, comprometendo camadas, pavimentos e canais, podendo causar acidentes e contaminar sistemas hídricos subterrâneos, gerando perdas econômicas e danos à saúde pública (COTECCHIA; VITONE, 2015).

Os aterros sanitários estão entre as estruturas geotécnicas especialmente projetadas e construídas para a disposição segura de resíduos sólidos urbanos. Devido à condutividade hidráulica muito baixa, as argilas são os materiais mais adequados para a construção de camadas impermeáveis, especialmente como revestimentos e coberturas em aterros sanitários onde a permeabilidade deve ser minimizada ( $k < 10^{-9}$  m/s) para evitar a migração de lixiviados e poluentes para o solo e lençóis freáticos. Se a argila utilizada tiver como característica uma expansividade considerável, a impermeabilidade dela pode ser prejudicada por sua tendência a mudanças extremas de volume e de surgimento de fissuras por dessecação após variação de umidade e altos gradientes térmicos nos aterros (TANG et al., 2018; YU; EL-ZEIN, 2019). Albrecht e Benson (2001) relatam que a fissuração por dessecação pode aumentar a condutividade hidráulica de argilas em cerca de três ordens de grandeza.

### **2.2.1 Determinação dos índices geométricos de fissuras**

O processo de fissuração em solos pode ser estudado por meio de ensaios realizados em laboratório através de aparatos desenvolvidos especificamente para esse tipo de experimento (Figura 3). Consiste basicamente de captura de imagens com o uso de câmera e utilização de *software* para as análises das imagens. A secagem pode ser auxiliada com o uso de equipamentos, como lâmpadas incandescentes (COSTA, 2015; ARAÚJO, 2020; AMMOUR; BOUHANNA, 2016).

Figura 3 – Exemplos de equipamentos desenvolvidos por (a) Costa (2015), (b) Araújo (2020) e (c) Ammour e Bouhanna (2016) para ensaio de fissuração por ressecamento.

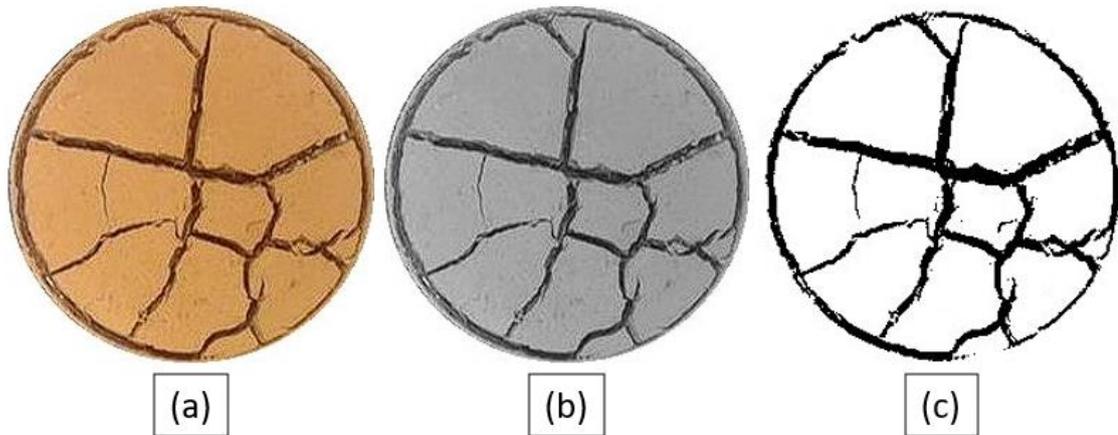


Fonte: Costa (2015); Ammour e Bouhanna (2016); Araújo (2020).

Dessa forma, é possível identificar e quantificar os índices geométricos das fissuras, como o padrão de fissuras, quantia de segmentos de fissuras, largura média das fissuras, comprimento total das fissuras, área fissurada e o CIF (*Crack Intensity Factor*) que, segundo foi definido por Miller et al. (1998), é a razão entre a área fissurada e toda a superfície da amostra, representando o percentual de fissuração. A evolução do CIF é quantificada através da saturação do solo e em seguida a promoção de sua secagem.

A análise das imagens acontece em duas etapas. Na etapa inicial há um preparo da imagem, transformando-a em tons de cinza. É um procedimento necessário por reduzir a dimensão do vetor de matrizes, tornando mais simples as operações sobre os dados e a definição do valor do pixel por um único valor. Em seguida, a imagem é transformada em uma imagem binária preta e branca através de aplicação de limiar ou *threshold* discreto. Nesse processo, pixels de escala de cinza abaixo de determinado valor se tornam preto (zero) e todos os valores superiores se tornam branco (um). A Figura 4 ilustra os estágios de processamento que a imagem passa.

Figura 4 – Estágios do processamento de imagem: (a) imagem original, (b) imagem em escala de cinza e (c) imagem binária.



Fonte: O Autor (2023).

Na segunda etapa é realizada a análise da imagem processada para se obter os índices geométricos das fissuras. O CIF é determinado configurando cada pixel preto como uma porção quadrada de área fissurada, fazendo uso de escala. Assim a soma de todos de mesma cor resulta na área fissurada e ao dividir pela área total da amostra resulta no CIF. A largura média das fissuras é encontrada ao tirar uma média aritmética da soma de todas as larguras de fissuras na amostra, determinada pela contagem de pixels pretos da distância mais curta de um ponto de uma borda ao limite oposto de uma fissura. O número de segmento de fissuras é a soma dos elementos entre duas intersecções adjacentes – um segmento de fissura. O comprimento total das fissuras é calculado contando o número total de pixels pretos consecutivos ao longo das fissuras (TANG et al. 2019). O programa de domínio público ImageJ é bastante usado para esses fins. Com ele é possível exibir, editar, analisar e processar imagens.

## 2.3 PNEUMÁTICOS

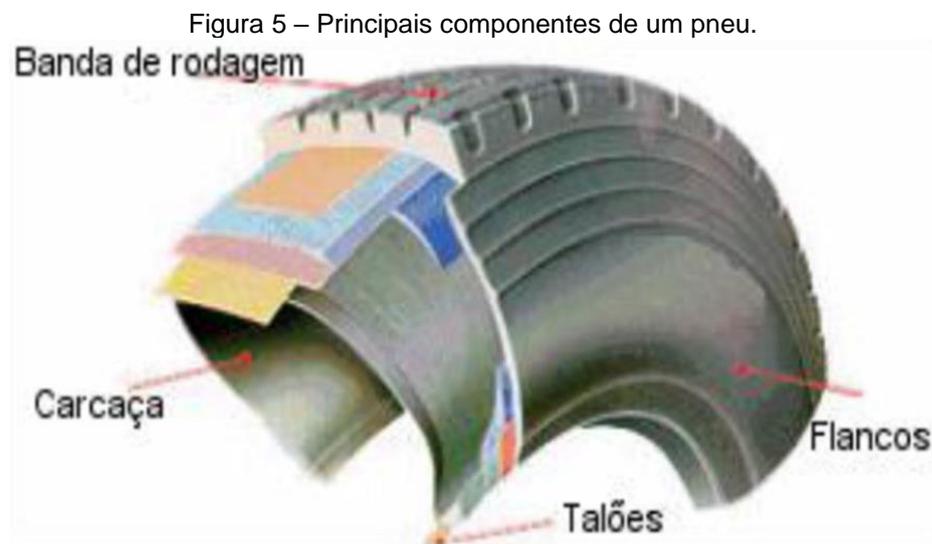
A seguir é apresentada a caracterização e reutilização dos pneumáticos.

### 2.3.1 Caracterização dos pneumáticos

O pneu, simplificação da palavra pneumático, é um tubo de borracha cheio de ar e condizente ao aro da roda do veículo que permite a tração do veículo e amortecimento aos choques contra o solo sobre o qual o veículo caminha

(ANDRIETTA, 2012). A resolução do CONAMA (BRASIL, 2009) define pneu novo como aquele que não mostra sinais de uso ou reformas assim como características de deterioração ou envelhecimento. Já os pneus inservíveis são caracterizados pela não possibilidade de reparação por conta de danos que afetam a estrutura.

Conforme Chrusciak (2013), os pneus são constituídos pela banda de rodagem (parte da superfície do pneu que entra em contato diretamente com a estrada), carcaça ou aro de aço (região interior do pneu), cintas (propicia suporte à estrutura, mantendo o formato do pneu), talão (mantém o pneu acoplado ao aro de aço), flancos (parede lateral) e overlay (restringe as deformações sofridas pela banda de rodagem). Alguns dos principais elementos citados podem ser encontrados na Figura 5.



Fonte: Fioriti (2007).

Analisando-se as matérias-primas que compõem o pneu, nota-se que sua composição é de aproximadamente 40% de borracha, 25% derivados do petróleo, 15% de composto de aço, 5% de tecidos e 15% restantes de outros compostos químicos (TAPAS; BALESHWAR, 2013).

A borracha de pneu tem em sua composição química polímero elastomérico que é levado a diversos processos termoquímicos até possuir as características desejáveis de resistência e durabilidade necessárias para sua aplicação fim. Para um comportamento elastomérico, uma característica obrigatória é que a estrutura molecular possua ligações cruzadas. Esse processo de formação de ligações cruzadas nos elastômeros que compõem a borracha é conhecido como vulcanização, tratamento que faz com que compostos de enxofres se liguem com as cadeias

principais do polímero que se encontram adjacentes, criando pontes entre elas (ALBUQUERQUE, 2009).

Algumas características físicas da borracha dos pneus foram relatadas em literaturas (MOO-YOUNG et al., 2003; SHALABY; KHAN, 2005; BALUNAINI; PREZZI, 2010; HAZARIKA et al., 2010; CASAGRANDE, 2013; THAKUR; KAUSHIK, 2016). Possui peso específico baixo, baixa condutividade elétrica, grande durabilidade, pouca absorção de água, não é biodegradável, boa resistência a intempéries, possui compressibilidade e é capaz de mitigar vibrações.

### **2.3.2 Reutilização de pneus inservíveis**

Cerca de 1,5 bilhão de pneus são fabricados no mundo a cada ano e 1 bilhão de pneus chegam ao fim de sua vida útil nesse mesmo período. Esse número pode chegar a até 1,2 bilhões de pneus ao ano até 2030 (THOMAS et al., 2014). Esses pneus descartados podem acabar em aterros sanitários, empilhados ou queimados, o que causa sérios problemas ecológicos e de saúde no mundo.

No ano de 2002 no Brasil, levando em conta a frota de veículos do país, foi estimada uma produção anual de aproximadamente 44 milhões de carcaças de pneus, com um total, até aquele momento, de 100 milhões de pneus abandonados de forma irregular em todo o país (BERTOLLO, 2002). Em 2013, o volume de vendas, que inclui produção e importação, foi de 72,6 milhões de unidades (ANIP, 2014), correspondendo a um aumento de 6,9% em relação ao ano 2012. Isso mostra que há uma tendência de maior consumo e conseqüentemente aumento da geração destes resíduos.

Os pneus usados podem passar por métodos de reutilização, reciclagem ou recuperação. Nesta última é possível dar um aumento a vida útil dos pneumáticos, prolongando o seu uso e retardando o descarte. A recuperação pode ser subdividida em processos de recapagem, recauchutagem e remoldagem. Apenas quando o pneu se encontra fora das condições aceitáveis de conservação que permitem o processo de reforma é que eles são descartados definitivamente, gerando a maior parte dos pneus inservíveis (CHRUSCIAK, 2013).

Conforme Andrade (2007), a recapagem consiste na reconstrução de um pneu através da troca de sua banda de rodagem. O mercado brasileiro de recapagens de carga é de aproximadamente 7,5 milhões de unidades por ano contra valores

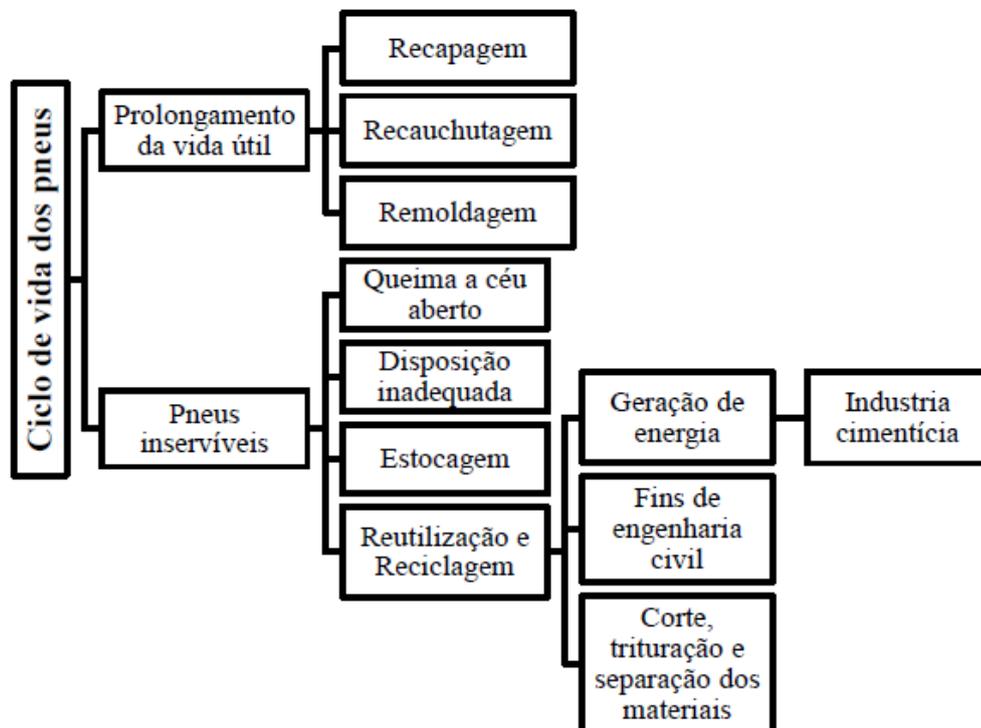
próximos a 4 milhões de pneus novos. De tudo isso, 75% dos pneus recapados são utilizados no transporte rodoviário de carga, 12% são pneus de movimentação de carga própria e o restante se refere aos pneus de transporte de passageiros.

A recauchutagem consiste na reconstrução do pneu através da substituição dos ombros e da banda de rodagem. É feita a remoção da banda de rodagem desgastada da carcaça do pneu para que se coloque uma nova banda de rodagem através de um novo processo de vulcanização (ANDRADE, 2007).

A remoldagem é o processo de reconstrução do pneu através da troca da banda de rodagem, dos ombros e de toda a superfície de seus flancos. Este é um processo que é muito parecido à recauchutagem, a diferença está em função da remoção da banda de rodagem e das partes laterais dos pneus, portanto, todo pneu recebe uma camada nova de borracha e passa por um processo de vulcanização novamente (ANDRADE, 2007).

A Figura 6 mostra as atividades que representam o ciclo de vida dos pneus.

Figura 6 – Ciclo de vida dos pneus.



Fonte: Chrusciak (2013).

A forma, assim como resistência à compactação dos pneus, dificulta o armazenamento, exigindo uma grande quantidade de espaço disponível (TAPAS & BALESHWAR, 2013). Um pneu pesa em torno de 10 kg e 60 kg e cerca de 75% do

seu volume é formado por um espaço vazio, portanto constitui-se de um objeto muito volumoso, de modo que ocupa áreas consideráveis nos aterros sanitários (MARTÍNEZ, 2013).

Abbaspour et al. (2019) propuseram recentemente a ideia de reutilizar resíduos de fibras têxteis de pneu como materiais promissores de reforço de solo em projetos de engenharia civil e geotécnica. Os resíduos de pneu são adquiridos durante o processo de reciclagem de pneus em fim de vida e são tradicionalmente enterrados ou queimados, em conflito com a legislação internacional. Portanto, reutilizá-los em projetos de engenharia geotécnica pode levar a várias vantagens: reduzir o custo dos projetos, melhorar a capacidade de carga, limitar as deformações dos solos e abordar os riscos ambientais decorrentes da queima ou enterro de resíduos de pneu.

Os pneus inservíveis podem ser processados de forma a se tornarem pedaços de pneu, migalhas de pneu, fibras de pneu e lascas de pneu (Figura 7). Na engenharia civil estes produtos resultantes são geralmente utilizados como agregados leves (EDINÇLILER, BAYKAL; SAYGILI, 2010).

Figura 7 – Produtos de processamentos de pneus inservíveis.



Fonte: Edinçliler, Baykal e Saygili (2010).

Os pedaços de pneus apresentam diversas formas e tamanhos, que oscilam de 50 a 300 mm (ASTM, 2004), a depender do tipo de máquina de processamento utilizada. Estes são usados como material para em algumas obras, como mostrado

por Edil e Bosscher (1994) que onde foi utilizado em construção de aterros misturado ao solo. Para evitar problemas com a compactação, recomenda-se o uso de pedaços inferiores a 50mm.

As lascas de pneus são processadas através de trituração primária. São resíduos de pneus que têm geometria retangular ou quadrada e possuem tamanho que varia de 10 mm a 50 mm e onde os fios de aço são retirados em sua maior parte (ASTM, 2008).

As migalhas de pneus possuem formato arredondado e sem tiras de aço. Para alcançar suas dimensões inferiores a 0,6 mm são utilizadas várias técnicas. Este tipo de resíduo de pneu é muito utilizado para a obtenção das misturas asfálticas modificadas.

As fibras de pneu são pequenos filamentos subprodutos da recapagem ou recauchutagem de pneus onde ele é raspado e toda a antiga cobertura da banda de rodagem é removida, gerando assim o resíduo. Diferente dos pedaços, lascas e migalhas de pneus, as fibras possuem pequeno diâmetro, de 2 a 4 mm, e comprimentos várias vezes maiores que seu diâmetro, de 0,1 mm a 37 mm, o que confere a eles um formato de fibra. São isentos de materiais têxteis e tiras de aço. Isso torna-os um material ideal para formar composto com o solo (EDINÇLILER; BAYKAL; SAYGILI, 2010).

Esses materiais processados de pneus inservíveis possuem aplicações dentro da engenharia civil. Alguns estudos relatam o uso desses materiais nos mais diversos campos, como por exemplo em concreto leve (GUERRA et al., 2010), blocos de concreto e blocos intertravados de concreto (SILVA et al., 2017), composição de aterros para rodovias (NASCIMENTO, 2015), sistema de drenagem em aterros (THAKUR; KAUSHIK, 2016), aditivo em pavimento asfáltico (RODRIGUEZ-ALLOZA et al., 2014), estruturas de contenção (GERSCOVICH et al., 2006) e em aterros leves sobre solos moles (AHMED; LOVELL, 1993).

## 2.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS

A utilização de técnicas de estabilização de solos para mudar suas características geotécnicas mostra-se cada vez mais importante na viabilização de obras de engenharia. A estabilização dos solos pode ser obtida através de diferentes técnicas. A escolha por uma ou outra técnica de estabilização é influenciada por vários

de fatores, dentre os quais se destacam os custos totais da obra, as propriedades dos materiais, as características que devem ser corrigidas, assim como a própria finalidade da obra (CABALAR; KARABASH, 2015).

Muitos tipos de resíduos como, por exemplo, resíduos industriais, pó de mármore, alguns materiais plásticos e cinzas volantes são explorados para serem utilizados como materiais aditivos para estabilizar solos expansivos diminuindo o deslocamento, taxa de assentamento e pressões da terra, aumentando a capacidade de carga dessas estruturas (CABALAR; KARABASH; MUSTAFA, 2014; CABALAR; KARABASH, 2015).

A expansão dos solos expansivos é um fenômeno muito importante na geotecnia que está na origem de inúmeros danos às estruturas. A utilização de fibras como reforço dentro de uma matriz depende essencialmente da compatibilidade das propriedades físicas, mecânicas e químicas que a fibra possui com os constituintes da matriz (solo, concreto, concreto arenoso ou argamassa). Fibras de todos os tipos foram testadas no reforço de materiais. Os mais comuns são: amianto, vidro, aço, plástico (náilon e polipropileno), carbono, fibras ou pó de pneus usados e fibras vegetais (BLEDZKI; GASSAN, 1999; TROUZINE; BEKHITI; ASROUN, 2012; BEKHITI; GHRIEB; ZAITRI, 2020). Fibras também passaram a ser adicionadas ao solo para melhorar a capacidade de suporte (CAI et al., 2006). O uso de fibras residuais como reforço tem enorme potencial como material reciclável na indústria da construção (SAVASTANO JUNIOR; WARDEN; COUTTS, 2005). As fibras naturais têm sido utilizadas no campo da estabilização de solos (GRAM, 1983). E recentemente, fibras artificiais são adicionadas a solos finos para fortalecer sua resistência (AKBULUT; ARASAN; KALKAN, 2007) como, por exemplo, a fibra de pneu.

Hasan et al. (2020) estudaram o uso de borracha de pneu para melhorar as propriedades de um solo expansivo. A incorporação da maior quantidade de borracha maior que 5% reduziu a resistência à compressão não confinada, embora o solo tenha mantido consistência rígida. Enquanto a tensão axial na ruptura do solo aumentou um pouco com o aumento do teor de borracha. A adição de borracha ao solo expansivo causou uma diminuição considerável no potencial de expansão e a taxa de diminuição foi de cerca de 29,84, 43,4, 49,39 e 14,77 vezes comparado ao solo não tratado para teor de borracha de 1%, 3%, 5% e 10%, respectivamente. A tensão de expansão no solo diminuiu consideravelmente, com uma taxa de redução de cerca de 11,91, 19,32,

31,78 e 17,84 vezes comparado ao solo não tratado para o teor de borracha de 1%, 3%, 5% e 10%.

Bhekiti et al. (2021) obtiveram resultados para solos argilosos misturados com diferentes porcentagens de fibras de borracha de pneu. Foi possível concluir que a mistura de amostras de argila expansiva com fibras de borracha de pneus reduziu o potencial de expansão e a tensão de expansão. Foram registradas reduções graduais com a adição de fibras de borracha. Para a bentonita, a taxa máxima de expansão foi de 15,75%. Quando misturado com fibras de borracha, a taxa de expansão diminuiu para 9,75% com um teor de fibra de 10%, resultando numa redução de aproximadamente 38,10%. Para a argila Oran a taxa máxima de expansão observada foi de 4,75%, com uma redução na expansão variando de 13,7% para o teor de 1% de fibras até uma redução de 36,8% para um teor de 10% de fibras de pneu. Pôde-se concluir que as fibras de pneu reduzem significativamente o comportamento de expansão independentemente da plasticidade do solo argiloso, embora tenha sido registrado um aumento da compressibilidade do solo argiloso ao se misturar com fibras.

Narani et al. (2020) avaliaram a viabilidade de reutilizar os resíduos de pneu como materiais de reforço em solos expansivos por meio de um conjunto de experimentos. Nos ensaios de resistência a tração por compressão diametral as fibras de pneu alteraram o comportamento de tração do solo. A resistência foi aumentada com um teor ótimo de 3% de fibras, onde a resistência à tração e a tensão máxima são aumentadas em 94% e 222%, respectivamente. O comportamento de pico único da amostra não reforçada é transformado em pico duplo e o comportamento pós-pico é significativamente melhorado. O potencial de expansão foi consideravelmente reduzido com um teor de 3%. A eficácia das fibras de pneu na mitigação das deformações de expansão foi comprometida em teores de fibra mais elevados devido a floculação e dobragem das fibras. A contração volumétrica e o CIF das amostras dos ensaios de formação e propagação de fissuras diminuíram à medida que o teor de fibras de pneu aumentou. A redução máxima foi experimentada com o teor de 4% de fibras de pneu, comprovando que as fibras podem efetivamente diminuir a área fissurada durante o processo de secagem.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa de investigação geotécnica é demonstrado com seus materiais e métodos utilizados. O solo expansivo investigado é oriundo do município de Paulista-PE e dele obteve-se suas características físicas e mecânicas em sua forma natural e em misturas com adição de fibras de pneu inservíveis. É buscado também saber se a adição da fibra promove uma menor expansividade e conseqüentemente fissuração ao solo comparado a ele em seu estado natural.

#### 3.1 PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

Esta pesquisa divide-se em três etapas (Figura 8). São elas:

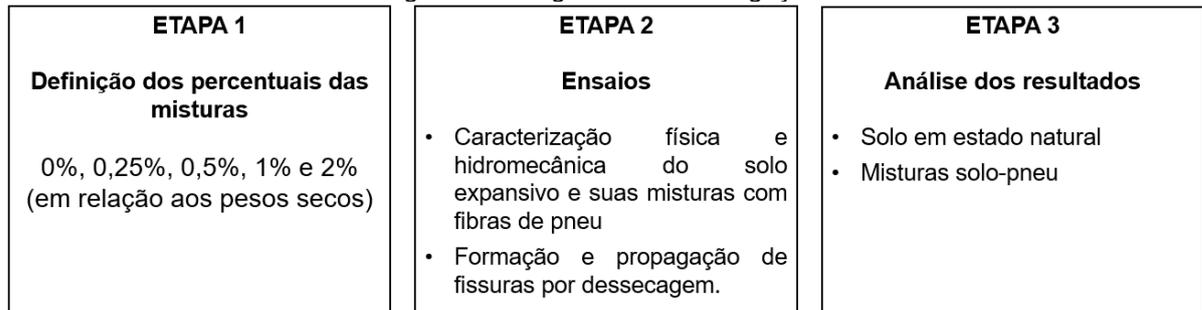
Etapa 1: Definição das porcentagens em massa de fibras de pneu a serem adicionadas ao solo expansivo de Paulista. Foi decidido avaliar as misturas de solo com fibras de pneu nas porcentagens, de 0%, 0,25%, 0,5%, 1% e 2%. Proporções essas em relação ao peso seco dos materiais envolvidos. A escolha dos teores foi definida através da análise de estudos – Abbaspour et al. (2019) e Silva (2018) – que também utilizaram resíduos de pneu em solos expansivos, observando as proporções que resultaram em melhores benefícios ao solo. Abbaspour et al. (2019) concluíram que confeccionar misturas uniformes em amostras que contêm mais de 4% de resíduos de pneu se mostrou bastante difícil e impraticável em projetos devido ao grande volume de material. Na pesquisa de Silva (2018) notou-se uma resistência à compactação nas amostras com misturas de solo/fibras de pneu, sendo maior à medida que se aumentava o teor de fibras, mostrando que a fibra tem capacidade de absorver uma parte da energia de compactação empregada. Por esses motivos, foi decidido avaliar o solo nas proporções gradativas supracitadas para verificar qual delas possui a melhor aplicabilidade em uma obra de engenharia.

Etapa 2: Consistiu da execução de ensaios para a caracterização física (granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, densidade real dos grãos e compactação) e hidromecânica (squeeze-flow, condutividade hidráulica, tensão de expansão, expansão “livre”, compressão simples, compressão diametral e cisalhamento direto) do solo expansivo e da mistura solo-fibras de pneu com as porcentagens supracitadas, assim como o ensaio de formação e propagação de fissuras por dessecação. Todos os ensaios foram executados em instalações dos

laboratórios de Solos e Instrumentação (LSI) e de Solos Não Saturados (Lab Nsat) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Etapa 3: Análises dos resultados obtidos nos ensaios e das comparações entre o solo em seu estado natural e as misturas com adição das fibras de pneu.

Figura 8 – Programa de investigação.



Fonte: O Autor (2023).

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir são apresentados os materiais utilizados na pesquisa.

### 3.2.1 Solo expansivo de Paulista-PE

O solo expansivo utilizado nesta pesquisa foi obtido das amostras deformadas coletadas por Araújo (2020) na Estação de Tratamento de Esgoto do Janga (ETE-Janga), no bairro de Maranguape II, no Município de Paulista/PE. As mesmas já se encontravam devidamente armazenadas em sacos plásticos no Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em quantidade suficiente para vários ensaios. Uma amostra deformada do solo expansivo armazenado em saco plástico é apresentada na Figura 9.

Figura 9 – Amostra do solo expansivo de Paulista-PE.



Fonte: O Autor (2023).

### 3.2.2 Fibras de pneus

As fibras de pneu que foram utilizados nessa pesquisa (Figura 10) foram coletadas por Macedo (2016) em uma empresa que realiza renovação de pneus, localizada no município de Jaboatão dos Guararapes-PE. Encontravam-se armazenados no Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em sacos plásticos em quantidade satisfatória para todos os ensaios da pesquisa.

Figura 10 – Amostra de fibras de pneus utilizados na pesquisa.



Fonte: O Autor (2023).

### 3.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Seguindo as diretrizes da norma NBR 6457 (ABNT, 2016a), todas as amostras de solo preparadas para os ensaios passaram por secagem ao ar, remoção de impurezas, destorroamento utilizando almofariz e mão de gral (Figura 11), peneiramento com uso de peneira nº 4 (4,8 mm) e posterior medição da umidade do solo. Em seguida foram preparadas misturas do solo com as fibras de pneu, que já se encontravam secas ao ar, em diferentes proporções.

Figura 11 – Solo em processo de destorroamento com almofariz e mão de gral.



Fonte: O Autor (2023).

As porcentagens de incremento de fibras de pneu foram feitas em relação ao peso seco do solo com teores pré-estabelecidos de 0,0% (solo natural), 0,25%, 0,5%, 1% e 2%.

As misturas foram realizadas de forma que as fibras ficassem distribuídas uniformemente no conjunto. A umidade de cada mistura foi realizada naquele momento e, após isso, as massas de solo-pneu foram armazenadas em sacos plásticos vedados para evitar variação de suas umidades até o posterior uso em ensaios.

### 3.4 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

Os ensaios para caracterização física do solo de Paulista-PE e de suas misturas com 0,25%, 0,50%, 1,00% e 2,00% de fibras de pneu encontram-se listados na Tabela 2:

Tabela 2 – Ensaio de caracterização realizados.

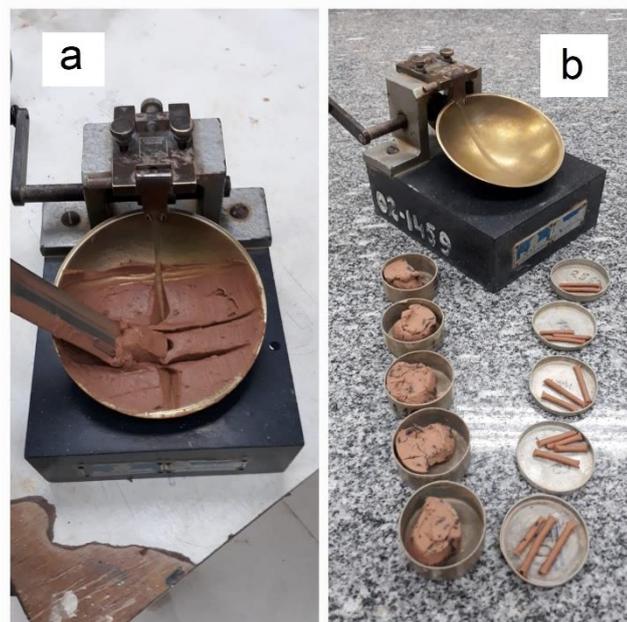
| <b>Ensaio</b>                   | <b>Norma</b>           |
|---------------------------------|------------------------|
| <b>Análise Granulométrica</b>   | NBR 7181 (ABNT, 2016b) |
| <b>Limite de Liquidez</b>       | NBR 6459 (ABNT, 2016c) |
| <b>Limite de Plasticidade</b>   | NBR 7180 (ABNT, 2016d) |
| <b>Densidade Real dos Grãos</b> | NBR 6508 (ABNT, 1984)  |
| <b>Compactação</b>              | NBR 7182 (ABNT, 2016e) |

Fonte: O Autor (2023).

A análise granulométrica do solo de Paulista-PE sem adição de fibras de pneu foi realizada de acordo com os procedimentos indicados na NBR 7181 (ABNT, 2016b) com os materiais preparados conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016a), a qual normaliza o método de preparo para amostras de ensaios de caracterização. O ensaio foi realizado em etapas de peneiramento e sedimentação com adição de defloculante hexametáfosfato de sódio devido ao conhecimento prévio e da identificação através de constatação visual de que o solo possui uma parcela significativa de materiais finos.

Para saber o nível de influência dos finos de argila presentes no solo de Paulista-PE natural e em suas misturas com 0,25%, 0,50%, 1,00% e 2,00% de fibras de pneu, foram realizados ensaios de Limite de Liquidez (LL) e de Limite de Plasticidade (LP) (Figura 12). Os ensaios foram realizados seguindo as normas NBR 6459 (ABNT, 2016c) e NBR 7180 (ABNT, 2016d), respectivamente.

Figura 12 – Execução dos ensaios de limite de liquidez (a) e limite de plasticidade (b).



Fonte: O Autor (2023).

A determinação da densidade real dos grãos do solo natural foi realizada através do método do picnômetro e da bomba a vácuo para a retirada do ar das amostras, conforme especificado na NBR 6508 (ABNT, 1984). Foram realizados três ensaios para se obter o valor através da média aritmética entre seus resultados.

Com a finalidade de determinar o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e a umidade ótima ( $w_{\acute{o}tima}$ ) do solo natural e do solo misturado com 0,25%, 0,50%, 1,00% e 2,00% de fibras de pneu, foram executados ensaios de compactação com reuso de material para cada proporção e para o solo sem mistura com o emprego de energia de Proctor Normal nos ensaios, tudo de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016e).

Nos ensaios de compactação, para cada amostra foi preparado e compactado aproximadamente 3kg de material em cilindro específico para o ensaio. O corpo de prova foi executado em três camadas, onde cada uma delas recebeu 26 golpes. Houve reuso do material com a destruição do corpo de prova no fim de um ensaio, nova preparação do material e posterior incremento de água para a reexecução do corpo de prova para, com seus resultados, construir a curva gráfica do ensaio. A Figura 13 mostra um corpo de prova moldado com 2% de fibras de pneu.

Figura 13 – Corpo de prova de uma mistura de solo com 2% de fibras de pneu para ensaio de compactação.



Fonte: O Autor (2023).

### 3.5 ENSAIO SQUEEZE-FLOW

Com a finalidade de conhecer melhor as características reológicas do solo natural e de suas misturas com fibras de pneu, foram realizados ensaios de squeeze-flow. Por não existir norma referente a solo para esse tipo de ensaio, foram seguidas as orientações da norma NBR 15839 (ABNT, 2010).

Foi utilizada prensa eletromecânica produzida pela Indústria e Comércio Ronald Top LTDA, extensômetros Mitutoyo com resolução de 0,01 mm e anéis dinamométricos de carga máxima 1 kN e 10kN da marca Digimess. O ensaio foi realizado com controle por deslocamento em que o material foi deslocado em velocidade constante de 0,04 mm/s. Para a moldagem do corpo de prova, foram usados os equipamentos mostrados na Figura 14.

Figura 14 – Conjunto de equipamentos utilizados para moldagem das amostras para o ensaio squeeze-flow: (a) gabarito; (b) placa superior; (c) espátula; (d) anel de moldagem 100,2 mm de diâmetro interno e 10 mm de altura; (e) placa inferior.



Fonte: O Autor (2023).

Foram realizados dois ensaios para cada proporção solo/fibra de pneu: um com umidade do ensaio do limite de liquidez e outro com do limite de plasticidade. Para os cálculos das massas de misturas solo/fibra de pneu necessárias para preencher o

anel de moldagem, foi definido um índice de vazios constante de 1,31 para todos os corpos de prova.

Inserido o gabarito com o anel de moldagem sob a placa inferior, a porção de solo/fibra de pneu foi calculada, preparada e inserida dentro do anel (Figura 15). Com auxílio da espátula, a mistura foi distribuída uniformemente no anel de moldagem. Em seguida, retirou-se com cuidado o gabarito e o anel de moldagem em movimento vertical ascendente, mantendo assim o corpo de prova com formato cilíndrico de 100,2 mm de diâmetro e com 10 mm de altura. Com cuidado, a placa superior era então posicionada sob a amostra de forma a não alterar as dimensões da mesma.

Figura 15 – Pesagem de uma porção de solo/fibra de pneu para ensaio squeeze-flow (a) e corpo de prova na umidade de limite de plasticidade moldado para ensaio (b).



Fonte: O Autor (2023).

Levando para a prensa eletromecânica todo o aparato montado, o mesmo era posicionado e centralizado no equipamento. O anel dinamométrico de carga máxima 1 kN foi utilizado para os corpos de prova com umidade correspondente ao limite de liquidez, já o anel de 10 kN foi usado para os de umidade igual ao limite de plasticidade.

Com o extensômetro devidamente posicionado, o ensaio era iniciado (Figura 16). Em determinados deslocamentos eram anotadas as cargas registradas nos anéis

à medida que a base onde o corpo de prova se encontra posicionado na prensa se deslocava verticalmente para cima. Como as amostras possuíam 10 mm de altura, os ensaios eram encerrados quando o extensômetro registrava deslocamento de 8 mm ou quando a carga chegava perto de exceder o máximo que o anel dinamométrico utilizado suporta, para evitar danos aos equipamentos.

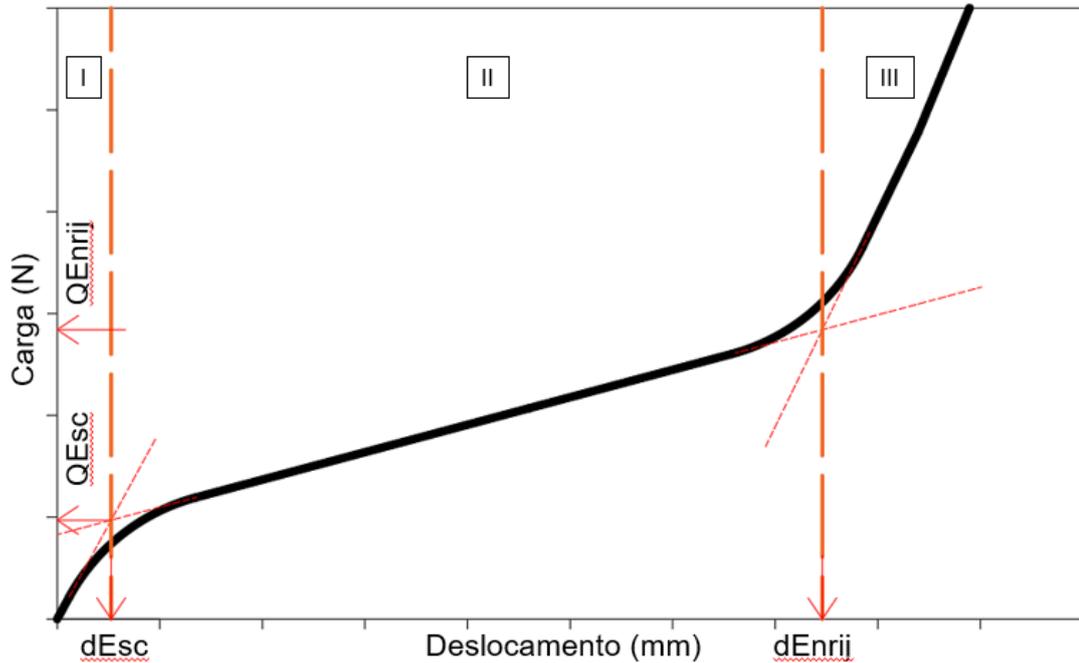
Figura 16 – Corpo de prova no início do ensaio squeeze-flow (a) e no fim do ensaio (b) para uma amostra com umidade no limite de liquidez.



Fonte: O Autor (2023).

Com os gráficos obtidos ao fim dos ensaios foi possível desenvolver as curvas de carga *versus* deslocamento dos três estágios de comportamento reológico, que têm origem do comportamento de interação entre as partículas da amostra (Figura 17). O fim do Estágio I e início do Estágio II tem como característica o deslocamento de escoamento ( $d_{Esc}$ ) e carga de escoamento ( $Q_{Esc}$ ). No fim do Estágio II e início do Estágio III se obtém o deslocamento inicial de enrijecimento ( $d_{Enrij}$ ) e a carga inicial de enrijecimento ( $Q_{Enrij}$ ). O fim do Estágio III corresponde ao fim do ensaio, que vai até o deslocamento máximo de 8 mm ou quando a carga chega próxima à carga máxima suportada pelo anel dinamométrico utilizado no ensaio.

Figura 17 – Demonstração dos três estágios do comportamento reológico em curva carga *versus* deslocamento.



Fonte: Adaptado de Cardoso (2009).

### 3.6 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Buscando-se determinar os coeficientes de permeabilidade do solo natural e em suas misturas com fibras de pneu, foram realizados ensaios de permeabilidade à carga constante para todas as misturas seguindo os procedimentos descritos na norma NBR 13292 (ABNT, 2021).

Os corpos de prova foram compactados no teor de  $w_{ótima}$  e  $\gamma_{dmáx}$  obtidos nos ensaios de compactação e moldados em formato cilíndrico com altura de 127 mm e 100 mm de diâmetro. Suas massas foram pesadas (Figura 18) e em seguida foram envoltos em plástico filme e papel alumínio e armazenados em caixa térmica de isopor fechada por 48 horas para a homogeneização da umidade. Após esse tempo, foram levados para ensaio.

Figura 18 – Pesagem de um corpo de prova para ensaio de condutividade hidráulica.

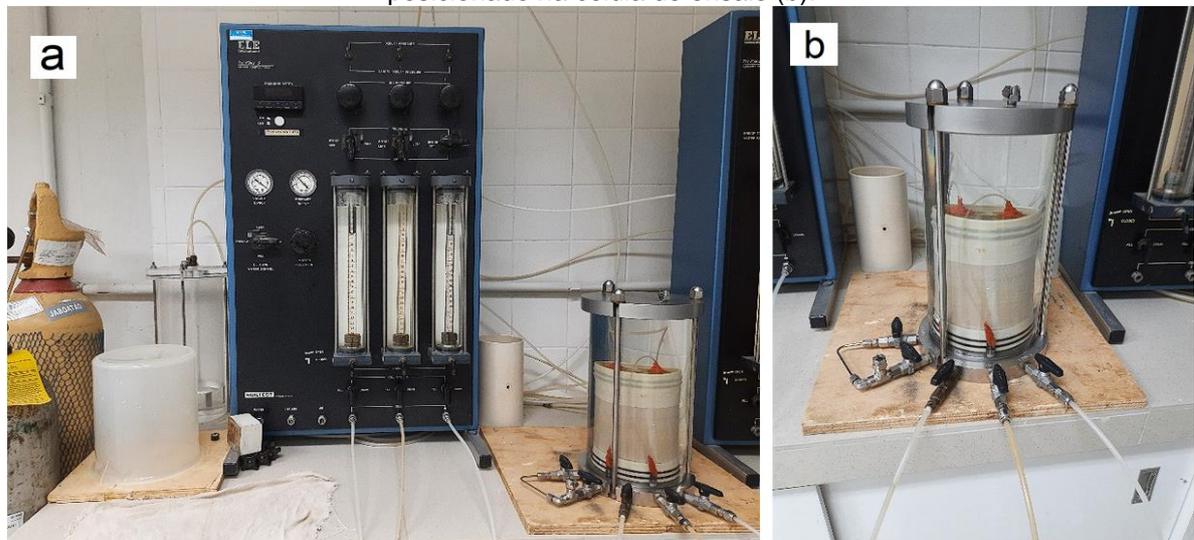


Fonte: O Autor (2023).

O equipamento utilizado foi um permeômetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE (Figura 19) com utilização de água destilada.

Após a devida acomodação das amostras no permeômetro, primeiramente foi realizada a saturação dos corpos de prova. Para isso, foi aplicada uma tensão confinante de 220 kPa nas paredes da membrana flexível que envolvia as amostras e tensão de 200 kPa na base e no topo do corpo de prova. A saturação era alcançada quando o volume de água que entrava pela base era igual a que saía pelo topo.

Figura 19 – Permeômetro utilizado no ensaio de condutividade hidráulica (a) e corpo de prova posicionado na célula de ensaio (b).



Fonte: O Autor (2023).

Após a saturação dos corpos de prova concluídas foi possível dar início aos procedimentos que determinam os valores dos coeficientes de condutividade hidráulica das amostras. Para isso, foi mantida a tensão confinante de 220 kPa e a pressão de 200 kPa na base, mudando apenas a tensão no topo do corpo de prova para 50 kPa e gerando com isso um gradiente hidráulico de 150 kPa no sentido vertical da base para o topo. Foram então anotados os tempos necessários para percolar 1 cm<sup>3</sup> de água pelas amostras sob esse gradiente. Foram feitas três percolações do mesmo volume para cada proporção solo/fibra de pneu e o tempo resultante foi definido pela média aritmética dos três valores. Em seguida, foram removidos os corpos de prova do permeâmetro e prontamente pesados para descobrir sua nova massa.

Com a Equação 1 foi encontrado o valor do coeficiente de condutividade hidráulica para os corpos de prova.

$$K_h = (h \cdot V_p) / (t \cdot A_b \cdot \Delta_p) \quad (1)$$

Onde:

$k_h$ : coeficiente de condutividade hidráulica (m/s);

$h$ : altura do corpo de prova (m);

$V_p$ : volume de água percolada (m<sup>3</sup>);

$t$ : tempo da percolação (s);

$A_b$ : Área da base do corpo de prova (m<sup>2</sup>);

$\Delta_p$ : gradiente de pressão aplicado entre a base e o topo do corpo de prova (cmH<sub>2</sub>O);

### 3.7 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA EXPANSÃO

Para verificar a influência da inclusão das fibras de pneu na expansividade do solo natural e de suas misturas com fibras de pneu, foram realizados ensaios de tensão de expansão e de expansão “livre” para todas as misturas.

Para ambos os ensaios, corpos de prova foram compactados na  $W_{ótima}$  e  $\gamma_{dmáx}$  e deles foram moldadas, em anéis metálicos de 82,5 mm de diâmetro e 20 mm de altura, amostras para os ensaios. Isso foi feito para todas as proporções de solo/fibra de pneu. As amostras confeccionadas nos anéis foram inseridas em células convencionais de ensaios edométricos e acomodadas em prensas de adensamento

para a execução (Figura 20). Para a aferição da variação de altura das amostras foi usado um extensômetro de resolução de 0,01 mm.

Figura 20 – Moldagem de amostra em anel metálico (a), células e prensas de adensamento (b) e ensaio de tensão de expansão em andamento (c).



Fonte: O Autor (2023).

Os ensaios de tensão de expansão foram realizados seguindo as diretrizes da norma NBR 16853 (ABNT, 2020) utilizando o método de volume constante. As amostras dentro das células edométricas foram inundadas e, à medida que a expansão do volume acontecia e conseqüentemente a altura do corpo de prova tendia a aumentar, novas sobrecargas eram adicionadas na prensa para aumentar a pressão de confinamento vertical e impedir a variação de volume. Esse processo se manteve até a completa estabilização da variação de altura das amostras que levava em torno de 48 horas. A sobrecarga total aplicada é a tensão de expansão do solo.

Com relação aos ensaios de expansão “livre”, cuja norma utilizada foi a ASTM D4829 (ASTM, 1995), as amostras dentro das células edométricas foram inseridas na prensa e uma pressão de confinamento vertical de 7 kPa foi aplicada. Os corpos de prova foram então inundados e as deformações verticais medidas por 48 horas. Com as variações verticais totais calculou-se as variações volumétricas e deformações específicas das amostras.

### 3.8 ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Foram executados ensaios de compressão simples e de compressão diametral no solo natural e em suas misturas com fibras de pneu, seguindo as orientações das normas NBR 12770 (ABNT, 1992) e NBR 7222 (ABNT, 2011), respectivamente. A

última foi utilizada por não existir normatização de ensaio de compressão diametral para solos.

Os corpos de provas para esses ensaios foram moldados em três camadas, sendo suas superfícies escarificadas para garantir aderência entre as mesmas, e com o uso de compactação estática na  $W_{ótima}$  e  $\gamma_{dmáx}$  para cada proporção solo/fibra de pneu em um cilindro tripartido de bronze com 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Para uma retirada mais fácil do corpo de prova, foi aplicado vaselina nas paredes internas do cilindro.

O anel dinamométrico utilizado em ambos os ensaios foi da marca Digimess e possuía capacidade máxima de 5,00 kN com constante  $0,12 \text{ kgf div}^{-1}$ . Empregado extensômetro da marca Mutitoyo com sensibilidade de 0,01 mm. Foi utilizada a prensa eletromecânica de compactação produzida pela Indústria e Comércio Ronald Top LTDA. A velocidade dos ensaios foi de 0,48mm/min.

Com as compactações realizadas e com os corpos de prova devidamente preparados, os mesmos eram desmoldados, envoltos em plástico filme e papel alumínio, identificados e deixados por 48 horas nesse estado dentro de uma caixa térmica de isopor fechada para a equalização da umidade. Após esse tempo eram levados para os ensaios. A Figura 21 demonstra algumas características dos ensaios de compressão executados para esse estudo.

Tanto para o ensaio de compressão simples como para o de compressão diametral foram confeccionados dois corpos de prova para cada proporção solo/fibra de pneu, cujo resultado final da resistência à compressão da proporção solo/fibra de pneu foi obtido através da média aritmética dos resultados de cada par.

Figura 21 – Execução de ensaio de compressão simples (a), amostra desmoldada para ensaio de compressão (b) e execução de ensaio de compressão diametral (c).



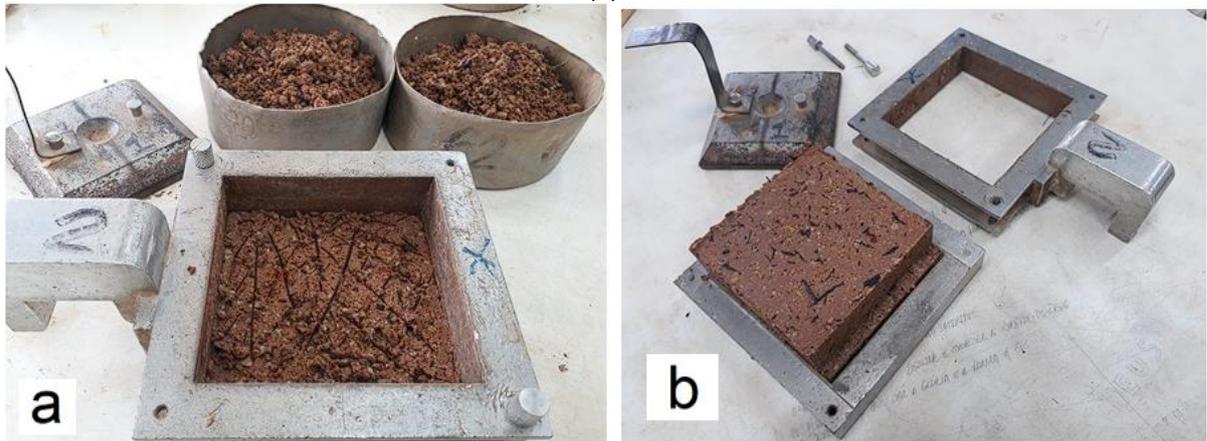
Fonte: O Autor (2023).

### 3.9 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Para o conhecimento da resistência ao cisalhamento do solo natural e de suas misturas com fibras de pneu, foram feitos ensaios de cisalhamento direto em condição não inundada e de acordo com a norma ASTM D3080 (ASTM, 2004).

Foram realizados ensaios para todas as proporções de solo/fibra de pneu. Os corpos de prova foram moldados em duas camadas com escarificação na superfície entre elas para haver aderência, executadas na  $w_{ótima}$  e  $\gamma_{dmáx}$  cujos valores já foram previamente conhecidos nos ensaios de compactação e acomodadas em uma caixa metálica paralelepípedica de fundo quadrado com 101 mm de lado e com altura de 43 mm. Cada ensaio de cisalhamento foi realizado no mesmo dia para evitar perda de umidade com o tempo. A Figura 22 ilustra como os corpos de prova foram moldados no ensaio.

Figura 22 –Moldagem do corpo de prova (a) e corpo de prova no fim do ensaio de cisalhamento direto (b).



Fonte: O Autor (2023).

Com relação aos equipamentos utilizados no ensaio, foi empregada uma prensa de cisalhamento direto com sistema de aplicação de tensão normal através de pesos em pendural (Figura 23). A leitura da força horizontal foi feita com o uso de anel dinamométrico da marca Digimess de capacidade máxima de 5,00 kN e constante de  $0,16 \text{ kgf div}^{-1}$ . Os deslocamentos horizontais e verticais foram medidos com o uso de extensômetros de sensibilidade  $0,01 \text{ mm}$  da marca Mutitoyo.

Figura 23 – Ensaio de cisalhamento direto em execução.



Fonte: O Autor (2023).

Para cada proporção de solo/fibra de pneu, foram feitos ensaios com 50, 100, 150 e 200 kPa de tensão normal aplicada. Após os corpos de prova estarem devidamente moldados e instalados na prensa, a tensão normal era empregada até a estabilização do deslocamento vertical da amostra, medindo-se simultaneamente o tempo que levava nesse processo e o quanto o extensômetro registrou de movimentação vertical. Consolidado o corpo de prova, era então executado o cisalhamento com um deslocamento horizontal constante de 0,038 mm/min anotando-se, em intervalos de tempo determinados, o quanto deslocou e o quanto o anel dinamômetro registrava de carga. Ao chegar em 15mm de deslocamento horizontal o ensaio era finalizado.

### 3.10 ENSAIO DE FISSURAÇÃO POR RESSECAMENTO

Serão mostrados os procedimentos realizados para os ensaios de fissuração por ressecamento, inclusive a verificação da curva de retenção de água durante o processo de fissuração do solo natural e de suas misturas com fibras de pneu.

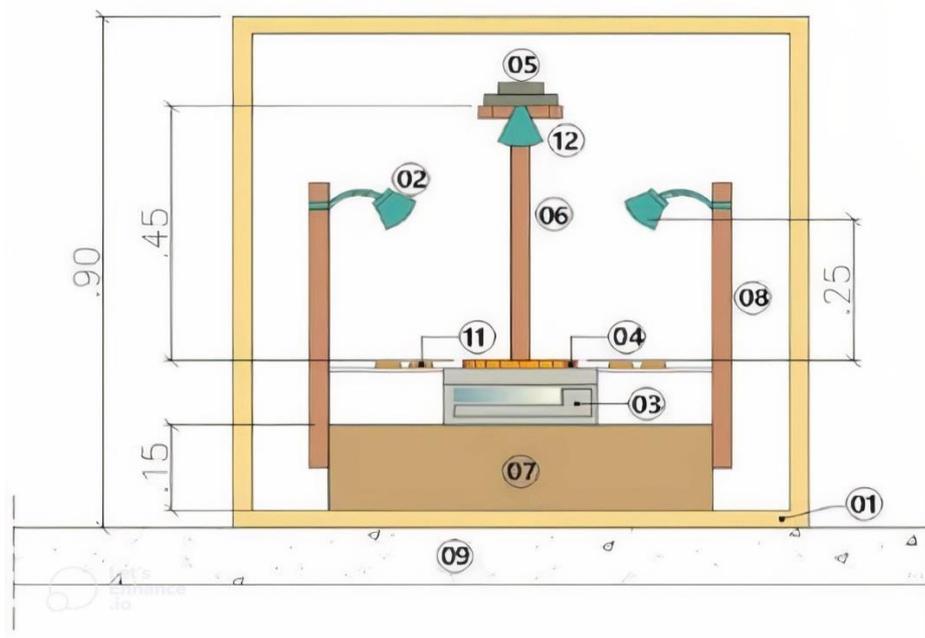
### 3.10.1 Procedimentos e equipamentos empregados

O equipamento utilizado foi o mesmo que foi utilizado por Araújo (2020) no Laboratório de Solos Não Saturados da Universidade Federal de Pernambuco. Consiste de um aparato de madeira que possui uma base de cinco hastes que apoiam uma balança de precisão de 0,01 g, cinco luminárias com lâmpadas incandescentes de 40W cuja função é ajudar no processo de secagem das amostras, uma webcam para registro das imagens a cada 10 minutos, um higrômetro da marca Inconterm para o registro da temperatura e umidade relativa, dez placas de Petri pequenas com 12,5 mm de altura e 70 mm de diâmetro de base e uma placa de Petri principal maior de 15,6 mm de altura e 147 mm de diâmetro.

Todos esses equipamentos encontravam-se dentro de uma caixa de madeira MDF cuja finalidade é isolar a temperatura e umidade interna, de onde acontece o ensaio, da área externa. As imagens capturadas pela webcam eram transmitidas a um notebook posicionado ao lado do aparato. A Figura 24 ilustra o esquema do equipamento montado e a Figura 25 mostra o equipamento pronto em laboratório.

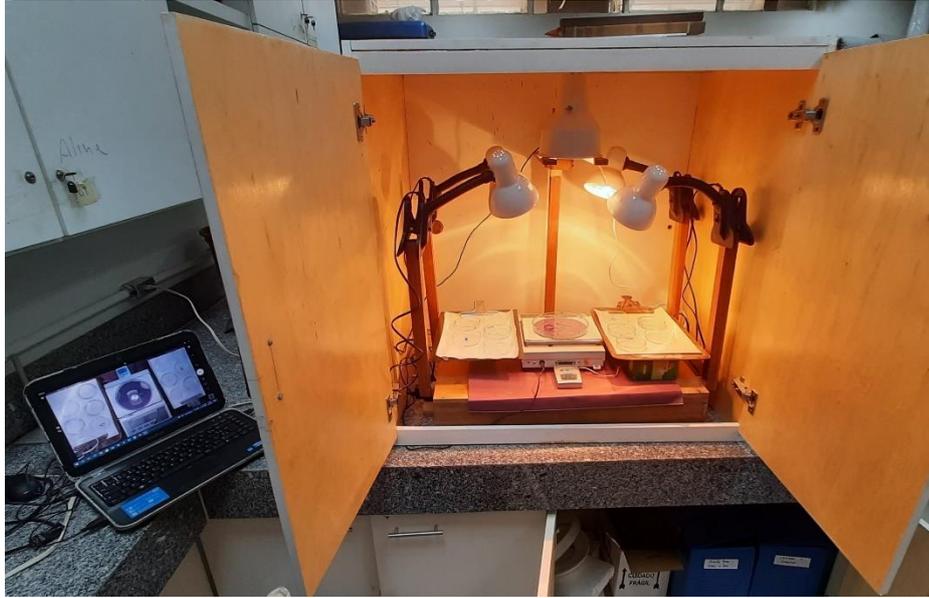
Figura 24 – Vista Frontal do aparato montado para análise da propagação de fissuras cujos elementos são: (1) a caixa em MDF; (2) Luminárias laterais; (3) balança de precisão; (4) conjunto solo-placa de Petri principal; (5) webcam; (6) haste de suporte da webcam; (7) base de madeira; (8) haste de suporte das luminárias; (9) bancada; (11) conjuntos solo-placa de Petri pequenas; (12) luminária central.

#### VISTA FRONTAL



Fonte: Araújo (2020).

Figura 25 – Aparato do ensaio de propagação de fissuras montado em laboratório.



Fonte: O Autor (2023).

### 3.10.2 Moldagem dos corpos de prova e execução dos ensaios

Os ensaios de análise de propagação de fissuras foram realizados para o solo natural e suas misturas com fibras de pneu, onde todas seguiram o mesmo procedimento de preparo e moldagem das amostras.

Primeiramente todas as placas de Petri foram pesadas e suas massas anotadas. Tendo feito as misturas do solo com as fibras de pneu, era adicionada água de modo que a umidade das misturas chegasse a 4% acima – ou seja, 1,04 vezes – do valor do limite de liquidez de cada proporção solo/fibra de pneu. Com isso, os solos não demorariam muito para começar a fissurar durante o ensaio e a pesquisa seria acelerada. As quantidades de solo, fibra e água foram calculadas de forma que todas as amostras mantivessem um valor de índice de vazios constante e igual a 1,51.

Com as amostras devidamente preparadas, as mesmas foram postas nas placas de Petri e niveladas com uma régua para ficarem distribuídas de forma homogênea (Figura 26). Durante esse processo, pequenos golpes eram aplicados nas bordas das placas para que bolhas de ar que eventualmente estivessem dentro das amostras fossem expulsas. Em seguida, os conjuntos solo-placa de Petri foram pesados na balança para se obter os pesos iniciais das amostras ao remover desse total os pesos das placas de Petri. Após a moldagem e pesagem das amostras, os conjuntos solo-placas de Petri foram posicionados no equipamento de ensaio.

Figura 26 – Amostra de mistura solo-fibras de pneu devidamente preparada e moldada na placa de Petri principal.



Fonte: O Autor (2023).

A amostra que se encontrava na placa de Petri principal ficou sob a balança de precisão do aparato durante todo o ensaio. Isso permitiu que o peso do conjunto solo-placa de Petri fosse monitorado em tempo real, determinando assim a umidade do solo em vários intervalos de tempo. Da amostra da placa de Petri principal obteve-se várias características relevantes, como o comprimento total das fissuras, largura média das fissuras, número de segmentos de fissuras, área fissurada e o CIF (*Crack Intensity Factor*). As imagens tiradas a cada 10 minutos pela webcam ajudaram na obtenção desses dados.

### 3.10.3 Aquisição e análise das imagens

Para o acompanhamento do processo de formação e propagação de fissuras, fez-se uso de uma webcam da marca Logitech, modelo C922 PRO STREAM Full HD localizada a 45 cm de altura em relação à placa de Petri principal dentro do aparato de ensaio e conectada a um notebook para a transmissão de imagens. As lâmpadas incandescentes posicionadas no equipamento colaboravam na nitidez da imagem, além de acelerar o processo de secagem da amostra.

Assim que todas as placas de Petri eram inseridas no aparato o ensaio era dado como iniciado e no notebook, com o uso do software livre Auto Screenshot Capture e através da webcam, fotos das placas de Petri (Figura 27) eram automaticamente capturadas num intervalo determinado de 10 minutos. Com o tempo, a amostra seguia secando e fissurando cada vez mais e quando a mistura presente

na placa de Petri principal registrava uma umidade perto dos 5%, o ensaio era finalizado.

Figura 27 – Imagem do início do surgimento de fissuras do ensaio de propagação de fissuras de amostras com 0,25% de fibras capturada pelo software Auto Screenshot Picture.



Fonte: O Autor (2023).

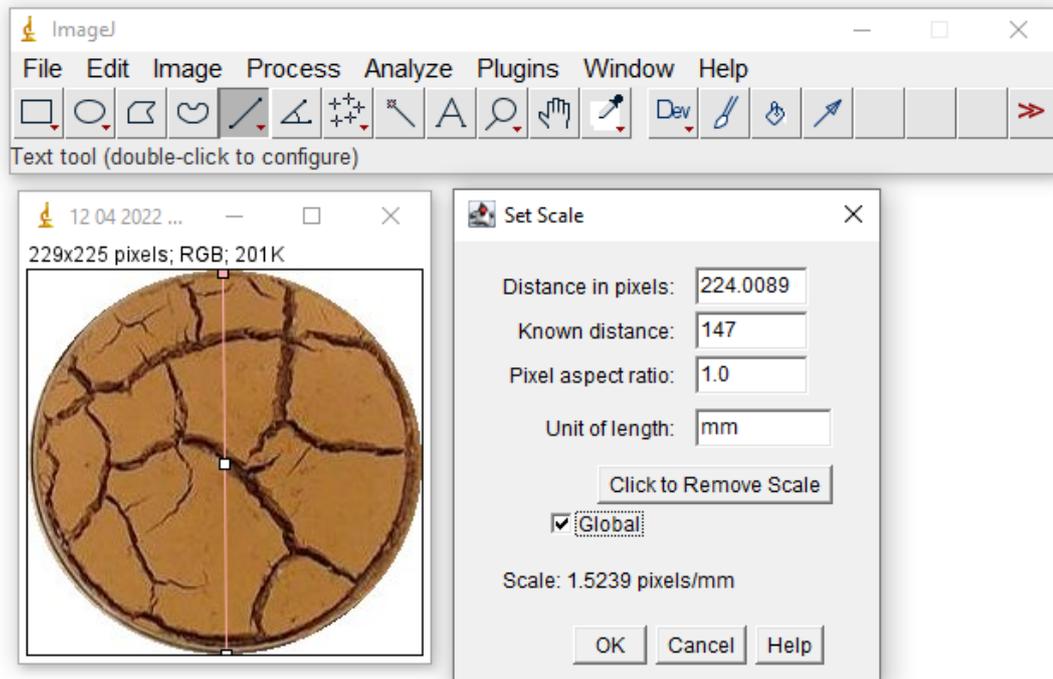
Na seleção das imagens utilizadas para o cálculo dos índices estabelecidos, foi feita a escolha de aproximadamente 25 imagens no intervalo que compreende do início das fissurações a quando a amostra visivelmente estabilizava sua fissuração.

A análise foi feita com o auxílio do software ImageJ. Com as imagens selecionadas, foram iniciados os ajustes para as aquisições dos valores dos parâmetros necessários para a avaliação da fissuração.

Primeiro buscou-se recortar e separar a imagem da placa de Petri principal. Para isso, ao abrir a imagem completa no software utilizou-se a ferramenta *Oval* para fazer o círculo sob a imagem da placa e em seguida foi usada a ferramenta encontrada em *Edit>Clear Outside*. Com isso isolou-se a imagem do solo fissurado.

Logo após, a imagem foi escalonada utilizando o valor do diâmetro da placa de Petri. Para isso, utilizou-se da ferramenta *Straight Line* para a medição. Logo após, digitou-se o valor do diâmetro em milímetros na opção *Know distance* na ferramenta *Set scale* do menu *Analyze* (Figura 28). Assim, o programa calculou quantos pixels equivalem a um milímetro na imagem.

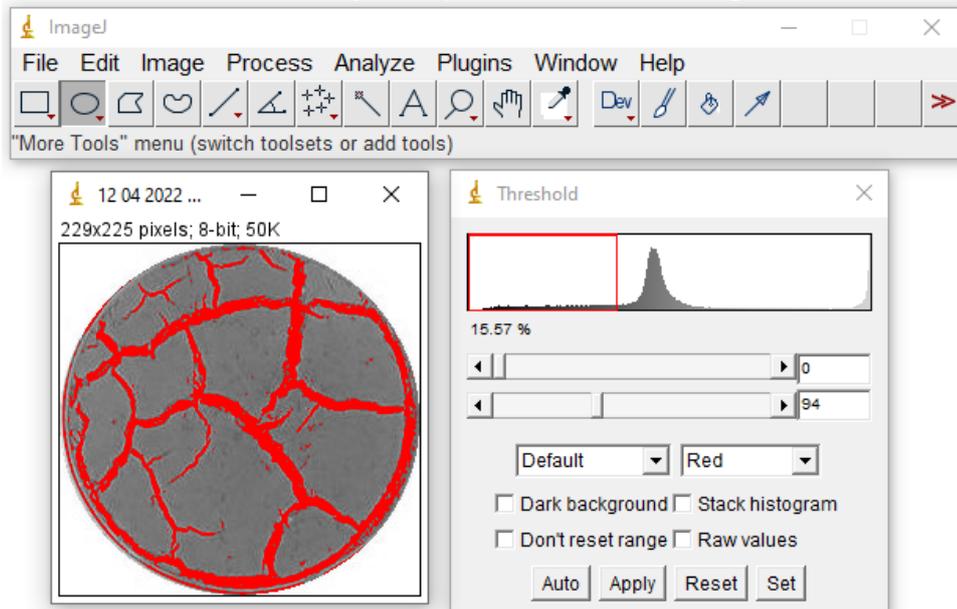
Figura 28 – Escalonamento de imagem no software ImageJ.



Fonte: O Autor (2023).

Com a imagem dimensionada, partiu-se para a binarização da imagem utilizando a ferramenta localizada em *image>type>8-bit* para deixar em escala de cinza e logo após a ferramenta em *Image>Adjust>Threshold* (Figura 29) para a imagem ficar binária em preto e branco. Dessa forma ficou possível dar início às análises da imagem.

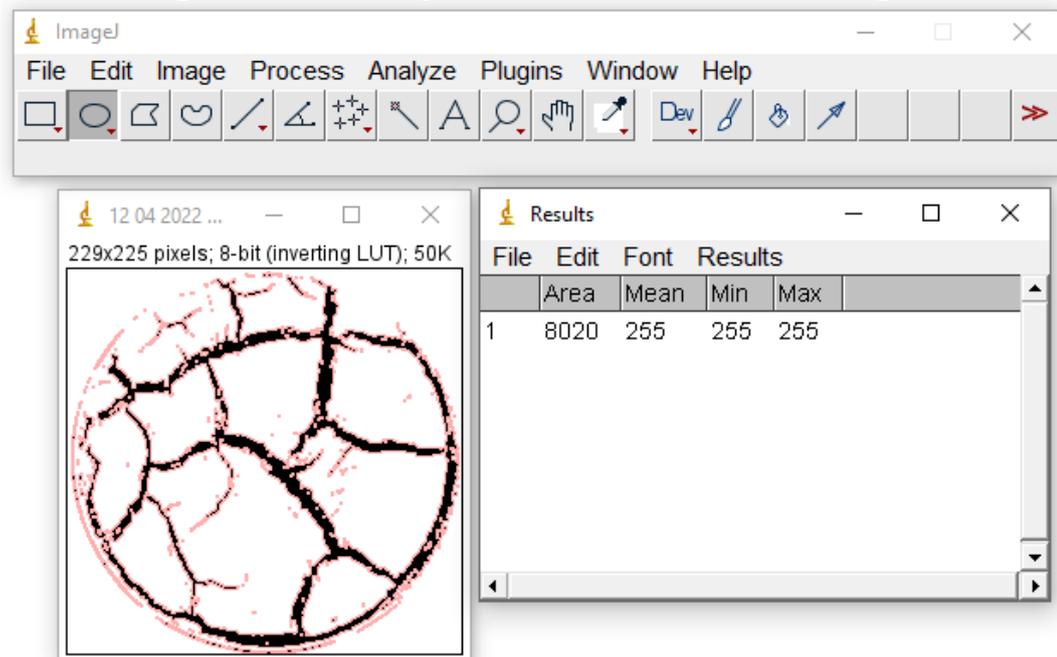
Figura 29 – Processo de binarização em preto em branco de imagem no software ImageJ.



Fonte: O Autor (2023).

O primeiro parâmetro definido foi a área fissurada, para com ela obter o valor do CIF. A seleção dos pixels pretos que correspondem às fissuras foi feita com o uso da ferramenta localizada em *Edit>Selection>Create Selection* e a definição da área correspondente a esses pixels foi definida com o uso do comando encontrado em *Analyze>Measure* (Figura 30). Dividindo o valor da área fissurada encontrado pela área inicial total da amostra, encontrou-se o valor do CIF correspondente.

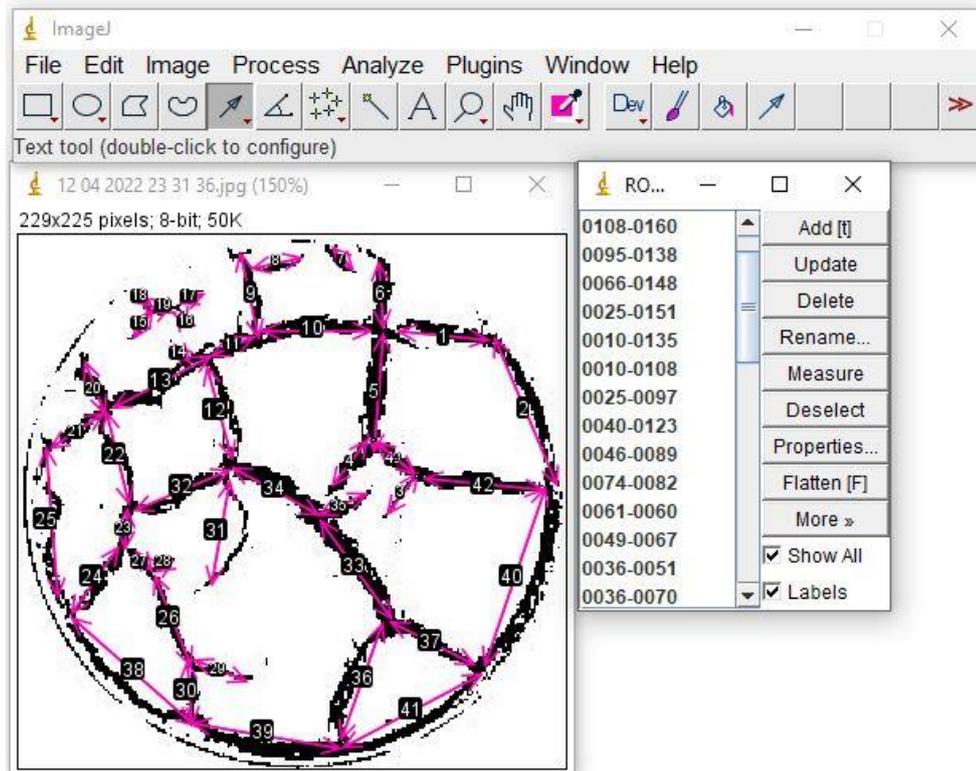
Figura 30 – Determinação da área fissurada no software ImageJ.



Fonte: O autor (2023).

Para obter o número de segmentos de fissuras, inicialmente selecionou-se *Analyze>Tools>ROI Manager*. Cada segmento de fissura foi representado por uma seta criada com a opção *Arrow tool*. Cada uma foi armazenada na ferramenta *ROI Manager* clicando-se em *Add(t)* (Figura 31). Com o número de setas desenhadas foi possível obter o número de segmentos de fissuras para cada imagem.

Figura 31 – Determinação do número de segmentos de fissuras no software ImageJ.



Fonte: O Autor (2023).

A obtenção da largura média das fissuras se deu por processo semelhante ao da obtenção da contagem de segmentos de fissuras. Selecionou-se *Analyze>Tools>ROI Manager*, desenhou-se cada largura de fissura com a ferramenta *Straight Line*, armazenou cada uma no *ROI Manager* clicando em *Add(t)* e as mediou usando a opção *Measure*. A largura média das fissuras foi obtida da média dos valores calculados.

A determinação do comprimento total das fissuras se deu por processo semelhante ao da obtenção da largura média das fissuras. Selecionou-se *Analyze>Tools>ROI Manager*, desenhou-se os comprimentos de fissuras com a ferramenta *Segmented Line*, armazenou cada um no *ROI Manager* clicando em *Add(t)* e os mediou usando a opção *Measure*. O comprimento total das fissuras foi obtido somando todos os valores encontrados.

#### 3.10.4 Determinação das curvas de retenção de água

As amostras que foram moldadas nas placas de Petri menores foram também inseridas no aparato de ensaio, porém fora da balança de precisão. Delas foram

extraídas informações referentes à sucção matricial da amostra durante o processo de secagem e fissuração para, com esses dados, construir a curva de retenção de água. O método escolhido para obtenção dos valores de sucção foi o do papel filtro, seguindo as instruções da norma ASTM D5298 (ASTM, 2010).

Conforme as amostras inseridas dentro do aparato de ensaio iam secando e fissurando, a cada 5% de umidade perdida, em média, um conjunto de solo-placa de Petri pequeno era retirado. Devido a impossibilidade de estar presente e monitorando o ensaio por mais de 24 horas, foram selecionadas variações de umidade no início do ensaio e perto do final.

Em seguida à retirada de um conjunto, em contato direto com a amostra, era posto um papel filtro do tipo *Whatman* nº42 de diâmetro de 55 mm da marca GE para a obtenção da sucção matricial naquela condição de umidade. Imediatamente a placa de Petri era embrulhada com plástico filme e papel alumínio para evitar a perda de umidade, identificada e deixada em caixa térmica de isopor fechada por 7 dias para a equalização da temperatura e umidade entre amostra e papel filtro. A Figura 32 mostra alguns passos do preparo das amostras.

Figura 32 – Preparo de uma amostra para a obtenção de sua sucção matricial. (a) papel filtro utilizado nos ensaios; (b) amostra com papel filtro em contato direto e envolta em plástico filme; (c) amostra embrulhada em alumínio, pronta para equalização da temperatura e umidade com o papel filtro.

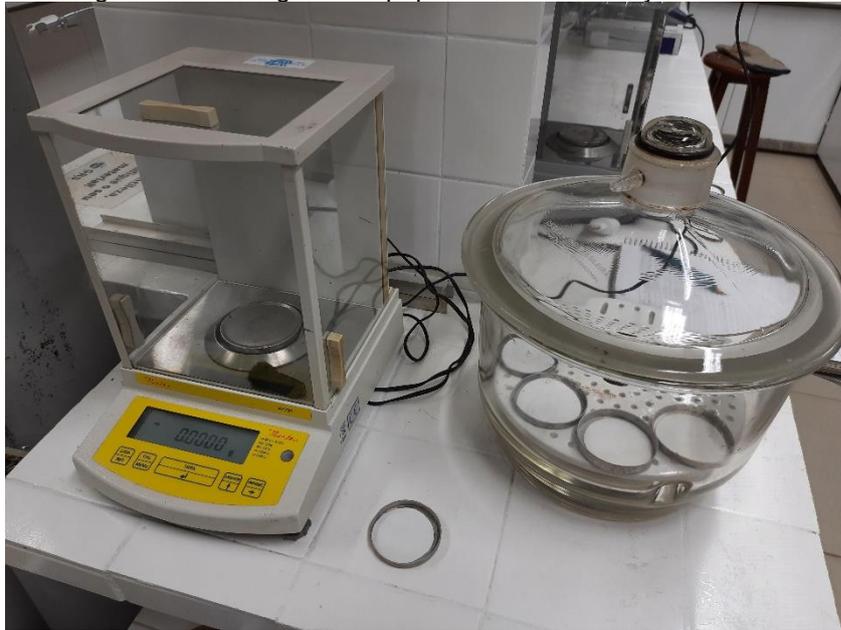


Fonte: O Autor (2023).

Após o período de equalização de umidade e temperatura, os conjuntos solo-placa de Petri de menor dimensão foram levados para as pesagens em balança analítica de resolução de 0,0001 g da marca Marte modelo AY220. Com o uso de uma pinça metálica, os papéis filtros de cada amostra foram removidos, imediatamente postos na balança para a determinação de seus pesos úmidos e em seguida postos em cápsulas. Parcelas dos solos das amostras também foram retiradas, postas em cápsulas e determinadas seus pesos úmidos.

Após os procedimentos as cápsulas com solos e papéis filtro foram levadas para estufa a 100°C por 24 horas e em seguida pesadas (Figura 33) para a determinação de seus pesos secos e assim ser possível calcular a umidade de cada amostra e a umidade volumétrica dos papéis filtro.

Figura 33 – Pesagem dos papéis filtro em balança analítica.



Fonte: O Autor (2023).

Para o cálculo da sucção matricial de todas as amostras, foram utilizadas a Equação 2 e Equação 3 propostas por Chandler et al. (1992).

$$\Psi = 10^{6,05 - 2,48 \cdot \log(w_p)}, w_p > 47\% \quad (2)$$

$$\Psi = 10^{4,84 - 0,0622 \cdot w_p}, w_p \leq 47\% \quad (3)$$

Onde:

$w_p$ : umidade do papel filtro (%);

$\Psi$ : sucção (kPa)

Para a construção da curva de retenção de água, foi utilizada a Equação 4 proposta por Van Genuchten (1980) que permite relacionar a sucção matricial e a umidade volumétrica das amostras graficamente.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / (1 + a \cdot \psi^n)^m \quad (4)$$

Onde:

$\theta$ : quantidade de água expressa em unidade volumétrica (%);

$\theta_r$ : umidade volumétrica residual (%) obtido experimentalmente;

$\theta_s$ : umidade volumétrica de saturação (%) obtido experimentalmente;

$\psi$ : Sucção (kPa);

a e n: parâmetros de ajuste da curva;

m:  $1-1/n$

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos em todos os ensaios realizados no solo e nas misturas de solo expansivo de Paulista-PE com fibras de pneu nas proporções em peso seco de 0,00%, 0,25%, 0,50%, 1,00% e 2,00%. Foi analisada a influência da adição de fibras de pneu no comportamento hidromecânico do solo e se houve a mitigação de propagação de fissuras com a adição das fibras de pneu. Os resultados laboratoriais obtidos com o solo são comparados com as misturas e com a literatura.

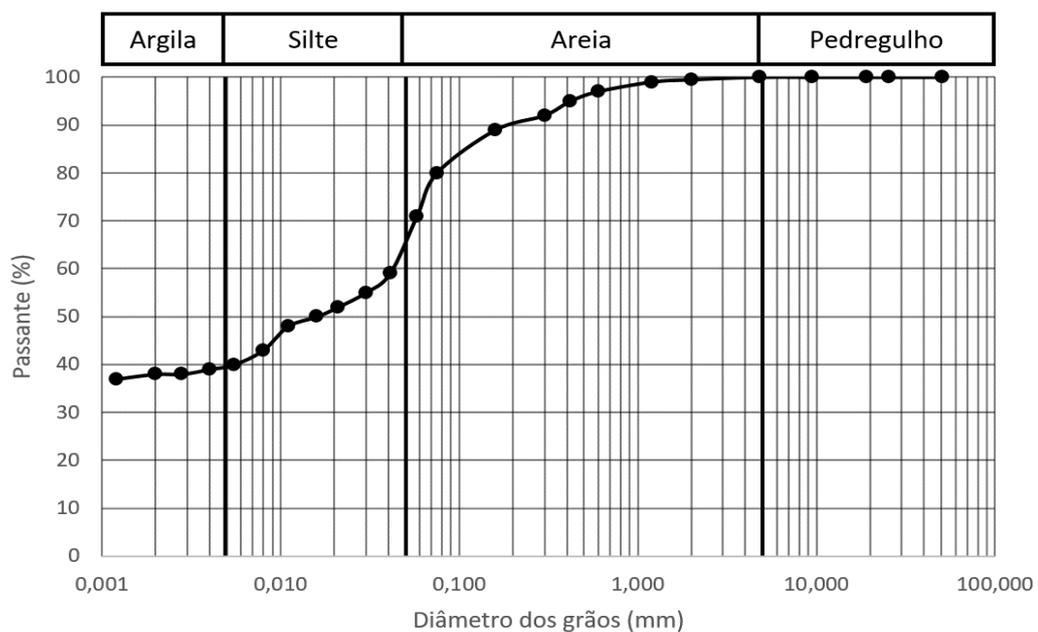
### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Apresenta-se as caracterizações físicas do solo expansivo, fibras de pneu e suas misturas.

#### 4.1.1 Caracterização física do solo expansivo e das fibras de pneu

A curva granulométrica encontrada através ensaio de granulometria para o solo expansivo de Paulista-PE, sem adição de fibras de pneu, é mostrada na Figura 34.

Figura 34 – Distribuição granulométrica do solo expansivo de Paulista-PE.



Fonte: O Autor (2023).

Os resultados apontaram que o solo possui 39% de argila, 26% de silte e 35% de areia. Comparando com outras literaturas que estudaram o mesmo solo expansivo de Paulista-PE (Tabela 3), percebe-se que a amostra utilizada nesse estudo é a que possuiu menos argila e mais areia em sua composição.

Tabela 3 – Composições granulométricas do solo expansivo de Paulista-PE obtidas em literaturas.

| <b>Solo</b>       | <b>Paiva<br/>(2016)</b> | <b>Morais<br/>(2017)</b> | <b>Constantino<br/>(2018)</b> | <b>Araújo<br/>(2020)</b> | <b>Autor</b> |
|-------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------|
| <b>Argila</b>     | 50%                     | 48%                      | 53%                           | 47%                      | 39%          |
| <b>Silte</b>      | 32%                     | 37%                      | 18%                           | 36%                      | 26%          |
| <b>Areia</b>      | 18%                     | 15%                      | 29%                           | 17%                      | 35%          |
| <b>Pedregulho</b> | 0%                      | 0%                       | 0%                            | 0%                       | 0%           |

Fonte: O Autor (2023).

Com relação a densidade real dos grãos do solo de Paulista-PE, o valor encontrado – após a realização de três ensaios e tirada a média aritmética – foi de 26,7 kN/m<sup>3</sup>. Valor bastante próximo de outros resultados encontrados em outras literaturas que estudaram o mesmo solo (Tabela 4).

Tabela 4 – Densidade real dos grãos do solo expansivo de Paulista-PE obtidas em literaturas.

| <b>Autores</b>            | <b>Densidade real dos grãos (kN/m<sup>3</sup>)</b> |
|---------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Constantino (2018)</b> | 26,6                                               |
| <b>Araújo (2020)</b>      | 26,8                                               |
| <b>Bezerra (2020)</b>     | 26,8                                               |
| <b>Autor</b>              | 26,7                                               |

Fonte: O Autor (2023).

Foram adquiridos valores dos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade, compactação – para definição dos valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo – e as classificações SUCS e AASHTO do solo. Seus valores se encontram na Tabela 5 que resume todas as características físicas analisadas do solo de Paulista-PE nesse estudo.

Tabela 5 – Resumo da caracterização física do solo de Paulista-PE.

| <b>Frações do solo, índices físicos e classificações</b>       | <b>Valor</b> |
|----------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Pedregulho (%)</b>                                          | 0            |
| <b>Areia (%)</b>                                               | 35           |
| <b>Silte (%)</b>                                               | 26           |
| <b>Argila (%)</b>                                              | 39           |
| <b>% &lt; 0,002 mm</b>                                         | 37           |
| <b>Limite de liquidez</b>                                      | 63,4         |
| <b>Limite de plasticidade</b>                                  | 21,8         |
| <b>Índice de plasticidade</b>                                  | 41,6         |
| <b>Densidade real dos grãos (kN/m<sup>3</sup>)</b>             | 26,7         |
| <b>Umidade ótima (%)</b>                                       | 23           |
| <b>Peso específico aparente seco máximo (kN/m<sup>3</sup>)</b> | 15,5         |
| <b>Classificação SUCS</b>                                      | CH           |
| <b>Classificação AASHTO</b>                                    | A-7-6        |

Fonte: O Autor (2023).

As fibras de pneu possuíam dimensões não uniformes com comprimentos que variavam entre 0,1 mm e 37 mm e diâmetros dentre 1 mm e 3 mm. Silva (2018), que utilizou as mesmas fibras de pneu em seu estudo, encontrou uma absorção de água de 6,9%, que aponta uma baixa capacidade de retenção de água e conseqüentemente uma maior demora para a saturação total do material. Também realizou ensaio para a determinação do valor de densidade real das fibras de pneu e encontrou o valor de 11,2 kN/m<sup>3</sup>. Para Macedo (2016), o valor de densidade real encontrado foi de 10,8 kN/m<sup>3</sup> para as mesmas fibras. Na Tabela 6 encontram-se as características analisadas das fibras.

Tabela 6 – Resumo da caracterização física das fibras de pneu.

| <b>Dimensões e Índices</b>               | <b>Valor</b>   |
|------------------------------------------|----------------|
| <b>Comprimento (mm)</b>                  | 0,1 a 37       |
| <b>Diâmetro (mm)</b>                     | 1 a 3          |
| <b>Densidade real (kN/m<sup>3</sup>)</b> | 10,8* - 11,2** |
| <b>Absorção de água (%)</b>              | 6,9%**         |

\* (MACEDO, 2016)

\*\* (SILVA, 2018)

Fonte: O Autor (2023).

#### 4.1.2 Caracterização física das misturas solo/fibra de pneu e comparação com o solo natural

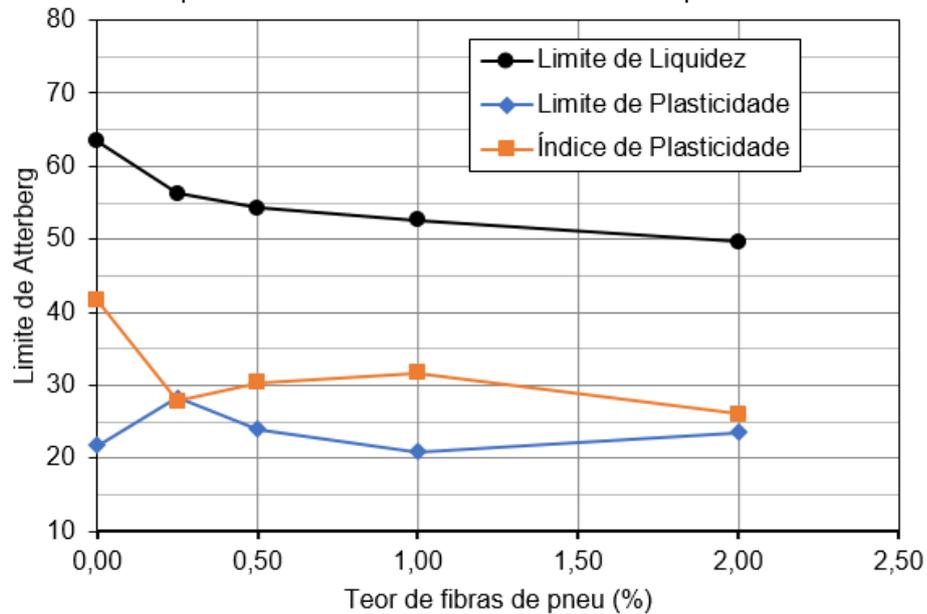
A Tabela 7 e a Figura 35 apresentam os valores dos limites de consistência para o solo e suas misturas com fibras de pneu. O limite de liquidez reduziu à medida que a porcentagem de fibras de pneu aumentou. O limite de plasticidade obteve um valor de pico no conteúdo de 0,25% com um aumento de 23,02% em relação ao valor para 0,00% e nas outras porcentagens de fibras obteve-se valores próximos ao do solo natural. O índice de plasticidade oscilou em valores, mas em uma tendência de queda. No estudo de Trouzine et al. (2012), que também analisou solo expansivo com fibras de pneu, houve a mesma tendência de diminuição dos limites de Atterberg à medida que se aumentou o conteúdo de fibras.

Tabela 7 – Valores de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade para o solo e suas misturas com fibras de pneu.

| <b>Teor de fibra de pneu (%)</b> | <b>Limite de Liquidez</b> | <b>Limite de Plasticidade</b> | <b>Índice de Plasticidade (%)</b> |
|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| <b>0,00%</b>                     | 63,40                     | 21,80                         | 41,60                             |
| <b>0,25%</b>                     | 56,22                     | 28,32                         | 27,90                             |
| <b>0,50%</b>                     | 54,34                     | 23,99                         | 30,35                             |
| <b>1,00%</b>                     | 52,67                     | 20,94                         | 31,73                             |
| <b>2,00%</b>                     | 49,70                     | 23,56                         | 26,14                             |

Fonte: O Autor (2023).

Figura 35 – Gráfico da variação do limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade para o solo e suas misturas com fibras de pneu.



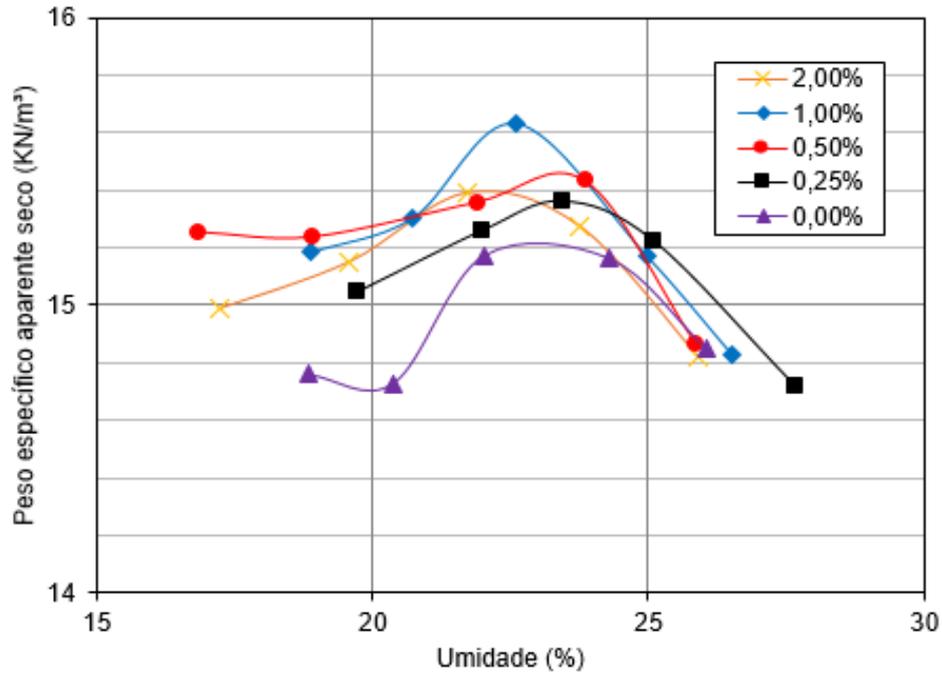
Fonte: O Autor (2023).

A Figura 36 mostra as curvas de compactação encontradas com todas as misturas de solo-fibra e do solo natural e os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima, que se encontram na Figura 37. A umidade ótima tende a diminuir à medida que a porcentagem de fibras é aumentada. Já para o peso específico aparente seco máximo, houve uma tendência de crescimento do valor até a porcentagem de 1,00%, diminuindo em 2,00% em valor igual a 0,25%. Na Tabela 8 é mostrado os dados em resumo.

Nos estudos de Soltani et al. (2019) e Hasan et al. (2020), que utilizaram fibras de pneu em solo expansivo, em seus ensaios de compactação também se obteve valores de umidade ótima menores à medida que o conteúdo de fibras de pneu aumentou. O peso específico aparente seco máximo seguiu uma tendência de queda com o aumento da quantidade de fibras.

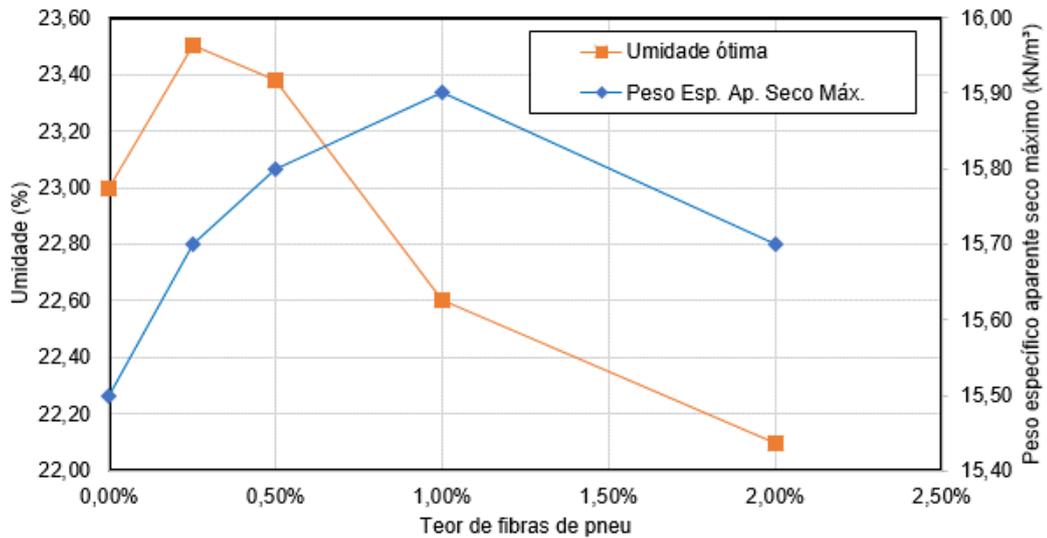
A diminuição da  $w_{ótima}$  e  $\gamma_{dmáx}$  pode ser atribuída à menor densidade específica, área superficial específica e capacidade de adsorção de água das partículas de borracha de pneu em comparação com os grãos do solo (ÖZKUL e BAYKAL, 2007; KALKAN, 2013; SIGNES et al., 2016).

Figura 36 – Curvas de compactação do solo natural e suas respectivas misturas com fibras.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 37 – Curvas de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para o solo e suas misturas.



Fonte: O Autor (2023).

Tabela 8 – Valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para o solo e suas misturas.

| <b>Teor de fibra de pneu (%)</b> | <b>Peso específico aparente seco máximo (kN/m<sup>3</sup>)</b> | <b>umidade ótima (%)</b> |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------|
| <b>0,00%</b>                     | 15,5                                                           | 23,00                    |
| <b>0,25%</b>                     | 15,7                                                           | 23,50                    |
| <b>0,50%</b>                     | 15,8                                                           | 23,38                    |
| <b>1,00%</b>                     | 15,9                                                           | 22,60                    |
| <b>2,00%</b>                     | 15,7                                                           | 22,10                    |

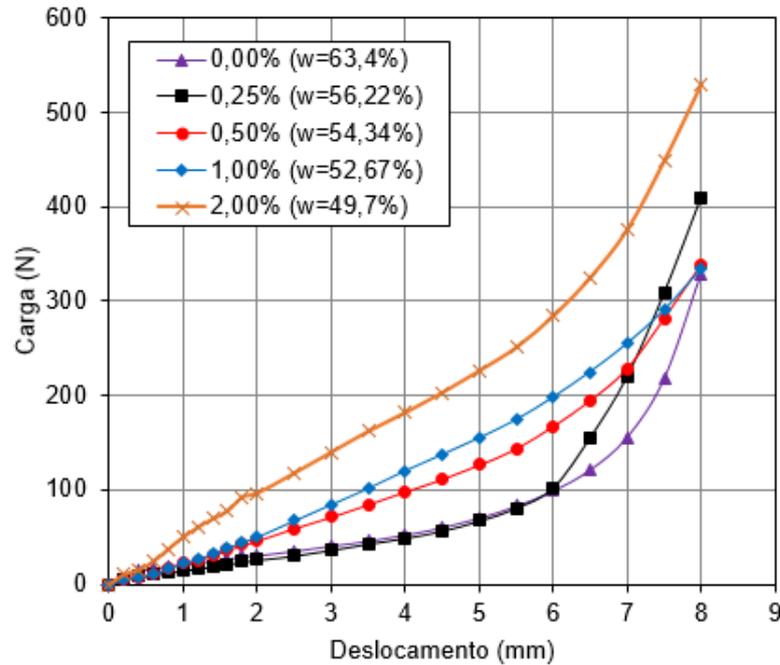
Fonte: O Autor (2023).

Portanto, como foi possível observar nos resultados dos ensaios de caracterização física, a adição de fibras de pneu provocou mudanças principalmente nos índices que envolvem a presença de água no solo, com destaque para a redução do limite de liquidez e conseqüentemente do índice de plasticidade.

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

As curvas de carga *versus* deslocamento obtidas dos ensaios de squeeze-flow para as amostras de solo natural e suas misturas com fibras de pneu nas umidades de limite de liquidez são apresentadas na Figura 38. Percebe-se que as curvas seguem de forma contínua, sem que aconteça parada de fluir, de carga ou oscilações. Isso aponta uma boa homogeneidade das amostras ensaiadas. Os três estágios do perfil reológico são observados, sendo o Estágio I consideravelmente o mais curto dos três, quase imperceptível na escala do gráfico.

Figura 38 – Gráfico das curvas de carga *versus* deslocamento dos ensaios de squeeze flow para o solo natural e suas misturas com fibra para as umidades de limite de liquidez.



Fonte: O Autor (2023).

A carga de escoamento ( $Q_{Esc}$ ), deslocamento de escoamento ( $d_{Esc}$ ), carga inicial de enrijecimento ( $Q_{Enrij}$ ), deslocamento inicial de enrijecimento ( $d_{Enrij}$ ), tensão de escoamento ( $\sigma_{Esc}$ ), tensão inicial de enrijecimento ( $\sigma_{Enrij}$ ) e a carga no deslocamento máximo do ensaio ( $Q_{Final}$ ) para o solo em estado natural e misturas com fibras de pneu na umidade de limite de liquidez são listados na Tabela 9.

A tensão de escoamento ( $\sigma_{Esc}$ ) e tensão inicial de enrijecimento ( $\sigma_{Enrij}$ ) seguiram uma tendência de aumento com o incremento de teor de fibras. Observa-se que quanto menor o teor de água maior é a viscosidade elongacional e mais difícil fica o espalhamento da amostra, demandando uma maior tensão para deformar. O deslocamento de escoamento seguiu uma tendência de decréscimo enquanto o de enrijecimento oscila num intervalo de 0,7 mm. Conforme explicitado por Melo (2014), esses fenômenos podem ser oriundos da redução do valor de limite de liquidez, e conseqüente diminuição da quantia de água no solo, à medida que se aumenta o teor de fibras no solo, já que a tensão de escoamento nos solos deve variar segundo a umidade e coesão da amostra.

Tabela 9 – Dados e índices do comportamento reológico do solo natural e das misturas com fibras de pneu no limite de liquidez.  $Q_{Esc}$  = carga de escoamento;  $d_{Esc}$  = deslocamento de escoamento;  $Q_{Enrij}$  = carga inicial de enrijecimento;  $d_{Enrij}$  = deslocamento inicial de enrijecimento;  $\sigma_{Esc}$  = tensão de escoamento;  $\sigma_{Enrij}$  = tensão inicial de enrijecimento;  $Q_{Final}$  = carga no deslocamento máximo.

| Amostras     | w(%)  | $Q_{Esc}$<br>(N) | $\sigma_{Esc}$<br>(kPa) | $d_{Esc}$<br>(mm) | $Q_{Enrij}$<br>(N) | $\sigma_{Enrij}$<br>(kPa) | $d_{Enrij}$<br>(mm) | $Q_{Final}$<br>(N) |
|--------------|-------|------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|
| Solo natural | 63,40 | 1,9              | 0,24                    | 0,8               | 80,5               | 10,21                     | 6,9                 | 328,3              |
| Solo+0,25%   | 56,22 | 5,1              | 0,65                    | 0,6               | 59,8               | 7,58                      | 6,2                 | 409,1              |
| Solo+0,50%   | 54,34 | 5,9              | 0,75                    | 0,5               | 150,3              | 19,06                     | 6,4                 | 338,4              |
| Solo+1,00%   | 52,67 | 7,2              | 0,91                    | 0,4               | 179,7              | 22,79                     | 6,3                 | 333,3              |
| Solo+2,00%   | 49,70 | 14,7             | 1,86                    | 0,2               | 295,1              | 37,42                     | 6,6                 | 530,3              |

Fonte: O Autor (2023).

O solo se comportou como um material sólido no Estágio I, apresentando deformação elástica linear que possui relação com a tensão de escoamento do solo natural e de suas misturas. Os deslocamentos foram inferiores a 1 mm para todos os teores. O que registrou maior tensão de escoamento foi a mistura com 2% de fibras.

No Estágio II – que tem seu início no fim do Estágio I – cujos deslocamentos vão até o intervalo dentre 6,2 a 6,9 mm, acontecem deslocamentos intermediários e a compressão resulta da deformação radial de cisalhamento ultrapassando as forças que mantinham o material em comportamento elástico, ou seja, acontecem deslocamentos viscosos e/ou plásticos. Durante o processo de deslocamento houve incrementos de carga significativos para as misturas com 0,50%, 1,00% e 2,00%.

Para o Estágio III – logo após o Estágio II com deslocamentos superiores a 6,2 a 6,9 mm – dada a aproximação das partículas sólidas do solo e da extrusão da água para as periferias das amostras, há uma resistência maior ao fluxo e a carga registrada aumenta vertiginosamente à medida que o deslocamento vai aumentando. As forças de atrito é quem prevalecem nessa situação. Todas as amostras seguiram até o deslocamento máximo definido de 8 mm, sendo a de 2% a que obteve a maior carga final ( $Q_{Final}$ ), de 530,3 N.

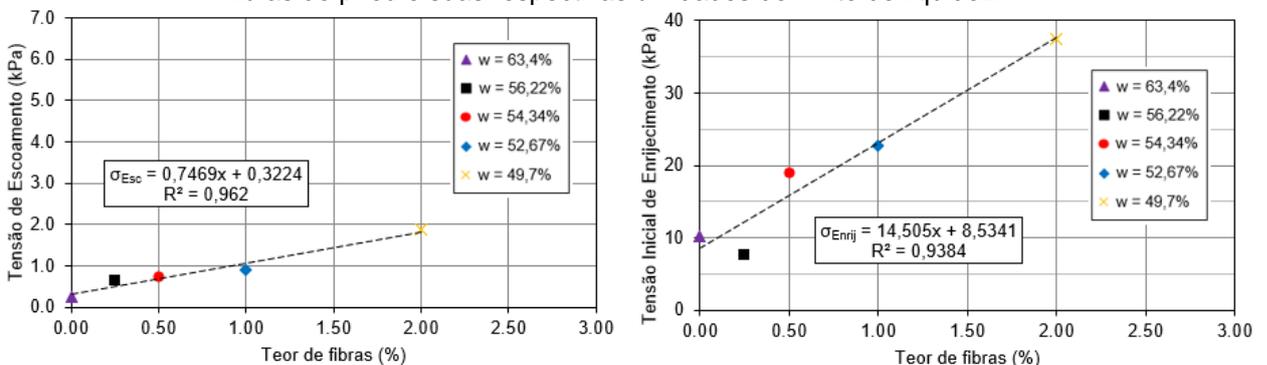
Na Figura 39 é mostrada as correlações entre as tensões de escoamento e tensões de enrijecimento com as porcentagens de teor de fibras de pneu nas misturas. Para fins de comparação, os resultados obtidos em outras literaturas que utilizaram o mesmo solo expansivo de Paulista-PE com fibras de material diferente são apresentados na Figura 40. Faustino (2022) utilizou fibras de coco verde e Silva (2023)

utilizou fibras de polipropileno em seus ensaios de squeeze-flow com umidades no limite de liquidez.

Com o acréscimo de fibras de coco verde há diminuição da tensão de escoamento e de enrijecimento. Isso acontece, segundo Faustino (2022), porque à medida que a porcentagem de fibras de coco aumenta, o teor de água necessário para a umidade do limite de liquidez também cresce. Para as fibras de polipropileno, com teor de 0,25% há uma redução considerável da tensão de escoamento e de enrijecimento em relação aos resultados encontrados para o solo natural, seguido de aumento com o acréscimo do teor de fibras até a porcentagem de 1%. Com 2% há uma leve redução para ambas as tensões.

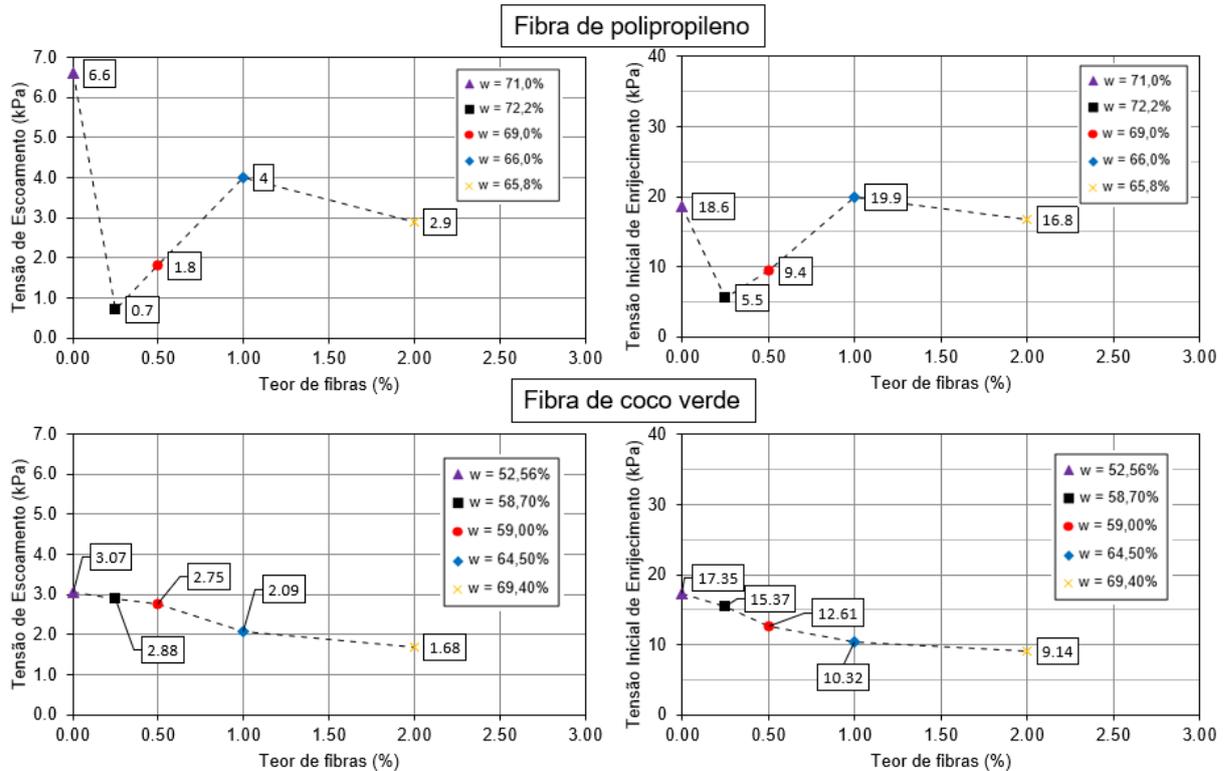
A fibra de pneu é a que apresentou maior incremento de tensão de escoamento em relação ao valor de tensão encontrado para o solo natural – um aumento de 7,75 vezes para o teor de 2% – assim como para a tensão inicial de enrijecimento, com aumento de 3,66 vezes com 2% de fibras.

Figura 39 – Variação da tensão de escoamento e da tensão inicial de enrijecimento com o teor de fibras de pneu e suas respectivas umidades de limite de liquidez.



Fonte: O Autor (2023).

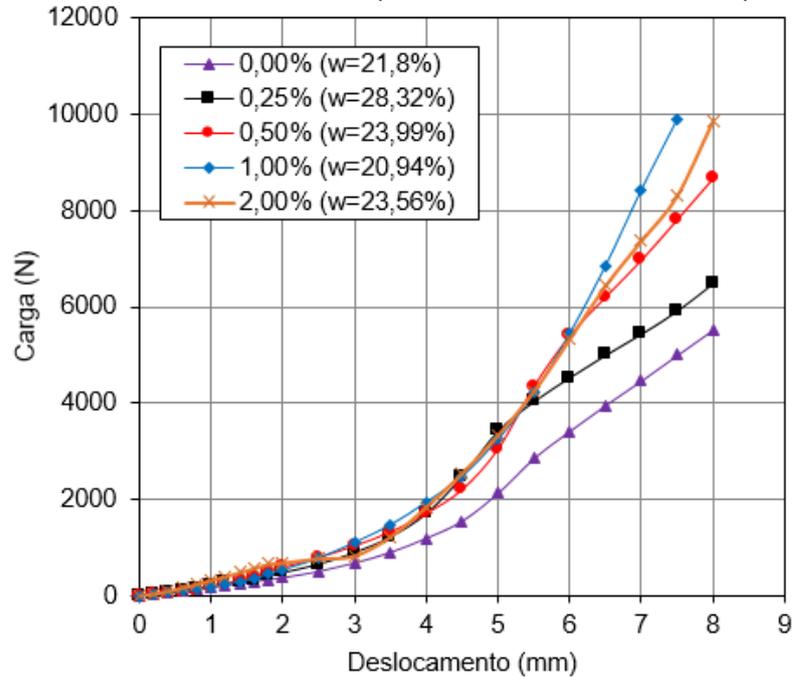
Figura 40 – Variação da tensão de escoamento com o teor de fibras e suas respectivas umidades de limite de liquidez para fibras de polipropileno (SILVA, 2023) e coco verde (FAUSTINO, 2022) utilizados no solo expansivo de Paulista-PE.



Fonte: Faustino (2022); Silva (2023).

A Figura 41 mostra as curvas de carga *versus* deslocamento para o solo natural e suas misturas com umidades de limite de plasticidade. Percebe-se que a resistência ao fluxo é maior do que para as amostras na umidade do limite de liquidez, já que a umidade das amostras para este caso é menor e o atrito entre as partículas é maior. Não foram observadas oscilações de carga consideráveis, que aponta uma boa homogeneidade das amostras.

Figura 41 – Gráfico das curvas de carga *versus* deslocamento dos ensaios de squeeze flow para o solo natural e suas misturas com fibra para as umidades de limite de plasticidade.



As curvas para o limite de plasticidade apresentaram apenas o Estágio II e o Estágio III, com valores para carga inicial de enrijecimento ( $Q_{Enrij}$ ) e o deslocamento inicial de enrijecimento ( $d_{Enrij}$ ).

A tensão de enrijecimento ( $\sigma_{Enrij}$ ) acabou por não ser influenciada pelos índices de umidade. Isso pode ter sido devido ao fato de serem valores bem menores do que dos limites de liquidez e as amostras já possuírem entrosamento suficiente ao ponto de pequenas variações de umidade não influenciarem consideravelmente. O que aparenta ter causado um maior entrosamento entre os elementos do solo foi o incremento de fibras de pneu, porém até a porcentagem de 1%. Em 2% a tensão sofre uma redução relevante. Uma hipótese para esse fenômeno seria porque a partir de uma determinada quantia de fibras substituindo partículas de solo o intertravamento entre as partículas sólidas do solo presentes na mistura passa a ser reduzido.

A mistura com 1% de fibras foi a que obteve maior carga final ( $Q_{Final}$ ) podendo ter sido ainda maior, porém ao deslocar a 7,5 mm a carga chegou no limite de carga do anel dinamométrico utilizado (10 kN) e o ensaio precisou ser finalizado para não danificar o equipamento. Todas as outras porcentagens seguiram o ensaio até o deslocamento máximo de 8 mm.

Todos os dados dos ensaios com o solo natural e suas misturas nas umidades de limite de plasticidade estão listados na Tabela 10 e a variação da tensão inicial de

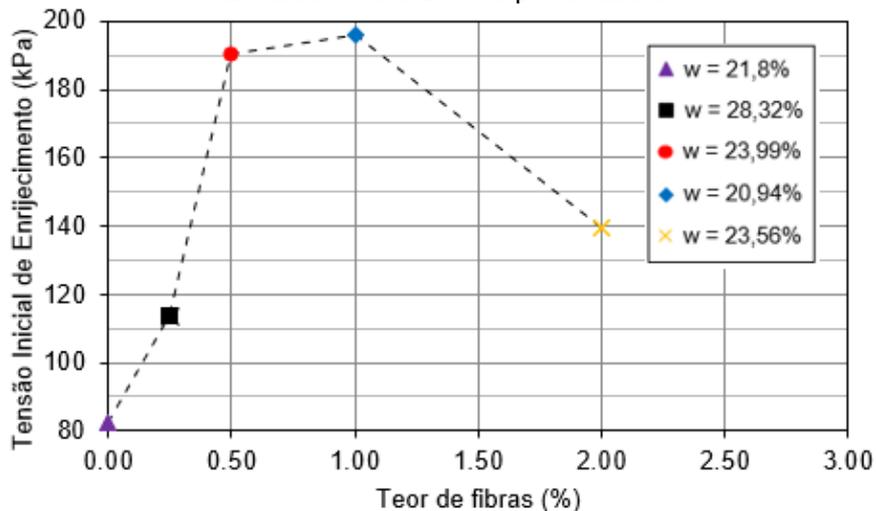
enrijecimento com o teor de fibras para umidades do limite de plasticidade é ilustrada na Figura 42.

Tabela 10 – Dados e índices do comportamento reológico do solo natural e das misturas com fibras de pneu no limite de plasticidade.  $Q_{Enrij}$  = carga inicial de enrijecimento;  $d_{Enrij}$  = deslocamento inicial de enrijecimento;  $\sigma_{Enrij}$  = tensão inicial de enrijecimento;  $Q_{Final}$  = carga no deslocamento máximo.

| Amostras     | w (%) | $Q_{Enrij}$ (N) | $\sigma_{Enrij}$ (kPa) | $d_{Enrij}$ (mm) | $Q_{Final}$ (N) |
|--------------|-------|-----------------|------------------------|------------------|-----------------|
| Solo natural | 21,80 | 651,3           | 82,59                  | 3,8              | 5528,3          |
| Solo+0,25%   | 28,32 | 895,5           | 113,56                 | 3,2              | 6493,5          |
| Solo+0,50%   | 23,99 | 1502,2          | 190,50                 | 4,2              | 8669,7          |
| Solo+1,00%   | 20,94 | 1544,8          | 195,91                 | 4,6              | 9886,5          |
| Solo+2,00%   | 23,56 | 1100,6          | 139,57                 | 4,1              | 9857,3          |

Fonte: O Autor (2023).

Figura 42 – Variação da tensão inicial de enrijecimento com os teores de fibras e suas respectivas umidades nos limites de plasticidade.



Fonte: O Autor (2023).

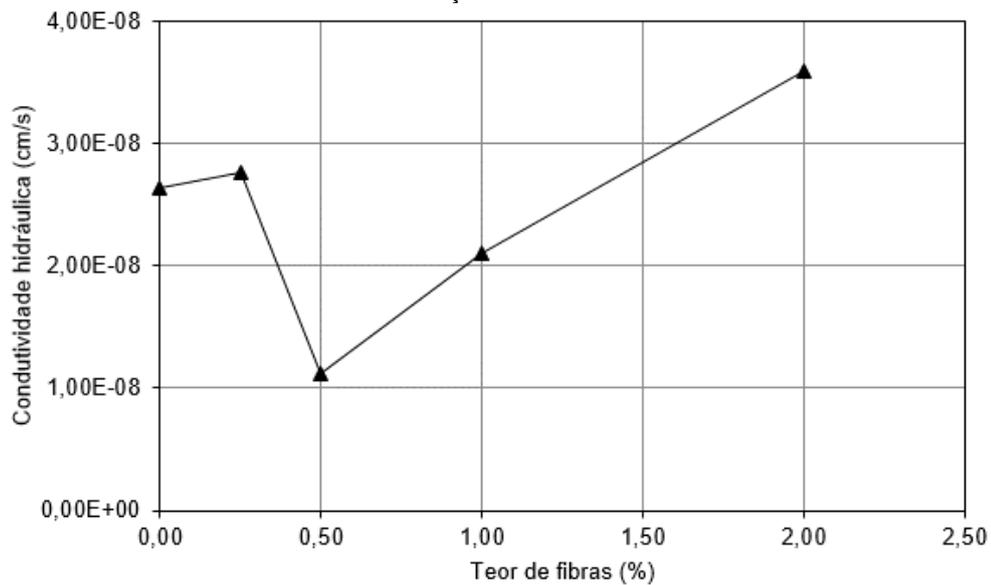
### 4.3 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

Os resultados obtidos no ensaio de Coeficiente de Permeabilidade para o solo natural e de suas misturas com teores de fibras de pneu são apresentados na Figura 43.

O solo em seu estado natural apresenta coeficiente de permeabilidade de  $2,64 \times 10^{-8}$  cm/s. Para as misturas, foram obtidos valores próximos do coeficiente do solo natural, com valores de  $2,76 \times 10^{-8}$  cm/s,  $1,12 \times 10^{-8}$  cm/s,  $2,11 \times 10^{-8}$  cm/s e  $3,59 \times 10^{-8}$  cm/s para as misturas de 0,25%, 0,50%, 1,00% e 2,00%, respectivamente.

A invariabilidade da ordem de grandeza ( $10^{-8}$ ) do coeficiente de condutividade hidráulica aponta que a adição das fibras de pneu até o conteúdo de 2% não influenciou a permeabilidade da mistura solo/fibra. Esse resultado também foi observado por Narani et al. (2020), onde suas misturas de solo expansivo com fibras de pneu não causaram mudanças significativas no coeficiente de condutividade hidráulica nas porcentagens de 0% até 2% de fibras de pneu.

Figura 43 – Condutividade hidráulica do solo e de suas misturas com teores de fibras de pneu na condição saturada.



Fonte: O Autor (2023).

#### 4.4 AVALIAÇÃO DA EXPANSIVIDADE

São analisados os resultados dos ensaios relacionados à expansividade do solo, sendo eles o ensaio de expansão “livre” e o de pressão de expansão.

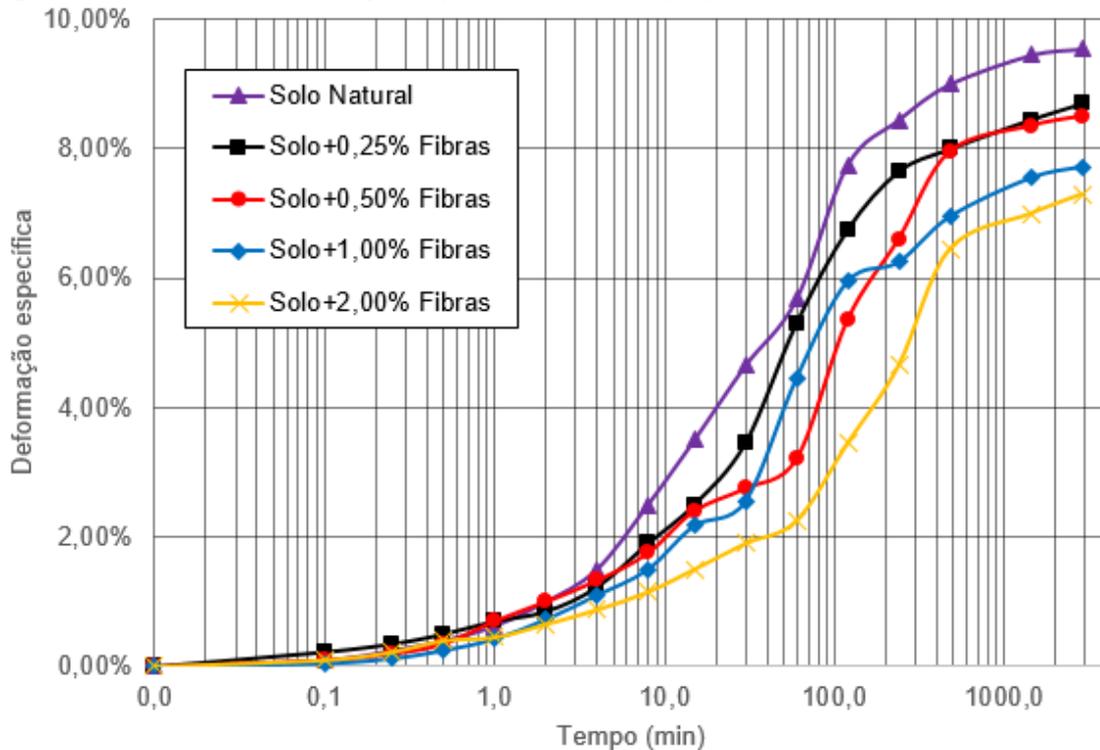
##### 4.4.1 Ensaio de expansão “livre”

Os ensaios de expansão “livre” realizados resultaram em curvas de deformação específica *versus* tempo, que são apresentadas na Figura 44.

No solo sem adição de fibras o valor máximo de expansão “livre” foi de 9,55% de deformação específica. Para as misturas do solo com as fibras de pneu foram obtidos os valores finais de deformação específica 8,70%, 8,50%, 7,73% e 7,30%, respectivamente. O acréscimo do teor de fibra ao solo diminui a expansão “livre”.

Comparando os valores do solo natural com o de maior teor de fibra (2,00%), calcula-se uma redução de 23,56% da deformação. Esse fato pode estar relacionado, segundo Narani et al. (2020), à substituição de sólidos (grãos do solo) com materiais que não expandem com a adição de água (fibras de pneu).

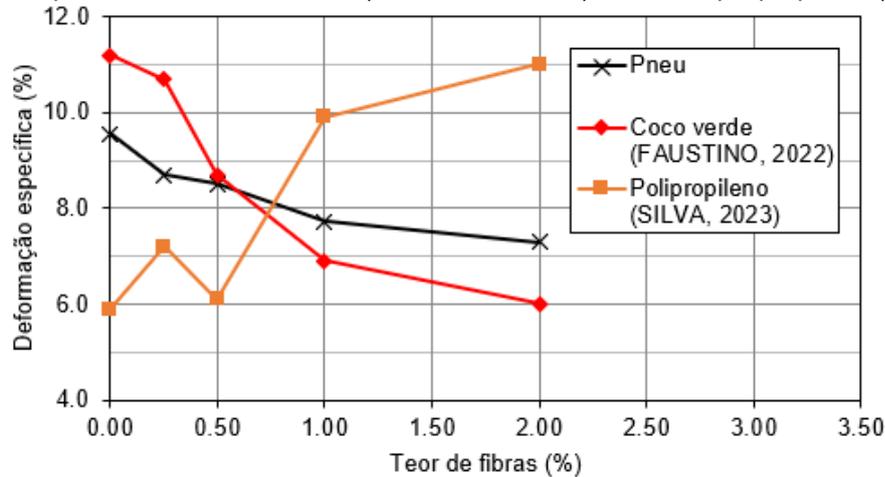
Figura 44 – Curvas de deformação específica com o tempo para os ensaios de expansão “livre”.



Fonte: O Autor (2023).

Comparando com o uso de outras fibras de materiais diferente como o mesmo solo expansivo de Paulista-PE (Figura 45) como as fibras de coco verde utilizadas por Faustino (2022) e as de polipropileno usadas por Silva (2023), nota-se que a fibra de coco e a de pneu seguem uma tendência de redução da deformação específica com o aumento do teor de fibras. A de polipropileno apresenta comportamento contrário. A fibra de coco é a que mais reduz a expansão “livre”, tendo com o teor de 2% uma redução de 46,43% em relação ao solo de Paulista-PE. Quase o dobro da redução obtida com a fibra de pneu com o mesmo teor.

Figura 45 – Curvas de deformação específica versus teor de fibras para os ensaios de expansão “livre” na fibra de pneu, fibra de coco verde (FAUSTINO, 2022) e fibra de polipropileno (SILVA, 2023).



Fonte: O Autor (2023).

Segundo os critérios de Seed et al. (1962), que correlaciona a expansão “livre” – referente a amostras compactadas à densidade máxima e umidade ótima – utilizando uma tensão vertical confinante de 7 kPa, com o grau de expansividade do solo (Tabela 11), o solo de Paulista pode ser classificado como um solo de alto grau de expansividade.

Tabela 11 – Critérios de Seed et al. (1962) para a classificação do grau de expansividade de um solo argiloso.

| Expansão “livre” (%)<br>Pressão 7 kPa | Grau de<br>Expansividade |
|---------------------------------------|--------------------------|
| > 25                                  | Muito alta               |
| 5 – 25                                | Alta                     |
| 1 – 5                                 | Média                    |
| 0 – 1                                 | Baixa                    |

Fonte: Seed et al. (1962).

Embora o incremento de fibras de pneu no solo tenha promovido uma redução da deformação específica, as misturas mantiveram seus valores de deformação dentro da faixa de grau de expansividade alta segundo o critério de Seed et al. (1962), mostrando que o incremento de fibra de pneu até a porcentagem de 2% contribuiu para a redução da expansividade, porém não modificou o grau de expansividade.

#### 4.4.2 Ensaio de tensão de expansão

Os resultados dos ensaios de tensão de expansão pelo método do volume constante para o solo natural e suas misturas com fibras de pneu encontram-se na Tabela 12. O solo natural compactado apresenta tensão de expansão no valor de 102,4 kPa. Nota-se que há uma redução nos valores de tensão com o incremento de fibras de pneu até o valor de 1% que resultou no menor valor encontrado de 82,4 kPa. Isso equivale a uma redução de 19,53% da tensão em relação ao solo natural. Na mistura com 2% de fibras houve um leve aumento da tensão de expansão.

Tabela 12 – Dados dos ensaios de tensão de expansão pelo método do volume constante.

| <b>Amostras</b>          | <b>Tensão de expansão (kPa)</b> |
|--------------------------|---------------------------------|
| <b>Solo natural</b>      | 102,4                           |
| <b>Solo+0,25% fibras</b> | 98,23                           |
| <b>Solo+0,50% fibras</b> | 89,90                           |
| <b>Solo+1,00% fibras</b> | 82,40                           |
| <b>Solo+2,00% fibras</b> | 83,23                           |

Fonte: O Autor (2023).

Para saber se as tensões de expansão encontradas nos ensaios podem levar a danos estruturais sérios em possíveis obras assentadas sobre o solo, as tensões foram avaliadas segundo o critério de Jimenez (1980) que se encontra na Tabela 13.

Tabela 13 – Critérios de Jimenez (1980) para possíveis danos.

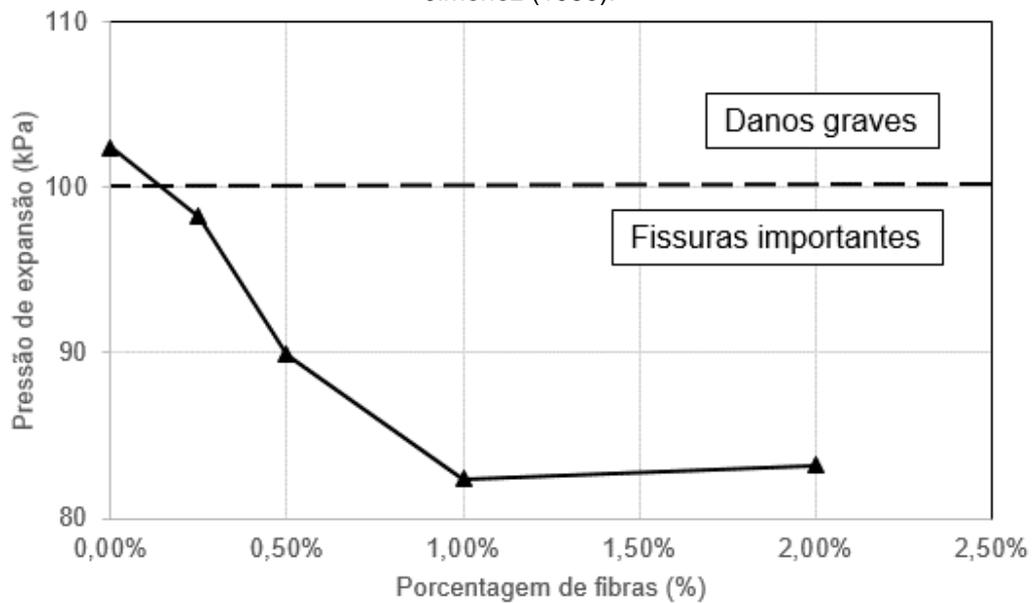
| <b>Tensão de expansão (kPa)</b> | <b>Grau de Expansividade</b> |
|---------------------------------|------------------------------|
| <b>&gt; 200</b>                 | Demolição                    |
| <b>100 – 200</b>                | Danos graves                 |
| <b>50 – 100</b>                 | Fissuras importantes         |
| <b>20 – 50</b>                  | Fissuras pequenas            |
| <b>&lt; 20</b>                  | Sem danos                    |

Fonte: Jimenez (1980).

De acordo com Jimenez (1980), o solo de Paulista é classificado como um solo que pode ocasionar danos graves. A adição de fibras de pneu fez com que o solo saísse da faixa “danos graves” e passasse a ser considerado “fissuras importantes”

(Figura 46). Esse fenômeno de redução da tensão de expansão pode ser explicado pela substituição de partículas sólidas do solo por fibras de pneu que não possuem potencial expansivo (NARANI et al., 2020). Isso mostra que mesmo com o incremento de teor de fibras – que resultaram numa redução máxima de 19,53% da tensão de expansão com o teor de 1% – o solo ainda exerce uma tensão de expansão considerável e se apresenta desfavorável para o uso em obras.

Figura 46 – Tensão de expansão *versus* teor de fibra de pneu em conjunto com a classificação de Jimenez (1980).



Fonte: O Autor (2023).

Conforme foi possível perceber, a adição de fibras de pneu no solo expansivo de Paulista-PE influenciou nas características de expansão “livre” e tensão de expansão, reduzindo ambos à medida que o teor de fibras foi aumentando. Esse fato foi também observado em outras literaturas que utilizaram fibras de pneu em solos expansivos, como nos estudos de Narani et al. (2020), Abbaspour et al. (2020) e Bekhiti (2021). Contudo, para todos os teores de fibras aplicados, a redução do grau de expansão não foi suficientemente expressiva. O solo mesmo com fibras pode causar danos às estruturas assentadas sobre ele.

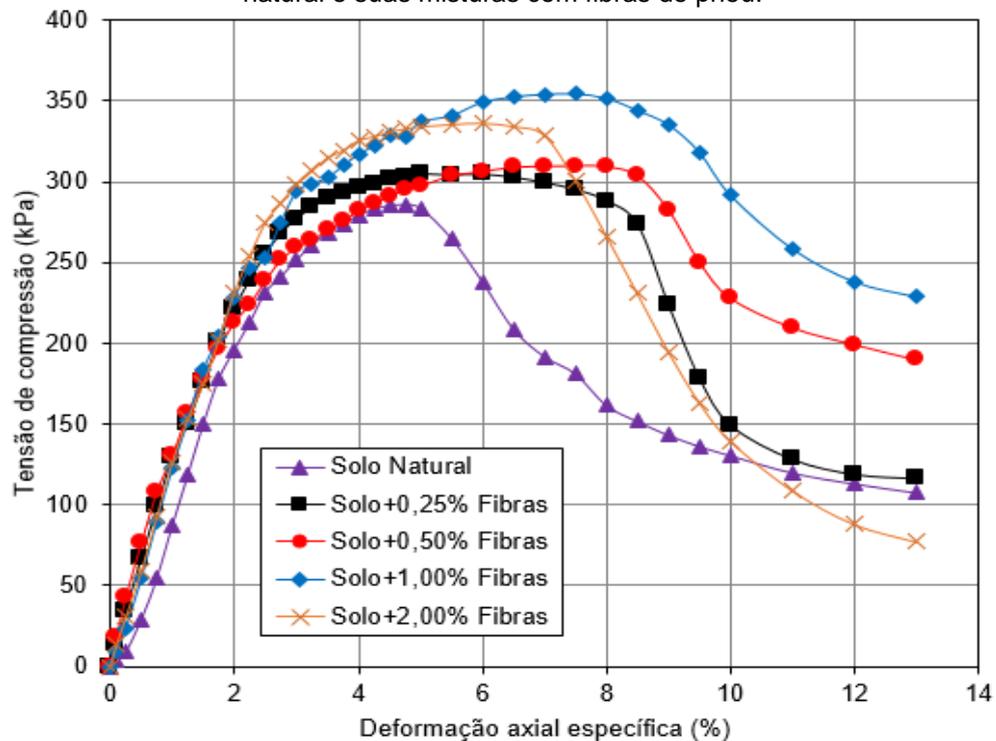
## 4.5 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA

São apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e resistência ao cisalhamento direto.

### 4.5.1 Resistência à compressão não confinada (compressão simples)

Na Figura 47 são apresentadas as curvas de tensão de compressão *versus* deformação axial específica para os ensaios de compressão simples realizados no solo natural e suas misturas com fibras de pneu. Na Tabela 14 são listados os valores encontrados para as resistências máximas à compressão não confinada e suas respectivas deformações axiais específicas nas rupturas, além das resistências ao cisalhamento. Os ângulos de superfície de ruptura resultantes para os corpos de prova das misturas ensaiadas foram iguais para os pares de igual teor de fibras e são demonstrados na Figura 48.

Figura 47 – Curvas de resistência à compressão não confinada (compressão simples) para o solo natural e suas misturas com fibras de pneu.



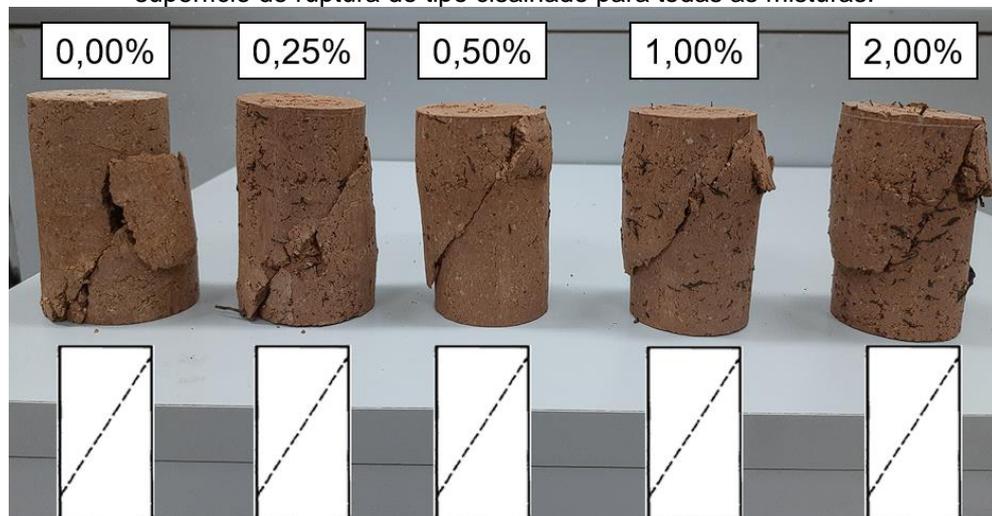
Fonte: O Autor (2023).

Tabela 14 – Dados dos ensaios de compressão simples.

| Amostras          | Resistência à compressão não confinada máxima (kPa) | Deformação axial específica na ruptura (%) | Resistência ao cisalhamento (kPa) |
|-------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| Solo natural      | 285,46                                              | 4,75                                       | 142,73                            |
| Solo+0,25% fibras | 304,46                                              | 5,00                                       | 152,23                            |
| Solo+0,50% fibras | 309,75                                              | 7,50                                       | 154,87                            |
| Solo+1,00% fibras | 354,44                                              | 7,50                                       | 177,22                            |
| Solo+2,00% fibras | 336,33                                              | 6,00                                       | 168,17                            |

Fonte: O Autor (2023).

Figura 48 – Corpos de prova rompidos nos ensaios de compressão simples e seus ângulos de superfície de ruptura do tipo cisalhado para todas as misturas.



Fonte: O Autor (2023).

A adição gradativa de fibras de pneu ao solo, até o teor de 1%, promoveu um acréscimo da resistência à compressão não confinada – um aumento de 19,46% na resistência em comparação ao solo natural – e das deformações axiais específicas na ruptura (Tabela 13). Na mistura com 2% de fibras houve uma leve redução da resistência e da deformação na ruptura. Portanto, com o gradativo incremento de fibras de pneu até o teor de 1%, o solo tendeu a ser mais dúctil, deformando mais até o momento de sua ruptura, e a resistir a maiores tensões de compressão antes de romper.

Essas características também foram observadas por outras literaturas que utilizaram solos expansivos em conjunto com fibras de pneu. Yadav e Tiwari (2017) utilizou fibras de pneu com no máximo 15 mm de comprimento que resultaram em um aumento gradativo da resistência à compressão não confinada até a porcentagem de

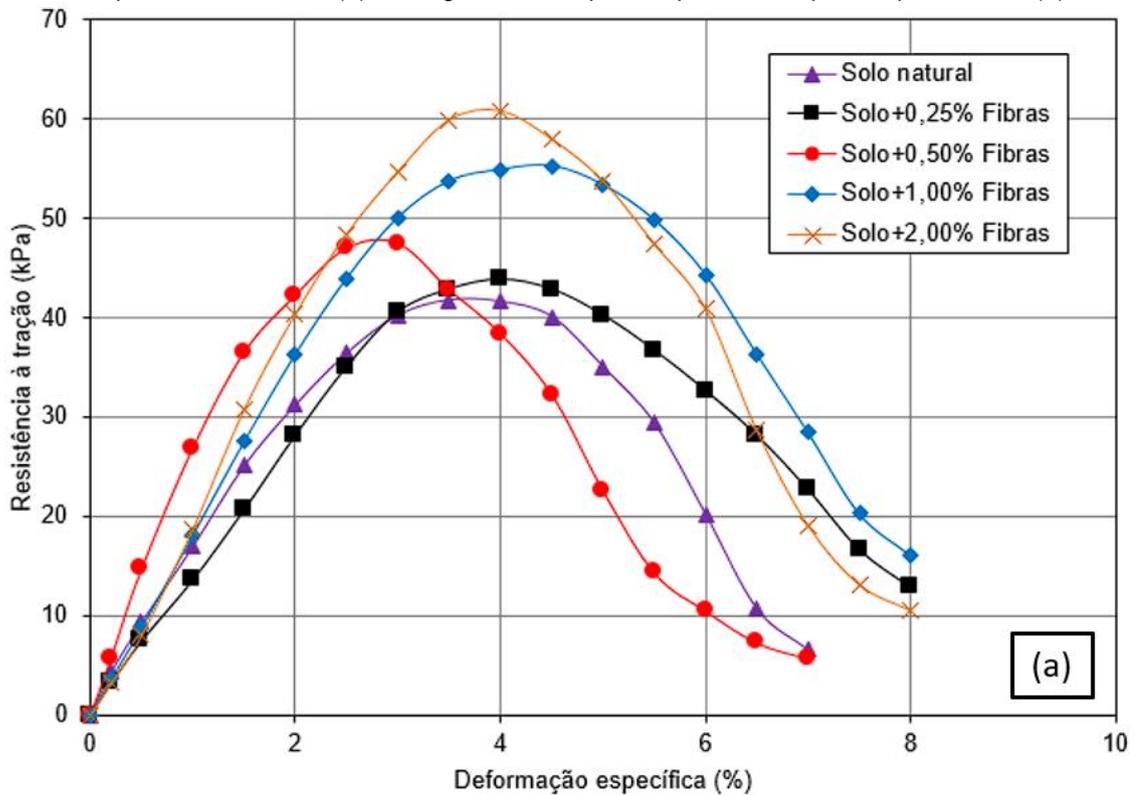
2,5%. Akbulut et al. (2007), com fibras de pneu de 10 a 15 mm de comprimento, obtiveram um aumento gradual da resistência até a mistura com 2%. Abbaspour et al. (2020), utilizando fibras de pneu com comprimentos de até 70 mm, encontraram um incremento progressivo até o teor de 1% de fibras.

#### **4.5.2 Resistência à tração por compressão diametral**

O resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral é mostrado na Figura 49. A resistência à tração *versus* deformação específica dos corpos de prova ensaiados de solo natural e suas misturas com fibra de pneu.

Nota-se que o solo natural e suas misturas com fibras de pneu apresentaram picos de resistência no intervalo entre 3 e 4,5% de deformação específica. Após esse intervalo, acontece a diminuição gradativa da resistência, com comportamentos de pós-pico semelhantes. O aumento da resistência pós-pico para a mesma deformação específica também é evidente – exceto para o teor de 0,5% – o que pode apontar um possível impedimento de surgimento de fissuras pelas fibras de pneu em contato com o solo com transferência de esforços de tração para as mesmas, tornando o corpo de prova mais rígido.

Figura 49 – Curvas de resistência à tração *versus* deformação específica resultantes do ensaio de compressão diametral (a) e imagem dos corpos de provas rompidos após ensaio (b).



Fonte: O Autor (2023).

Conforme é possível notar na Tabela 15, que reúne os principais dados extraídos dos ensaios, a resistência à tração aumentou à medida em que o teor de fibras de pneu foi incrementado. Comparando os resultados da amostra de solo natural com a amostra que obteve maior resistência à tração por compressão diametral – com teor de 2% – observa-se um incremento de 31,32% na resistência à tração.

Tabela 15 – Dados dos ensaios de compressão diametral.

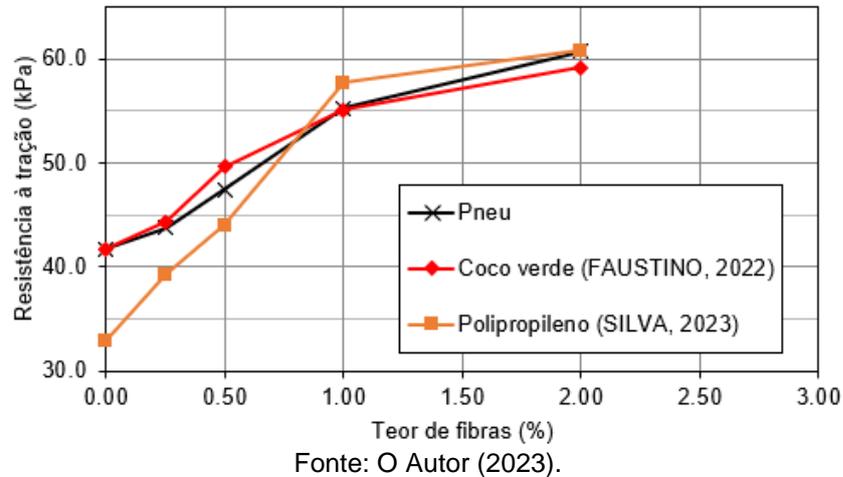
| <b>Amostras</b>          | <b>Resistência à tração máxima (kPa)</b> | <b>Deformação específica na ruptura (%)</b> |
|--------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Solo natural</b>      | 41,73                                    | 3,5                                         |
| <b>Solo+0,25% fibras</b> | 43,80                                    | 4,0                                         |
| <b>Solo+0,50% fibras</b> | 47,46                                    | 3,0                                         |
| <b>Solo+1,00% fibras</b> | 55,26                                    | 4,5                                         |
| <b>Solo+2,00% fibras</b> | 60,76                                    | 4,0                                         |

Fonte: O Autor (2023).

Esse mesmo comportamento foi observado por outros estudos que utilizaram fibras de pneu e solos expansivos. Yadav e Tiwari (2017), que utilizaram fibras de pneu com no máximo 15 mm de comprimento, observaram um aumento progressivo da resistência à tração por compressão diametral até o teor de 2,5% de fibras. Teores maiores promoveram uma redução da resistência. Para Narani et al. (2020) também houve um incremento da resistência com a inclusão de fibras de até 70 mm, porém até o teor de 3% de fibras. Além desse valor houve diminuição da resistência à tração.

Observando os resultados obtidos por Faustino (2022) para fibras de coco verde e por Silva (2023) para fibras de polipropileno, ambos misturados ao solo expansivo de Paulista-PE (Figura 50), percebe-se que quanto maior o teor de fibras presente no solo, maior a resistência à tração para todas as três fibras. A inclusão das fibras até a porcentagem de 2% colabora na resistência. Delas, a que resultou em maior resistência à tração comparado ao solo em seu estado natural foi a de polipropileno. Para essa fibra, houve um incremento de 84,80% da resistência com o teor de 2% de fibras.

Figura 50 – Resistências à tração máxima *versus* teor de fibras para as fibras de pneu, coco verde (FAUSTINO, 2022) e polipropileno (SILVA, 2023) obtidas por ensaio de compressão diametral.



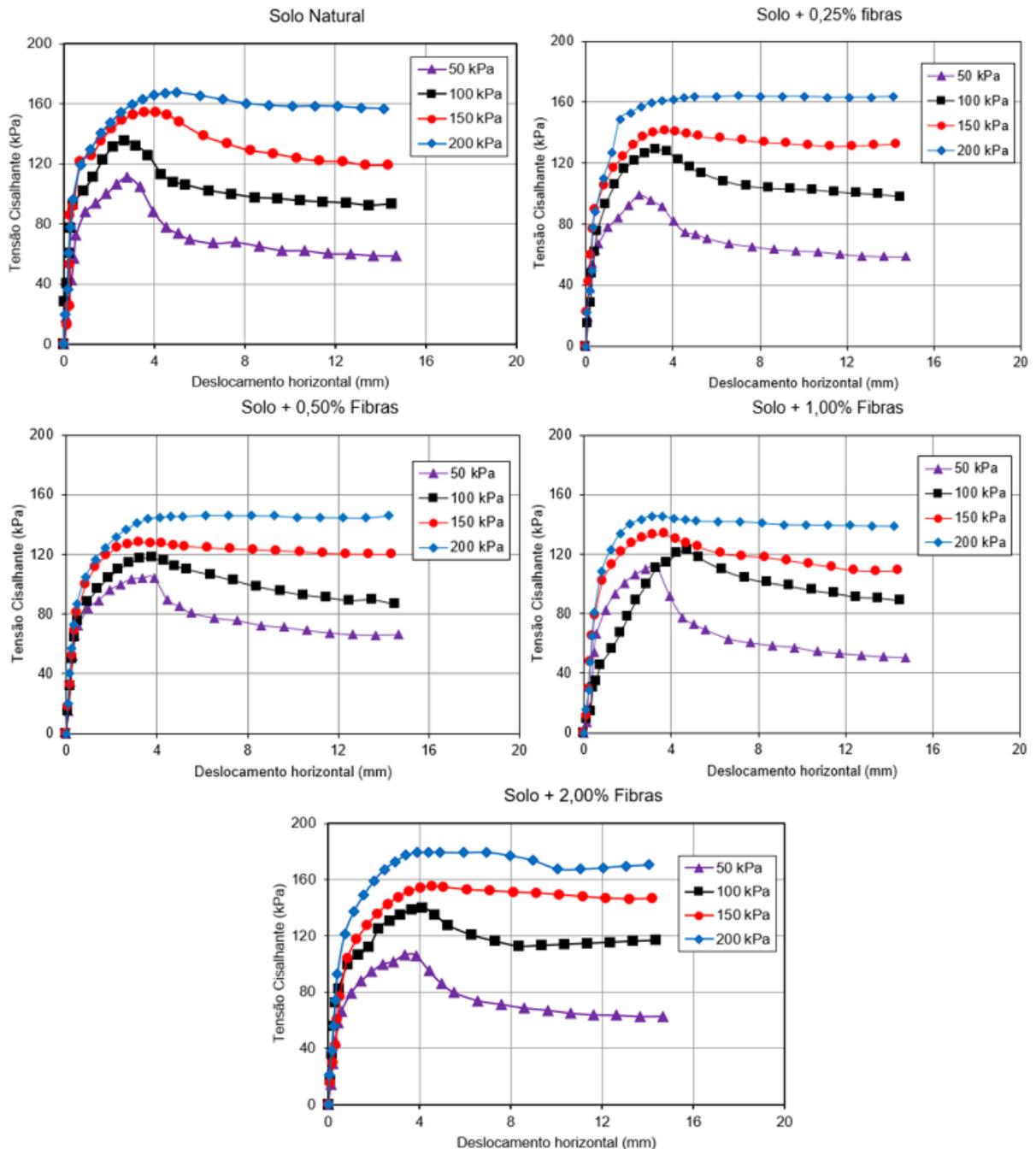
#### 4.5.3 Resistência ao cisalhamento por ensaio de cisalhamento direto

As curvas resultantes dos ensaios de cisalhamento direto não inundado para os teores de fibra nas tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa, com corpos de prova compactados na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, são mostradas na Figura 51.

Percebe-se que houve um comportamento de pico para todas as amostras ensaiadas com tensões normais de 50 e 100 kPa. Para as de 150 kPa, nota-se que os picos de resistência começam a ficar menos aparentes. Nesses ensaios mencionados, os picos de resistência manifestam-se quando as amostras chegam a valores de deslocamento horizontal na faixa compreendida entre 2 e 4 mm. Para os ensaios com tensão normal de 200 kPa, as curvas demonstram um comportamento plástico, cujos deslocamentos horizontais aumentam com uma variação muito pequena das resistências ao cisalhamento.

A influência intensificada de fibras de pneu sob tensões normais mais altas em baixos níveis de deslocamento horizontal (por exemplo, deslocamento correspondente ao pico de resistência ao cisalhamento) pode ser atribuída ao fato de que, devido ao intertravamento e fricção entre os minerais do solo e as superfícies das fibras antes do arrancamento das fibras, o atrito desempenha um papel muito mais significativo na interação fibra-argila. Sob tensões normais mais altas, o atrito solo-fibra é aumentado, o que por sua vez induz maior resistência ao cisalhamento no solo (ABBASPOUR et al., 2020).

Figura 51 – Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal resultantes dos ensaios de cisalhamento direto para tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa.



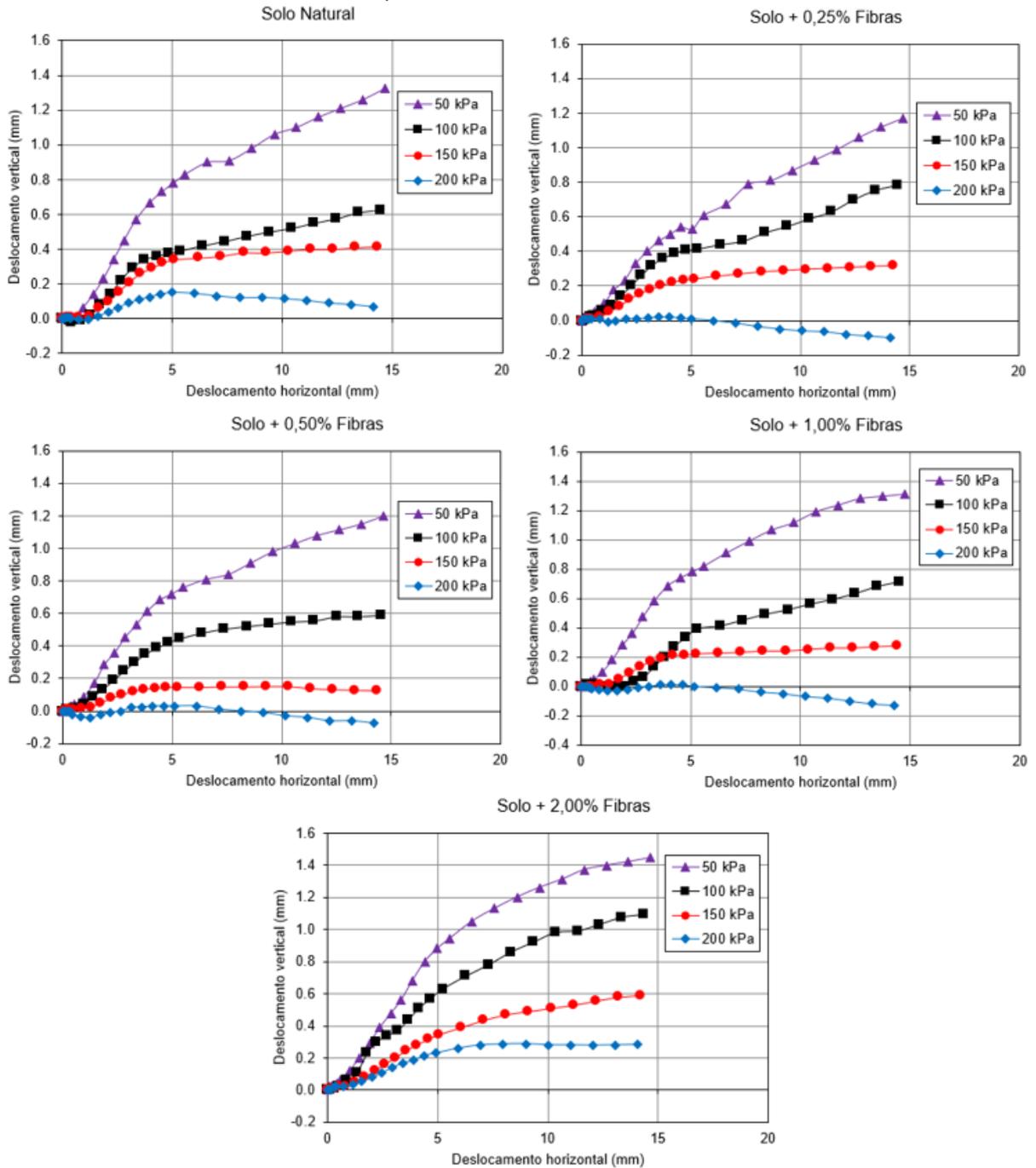
Fonte: O Autor (2023).

Nas curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal (Figura 52) é possível constatar que houve no início dos ensaios trechos de contração volumétrica quando as amostras deslocaram horizontalmente de 0 mm a 1mm em média, com alguns ensaios chegando até a 2,5 mm (teor de 0,5% sob 200 kPa). Após esses trechos as amostras seguiram dilatando volumetricamente, exceto para as

amostras de 0,25%, 0,50% e 1% sob 200 kPa de tensão normal que voltaram a se contraírem.

É perceptível que quanto menor foi a tensão normal aplicada, mais a amostra dilatou. Esse comportamento pode se dar pelo imbricamento entre partículas do solo, que é o trabalho necessário para movimentar as partículas de solo ascendentemente. Como as amostras estavam compactadas na umidade ótima existe um trabalho adicional para superar o imbricamento das partículas, causando necessariamente uma expansão volumétrica durante o cisalhamento (BENSON e KHIRE, 1994). Portanto, quanto maior foi a tensão normal aplicada – que é aplicada descendentemente – menor foi o movimento ascendente (expansão volumétrica).

Figura 52 – Curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal resultantes dos ensaios de cisalhamento direto para tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa.



Fonte: O Autor (2023).

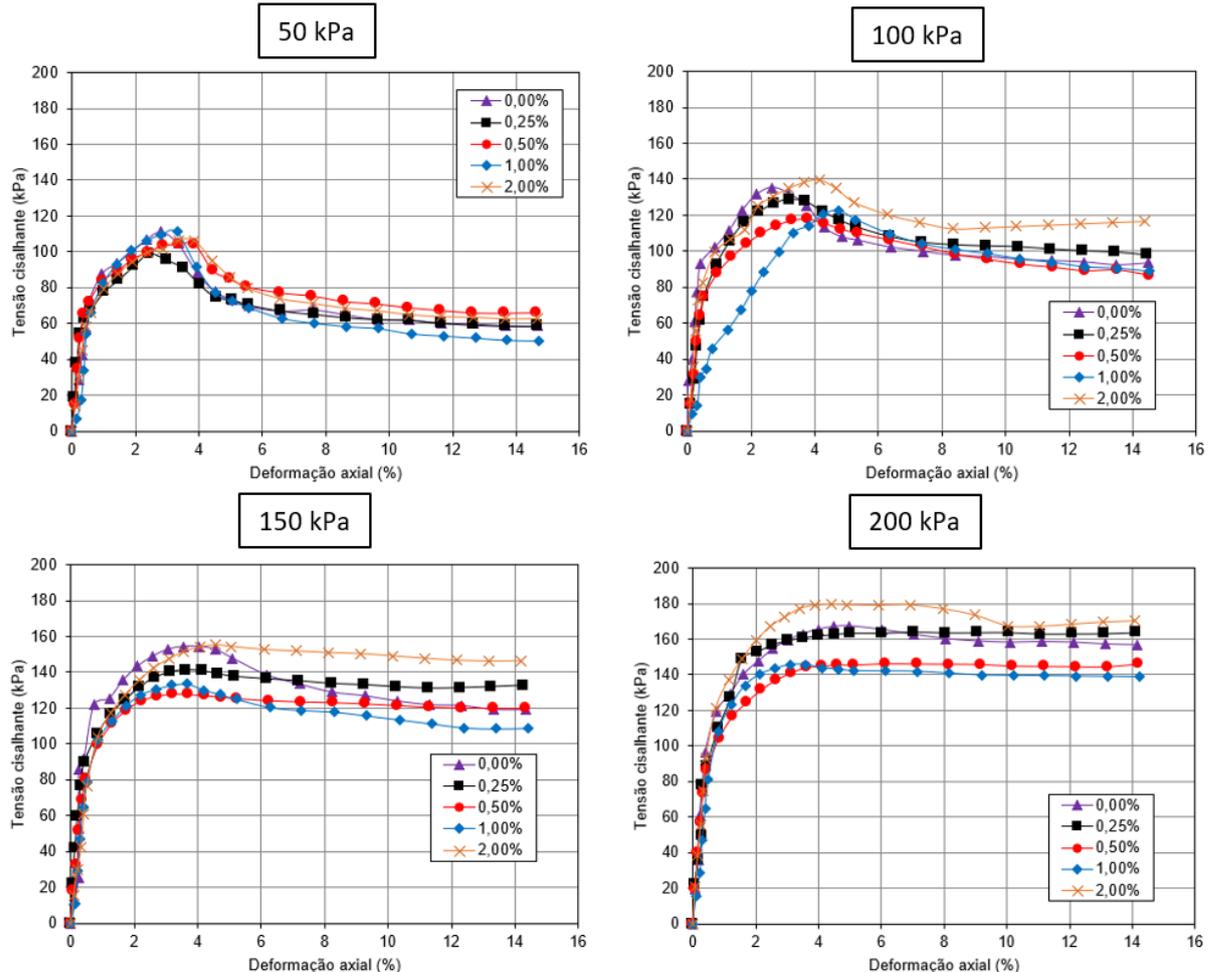
A Figura 53 apresenta as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para cada tensão normal de 50, 100, 150 e 200 kPa e teores de fibras de pneu dos ensaios de cisalhamento direto.

Observa-se que para as tensões normais de 100, 150 e 200 kPa o teor de fibras que superou a resistência máxima ao cisalhamento do solo natural foi o de 2%. Para a tensão de 50 kPa foi o teor de 1%, embora o de 2% tenha chegado a um valor

próximo. Esse comportamento pode ser explicado pela redução do entrosamento das partículas do solo no plano de cisalhamento devido à substituição de parte do solo pelas fibras de pneu. É importante ressaltar que as fibras estavam dispostas aleatoriamente nas amostras e não perpendicularmente ao plano de cisalhamento, onde as fibras colaborariam com um provável aumento da resistência. Na porcentagem de 2% uma boa parcela de fibras pode ter estado perpendicular ao plano e contribuído com a elevação da resistência.

Outro fato observado é que à medida que se aumentou a tensão normal aplicada nas amostras mais os valores de resistência residual se aproximaram dos valores das resistências de pico. As amostras para a tensão normal de 200 kPa chegaram a apresentar um comportamento plástico durante a ruptura.

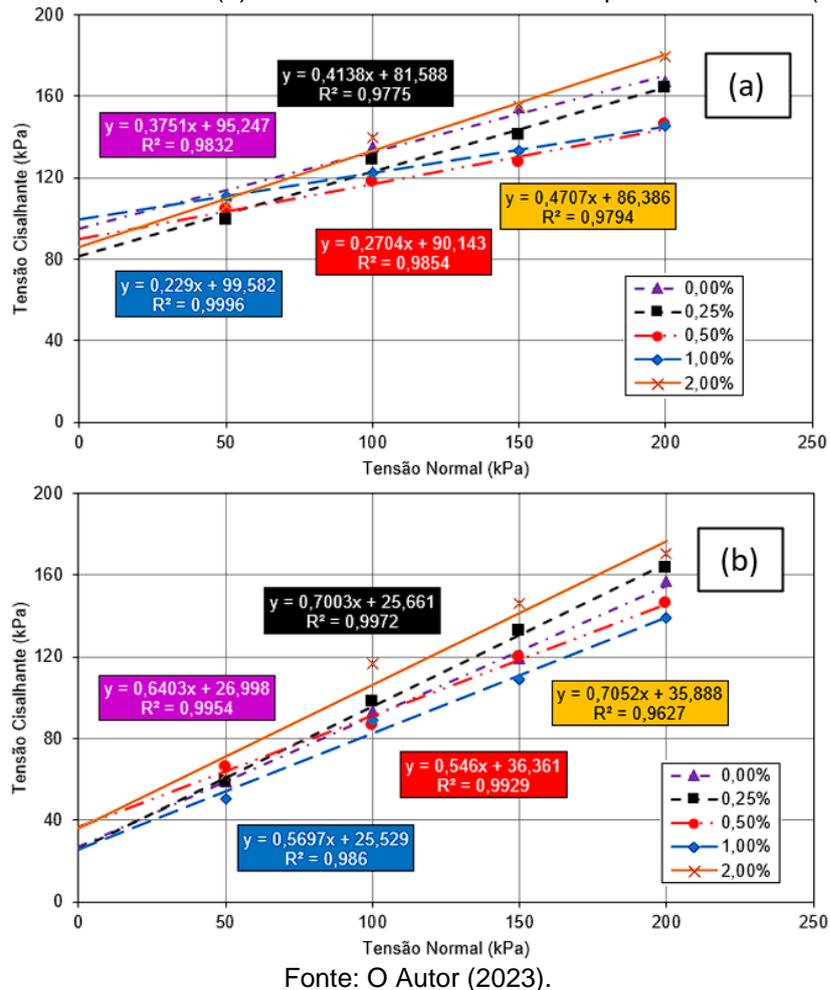
Figura 53 – Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para cada tensão normal de 50, 100, 150 e 200 kPa e teores de fibras dos ensaios de cisalhamento direto.



Fonte: O Autor (2023).

A Figura 54 apresenta as envoltórias de Mohr-Coulomb para as tensões cisalhantes máximas e residuais quando o deslocamento horizontal ( $\epsilon$ ) foi de 14 mm. Constata-se nela que a adição de 2% de fibras de pneu foi a que proporcionou maiores valores de resistência ao cisalhamento e maior ângulo de atrito.

Figura 54 – Envoltórias de Mohr-Coulomb dos ensaios de cisalhamento direto para a tensão cisalhante máxima (a) e tensão cisalhante residual quando  $\epsilon = 14\text{mm}$  (b).

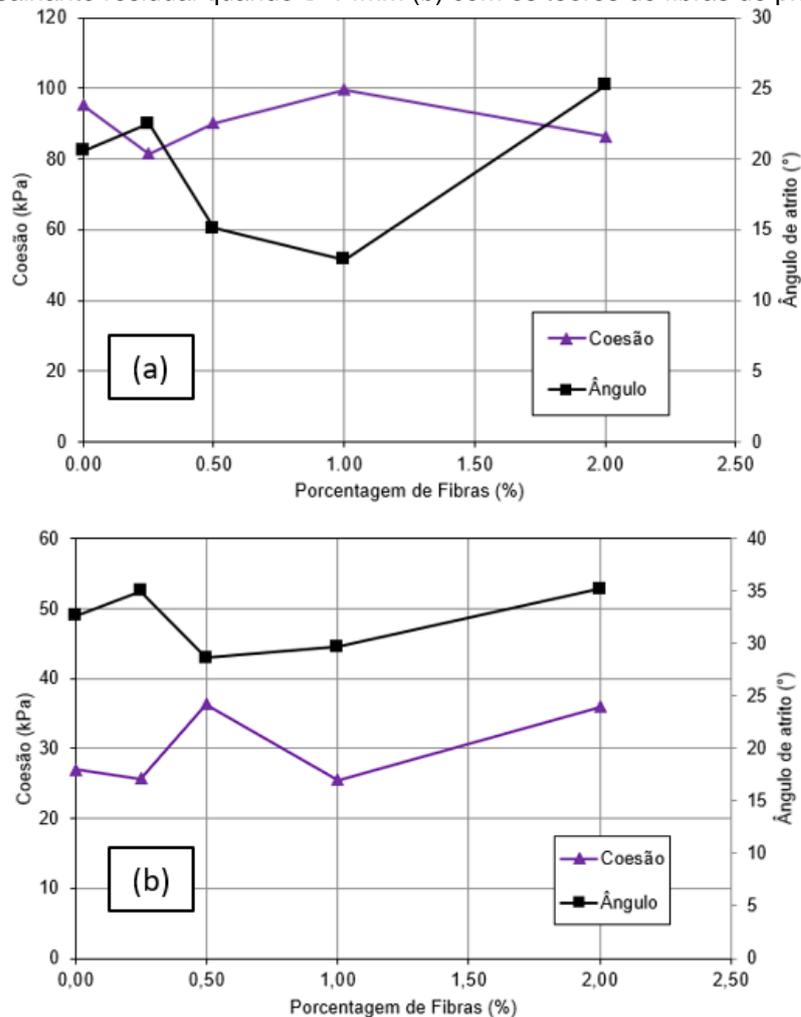


As relações entre coesão e ângulo de atrito com os teores de fibras de pneu, para a tensão cisalhante máxima e residual quando  $\epsilon = 14\text{mm}$  nas amostras, foram obtidas das envoltórias de Mohr-Coulomb e estão representadas na Figura 55. É possível constatar que em relação ao solo natural, para a tensão cisalhante máxima, a coesão reduziu com o teor de 0,25%, subiu com teores de 0,5% e 1% e diminuiu com 2%. O ângulo de atrito aumentou com 0,25%, reduziu com 0,5% e 1% e apresentou incremento com 2%. Para as tensões cisalhantes residuais com  $\epsilon = 14\text{mm}$ , a coesão praticamente manteve-se igual no solo natural, 0,25% e 1% com aumento

nos teores de 0,5% e 2%. O ângulo de atrito aumentou para 0,25%, diminuiu para 0,5% e seguiu crescendo com os teores de 1% e 2%.

Com relação aos valores, houve pequenas oscilações de valores de coesão para resistências máximas e residuais, assim como para o ângulo de atrito. O mesmo foi observado por Abbaspour (2020) ao adicionar fibras de pneu a um solo expansivo até o teor de 2%.

Figura 55 – Relações entre coesão e ângulo de atrito para a tensão cisalhante máxima (a) e tensão cisalhante residual quando  $\epsilon=14\text{mm}$  (b) com os teores de fibras de pneu.



Fonte: O Autor (2023).

Na Tabela 16 encontram-se resumos dos dados referentes às resistências máximas ao cisalhamento e na Tabela 17 os dados relativos às resistências residuais para o deslocamento horizontal ( $\epsilon$ ) de 14 mm das amostras, referentes ao fim dos ensaios. Ambas também possuem os respectivos valores de ângulo de atrito e de coesão encontrados nas envoltórias de Mohr-Coulomb.

Para as tensões cisalhantes máximas, apenas as amostras com teor de 2% foram as que superaram as resistências do solo natural ou obtiveram valores muito próximos. Para 50 kPa, resultou num valor 4,55% inferior ao do solo natural. Para 100, 150 e 200 kPa, obteve-se valores 3,34%, 5,12% e 7,23% superior ao do solo natural, respectivamente. Todas as outras porcentagens resultaram em resistências menores.

Para as tensões cisalhantes residuais, quando  $\epsilon=14\text{mm}$ , a mistura com 2% de fibras foi a que garantiu maior resistência do que o solo natural em todas as tensões normais aplicadas. Para 50, 100, 150 e 200 kPa obteve-se valores 6,84%, 24,92%, 22,79% e 8,63% acima dos valores do solo natural, nessa ordem.

Tabela 16 – Dados dos ensaios de cisalhamento direto para as tensões máximas de cisalhamento.

| Amostra                  | Tensão cisalhante máxima (kPa) |         |         |         | Ângulo de atrito ( $\theta$ ) | Coesão (kPa) |
|--------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|-------------------------------|--------------|
|                          | 50 kPa                         | 100 kPa | 150 kPa | 200 kPa |                               |              |
| -                        | 50 kPa                         | 100 kPa | 150 kPa | 200 kPa | -                             | -            |
| <b>Solo natural</b>      | 111,32                         | 135,32  | 154,43  | 167,47  | 21                            | 95,25        |
| <b>Solo+0,25% fibras</b> | 99,21                          | 128,78  | 141,22  | 164,02  | 22                            | 81,59        |
| <b>Solo+0,50% fibras</b> | 104,37                         | 117,64  | 127,66  | 146,10  | 15                            | 90,14        |
| <b>Solo+1,00% fibras</b> | 111,09                         | 122,62  | 133,48  | 145,63  | 13                            | 99,58        |
| <b>Solo+2,00% fibras</b> | 106,25                         | 139,84  | 155,22  | 179,58  | 25                            | 86,39        |

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 17 – Dados dos ensaios de cisalhamento direto para as tensões de cisalhamento quando  $\epsilon = 14\text{mm}$ .

| Amostra                  | Tensão cisalhante (kPa) ( $\epsilon=14\text{mm}$ ) |         |         |         | Ângulo de atrito ( $\theta$ ) | Coesão (kPa) |
|--------------------------|----------------------------------------------------|---------|---------|---------|-------------------------------|--------------|
|                          | 50 kPa                                             | 100 kPa | 150 kPa | 200 kPa |                               |              |
| -                        | 50 kPa                                             | 100 kPa | 150 kPa | 200 kPa | -                             | -            |
| <b>Solo natural</b>      | 58,73                                              | 93,39   | 119,20  | 156,85  | 33                            | 26,99        |
| <b>Solo+0,25% fibras</b> | 58,54                                              | 97,94   | 132,61  | 163,71  | 35                            | 25,66        |
| <b>Solo+0,50% fibras</b> | 66,04                                              | 86,65   | 119,74  | 146,01  | 29                            | 36,36        |
| <b>Solo+1,00% fibras</b> | 50,49                                              | 88,84   | 108,85  | 138,77  | 30                            | 25,53        |
| <b>Solo+2,00% fibras</b> | 62,75                                              | 116,66  | 146,37  | 170,38  | 35                            | 35,89        |

Fonte: O Autor (2023).

## 4.6 PROCESSO DE FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FISSURAS POR RESSECAMENTO

Para os ensaios de análise de formação e propagação de fissuras por ressecamento de amostras de solo e misturas do solo com as fibras de pneu, foram investigadas as características dos surgimentos das primeiras fissuras e os índices geométricos das fissuras como o número de segmentos, comprimento total, largura média, área fissurada e o CIF.

### 4.6.1 Análise do surgimento das primeiras fissuras

As primeiras fissuras no solo aparecem em um certo valor de umidade onde as tensões de tração induzidas pela sucção capilar superam a resistência à tração do solo. Na Tabela 18 estão reunidos os principais dados relativos ao surgimento das primeiras fissuras nas amostras de solo e nas misturas de solo com fibra de pneu. Umidade da amostra no início do ensaio ( $w_o$ ), tempo de início das fissurações ( $T_{if}$ ), umidade de início das fissurações ( $w_{if}$ ) e perda de umidade até início de fissuração ( $w_p$ ) são relatados para cada amostra. Nota-se que os valores de  $w_o$  equivalem a 1,04 vezes os valores dos limites de liquidez encontrados em ensaios anteriores – 4% acima dos valores de limite de liquidez.

Tabela 18 – Dados relativos às primeiras fissuras das amostras dos ensaios de fissuração por ressecamento.  $w_o$  = umidade no início do ensaio;  $T_{if}$  = tempo de início das fissurações;  $w_{if}$  = umidade de início das fissurações;  $w_p$  = perda de umidade até início de fissuração.

| <b>Amostra</b>           | <b><math>w_o</math> (%)</b> | <b><math>T_{if}</math></b> | <b><math>w_{if}</math> (%)</b> | <b><math>w_p</math> (%)</b> |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| <b>Solo natural</b>      | 65,94                       | 5h20                       | 49,36                          | 16,58                       |
| <b>Solo+0,25% fibras</b> | 58,47                       | 2h30                       | 52,73                          | 5,74                        |
| <b>Solo+0,50% fibras</b> | 56,51                       | 4h50                       | 47,23                          | 9,28                        |
| <b>Solo+1,00% fibras</b> | 54,78                       | 4h                         | 46,11                          | 8,67                        |
| <b>Solo+2,00% fibras</b> | 51,69                       | 1h10                       | 49,60                          | 2,09                        |

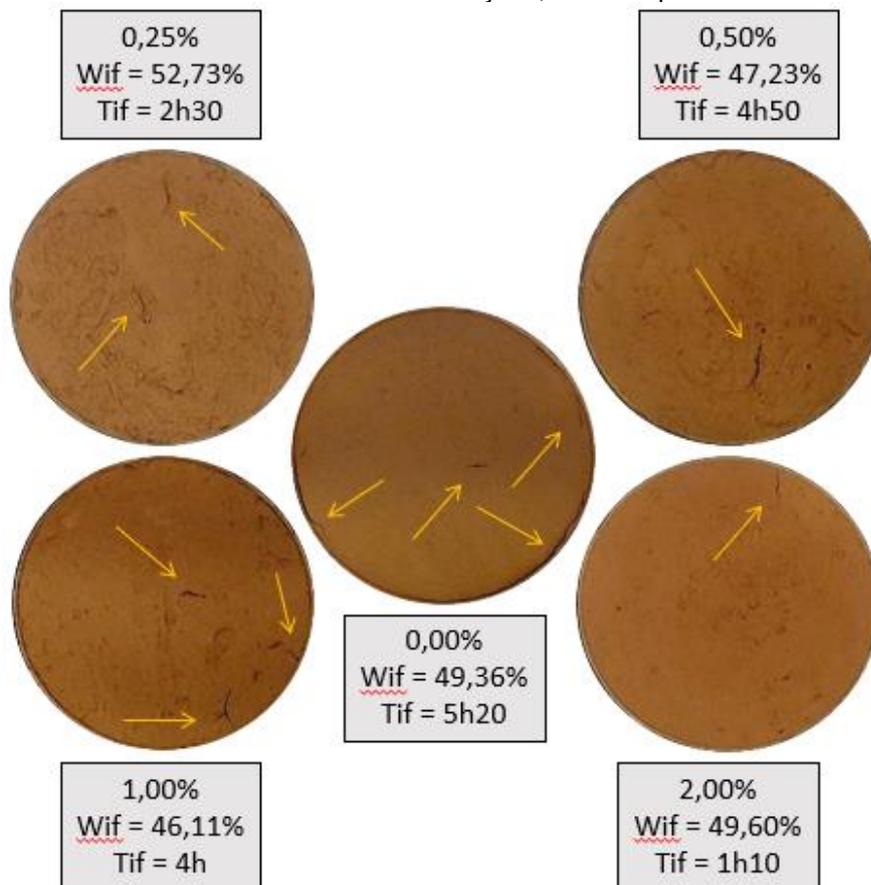
Fonte: O Autor (2023).

A amostra com teor de fibra 2% foi a que fissurou mais rapidamente com o tempo (em 1h10), seguida da amostra com 0,25%, 1%, 0,5% e solo natural. A mesma ordem se aplica para a menor perda de umidade. O solo com 2% de fibras foi o que

menos perdeu umidade até o surgimento do primeiro segmento de fissura, seguido do teor de 0,25%, 1%, 0,5% e o solo natural.

Algumas peculiaridades podem ter influenciado no tempo para o aparecimento das primeiras fissuras e na umidade inicial do processo de fissuração. São elas: umidade inicial, temperatura e umidade relativa do ar, heterogeneidade e mineralogia (TANG et al., 2012). Na Figura 56 é possível visualizar os primeiros segmentos de fissuras que surgiram nos ensaios, para cada teor de fibras de pneu.

Figura 56 – Surgimento das primeiras fissuras nas amostras dos ensaios de fissuração por ressecamento. Wif = umidade de início de fissurações; Tif = tempo de início das fissurações.



Fonte: O Autor (2023).

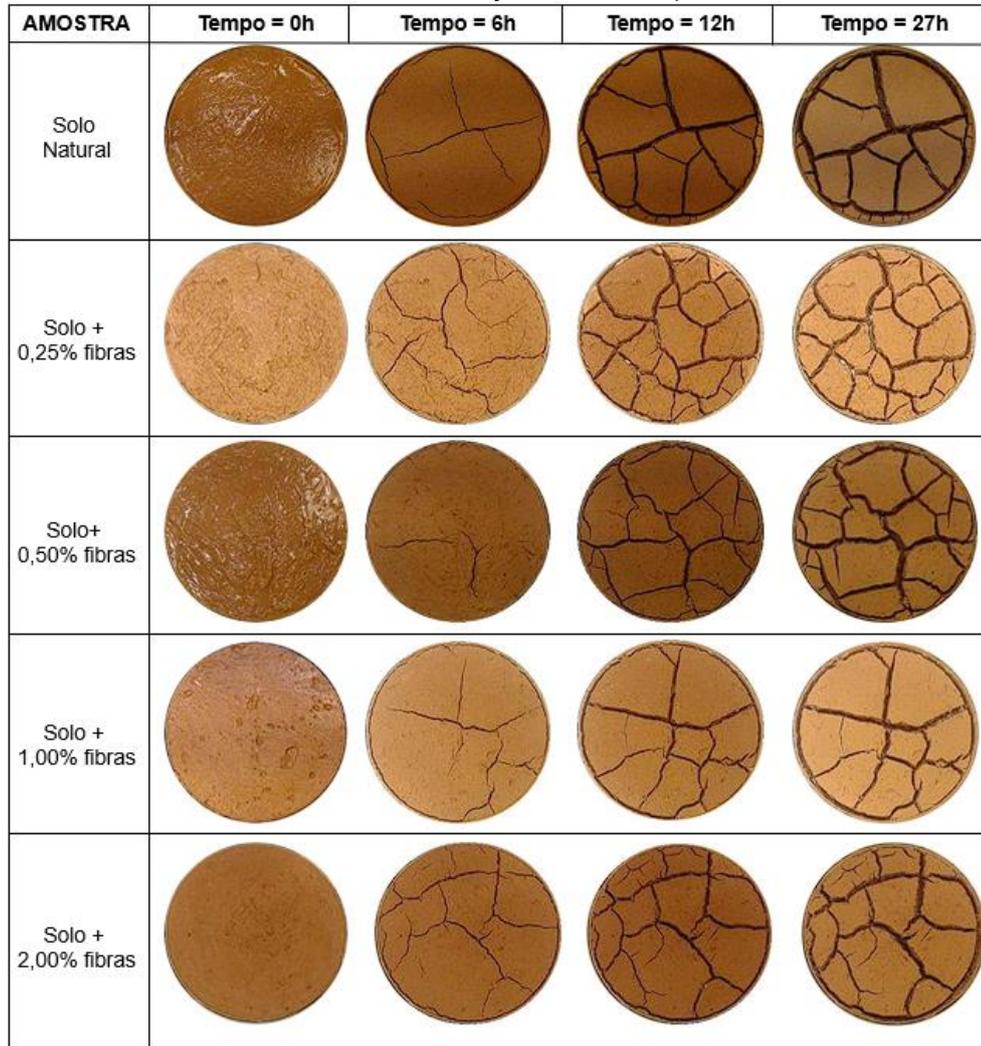
#### 4.6.2 Análise da formação e propagação das fissuras nas amostras

Foram selecionadas imagens a partir do surgimento dos primeiros segmentos de fissuras até uma visível estabilidade da propagação de fissuras nas amostras. Com elas, foram obtidos os dados relativos para a determinação do número de fissuras, seus comprimentos totais, larguras médias, áreas fissuradas e os CIFs, tudo em função das umidades gravimétricas das amostras.

Ao longo do processo de secagem, as primeiras fissuras no solo surgem em um determinado valor de umidade em que as tensões de tração induzidas pela sucção capilar ultrapassam a resistência à tração do solo. Assim como observou-se que em um determinado estágio do processo de ressecamento, paralisa-se a formação e propagação de fissuras. Isso ocorre quando um aumento adicional das tensões de tração não provoca o aparecimento de novas fissuras nem a propagação de fissuras já existentes. A análise individual do processo de propagação fissura do solo e das misturas solo/fibras de pneu são apresentadas no Apêndice A. Uma comparação do solo e de todas as misturas são aqui analisadas.

Para uma comparação do surgimento e propagação de fissuras em todas as amostras, a Figura 57 mostra imagens de todas as amostras ensaiadas em função do tempo. Nota-se que as amostras, mesmo as com reforço de fibras de pneu, apresentaram contração e fissuras profundas. Em todas as amostras, fissuras primárias e secundárias surgiram até um tempo de cerca de 12h de ensaio. Após esse período, houve um maior desenvolvimento dos alargamentos das fissuras, que seguiu até o final do experimento. No fim dos ensaios, para a amostra sem reforço, predominaram as fissuras em formato de 'T' e 'Y' e para as reforçadas, 'X' e 'Y'. Do ponto de vista morfológico, a inclusão de fibras de pneu tendeu a transformar fissuras largas e lisas em fissuras mais estreitas e irregulares.

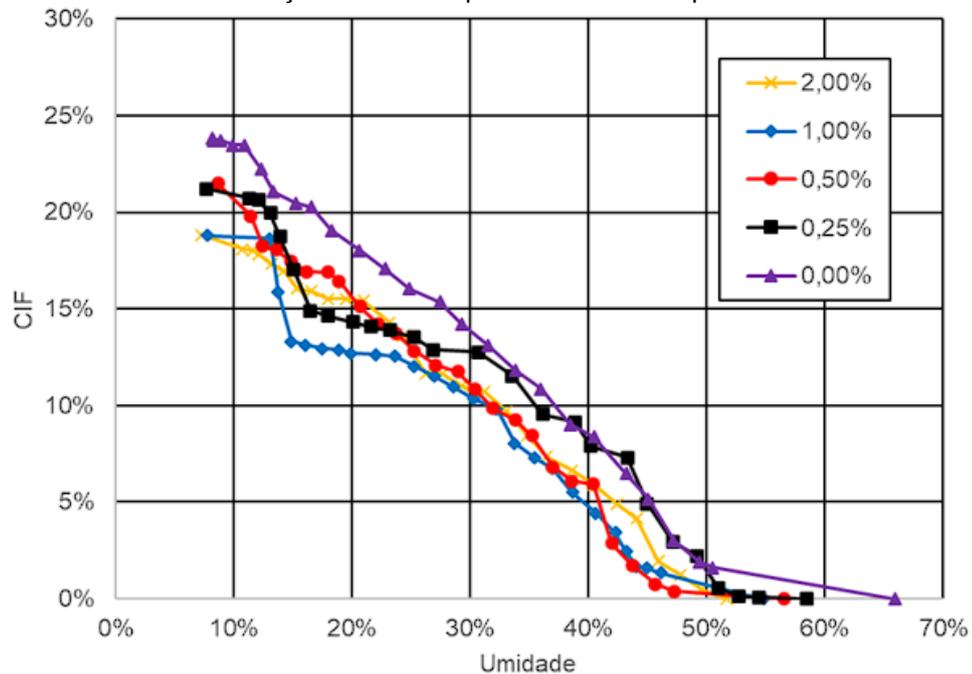
Figura 57 – Evolução das fissuras em função do tempo de ensaio para a amostra de solo natural e amostras com reforço de fibras de pneu.



Fonte: O Autor (2023).

Na Figura 58 se encontra as relações entre os CIFs e as umidades gravimétricas para as amostras de solo natural e dos solos reforçados com fibras de pneu. Os valores de CIF da amostra de solo natural foram maiores do que as amostras que receberam reforços de fibras de pneu. A amostra com 0,25% de fibras de pneu seguiu com valores de CIFs muito próximos ao do solo natural até aproximadamente 39% de umidade, quando daí passou a resultar em valores menores até o fim do ensaio. As amostras com 0,25% e 0,5% de fibras obtiveram valores finais de CIF próximos e inferiores ao do solo natural; e as que possuíam 1% e 2% de fibras resultaram em valores próximos e inferiores aos das amostras com 0,25% e 0,5%.

Figura 58 – Relação entre o CIF e a umidade gravimétrica para as amostras de solo natural e de solos com reforço de fibras de pneu com seus respectivos teores.



Fonte: O Autor (2023).

Um resumo dos principais dados e índices das análises de formação e propagação de fissuras para a amostra de solo natural e misturas de solo com reforço de fibras de pneu pode ser encontrado na Tabela 19. Nela é possível observar que o número de segmentos de fissuras seguiu uma tendência de redução com o acréscimo de fibras. Nenhum teor de fibra de pneu adicionado cessou por completo a fissuração do solo. A largura média final e o comprimento total final não seguiram uma tendência bem definida, porém ainda assim os CIFs finais das amostras reforçadas foram menores que o do solo natural. Para as amostras com 0,25%, 0,5%, 1% e 2%, a redução dos CIFs foi de 10,91%, 9,74%, 21,16% e 20,95% respectivamente.

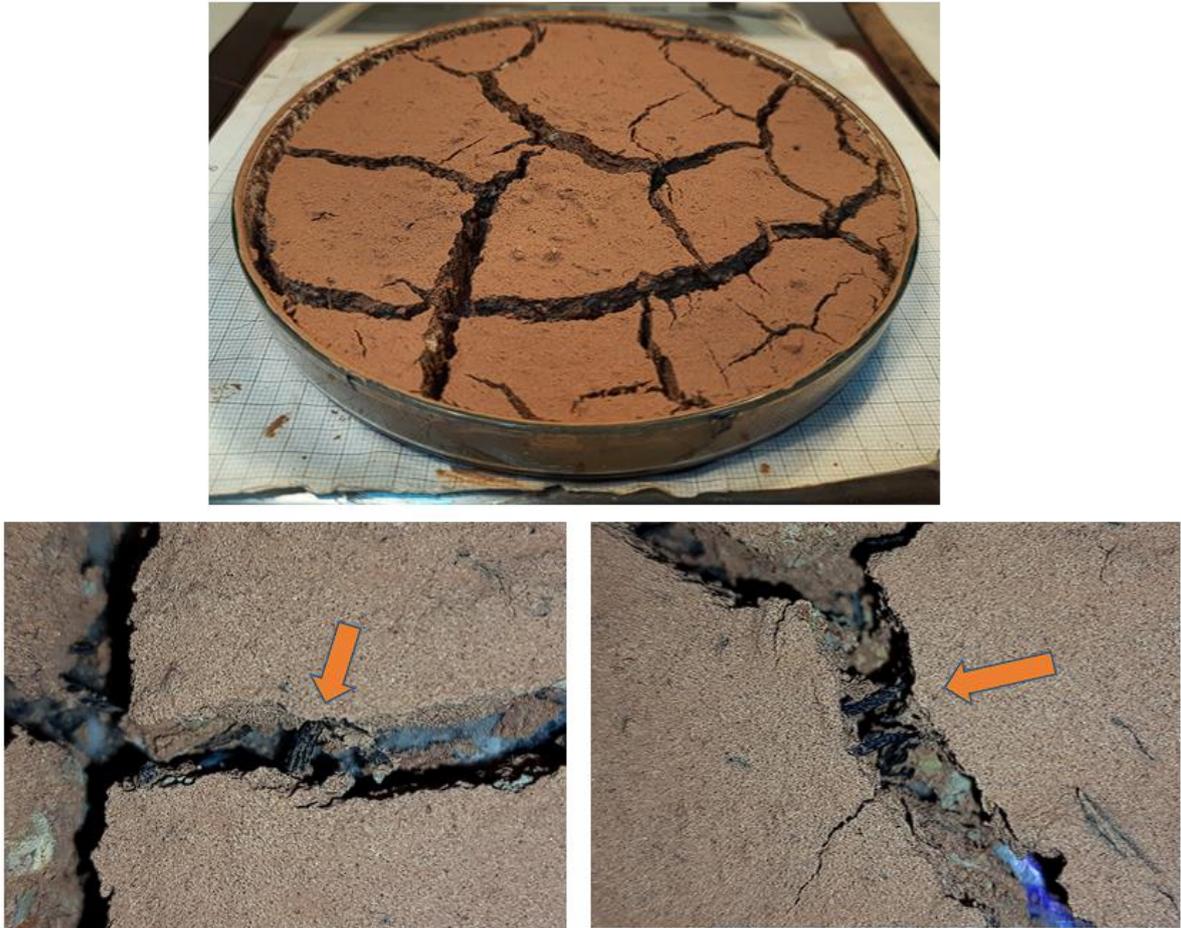
Constata-se que as fibras de pneu (Figura 59) colaboraram na resistência à tração do solo oriunda da dessecação, reduzindo o potencial de fissuração do solo. Esse mesmo fenômeno foi observado por Narani (2020), que utilizou resíduos de fibras de pneu como reforço para um solo expansivo e concluiu que à medida que se adiciona mais fibras de pneu, a área de fissuração reduz.

Tabela 19 –Resumo dos principais dados e índices das análises de formação e propagação de fissuras para a amostra de solo natural e misturas de solo com reforço de fibras de pneu.

| <b>Índices físicos e geométricos das fissuras</b>       | <b>Solo natural</b> | <b>Solo+ 0,25%</b> | <b>Solo+ 0,5%</b> | <b>Solo+ 1%</b> | <b>Solo+ 2%</b> |
|---------------------------------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Umidade inicial (%)</b>                              | 65,94               | 58,47              | 56,51             | 54,78           | 51,69           |
| <b>Índice de vazios inicial (e<sub>o</sub>)</b>         | 1,51                | 1,51               | 1,51              | 1,51            | 1,51            |
| <b>Tempo total de secagem</b>                           | 26h30               | 27h                | 27h30             | 27h             | 27h30           |
| <b>Temperatura média ± desvio padrão (°C)</b>           | 49,89 ± 4,06        | 45,73 ± 2,77       | 44,04 ± 0,37      | 48,12 ± 3,50    | 41,88 ± 0,65    |
| <b>Umidade relativa do ar média ± desvio padrão (%)</b> | 32,51 ± 1,78        | 41,75 ± 4,71       | 43,08 ± 0,99      | 38,33 ± 5,74    | 46,58 ± 1,78    |
| <b>Tempo para primeiras fissuras</b>                    | 5h20                | 2h30               | 4h50              | 4h              | 1h10            |
| <b>Umidade para primeiras fissuras (%)</b>              | 49,36               | 52,73              | 47,23             | 46,11           | 49,60           |
| <b>Formato das fissuras</b>                             | T ou Y              | Y ou X             | Y ou X            | Y ou X          | Y ou X          |
| <b>Umidade final (%)</b>                                | 5,38                | 7,67               | 8,67              | 7,78            | 7,26            |
| <b>Nº de segmentos final de fissuras</b>                | 57                  | 51                 | 49                | 35              | 43              |
| <b>Largura média final das fissuras (mm)</b>            | 3,4                 | 3,46               | 3,02              | 3,62            | 3,0             |
| <b>Comprimento total final das fissuras (mm)</b>        | 1024                | 893                | 1098              | 1094            | 1211            |
| <b>Área fissurada final (mm<sup>2</sup>)</b>            | 4044,5              | 3603,8             | 3650,8            | 3189            | 3197,9          |
| <b>CIF final (%)</b>                                    | 23,82               | 21,22              | 21,50             | 18,78           | 18,83           |

Fonte: O Autor (2023).

Figura 59 – Visualização de fibras de pneus atuando nas fissuras na amostra de solo reforçado com 2% de fibras.



Fonte: O Autor (2023).

#### 4.7 AVALIAÇÃO DAS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA

As curvas de retenção de água, em termos de umidade volumétrica *versus* sucção matricial, obtidas para as amostras de solo natural e suas misturas com fibras de pneu – inclusive suas curvas de ajuste pelo método de Van Genuchten (1980) – estão apresentadas na Figura 60.

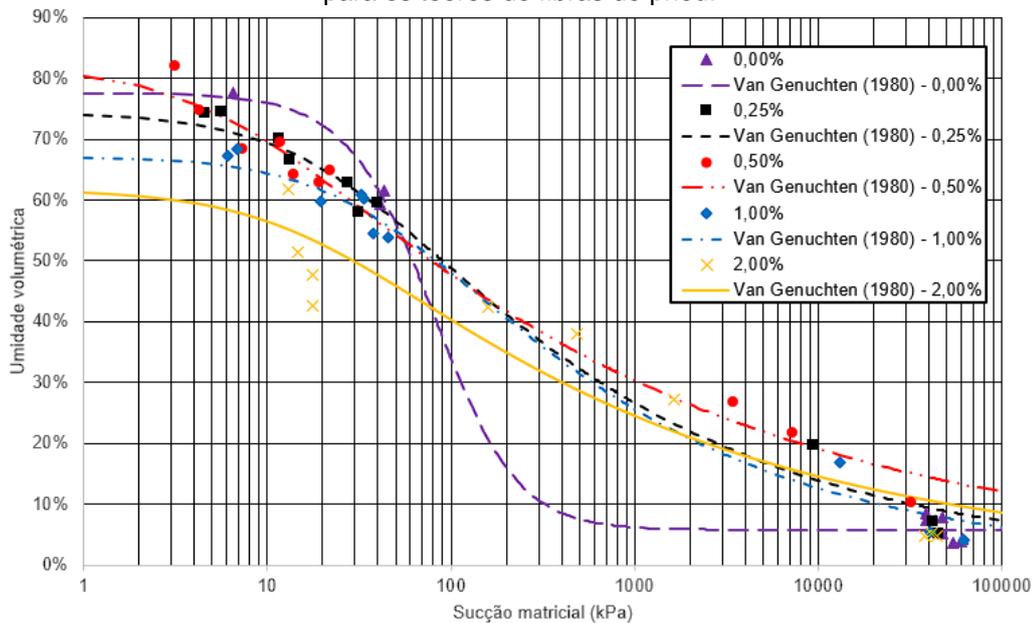
O solo natural foi o que mostrou maior retenção de água em trechos de baixa sucção matricial – de 3 a 42 kPa. A partir dos 42 kPa, todas as misturas de solo com fibras de pneu retiveram mais água do que o solo natural. Em valores de sucção superiores a aproximadamente 150 kPa, a amostra com 0,5% de fibras foi a que mais reteve água.

Observando o comportamento das curvas de ajustes após os pontos de entrada de ar ( $\Psi_{ar}$ ), o solo natural foi o que menos aumentou a sucção matricial com o decaimento da sua umidade volumétrica. Porém, sua sucção matricial cresceu

exponencialmente com valores abaixo de 7% de umidade. Já para as misturas de solo com fibras de pneu, pequenas reduções de umidade volumétrica conferiram aumentos expressivos de sucção matricial.

Em geral, as misturas com fibras retiveram mais água que o solo natural para um mesmo valor de sucção matricial, mostrando que a inclusão das fibras de pneu altera essa característica.

Figura 60 – Curvas de retenção de água na relação umidade volumétrica *versus* sucção matricial para os teores de fibras de pneu.



Os índices de ajustes de curvas de retenção de água, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten (1980), encontram-se na Tabela 20, assim como os valores de sucção matricial para os pontos de entrada de ar de cada curva. Percebe-se que a inclusão de fibras de pneu no solo fez o ponto de entrada de ar reduzir de 27 kPa para o solo natural para 11, 4, 11 e 8 kPa para os teores de 0,25%, 0,50%, 1% e 2%, nessa ordem.

Tabela 20 – Parâmetros dos ajustes de curvas de retenção de água de Van Genuchten (1980).  $\Psi_{ar}$  = Sucção do solo para entrada de ar;  $\theta_r$  = umidade residual;  $\theta_s$  = umidade de saturação;  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  = índices de ajustes do modelo de Van Genuchten (1980).

| <b>Amostra</b>           | <b><math>\Psi_{ar}</math> (kPa)</b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b><math>n</math></b> | <b><math>\theta_r</math> (%)</b> | <b><math>\theta_s</math> (%)</b> | <b><math>m</math></b> |
|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| <b>Solo natural</b>      | 27                                  | 0,011                      | 1,778                 | 0,058                            | 0,776                            | 1,216                 |
| <b>Solo+0,25% fibras</b> | 11                                  | 0,037                      | 1,133                 | 0,001                            | 0,744                            | 0,250                 |
| <b>Solo+0,50% fibras</b> | 4                                   | 0,140                      | 1,096                 | 0,001                            | 0,820                            | 0,184                 |
| <b>Solo+1,00% fibras</b> | 11                                  | 0,022                      | 1,114                 | 0,001                            | 0,673                            | 0,270                 |
| <b>Solo+2,00% fibras</b> | 8                                   | 0,058                      | 1,107                 | 0,001                            | 0,618                            | 0,204                 |

Fonte: O Autor (2023).

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e aspectos relevantes deste trabalho, assim como sugestões para pesquisas futuras que englobem o tema.

### 5.1 CONCLUSÕES

A viabilidade de reutilizar fibras de pneus como materiais de reforço no solo expansivo de Paulista-PE foi investigada por meio de um conjunto de ensaios. As conclusões mais importantes desta pesquisa podem ser categorizadas são descritas a seguir.

- a) O acréscimo da adição de fibras de pneu ao solo expansivo de Paulista-PE reduz o limite de liquidez e o índice de plasticidade.
- b) A umidade ótima cresce para a adição de 0,25% e 0,50% da fibra de pneu em relação ao solo e decresce para valores superiores. O peso específico aparente seco máximo cresce com a adição da fibra de pneu e atinge o valor máximo para a adição de 1%.
- c) O solo expansivo compactado na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo apresenta um coeficiente de permeabilidade de  $2,64 \times 10^{-8}$  cm/s. A adição de fibras de pneu ao solo não influencia o coeficiente de permeabilidade mantendo a ordem de grandeza de  $10^{-8}$  cm/s.
- d) Com relação à caracterização reológica através dos ensaios de squeeze-flow, para a umidade do limite de liquidez, a tensão de escoamento e tensão inicial de enrijecimento segue uma tendência de aumento com o sucessivo incremento de teor de fibras de pneu. Para a umidade do limite de plasticidade, há um crescimento do valor da tensão inicial de enrijecimento até a porcentagem de 1% e um decréscimo em seguida para o teor de 2%.
- e) A adição de fibras de pneu ao solo colabora na redução da expansão "livre". Quanto mais fibras presentes, menos a mistura de solo com fibras expande. Na avaliação da tensão de expansão, o incremento de fibras de pneu até o teor de 1% reduz a tensão de expansão em relação ao solo sem reforço.
- f) A adição gradativa de fibras de pneu ao solo, até o teor de 1%, promove um acréscimo da resistência à compressão não confinada e das deformações axiais específicas na ruptura. Com 2% de fibras há uma leve redução da

resistência. Para a resistência à tração por compressão diametral, a resistência à tração cresce à medida em que o teor de fibras de pneu aumenta, com um aumento expressivo de 31,32% com o teor de 2% de fibras de pneu.

- g) Para as tensões cisalhantes máximas, apenas o teor de 2% de fibras de pneu resulta em resistência do solo próxima à do solo natural. Todas as outras porcentagens resultam em resistências menores.
- h) O solo natural é o que mostra maior retenção de água em trechos de baixa sucção matricial – de 3 a 42 kPa. A partir dos 80 kPa, as misturas com fibras retêm mais água que o solo natural para um mesmo valor de sucção matricial, mostrando que a inclusão das fibras de pneu altera essa característica. A inclusão de fibras de pneu no solo também faz o ponto de entrada de ar reduzir.
- i) Para a formação e propagação de fissuras, mesmo com reforço de fibras de pneu, o solo apresenta contração e fissuras profundas. Nenhum teor de fibras conseguiu cessar por completo a fissuração. Em todos os teores de fibras, fissuras primárias e secundárias surgem. O valor de CIF do solo natural é maior do que os solos com reforços de fibras de pneu e a adição das fibras faz com que o valor do coeficiente reduza.

É possível concluir que a inclusão de fibras de pneu promove melhorias em características geotécnicas importantes, como a resistência à tração e comportamento reológico, do solo expansivo de Paulista-PE. O percentual ideal de fibras de pneu para este estudo ficou entre 1% e 2%. A formação e propagação de fissuras não é totalmente mitigada, porém há uma redução. Isso mostra que a utilização de fibras de pneu como agente de reforço para solos expansivos pode ser uma solução interessante para a melhoria desse tipo de solo, principalmente para os que possuem menores potenciais expansivos.

## 5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

São listadas a seguir algumas sugestões para pesquisas futuras que englobem o mesmo tema deste trabalho:

1. Realizar ensaios com teores de fibra de pneu maiores que 2%.
2. Utilizar fibras de pneu com comprimentos mais longos e de pequena variância.

3. Utilizar outros passivos ambientais ou materiais em conjunto com as fibras de pneu para a averiguação de melhorias ou pioras de características.
4. Realizar ensaio de tração nas fibras de pneu.
5. Analisar a interação fibra/solo com o uso de microscopia eletrônica de varredura.
6. Realizar ensaios de adensamento para os solos reforçados com fibras de pneu.
7. Analisar a aplicabilidade de fibras de pneu como reforço em solos colapsíveis.

## REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, M.; AFLAKI, E.; MOGHADAS NEJAD, F. Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement. **Journal of Cleaner Production**. 207, 1059-1071. 2019. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.09.253>
- ABBASPOUR, M.; NARANI, S. S.; AFLAKI, E.; MOGHADAS NEJAD, F.; MIR MOHAMMAD HOSSEINI, S. M. Strength and swelling properties of a waste tire textile fiberreinforced expansive soil. **Geosynthetics International**, v. 27, n. 5, p. 476–489. 2020. <https://doi.org/10.1680/jgein.20.00010>
- AHMED, I.; LOVELL, C. W. Rubber soils as lightweight geomaterials. **Transportation Research Record**, n. 1422, p. 61-70, 1993.
- AKBULUT, S.; ARASAN, S.; KALKAN, E. Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. **Applied Clay Science**, v. 38, p. 23-32, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.02.001>.
- ALBRECHT, B. A.; BENSON, C. H. Effect of desiccation on compacted natural clays. **J. Geotech. Geoenviron. Eng**, v. 127, p. 67-75, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:1\(67\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:1(67)).
- ALBRIGHT, W. H. et al. Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site. **J Geotech Geoenviron**, v. 132, p. 1393–1403, 2006. Disponível em: <[<https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2006\)>](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2006))>.
- ALBUQUERQUE, A. C. **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu**. Tese (Tese de doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3080**: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. Philadelphia: PA, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4829**: Standard test method for expansion index of soils. Philadelphia: PA, 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5298**: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. Philadelphia: PA, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6270**: Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications. Philadelphia, 20 p., 2008.
- AMMOUR, A.; BOUHANNA, B. **Contribution a l'étude de la fissuration des argiles**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Tlemcen, Argélia, 2016.

ANDRADE, H. S. **Pneus Inservíveis: Alternativas Possíveis de Reutilização**. Monografia, Curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 101 p., 2007.

ANDRIETTA, A. J. **Pneus e meio ambiente: Um grande problema requer uma grande solução**. 2012. Disponível em: <<http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipneus>>. Acesso em: 22 jun. 2022.

ANIP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **Dados do Segmento**. 2014. Disponível em: <http://www.anip.com.br>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

ANIP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **Relatório Ambiental 2020**. 2021. Disponível em: <<https://www.anip.org.br/>>. Acesso em: 25 fev. 2023.

ANVARI, S. M.; SHOOSH PASHA, I. Influence of size of granulated rubber on bearing capacity of fine-grained sand. **Arab. J. Geosci**, v. 9, p. 2–13, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12517-016-2744-8>>.

ARAÚJO, A. G. D. **Análise do processo de fissuras e do comportamento de estacas granulares ancoradas submetidas a secagem e umedecimento em solo expansivo**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

ARAÚJO, A. G. D.; BELFORT, N. T.; BARBOSA, F. A. S.; SILVA, T. C. R.; FERREIRA, S. R. M. F.; GUIMARÃES, L. J. N.; BEZERRA, I. M. L. Expansive clay cracking behavior through digital image correlation. **4th European Conference on Unsaturated Soils (E-Unsat 2020)**. v. 195, 2020.

ARULRAJAH, A. et al. Effect of lime kiln dust as an alternative binder in the stabilization of construction and demolition materials. **Constr. Build. Mater**, p. 152, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770**: Solo – Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15839**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16853**: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BALUNAINI, U.; PREZZI, M. Interaction of ribbed-metal-strip reinforcement with tire shred-sand mixtures. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 28, n. 2, p. 147-163, 2010.

BARBOSA, F. A. S. **Análise do comportamento hidromecânico e da dinâmica de fissuração de um solo expansivo**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 132p., 2019.

BARBOSA, F. A. S.; ARAÚJO, A. G. D.; FERREIRA, S. R. M. Estimativa da capacidade de carga de um solo expansivo por métodos teóricos e com a utilização do penetrômetro dinâmico de Stolf. **9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 9** – 4 a 6 de junho de 2019, São Paulo/SP, 2019.

BASTOS, E. G. **Variação Volumétrica de uma Argila Expansiva do Litoral Norte de Pernambuco**. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal da Paraíba, CCT, Campina Grande. Paraíba, 153p., 1994.

BEKHITI, M.; GHRIEB, A.; SMAIDA, A. Influence of worn tire rubber fibres on the swelling potential and pressure of clay soils, **Materials Today: Proceedings**, v. 45, n. 6, p. 5225-5230, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.723>

BEKHITI, M.; GHRIEB, A.; ZAITRI, R. Valorization of dune sand treated with lime and scrap tyre rubber powder as a road foundation material. **Journal of Materials and Engineering Structures**, 2020.

BENSON, C. H.; KHIRE, M. V. Reinforcing sand with strips of reclaimed high-density polyethylene. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 120, n. 5, p. 838–855, 1994.

BERTOLLO, S. M. et al. Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos. In: **XVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Cancún, México. 2002.

BEZERRA, I. M. L. **Análise da interação interpartículas e do processo de fissuração de um solo expansivo tratado com areia, cal e cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibers. **Elsev. Progr. Polym. Sci**, v. 24, p. 221–274, 1999.

BOWLES, J. E. **Physical and Geotechnical Properties of Soils**. [S.l.]: McGraw-Hill International Book Company, 1979.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2009.

CABALAR, A. F.; KARABASH, Z. California bearing ratio of a sub-base material modified with tire buffings and cement addition. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 43, n. 6, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1520/JTE20130070>>.

CABALAR, A. F.; KARABASH, Z.; MUSTAFA, W. S. Stabilising a clay using tyre buffings and lime. **Road Materials and Pavement Design**, v. 15, n. 4, p. 872–891, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14680629.2014.939697>>.

CAI, Y.; SHI, B.; CHARLES, W. W.; TANG, C. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. **Eng. Geol**, v. 87, p. 230–240, 2006.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARVALHO, J. B. Q. **Fundamentos da Mecânica dos Solos**. [S.l.]: Gráfica Marconi, 1997.

CASAGRANDE, M. D. T. Solo: do comportamento a aplicações. **Fundações e Obras geotécnicas**, ano 3, n. 31, p. 80-91, 2013.

CHADUVULA, U.; VISWANADHAM, B. V. S.; KODIKARA, J. A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced expansive clay. **Appl Clay Sci**, v. 142, p. 163–172, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2014/498437>>.

CHANDLER, R. J. CRILLY, M. S. MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proceedings of the Institute of Civil Engineering**, v.92, n. 2, p. 82-89, 1992.

CHEN, F. H. **Foundations on expansive soils**. [S.l.]: Elsevier Scientific Publishing Co., 1988.

CHRUSCIAK, M. R. **Análise da melhoria de solos utilizando fragmentos de borracha**. 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CONSTANTINO, C. S. **Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; RUIZ, H. A.; BASTOS, R. S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das várzeas de Sousa (PB). **Ver Bras Cienc Solo**, v. 27, p. 311–324, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200011>>.

COSTA, C. D. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de 102 aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

COSTA, N. A. J.; VASCONCELOS, E. M.; PANDOLFI, R. L. M. Ocorrências e Propriedades de Engenharia de Solos Expansivos na Área da Grande Recife. VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia de Fundações. **Anais**, p.193-209. Olinda/Recife, 1982.

COTECCHIA, F.; VITONE, C. Behavioural features of fissured clays: experimental evidence and modelling. In: **6th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials**. Buenos Aires, Argentina: [s.n.], p. 615–622, 2015.

DELMIRO, T. D. **Aplicações dos Solos na Construção Civil: Avaliação da Expansão Livre e Tensão de Expansão**. Relatório de Iniciação Científica – Universidade Católica de Pernambuco – Recife/PE, 2013.

DIF, A.; BLUEMEL, W. Expansive soils under cyclic drying and wetting. **Geotech. Test. J**, v. 14, n. 1, p. 96–102, 1991. Disponível em: <<https://doi.org/10.1520/GTJ10196J>>.

DJADOUNI, H. et al. 2d numerical analysis of a cantilever retaining wall backfilled with sand/tire chips mixtures. **Eur. J. Environ. Civ. Eng**, v. 0, p. 1–17, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1570870>>.

EDIL, T.; BOSSCHER, P. Engineering properties of tire chips and soil mixtures. **Geotechnical Testing Journal**, v. 14, n. 4, p. 453–464, 1994.

EDINÇLILER, A.; AYHAN, V. Influence of tire fiber inclusions on shear strength of sand. **Geosynthetics International**, v. 17, n. 4, p. 183-192, 2010.

EDINÇLILER, A.; BAYKAL, G.; SAYGILI, A. Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction. **Waste Manag**, v. 30, p. 1073–1080, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.031>>.

ESTABRAGH, A. R.; MOGHADAS, M.; JAVADI, A. A. Effect of different types of wetting fluids on the behaviour of expansive soil during wetting and drying. **Soils Found**, v. 53, n. 5, p. 617–627, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.SANDF.2013.08.001>>.

FAUSTINO, O. W. C. **Análise do comportamento hidromecânico e o processo de formação de fissuras de solo expansivo reforçado com fibras de coco verde**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

FERREIRA S. R. M.; ARAÚJO, A. G. D.; BARBOSA, F. A. S.; SILVA, T. C. R.; BEZERRA, I. M. L. Analysis of changes in volume and propagation of cracks in expansive soil due to changes in water content. **Rev. Bras. Cienc. Solo**. v. 44, 2020.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devidos à inundação**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

FERREIRA, S. R. M. et al. Estabilização de solos expansivos de Cabrobó, Paulista e Suape/PE com cal. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 16., 2012. **Anais [...]**. Porto de Galinhas: ABMS, 2012, p. 264.

FERREIRA, S. R. M. Mapa de risco a colapsibilidade e expansividade de solos do estado de Pernambuco – Geotecnia Ambiental. **Relatório Técnico do CNPq**, 100 p., 1999.

FERREIRA, S. R. M.; FERREIRA, M. G. V. X. Mudanças de volume devido a variação de teor de umidade em um vertissolo no semiárido de pernambuco. **Ver Bras Cienc Solo**, v. 33, p. 779–791, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400004>>.

FIORITI, C. F. Paviers de concreto com adição de resíduos da recauchutagem de pneus. 2007. Disponível em: <<http://www.ppger.feis.unesp.br/producao2006/41.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2022.

FRANCO, K. L. B. **Caracterização do Comportamento Geotécnico de Misturas de Resíduo de Pneus e Solo Laterítico**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 139 p. 2012.

GERSCOVICH, D. M. S.; SAYÃO, A. S. F. J.; VALLE, F. A. F. Mecanismo de ruptura de reforço de solos com pneus. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 13., 2006, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: ABMS, 2006. 6 p.

GHAZIZADE, M. J.; SAFARI, E. Analysis of desiccation crack depth in three compacted clay liners exposed to annual cycle of atmospheric conditions with and without a geotextile cover. **J Geotech Geoenviron**, v. 143, 2017. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001607](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001607)>.

GHENI, A. A. et al. Durability properties of cleaner cement mortar with by-products of tire recycling. **J. Clean. Prod**, v. 213, p. 1135–1146, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.260>>.

GRAM, H. E. Durability of natural fibres in concrete. **CBI Research**, v. 83, n. 1, p. 255, 1983.

GUERRA, G. J. Z.; BORGES, B. S.; CASTRO, B. C.; CARVALHO, J. C. Uso de resíduos do processo de recapagem de pneus no concreto portland para calçadas. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 15., 2010, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: ABMS, 2010. 8 p.

HASAN, H. A.; MOHAMMED, H. A.; MASOOD, G. G. Effect of rubber tire on behaviour of subgrade expansive Iraqi soils. **Materials Science and Engineering**, v. 870, 2020. DOI:10.1088/1757-899X/870/1/012066

HAZARIKA, H.; YASUHARA, K.; KIKUCHI, Y.; KARMOKAR, A. K.; MITARAI, Y. Multifaceted potentials of tire-derived three dimensional geosynthetics in geotechnical applications and their evaluation. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 3, p. 303-315, 2010.

JIMENEZ, S. J. A. Cimentaciones em terrenos expansivos o cola sables. In: **Geotecnia Y Cimentos 111**, v. 1, ED. Rueda, Madrid. p.533-650. 1980.

JONES, L. D.; JEFFERSON, I. Expansive soils. **ICE Manual of Geotechnical Engineering**, v. 1, p. 413–441, 2012.

JUCÁ, J. F. T.; GUSMÃO FILHO, J. A.; SILVA, J. M. J. Laboratory and field tests on an expansive soil in Brazil. **7th International Conference on Expansive Soils – Dallas/EUA**, Vol. 1, 337-342, 1992.

KALKAN, E. Preparation of Scrap Tire Rubber Fiber–Silica Fume Mixtures for Modification of Clayey Soils. **Appl. Clay Sci**. v. 80–81, p. 117–125. 2013. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2013.06.014>

KUA, T. et al. Stiffness and deformation properties of spent coffee grounds based geopolymers. **Constr. Build. Mater**, v. 138, p. 79–87, 2017.

LI, J. H.; ZHANG, L. M. Study of desiccation crack initiation and development at ground surface. **Eng. Geol**, v. 123, p. 347–358, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.09.015>>.

LI, J.; CAMERON, D. A.; REN, G. Case study and back analysis of a residential building damaged by expansive soils. **Comput. Geotech**. v. 56, p. 89-99, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.11.005>.

LI, X. W. et al. Unsaturated expansive soil fissure characteristics combined with engineering behaviors. **J Cent South Univ**, v. 19, p. 3564–71, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11771-012-1444-0>>.

LIU, L.; CAI, G.; LIU, S. Compression properties and micro-mechanisms of rubber-sand particle mixtures considering grain breakage. **Constr. Build. Mater**, v. 187, p. 1061–1072, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.051>>.

LUND, H. F. **The McGraw-Hill Recycling Handbook**. McGraw-Hill, 1993. ISBN 9780070390966. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=6eNadmXl\\\_dgC](https://books.google.com.br/books?id=6eNadmXl\_dgC)>.

MACEDO, M. C. **Investigação sobre o comportamento geomecânico de misturas de solo com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2016.

MACEDO, M. C.; FUCALE, S.; FERREIRA, S. R. M. Geomechanical Behavior of Soil Mixtures with Tire Residues and Construction and Demolition Waste. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v.21, p. 6393-6410, 2016.

MAHLER, C. F. **Análise de obras assentes em solos colapsíveis e expansivos**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.

MARQUES, F. A.; SOUZA, R. A. S.; SOUZA, J. E. S.; LIMA, J. F. W. F.; JÚNIOR, V. S. S. Caracterização de vertissolos da ilha de fernando de noronha, pernambuco. **Rev Bras Cienc Solo**, v. 38, p. 1051–1065, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400002>>.

MARTÍNEZ, J. et al. Waste tyre pyrolysis—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 179-213, 2013.

MELO, D. F. M. **Comportamento reológico de solos sujeitos a corridas de lama por liquefação estática**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MILLER, C. J.; MI, H.; YESILLER, N. Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners. **Journal of the American Water Resources Association**, 34 (3), p. 677-686, 1998.

MIRZABABAEI, M. et al. Impact of carpet waste fibre addition on swelling properties of compacted clays. **Geotech. Geol. Eng**, v. 31, p. 173–182, 2013.

MIRZABABAEI, M. et al. Practical approach to predict the shear strength of fibre-reinforced clay. **Geosynth. Int**, v. 25, p. 50–66, 2018.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. 2. ed. [S.l.]: John Willey & sons, 1976.

MITTAL, R. K.; GILL, G. Recent developments in utilizing waste tires to reduce seismic earth pressures and liquefaction potential. **Int. J. Adv. Struct**, v. 5, p. 107–114, 2016.

MITTAL, R. K.; GILL, G. Sustainable application of waste tire chips and geogrid for improving load carrying capacity of granular soils. **Arab. J. Geosci**, v. 200, p. 542–551, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.287>>.

MOO-YOUNG, H.; SELLASIE, K.; ZEROKA, D.; SABNIS, G. Physical and chemical properties of recycled tire shreds for use in construction. **Journal of environmental engineering**, v. 129, n. 10, p. 921–929, 2003.

MORAIS, J. J. O. **Caracterização geotécnica da expansividade de um solo argiloso do município de Paulista-PE**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

NALBANTOGLU, Z. Lime stabilization of expansive clay. **Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment**, p. 139–148, 2006.

NARANI, S. S.; ABBASPOUR, M.; MIR MOHAMMAD HOSSEINI, S. M.; AFLAKI, E.; MOGHADAS NEJAD, F. Sustainable reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTFs) as reinforcement materials for expansive soils: With a special focus on landfill liners/covers. **Journal of Cleaner Production**. v. 247. 2020.

NASCIMENTO, P. R. F. B. **Capacidade de carga de misturas de solo laterítico e desbastes de pneus**. 2015. 160 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

NAYAK, N. V. **Foundation Design Manual**. 4. ed. [S.l.]: Dhanpat Rai Publications, 2001.

ÖZKUL, Z.; BAYKAL, G. Shear Behavior of Compacted Rubber Fiber–Clay Composite in Drained and Undrained Loading. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.**, v. 133, n. 7, p. 767–781. 2007.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2007\)133:7\(767\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2007)133:7(767))

PAIVA, S. C. **Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca – PE e de suas misturas com cal**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

PAIVA, W. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo**. Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Pernambuco. Recife/PE.193p, 2009.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PHUMMIPHAN, I. et al. High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material. **J. Hazard. Mater.**, v. 341, p. 257–267, 2018.

RAMIREZ, G. G. D. **Estudo experimental de solos reforçados com borracha de pneus inservíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PUC – Rio, Rio de Janeiro/RJ, 2012.

RODRIGUEZ-ALOOZA, A. M.; GALLEGO, J.; PÉREZ, I.; BONATI, A.; GIULIANI, F. High and low temperature properties of crumb rubber modified binders containing warm mix asphalt additives. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 460–466, 2014.

ROWE, R. K.; BABCOCK, D. Modelling the clogging of coarse gravel and tire shreds in column tests. **Can. Geotech. J.**, v. 44, p. 1273–1285, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1139/t07-057>>.

SABERIAN, M.; LI, J. Investigation of the mechanical properties and carbonation of construction and demolition materials together with rubber. **J. Clean. Prod.**, v. 202, p. 553–560, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.183>>.

SABERIAN, M.; LI, J.; SETUNGE, S. Evaluation of permanent deformation of a new pavement base and subbase containing unbound granular materials, crumb rubber and crushed glass. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, n. 1, p. 38–45, 2019.

SAGAN, C. Why we need to understand science. **Mercury**, San Francisco, 22(2), p. 52-55, 1993.

SANTOS, G. M. **Estudo do comportamento histerético de uma argila expansiva não saturada**. – Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, 119 p, 2008.

SAVASTANO JUNIOR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites. **Cem. Concr. Compos.**, p. 583–592, 2005.

SCHREINER, H. D. **State of the art review on expansive soils**. Imperial College, London, 1987.

SEED, H. B.; WOODWARD, D. J.; LUNDGREN, R. Prediction for compacted clays. **Journal soil mechanics and Foundations division**, asce, v. 88, sm 3, p 53-87, 1962.

SHALABY, A.; KHAN, R. A. Design of unsurfaced roads constructed with large-size shredded rubber tires: a case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 44, n. 4, p. 318-332, 2005.

SHARIATMADARI, N.; KARIMPOUR-FARD, M.; SHARGH, A. Evaluation of liquefaction potential in sand-tire crumb mixtures using the energy approach. **Int. J.**

**Civil Eng**, v. 17, p. 181–191, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40999-017-0202-y>>.

SHI, B. et al. Expansive soil crack depth under cumulative damage. **Sci World J**, v. 2014, p. 1–14, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2014/498437>>.

SIGNES, C. H.; GARZON-ROCA, J.; FERNÁNDEZ, P. M.; TORRE, M. E. G.; FRANCO, R. I. 2016. Swelling Potential Reduction of Spanish Argillaceous Marlstone Facies Top Soil through the Addition of Crumb Rubber Particles from Scrap Tyres. **Appl. Clay Sci**, v. 132-133, p. 768–773. 2016. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2016.07.027>

SILVA, A. C. **Comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso adicionado com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.

SILVA, A. C. **Resistência à tração de um solo expansivo reforçado com fibras curtas de pet**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023. No prelo.

SILVA, F. M.; VAZ, V. V.; BARBOSA, L. A. G.; LINTZ, R. C. C. Avaliação da resistência mecânica de pisos intertravados de concreto sustentáveis (PICS). **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, 11 p., 2017.

SILVA, J. M. J. Acompanhamento Sazonal do Movimento do Terreno e da Umidade de um Depósito de Argila Expansiva Não Saturado. **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Belo Horizonte/MG, 2016.

SILVA, J. M. J. Caracterização física, química e mineralógica de um depósito de argila expansiva e sua relação com o comportamento de deformação. **Artigo Científico** - São Carlos – SP, 2004.

SOLTANI, A. et al. Interfacial shear strength of rubber-reinforced clays: A dimensional analysis perspective. **Geosynth. Int**, 2019a.

SOLTANI, A.; DENG, A.; TAHERI, A.; SRIDHARAN, A. Swell–Shrink–Consolidation Behavior of Rubber–Reinforced Expansive Soils. **Geotechnical Testing Journal**, v. 42, n. 3, p. 761–788. 2019. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170313>

TANG, C. S. et al. Desiccation and cracking behavior of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles. **Geoderma**, v. 66, p. 111–118, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.018>>.

TANG, C. S.; WANG, D. Y.; ZHU, C.; ZHOU, Q. Y.; XU, S. K.; SHI, B. Characterizing drying-induced clayey soil desiccation cracking process using electrical resistivity method. **Appl. Clay Sci**, v. 152, p. 101-112, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.001>.

TANG, C.; SHI, B.; CUI, Y.; LIU, C.; GU, K. Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced clayey soil. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 49, n. 9, p. 1088-1101, 2012. <https://doi.org/10.1139/t2012-067>

TANG, C.; ZHU, C.; LENG, T.; SHI, B.; CHENG, Q.; ZENG, H. Three-dimensional characterization of desiccation cracking behavior of compacted clayey soil using X-ray computed tomography. **Engineering Geology**, v. 255, p. 1-10, 2019.

TAPAS, D; BALESHWAR, S. Benefits and impacts of scrap tyre use in geotechnical engineering. **Journal of Environmental Research And Development**. v. 7, n. 3, 2013.

THAKUR, D.; KAUSHIK, M. K. Assessment of drainage properties of tires derived aggregates to be used as drainage layer material in leachate collection system of MSW landfill. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 5, n. 2, p. 2219-2230, 2016.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. **J. Clean. Prod**, v. 113, p. 86–92, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.019>>.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C.; KALLA, P.; CSETENEYI, L. Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 204–212, 2014.

TROUZINE, H.; BEKHITI, M.; ASROUN A. Effects of scrap tyre rubber fibre on swelling behaviour of two clayey soils in Algeria. **Geosynthetics International**, v. 19, n. 2, 124–132. 2012. <http://dx.doi.org/10.1680/gein.2012.19.2.124>

VAN GENUCHTEN, M. T. A. Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, 892- 898, 1980.

YADAV, J. S.; TIWARI, S. K. Effect of waste rubber fibres on the geotechnical properties of clay stabilized with cement. **Applied Clay Science**, v. 149, p. 97-110, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.07.037>.

YU, B.; EL-ZEIN, A. Experimental investigation of the effect of airgaps in preventing desiccation of bentonite in geosynthetic clay liners exposed to high temperatures. **Geotext. Geomembranes**, v. 47, p. 142-153, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.12.002>.

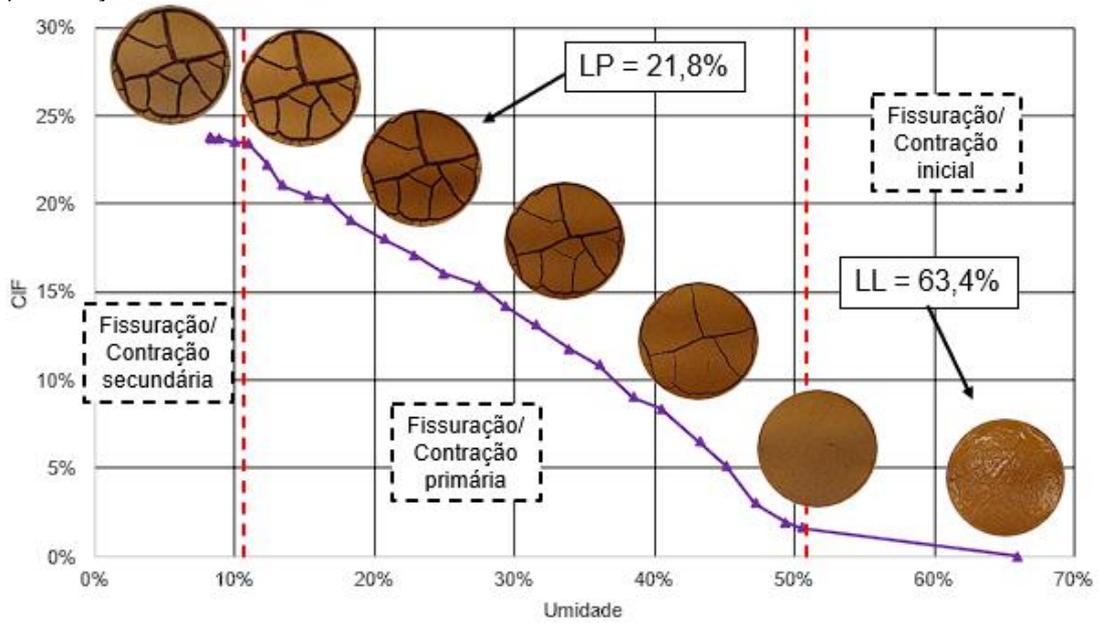
ZHANG, J. et al. Mechanical performance of jute fiber-reinforced micaceous clay composites treated with ground-granulated blast-furnace slag. **Materials**, v. 12, p. 576, 2019.

## APÊNDICE A – ANÁLISE INDIVIDUAL DO PROCESSO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURAS DO SOLO E DAS MISTURAS SOLO/FIBRAS DE PNEU

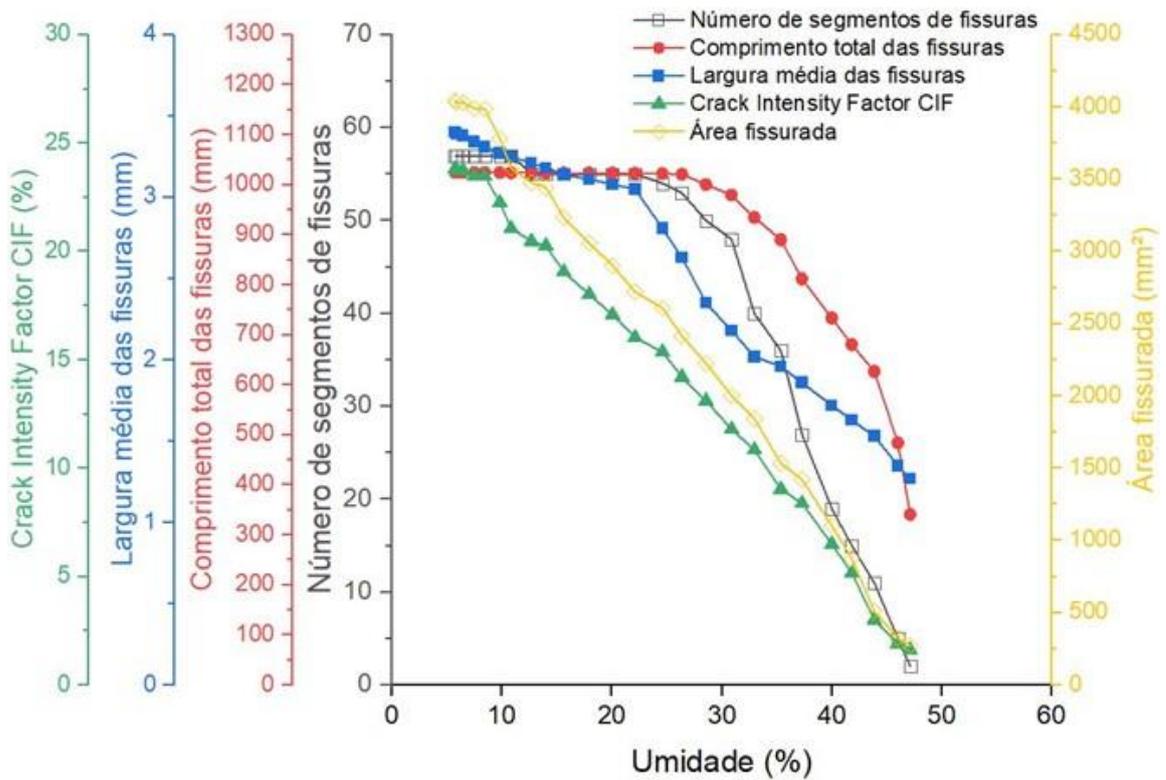
a) Sequência temporal da formação e propagação de fissuras no solo natural:



b) Relação entre CIF e umidade da amostra de solo natural.



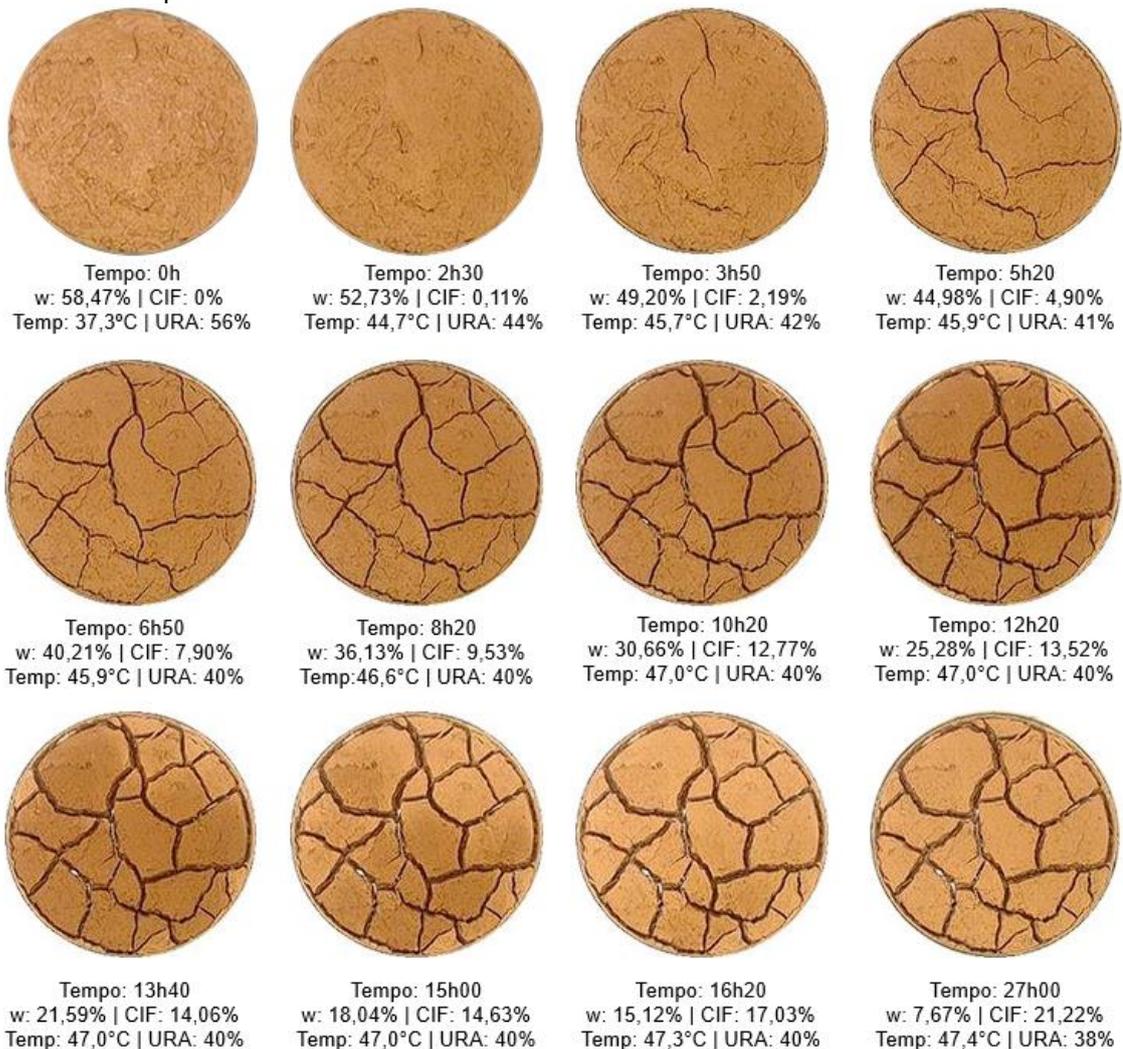
c) Evolução quantitativa dos índices geométricos das fissuras da amostra de solo natural.



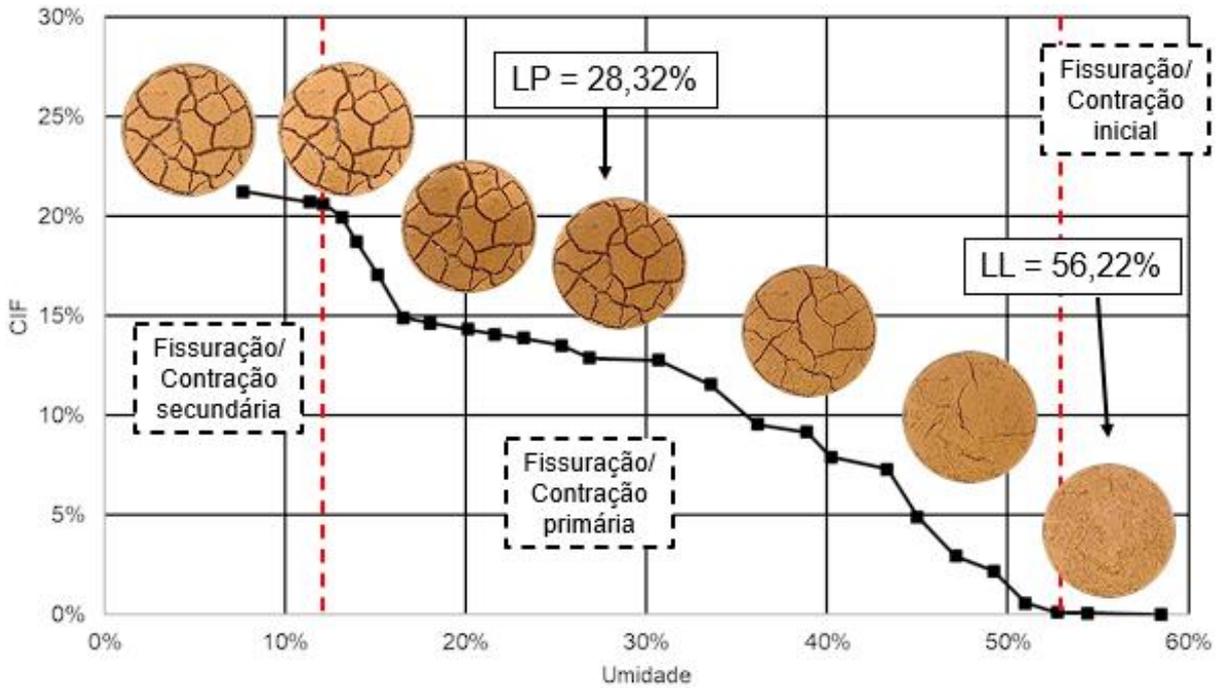
d) Resumo dos principais dados e índices das análises de formação e propagação de fissuras para a amostra de solo natural.

| Índices físicos e geométricos das fissuras                   | Resultados       |
|--------------------------------------------------------------|------------------|
| Umidade inicial (%)                                          | 65,94            |
| Índice de vazios inicial ( $e_0$ )                           | 1,51             |
| Tempo total de secagem                                       | 26h30            |
| Temperatura média $\pm$ desvio padrão ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 49,89 $\pm$ 4,06 |
| URA média $\pm$ desvio padrão (%)                            | 32,51 $\pm$ 1,78 |
| Tempo para primeiras fissuras                                | 5h20             |
| Umidade para primeiras fissuras (%)                          | 49,36            |
| Formato das fissuras                                         | T ou Y           |
| Umidade final (%)                                            | 5,38             |
| Nº de segmentos final de fissuras                            | 57               |
| Largura média final das fissuras (mm)                        | 3,4              |
| Comprimento total final das fissuras (mm)                    | 1024             |
| Área fissurada final ( $\text{mm}^2$ )                       | 4044,5           |
| CIF final (%)                                                | 23,82            |

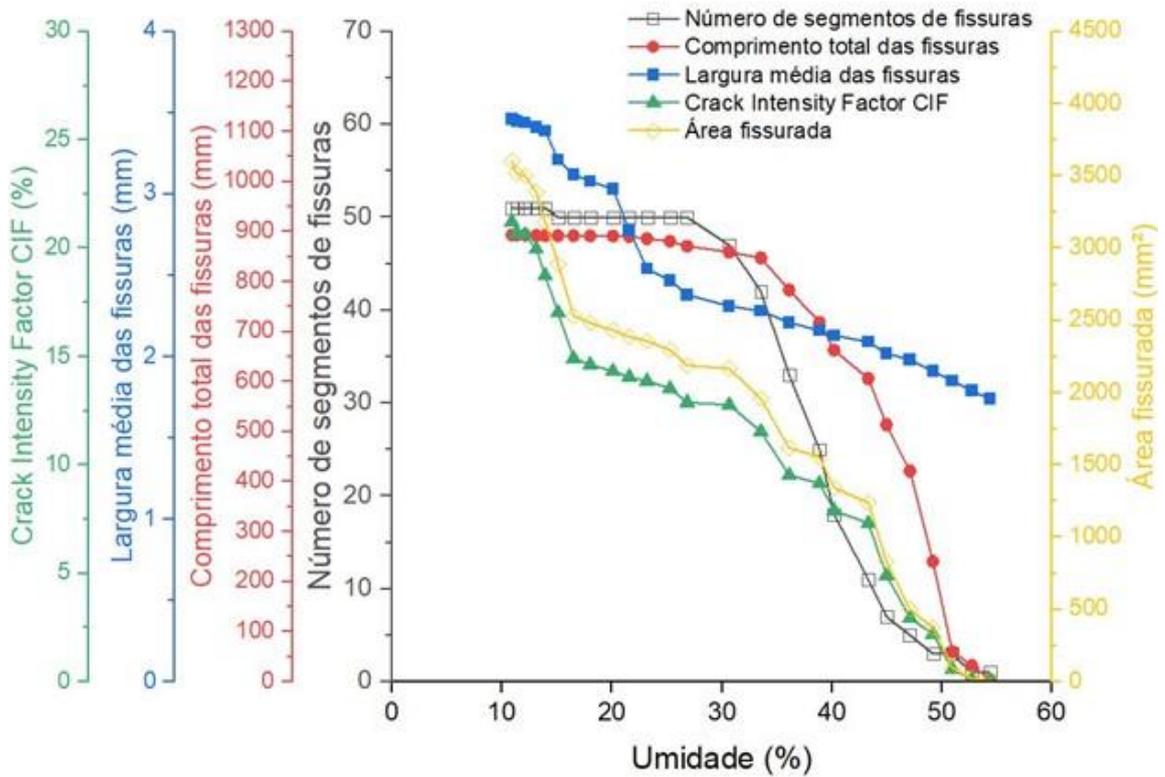
e) Sequência temporal da formação e propagação de fissuras na mistura de solo com 0,25% de fibras de pneu.



f) Relação entre CIF e umidade da amostra com 0,25% de fibras de pneu.



g) Evolução quantitativa dos índices geométricos das fissuras da amostra com 0,25% de fibras de pneu.



- h) Resumo dos principais dados e índices das análises de formação e propagação de fissuras para a amostra de solo com 0,25% de fibras de pneu.

| Índices físicos e geométricos das fissuras                   | Resultados       |
|--------------------------------------------------------------|------------------|
| Umidade inicial (%)                                          | 58,47            |
| Índice de vazios inicial ( $e_0$ )                           | 1,51             |
| Tempo total de secagem                                       | 27h              |
| Temperatura média $\pm$ desvio padrão ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 45,73 $\pm$ 2,77 |
| URA média $\pm$ desvio padrão (%)                            | 41,75 $\pm$ 4,71 |
| Tempo para primeiras fissuras                                | 2h30             |
| Umidade para primeiras fissuras (%)                          | 52,73            |
| Formato das fissuras                                         | Y ou X           |
| Umidade final (%)                                            | 7,67             |
| N $^{\circ}$ de segmentos final de fissuras                  | 51               |
| Largura média final das fissuras (mm)                        | 3,46             |
| Comprimento total final das fissuras (mm)                    | 893              |
| Área fissurada final (mm $^2$ )                              | 3603,8           |
| CIF final (%)                                                | 21,22            |

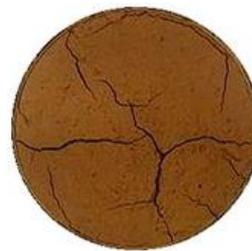
- i) Sequência temporal da formação e propagação de fissuras na mistura de solo com 0,50% de fibras de pneu.



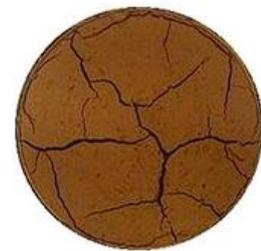
Tempo: 0h  
w: 56,51% | CIF: 0%  
Temp: 43,1 $^{\circ}\text{C}$  | URA: 45%



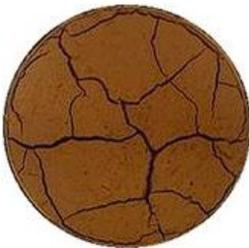
Tempo: 5h40  
w: 45,68% | CIF: 0,76%  
Temp: 44,2 $^{\circ}\text{C}$  | URA: 42%



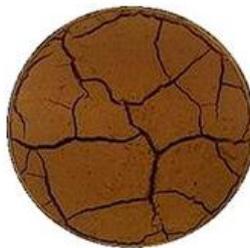
Tempo: 7h20  
w: 41,99% | CIF: 2,88%  
Temp: 44,2 $^{\circ}\text{C}$  | URA: 43%



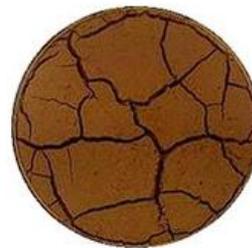
Tempo: 9h00  
w: 38,63% | CIF: 6,07%  
Temp: 44,2 $^{\circ}\text{C}$  | URA: 44%



Tempo: 10h40  
w: 35,23% | CIF: 8,43%  
Temp: 44,4 $^{\circ}\text{C}$  | URA: 44%



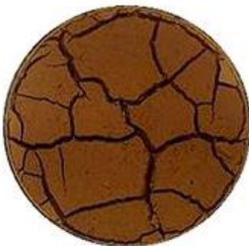
Tempo: 12h20  
w: 31,96% | CIF: 9,85%  
Temp: 44,2 $^{\circ}\text{C}$  | URA: 43%



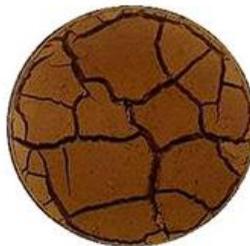
Tempo: 14h00  
w: 28,96% | CIF: 11,74%  
Temp: 44,2 $^{\circ}\text{C}$  | URA: 43%



Tempo: 15h40  
w: 25,28% | CIF: 12,82%  
Temp: 44,0 $^{\circ}\text{C}$  | URA: 43%



Tempo: 17h20  
w: 22,28% | CIF: 14,20%  
Temp: 44,0 $^{\circ}\text{C}$  | URA: 43%



Tempo: 19h00  
w: 18,95% | CIF: 16,43%  
Temp: 44,0 $^{\circ}\text{C}$  | URA: 43%

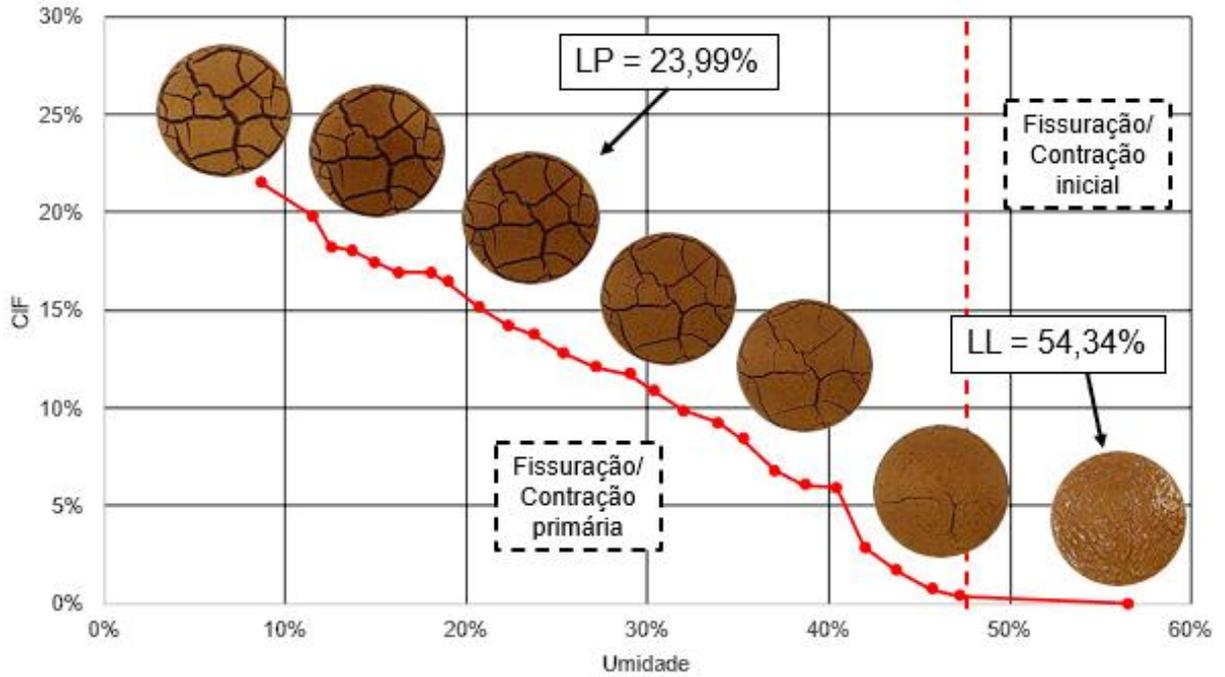


Tempo: 20h40  
w: 16,20% | CIF: 16,92%  
Temp: 43,6 $^{\circ}\text{C}$  | URA: 43%

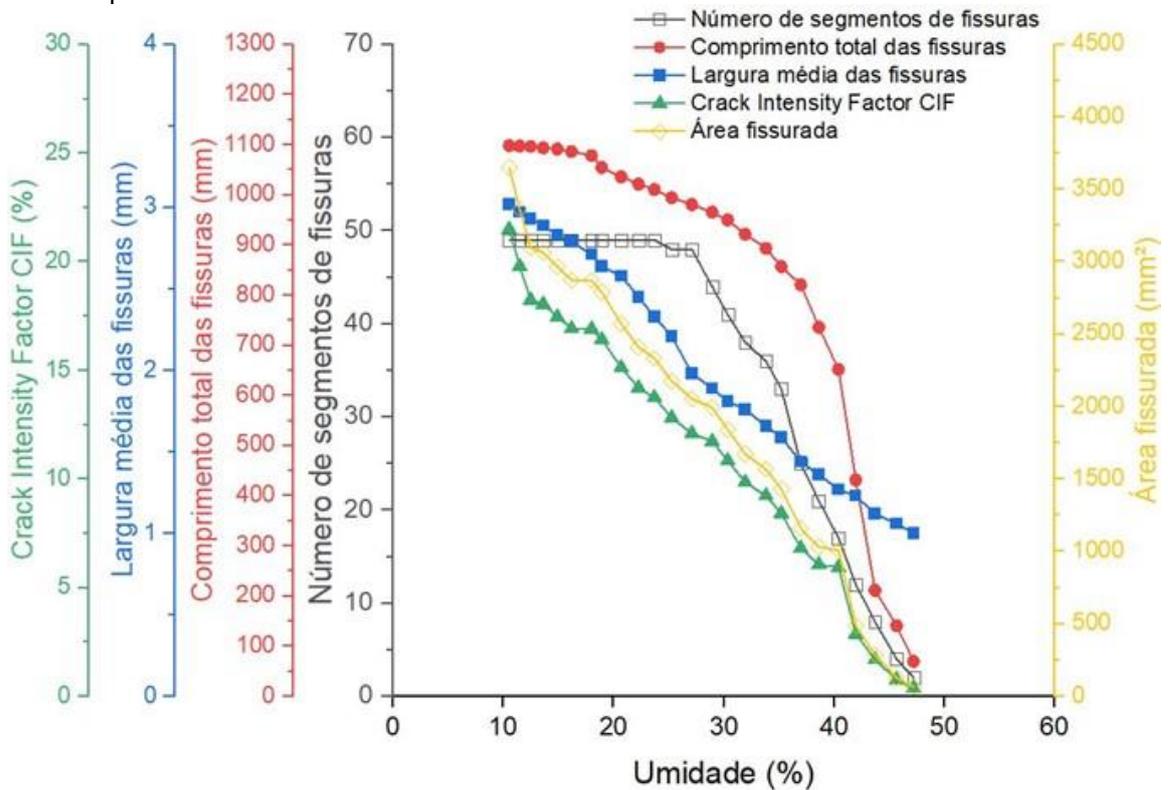


Tempo: 27h30  
w: 8,67% | CIF: 21,50%  
Temp: 44,4 $^{\circ}\text{C}$  | URA: 41%

j) Relação entre CIF e umidade da amostra com 0,50% de fibras de pneu.



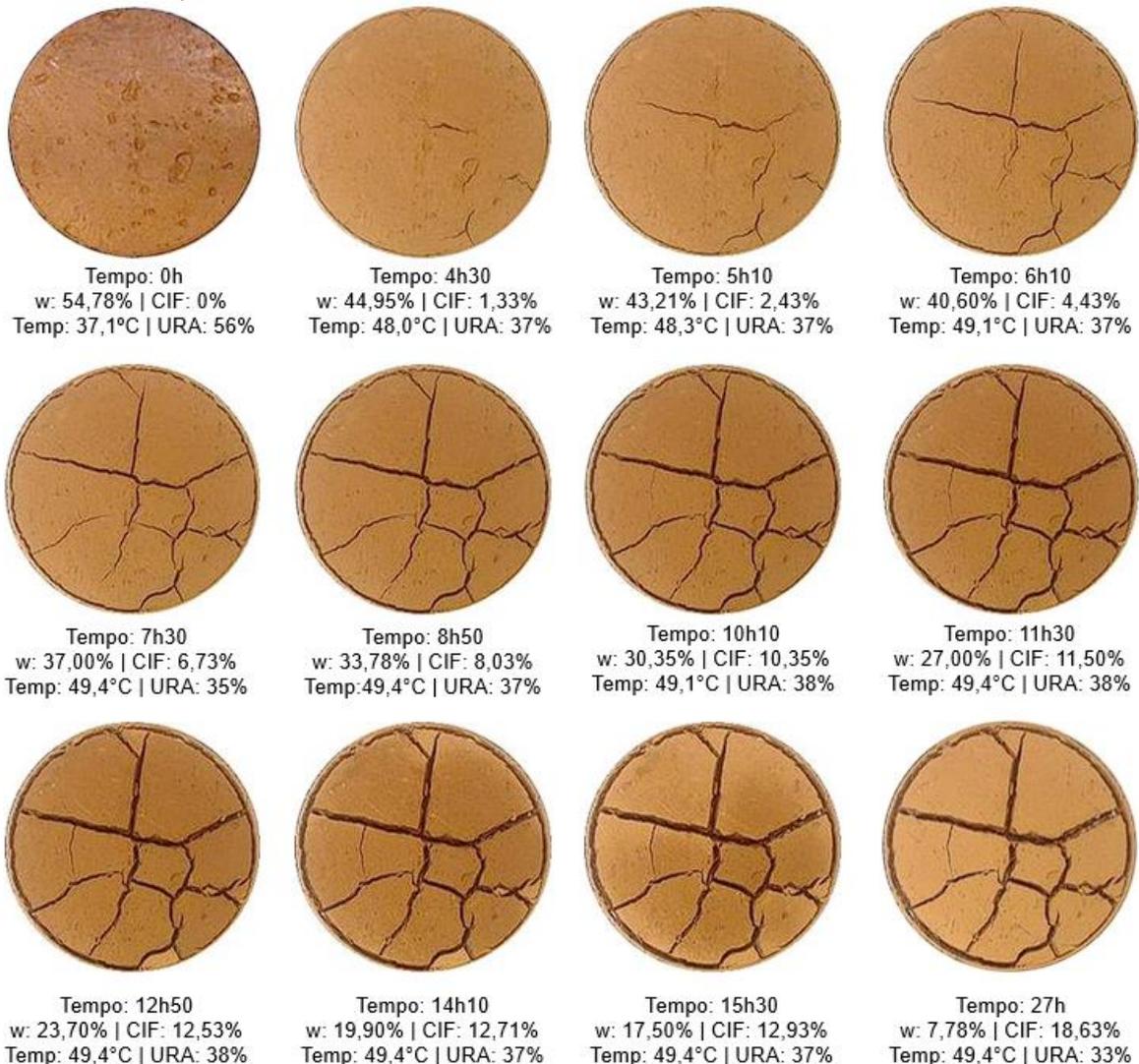
k) Evolução quantitativa dos índices geométricos das fissuras da amostra com 0,50% de fibras de pneu.



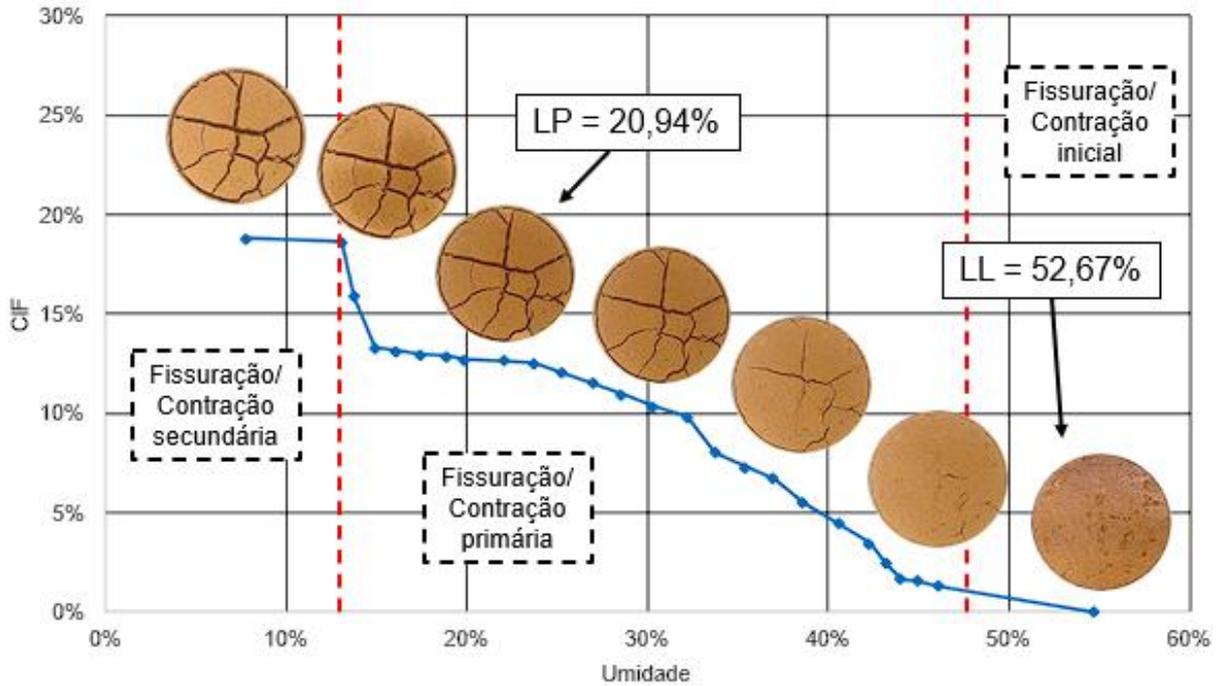
- l) Resumo dos principais dados e índices das análises de formação e propagação de fissuras para a amostra de solo com 0,50% de fibras de pneu.

| Índices físicos e geométricos das fissuras                   | Resultados       |
|--------------------------------------------------------------|------------------|
| Umidade inicial (%)                                          | 56,51            |
| Índice de vazios inicial ( $e_0$ )                           | 1,51             |
| Tempo total de secagem                                       | 27h30            |
| Temperatura média $\pm$ desvio padrão ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 44,04 $\pm$ 0,37 |
| URA média $\pm$ desvio padrão (%)                            | 43,08 $\pm$ 0,99 |
| Tempo para primeiras fissuras                                | 4h50             |
| Umidade para primeiras fissuras (%)                          | 47,23            |
| Formato das fissuras                                         | Y ou X           |
| Umidade final (%)                                            | 8,67             |
| Nº de segmentos final de fissuras                            | 49               |
| Largura média final das fissuras (mm)                        | 3,02             |
| Comprimento total final das fissuras (mm)                    | 1098             |
| Área fissurada final ( $\text{mm}^2$ )                       | 3650,8           |
| CIF final (%)                                                | 21,50            |

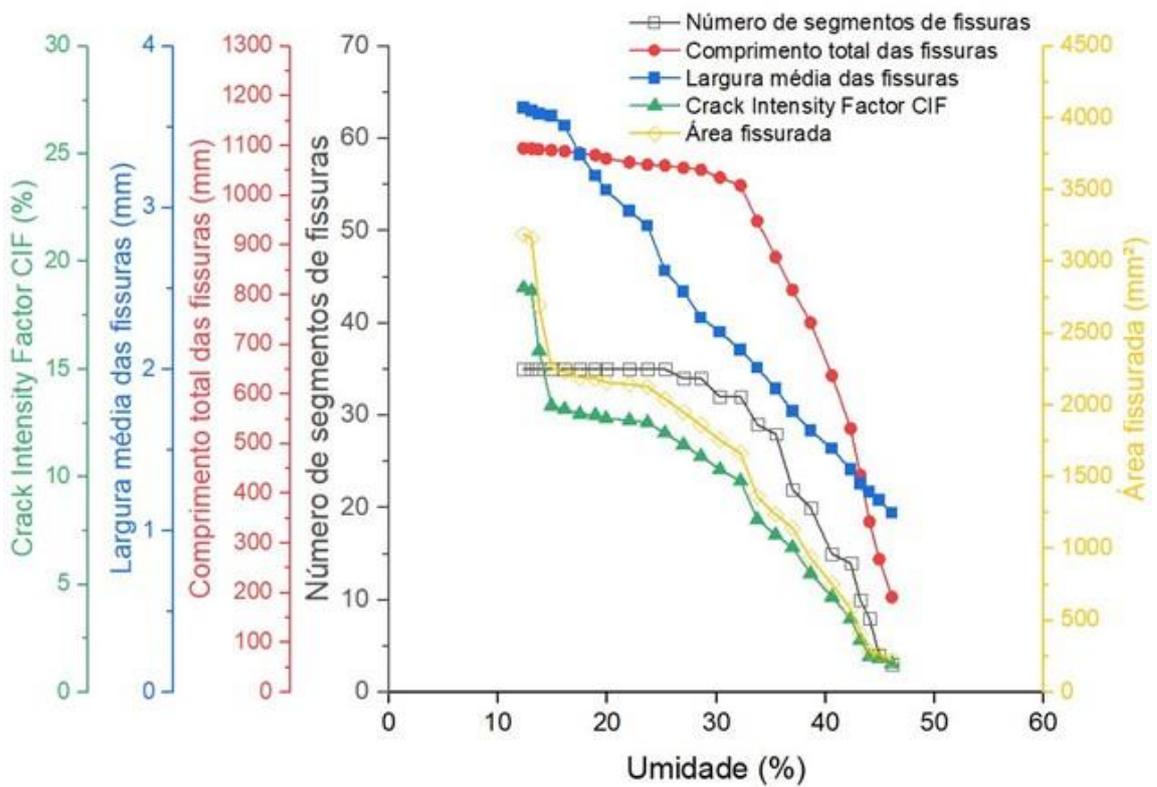
- m) Sequência temporal da formação e propagação de fissuras na mistura de solo com 1% de fibras de pneu.



n) Relação entre CIF e umidade da amostra com 1% de fibras de pneu.



o) Evolução quantitativa dos índices geométricos das fissuras da amostra com 1% de fibras de pneu.



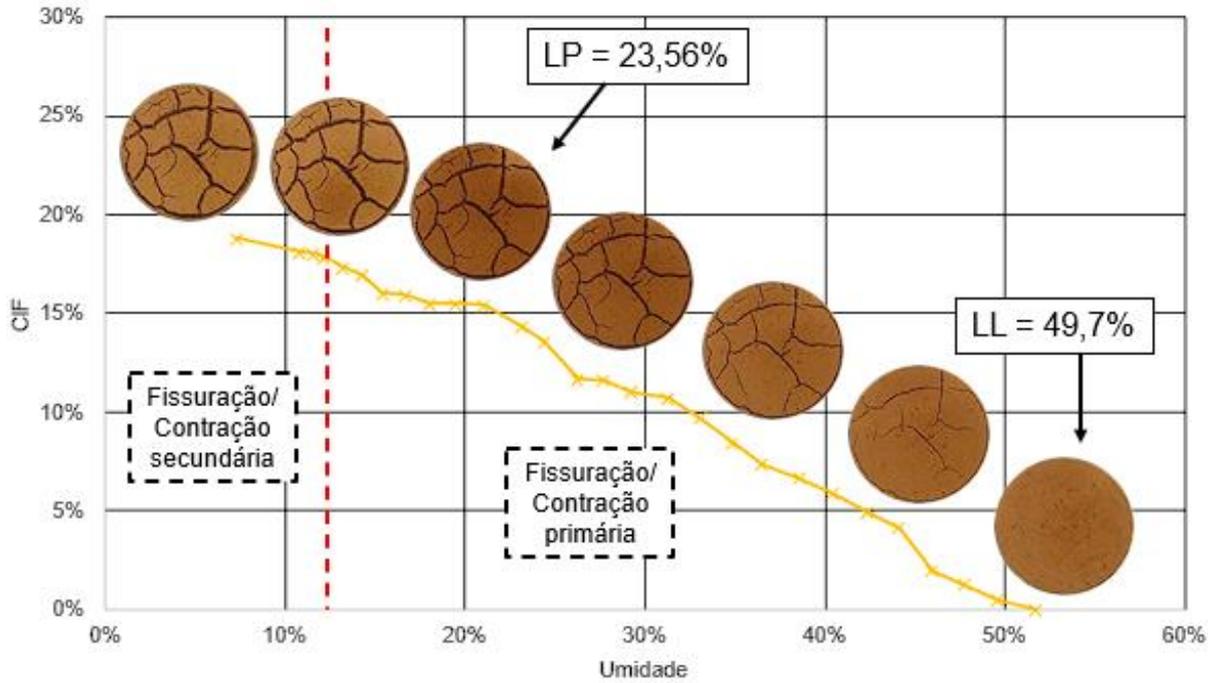
- p) Resumo dos principais dados e índices das análises de formação e propagação de fissuras para a amostra de solo com 1% de fibras de pneu.

| Índices físicos e geométricos das fissuras                   | Resultados       |
|--------------------------------------------------------------|------------------|
| Umidade inicial (%)                                          | 54,78            |
| Índice de vazios inicial ( $e_0$ )                           | 1,51             |
| Tempo total de secagem                                       | 27h              |
| Temperatura média $\pm$ desvio padrão ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 48,12 $\pm$ 3,50 |
| URA média $\pm$ desvio padrão (%)                            | 38,33 $\pm$ 5,74 |
| Tempo para primeiras fissuras                                | 4h               |
| Umidade para primeiras fissuras (%)                          | 46,11            |
| Formato das fissuras                                         | Y ou X           |
| Umidade final (%)                                            | 7,78             |
| Nº de segmentos final de fissuras                            | 35               |
| Largura média final das fissuras (mm)                        | 3,62             |
| Comprimento total final das fissuras (mm)                    | 1094             |
| Área fissurada final ( $\text{mm}^2$ )                       | 3189             |
| CIF final (%)                                                | 18,78            |

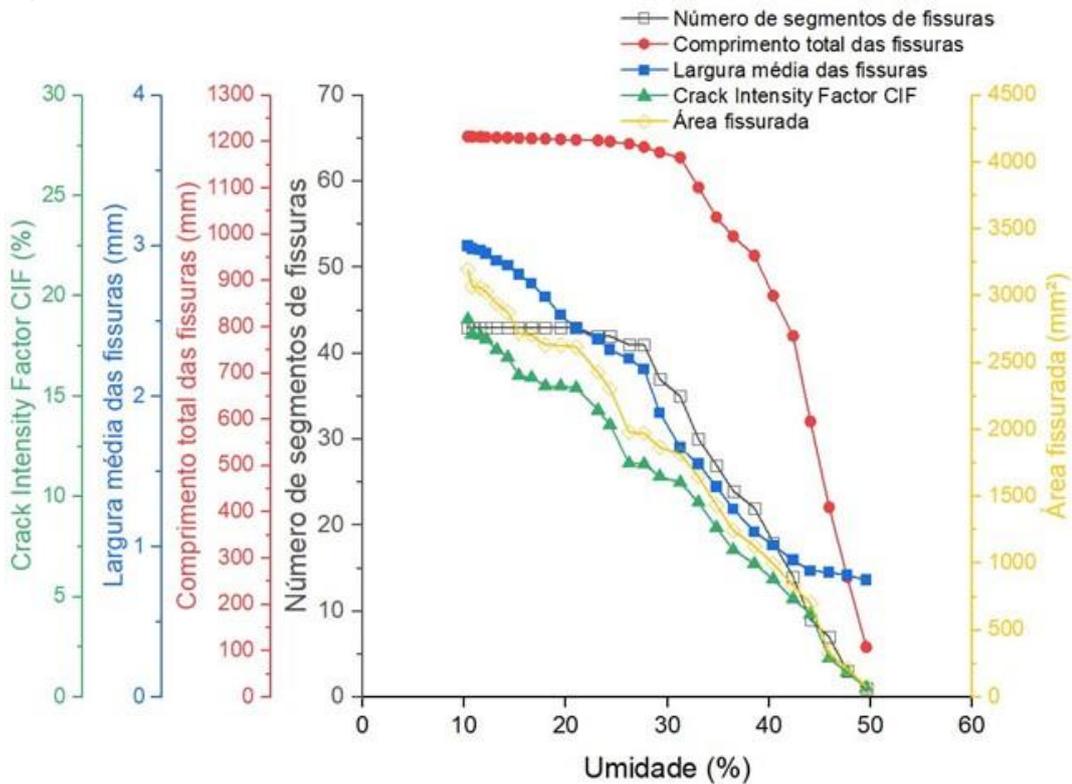
- q) Sequência temporal da formação e propagação de fissuras na mistura de solo com 2% de fibras de pneu.



r) Relação entre CIF e umidade da amostra com 2% de fibras de pneu.



s) Evolução quantitativa dos índices geométricos das fissuras da amostra com 2% de fibras de pneu.



- t) Resumo dos principais dados e índices das análises de formação e propagação de fissuras para a amostra de solo com 2% de fibras de pneu.

| <b>Índices físicos e geométricos das fissuras</b>            | <b>Resultados</b> |
|--------------------------------------------------------------|-------------------|
| Umidade inicial (%)                                          | 51,69             |
| Índice de vazios inicial ( $e_0$ )                           | 1,51              |
| Tempo total de secagem                                       | 27h30             |
| Temperatura média $\pm$ desvio padrão ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 41,88 $\pm$ 0,65  |
| URA média $\pm$ desvio padrão (%)                            | 46,58 $\pm$ 1,78  |
| Tempo para primeiras fissuras                                | 1h10              |
| Umidade para primeiras fissuras (%)                          | 49,60             |
| Formato das fissuras                                         | Y ou X            |
| Umidade final (%)                                            | 7,26              |
| Nº de segmentos final de fissuras                            | 43                |
| Largura média final das fissuras (mm)                        | 3,0               |
| Comprimento total final das fissuras (mm)                    | 1211              |
| Área fissurada final ( $\text{mm}^2$ )                       | 3197,9            |
| CIF final (%)                                                | 18,83             |