



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

OTÁVIO WESLEY CAVALCANTI FAUSTINO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO E O PROCESSO DE
FORMAÇÃO DE FISSURAS DE SOLO EXPANSIVO REFORÇADO COM
FIBRAS DO COCO VERDE**

Recife

2022



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

OTÁVIO WESLEY CAVALCANTI FAUSTINO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO E O PROCESSO DE
FORMAÇÃO DE FISSURAS DE SOLO EXPANSIVO REFORÇADO COM
FIBRAS DO COCO VERDE**

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

2022

Catálogo na fonte:
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

F268a Faustino, Otávio Wesley Cavalcanti.
 Análise do comportamento hidromecânico e o processo de formação de fissuras de solo expansivo reforçado com fibras do coco verde. / Otávio Wesley Cavalcanti Faustino. – 2022.
 129 f.: il.

 Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.
 Inclui referências.

 1. Engenharia civil. 2. Solo expansivo. 3. Reforço de fibra. 4. Expansão.
 5. Ensaio de fissuras. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (orientador). II. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2022-353

OTÁVIO WESLEY CAVALCANTI FAUSTINO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO E O PROCESSO DE
FORMAÇÃO DE FISSURAS DE SOLO EXPANSIVO REFORÇADO COM
FIBRAS DO COCO VERDE**

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

Aprovada em: 11/07/2022

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Stela Fucale Sukar (Examinadora Externa)
Universidade de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Analice França Lima Amorim (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho a minha esposa Sarah, meus filhos Joaquim, Carolina e Mateus, meus pais Ronaldo e Maria, minha irmã Ana Mirella e a meus avós Divanete, Otávio (*IN MEMORIAN*), Onizia (*IN MEMORIAN*) e Moacyr (*IN MEMORIAN*).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pela sua graça e misericórdia para comigo, por ter me dado saúde, força, e sabedoria para concluir esta dissertação, a Ele a honra o poder e a glória para todo sempre. Te amarei de todo meu coração, com toda minha alma e com todas as minhas forças.

À minha esposa Sarah pelo amor, apoio e compreensão compartilhado ao longo deste trabalho, a minha gratidão pelo carinho e amor. Aos meus filhos Joaquim e Carolina, pelo carinho e amor e a compressão que tiveram de minha ausência semanal durante os últimos anos, minha gratidão. Ao meu filho Mateus Ronaldo, que apesar de ainda encontrar-se no primeiro ano de sua vida, enche nossos dias de alegria, emoção, fé e esperança.

Aos meus pais Ronaldo e Maria, minha profunda admiração, amor, respeito e gratidão, pela incansável dedicação em conduzir bem a família, por ter me educado e pelo apoio incondicional sempre constante ao longo de toda minha vida. A minha irmã Ana Mirella pela amizade, companheirismo, incentivo e por sempre acreditar em mim.

Ao meu orientador, Silvio Romero de Melo Ferreira, pela orientação e apoio incondicional no desenvolvimento desta dissertação, pela confiança depositada em mim, pelo companheirismo e ensinamentos. Serei eternamente grato pelos dias compartilhados é uma honra tê-lo como orientador.

Aos amigos da Pós-Graduação Hítalo Tavares e Ruth Maria pela parceria, apoio e amizade prestado durante as aulas do mestrado, compartilhando todas as conquistas e dificuldades ao longo desta trajetória, minha gratidão pela amizade sincera.

Aos amigos do grupo de pesquisa de Solos Não Saturados da Universidade Federal de Pernambuco, Sávio Holanda, Débora Soares e Aline Cátia, pelo companheirismo e amizade mostrados durante nossa convivência.

Aos meus grandes amigos Thiago Porpino e Thiago Ferreira pela sincera amizade e boas conversas, minha gratidão por todo o companheirismo ao longo de todos esses anos.

Ao laboratorista Gutemberg Francisco e ao Engenheiro Antônio Brito pela convivência, amizade e colaboração durante o período em que trabalhamos juntos, minha gratidão pela ajuda e profissionalismo na execução dos ensaios.

Ao Técnico de laboratório Rubens por liberar o acesso ao Laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Pernambuco para realização dos ensaios de tração direta nas fibras de coco.

A todos os professores da área Geotécnica do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco em especial os professores Dr. Roberto Quental, Dr. José Fernando Jucá e o Dr. Leonardo Guimarães por todos os ensinamentos que contribuíram para a realização dessa pesquisa e elaboração da dissertação.

RESUMO

As fibras de coco verde, é um subproduto derivado do processo de produção de compostos do coco, podem se tornar um resíduo pois são tradicionalmente descartadas em locais não adequados chegando a poluir praias e cidades em oposição as leis locais se tornando um passivo ambiental. O descarte das fibras causa um impacto ambiental principalmente pois ocupam espaço urbano e de aterros sanitários, e queimá-los leva à emissão de gases. Nesta pesquisa, a viabilidade de reutilizar as fibras de coco como reforço em solo expansivo de Paulista/PE é investigada através de experimentos de laboratório, em amostra do solo compactado e nas suas misturas com fibras de coco nas proporções em peso de 0,25%; 0,50%; 1,00% e 2,00%. Foram realizados os ensaios de: granulometria, limites de consistências, compressão, expansão “livre” e tensão de expansão, *squeeze flow*, cisalhamento direto, retenção de água, condutividade hidráulica e de análise de formação e propagação de fissuras por secagem. O potencial de expansão, com o acréscimo de fibras há redução na tensão de expansão do solo de 101,7 kPa do solo natural para 25,8 kPa para o solo com 1% de fibra de coco, uma redução de 74,63%, com 2% de fibra o potencial de expansão não decresce tendendo a estabilidade. Nos ensaios de compressão simples e diametral a inclusão de fibras de coco modifica completamente o comportamento de resistência à tração e ao cisalhamento do solo. A resistência a tração por compressão diametral cresce 42% ao se adicionar 2% de fibra ao solo natural. Em relação à compressão simples, o melhor percentual de fibra é de 1% apresentando um aumento na tensão máxima de 57,49%. O ensaio de cisalhamento direto, o solo e as misturas assumiram um comportamento plástico, conforme o aumento das tensões aplicadas. A condutividade hidráulica não se altera significativamente com a adição da fibra, em nenhuma amostra o valor excede a permeabilidade de (10^{-9} m/s). O fator de intensidade da fissura (CIF) diminui à medida que o teor de fibras aumenta, levando à máxima redução de fissuras no percentual de 2% de Fibras. A inclusão de fibras modifica as fissuras largas que ocorre no solo natural em fissuras mais estreitas. A inserção de fibras de coco verde ao solo expansivo de Paulista melhora todas as características geotécnicas investigadas do solo expansivo. Portanto, as fibras de coco podem ser empregadas como materiais de reforço em solos expansivos reduzindo um passivo ambiental.

Palavras-chave: solo expansivo; reforço de fibra; expansão; ensaio de fissuras.

ABSTRACT

The green coconut fiber, the derived compound from the coconut production process, is an environmental liability and can become a waste, since it is traditionally discarded in inappropriate places, polluting beaches and cities, in opposition to local laws. The disposal of this fiber causes an environmental impact, mainly because it occupies urban spaces and sanitary landfills, while burning it leads to the emission of gases. In this research, the feasibility of reusing coconut fibers as reinforcement in expansive soil from Paulista/PE is investigated through laboratory experiments, by using a sample of compacted soil and in its mixtures with coconut fibers in proportions by weight of 0.25%; 0.50%; 1.00%; and 2.00%. The experiments include: granulometry, atterberg's limits, compression, swelling potential, squeeze flow, direct shear, water retention, hydraulic conductivity and analysis of crack formation and propagation by drying. With the addition of coconut fibers, there is a reduction in soil swelling potential from 101.7 kPa, for the natural soil, to 25.8 kPa, for the soil with 1% coconut fiber, a 74.63% reduction, but with 2% coconut fiber, the swelling potential does not decrease, which seems to indicate that there is a limit to the effectiveness of this application. Regarding compression, the best percentage of fiber is 1%, showing an increase in maximum tension of 57.49%. In the direct shear test, the soil and the mixtures assumed a plastic behavior, as the applied stress increased. The hydraulic conductivity does not change significantly with the addition of fiber, in no sample does the value exceed the permeability of (10^{-9} m/s). The crack intensity factor (CIF) decreases as the fiber content increases, with the maximum crack reduction being achieved by the use of the 2% coconut fiber sample. The inclusion of coconut fibers also transforms the wide cracks in the natural soil into narrower cracks. The insertion of green coconut fibers into the expansive soil of Paulista improves all the investigated geotechnical characteristics of the expansive soil, therefore, coconut fibers can be used as reinforcement materials in expansive soils, reducing an environmental liability.

Keywords: expansive soil; fiber reinforcement; expansion; crack test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Sucção e Umidade em solos expansivos.....	24
Figura 2- Comportamento da permeabilidade em solos expansivos	25
Figura 3- Diagrama da estrutura da montmorilonita	26
Figura 4- MEV solo expansivo.....	27
Figura 5– Expansão das amostras do Solo compactado inundado	30
Figura 6 - Tensão de Expansão solo de Paulista/PE e misturas com adição de CCA, Areia e Cal	31
Figura 7 – Expansão volumétrica de solos expansivos em diferentes densidades secas iniciais	31
Figura 8– Expansão do solo para as amostras não tratadas e tratadas com cal para três diferentes durações de cura.	32
Figura 9– Coco como passivo ambiental.....	33
Figura 10 - Sequência de etapas para beneficiamento da casca do coco.....	35
Figura 11 - Mecanismos de adesão na interface fibra-matriz.....	36
Figura 12 - Curva carga versus deslocamento com os três estágios do comportamento reológico.	37
Figura 13 - Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e envoltórias de resistência do solo e das misturas.	38
Figura 14 - Variação tensão com a deformação diametral e potencial de expansão	39
Figura 15 - Variação de umidade ótima e peso específico máximo aparente seco das misturas.....	39
Figura 16 - Variação tensão com a deformação axial e potencial de expansão	39
Figura 17 - Formação de Fissuras e Umidade	40
Figura 18 - Processo de formação de fissuras	41
Figura 19 - Variação do CIF para solo não reforçado (T1) e solo reforçado com fibras (T5, T6, T7)	42
Figura 20 - Evolução das Fissuras nas amostras	43
Figura 21 - Fluxograma do programa experimental da pesquisa	45
Figura 22 - Local da coleta do solo na ETE-Janga.....	46
Figura 23 - Localização da cidade de Paulista/PE.....	47
Figura 24 - Fibras de Coco	48
Figura 25 - Ensaio de tração direta nas fibras de coco	48

Figura 26 - Amostras dos materiais: a) Solo de Paulista/PE, b) Fibras de Coco	49
Figura 27 - Preparação das Amostras de solo e das misturas solo – fibra.....	50
Figura 28 - Ensaios de Caracterização Física do solo e misturas.....	51
Figura 29 - Ensaio de Compactação de Solo e Misturas	52
Figura 30 - Corpo de prova para ensaio de condutividade hidráulica	52
Figura 31 - Sequência da montagem da amostra para realização do ensaio de condutividade hidráulica no equipamento Tri-flex da Soil Test – ELE	53
Figura 32 - Célula montada para realização do ensaio de condutividade hidráulica	54
Figura 33 - Ferramentas utilizadas na moldagem de amostras ensaio squeeze-flow	56
Figura 34 - (a) Amostra solo natural ($w=52,56\%$ e $e= 1,31$) no início; (b) solo após ensaio	57
Figura 35 - Curva carga <i>versus</i> deslocamento com três estágios do comportamento reológico.	57
Figura 36 - Sequência de montagem de corpo de prova para ensaios de expansão	58
Figura 37 - Ensaio de Expansão “Livre”	59
Figura 38 - Moldagem de corpos de prova para ensaios de compressão	60
Figura 39 - Ensaio de compressão simples.....	61
Figura 40 - Ensaio de Compressão Diametral	62
Figura 41 - Moldagem das amostras na caixa de cisalhamento direto	63
Figura 42 - Amostras para realização do ensaio de cisalhamento direto.....	63
Figura 43 - Placas petri utilizadas na pesquisa	65
Figura 44 - Aparato do ensaio do processo de formação de fissuras.	66
Figura 45 - Início do ensaio de formação de fissuras para a amostra Solo Natural	67
Figura 46 - Fim do ensaio de formação de fissuras para a amostra solo natural.....	68
Figura 47 - Coleta e análise das imagens	69
Figura 48 - Medição do diâmetro na imagem.....	69
Figura 49 - Binarização da imagem.....	70
Figura 50 - Obtenção da área fissurada através do software ImageJ.....	70
Figura 51 - CIF versus Umidade para amostra na condição natural	71
Figura 52 - Determinação da sucção das amostras.....	72
Figura 53 - Ensaio de tração direta nas fibras de Coco	75
Figura 54 - Curva Granulométrica da Amostra do solo de Paulista/PE	75
Figura 55 - Variações dos limites de liquidez, limites de plasticidade e índices de plasticidade do solo com diferentes teores de fibras	78

Figura 56 - Curvas de compactação do Solo Natural e misturas Solo-Fibra de Coco ...	79
Figura 57 - Condutividade hidráulica saturada do solo natural e das misturas com os diferentes teores de fibras de coco.....	80
Figura 58 - Resultados dos ensaios de squeeze-flow de amostras de solo natural e misturas solo+fibras para as umidades do limite de liquidez	81
Figura 59 - Resultados dos ensaios de squeeze-flow para amostras de solo natural e misturas solo+fibras para as umidades do limite de Plasticidade.....	83
Figura 60 - Correlação da tensão de escoamento, Cargas de enrijecimento e final com umidade.....	84
Figura 61 - Correlação do teor de fibras com a cargas de enrijecimento e final	85
Figura 62 - Carga <i>versus</i> deslocamento das umidades do ensaio do limite de plasticidade e limite de liquidez	86
Figura 63 - Resultados dos ensaios de expansão “livre”	87
Figura 64 - Expansão “livre” segundo critério de Cuellar (1978).	87
Figura 65 - Tensão de Expansão <i>versus</i> teor de fibra de coco e classificação dos danos segundo Jimenez Salas (1980).	89
Figura 66 - Resistência a Compressão Simples do solo e misturas.....	91
Figura 67 - Resultados da compressão diametral para o solo natural e as diferentes misturas.....	94
Figura 68 - Curvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal (A), (C), (E), (G) e (I) de deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal do solo natural (B), (D), (F), (H) e (J).	95
Figura 69 - Curvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para cada tensão e misturas.....	97
Figura 70 - Envoltórias de Mohr-Coulomb	98
Figura 71 - Correlação da coesão e ângulo de atrito na tensão máxima e teor de fibras	99
Figura 72 - Correlação da coesão e ângulo de atrito na ($\epsilon=14\text{mm}$) com teor de fibras..	99
Figura 73 - Curvas de retenção de água em termos da sucção matricial e umidade volumétrica	101
Figura 74 - Interação fibra solo após a compactação para um solo+1% Fibra.....	102
Figura 75 - Primeiras fissuras nas amostras de solo natural e misturas	104
Figura 76 - Sequência processo de formação de fissuras solo natural	106
Figura 77 - Curva CIF <i>versus</i> Umidade	107
Figura 78 - Sequência da formação de fissuras da mistura solo+0,25% Fibra.....	108

Figura 79 - Curva CIF versus Umidade (Solo+0,25% Fibra)	109
Figura 80 - Sequência da formação de fissuras da mistura solo+0,5% Fibra.....	110
Figura 81 - Curva CIF versus Umidade (Solo+0,5% Fibra)	111
Figura 82 - Sequência da formação de fissuras da mistura solo+1% Fibra.....	112
Figura 83 - Curva CIF versus Umidade (Solo+1% Fibra)	113
Figura 84 - Sequência da formação de fissuras da mistura solo+2% Fibra.....	114
Figura 85 - Curva CIF versus Umidade (Solo+2% Fibra)	115
Figura 86 - Comparativo da formação e propagação das fissuras e o tempo no solo e misturas.....	115
Figura 87 - Correlação da área fissurada e a sucção do solo.....	116
Figura 88 - Evolução do CIF versus Umidade do solo natural e misturas solo+fibras	117
Figura 89 - Área Fissurada versus Umidade do Solo natural e misturas Solo+ Fibras	117
Figura 90 - Variação do CRR em função do tempo no solo natural e reforçado	118
Figura 91 - Interação Fibra de coco e o solo no processo de formação de fissuras	119

LISTA DAS TABELAS

Tabela 1- Métodos de identificação de solos expansivos.....	28
Tabela 2- Classificação do grau de expansão pelo Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade	28
Tabela 3– Critérios de classificação de solos expansivos com base na expansão livre .	29
Tabela 4 - Propriedades físicas de fibras utilizadas como reforço	36
Tabela 5 - Percentual granulométrico de uma amostra do solo de Paulista/PE	76
Tabela 6 - Valores da Densidade Real do Solo de Paulista/PE.....	76
Tabela 7 - Caracterização física do solo de Paulista/PE.....	77
Tabela 8 - Valores dos limites de liquidez, limites de plasticidade e índices de plasticidade do solo com diferentes teores de fibras.....	78
Tabela 9 - Parâmetros de compactação Solo Natural e misturas Solo-Fibra de Coco ...	80
Tabela 10 - Índices do comportamento reológico do solo e das misturas no LL.....	82
Tabela 11 - Índices do comportamento reológico do solo e das misturas no LP	84
Tabela 12 - Valores das tensões de expansão pelo método do volume constante.....	88
Tabela 13 - Valores expansão livre e tensão de expansão no solo e nas misturas .	90
Tabela 14 - Valores das tensões cisalhantes no ensaio de compressão simples.....	91
Tabela 15 - Valores das tensões cisalhantes no ensaio de compressão diametral.....	93
Tabela 16 - Valores das tensões cisalhantes no ensaio de compressão simples.....	98
Tabela 17 - Valores da resistência do solo e das misturas solo-fibra por ensaio Compressão Simples, Tração por Compressão Diametral e Cisalhamento Direto	100
Tabela 18 - Valores das tensões cisalhantes no ensaio de compressão simples.....	102
Tabela 19 - Umidade das amostras no momento do início das primeiras fissuras.....	103

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Equação para cálculo da expansão “livre”	28
Equação 2 - Equação do Fator de intensidade de fissuras (CIF)	41
Equação 3 – Equação do Fator de redução de fissuras (CRR)	41
Equação 4 – Equação do coeficiente de condutividade hidráulica do solo.....	55
Equação 5 - Equação do Fator de intensidade de fissuras percentual (CIF%).....	71
Equação 6 - Equação calibração da sucção por Chandler <i>et al.</i> (1992) $w_{papel} \leq 47\%$	72
Equação 7 - Equação calibração da sucção por Chandler <i>et al.</i> (1992) para $w_{papel} >$ 47%.....	72
Equação 8 - Equação do ajuste da curva de retenção modelo van Genuchten (1980)	73

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BNB	Banco do Nordeste do Brasil
CBR	California Bearing Ratio
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CIF	Crack Intensity Factor
CIU	Consolidated Isotropic Undrained
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CRR	Crack Reduction Ratio
DIC	Digital Image Correlation
FAO	Food na Agriculture Organization
LTDA	Sociedade Empresária Limitada
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	Transportation Research Board
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
URA	Umidade relativa do ar
UTM	Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

pH_{h_2O}	Potencial hidrogeniônico em água
θ	Umidade volumétrica
γ	Peso específico natural
γ_d	Peso específico aparente seco
γ_s	Peso específico dos grãos
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	Peso específico aparente seco máximo
ε	Deformação axial
ϕ	Ângulo de atrito
C	coesão
Δp	Gradiente de pressão aplicado entre a base e o topo do corpo de prova
kh	Coefficiente de condutividade hidráulica saturada à água
α, n, m	Parâmetros de ajustes do modelo de Van Genutchen (1980)
$\sigma_{e'}$	Tensão de escoamento (yield) ou cedência após expansão
σ	Tensão normal
τ	Tensão cisalhante
ε_{rup}	Deformação na ruptura
θ_r	Umidade residual
θ_s	Umidade de saturação
ψ_b	Ponto de entrada de ar
e	Índice de Vazios
W	Umidade
Q_{Esc}	Carga de escoamento
σ_{Esc}	Tensão de escoamento
d_{Esc}	Deslocamento de escoamento;
ε_{Esc}	Deformação de escoamento;
Q_{Enrij}	Carga inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III);
σ_{Enrij}	Tensão inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III);
d_{Enrij}	Deslocamento inicial de enrijecimento (final Estágio II e início III);
ε_{Enrij}	Deformação inicial de enrijecimento (final) Estágio II e início III);
Q_{Final}	Carga para deslocamento de 8 mm.
SR	Grau de Saturação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	RELEVÂNCIA DO TEMA.....	20
1.2	OBJETIVOS.....	21
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	SOLOS EXPANSIVOS.....	23
2.1.1	Mecanismos de Expansão em solos	25
2.1.2	Critérios de identificação de solos expansivos	27
2.1.3	Estabilização de solos expansivos	29
2.2	REFORÇO DO SOLO COM FIBRAS DE COCO VERDE.....	32
2.2.1	Fibras de Coco verde	32
2.2.2	Propriedades Físico-Mecânicas das Fibras de Coco verde.....	35
2.2.3	Resistência de solos com fibras	38
2.2.4	Processo de formação de fissuras	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	44
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS.....	46
3.2.1	Solo de Paulista/PE.....	46
3.2.2	Fibra de coco	47
3.2.3	Misturas Solo – Fibras De Casca De Coco	49
3.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	51
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	74
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	74
4.1.1	Caracterização Física da Fibras de Coco.....	74
4.1.2	Caracterização Física do Solo.....	75
4.1.3	Caracterização Física do Solo-Fibra.....	77
4.2	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	80
4.3	CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA.....	81
4.4	AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO LIVRE E TENSÃO DE EXPANSÃO DO SOLO E MISTURAS.....	86
4.4.1	Ensaio de Expansão Livre	86

4.4.2 Tensão de Expansão	88
4.5 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA.....	90
4.5.1 Resistência a Compressão Simples.....	90
4.5.2 Resistência à tração por compressão diametral	93
4.5.3 Ensaio de cisalhamento direto	94
4.5.4 Considerações sobre a influência da adição das fibras da resistência	100
4.6 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E NAS MISTURAS SOLO FIBRA.....	100
4.7 PROCESSO DE FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FISSURAS POR RESSECAMENTO	102
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	120
5.1 CONCLUSÕES	120
5.2 SUGESTÕES	121
REFERÊNCIAS.....	122

1 INTRODUÇÃO

Solos não saturados são comuns na natureza, e estão presente na maioria das obras de infraestrutura geotécnica, incluindo encostas de terra, muros de contenção e pavimentação, aterro sanitário, barragens de terra, canais de irrigação e em algumas situações pode-se encontrar a presença de solos expansivos naturais ou compactados sujeitos a variação de umidade (sucção).

O clima desempenha um papel importante no solo não saturado, por exemplo, na estação seca com precipitações baixas, apresenta um valor mais baixo de umidade podendo causar no solo não saturado uma desidratação que gera magnitudes de sucção muito altas, em outros momentos em períodos chuvosos, temos um aumento nos índices pluviométricos e um aumento da umidade no solo não saturado diminuído sua sucção e consequentemente sua resistência.

Em solos expansivos, em campo, observam-se fissuras ou fendas características, nas estações secas e ondulações, aumento de volume, em estações chuvosas. As edificações de obras de Engenharia Geotécnica em solos que apresentam instabilidade volumétrica, quando há mudança de umidade pode causar sérios problemas. Solos expansivos, consistindo de solos fortemente hidrofilicos com a presença de argilominerais como a montmorilonita e ilita, são sensíveis a mudança de sucção. Conforme mostrado em Ng *et al.* (2003), o clima pode afetar significativamente o comportamento hidromecânico de solos expansivos, o que pode gerar danos graves às estruturas construídas sobre eles. Nelson e Miller (1992) reportam que em um ano típico nos EUA os solos expansivos podem causar maior perda financeira para os proprietários do que danos causados por tremores de terra, inundações, tornados e furações combinados. A Sociedade Americana de Engenheiros Civil estima que uma em cada quatro casas tem alguns danos causados por solos expansivos. Driscoll e Crilly (2000) comenta que o custo médio estimado por ano pela Associação de Seguradoras Britânicas com solo expansivo para a indústria de seguros está em mais de 400 milhões de libras. Não se têm no Brasil, dados específicos dos custos com danos causados por esses solos, quando inundados.

Por outro lado, o alto consumo de coco verde, principalmente por ser nutritivo, rico em sais minerais e ter um sabor apreciado pelos brasileiros, gera uma casca que representa a maior parte de seu volume e peso deixando um passivo ambiental. Responsável por quase 5% da produção mundial de coco, o Brasil é o país com a 4ª maior

produção desse insumo (SILVEIRA; ARAGÃO, 2016), onde o Nordeste responde por cerca de 75% da produção nacional e mais da metade do consumo do coco verde (BNB, 2018).

Em 2017, a área plantada ou destinada a colheita de coco em território nacional foi de 215.683,00 hectares e o Nordeste apresenta uma área de 178.840 hectares e que corresponde a 83% de toda a produção nacional. (BNB, 2018). Segundo Silveira e Aragão (2016) a maior parte da produção se destina às agroindústrias para obtenção de derivados do coco utilizados na produção de gêneros alimentícios (coco ralado, leite de coco, bebidas, óleos, doces, biscoitos, chocolates, etc.) este setor absorve aproximadamente 70% da produção, enquanto os 30% restantes são comercializados no Nordeste.

Diante deste cenário um passivo ambiental surge com o descarte deste material, o coco representa cerca de 70% de todo lixo gerado nas praias brasileiras (ROSA *et al.*, 2009). Silva e Jerônimo (2012) chamam a atenção que o não aproveitamento desses resíduos representa, na prática, a eliminação de matérias-primas infinitas e renováveis de grande valor, enquanto poderiam ser utilizados em substituição de outros produtos e suas matérias-primas não utilizadas constituem desperdício e ainda geram gastos de desova significativos para a sociedade (SENHORAS, 2003).

É imprescindível que a sustentabilidade seja debatida em todas as áreas e atividades do conhecimento buscando incluir em seus processos, materiais e metodologias mais sustentáveis, diminuindo o consumo e o reaproveitamento de resíduos gerados nos processos. A Engenharia Geotécnica, não deve estar fora deste debate e deve buscar formas e tecnologias mais sustentáveis, devido a sua importância prioritária em um projeto de construção civil (MISRA; BASU, 2011).

Procurando alternativa para mitigar os problemas dos solos expansivos na Engenharia Geotécnica e também viabilizar uma aplicação para as fibras de coco verde reduzindo um passivo ambiental a pesquisa se apresenta para investigar o comportamento hidromecânico dos solos expansivos do município de Paulista-PE reforçados com fibras de coco verde.

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

Os solos expansivos, por variarem seu volume, ou seja, expandirem quando em contato com água e contraírem ao perder água, podem provocar sérias patologias em uma edificação assentada sobre uma camada desse tipo de solo e levar a estrutura ao colapso

quando os danos à construção são elevados. Dada essa possibilidade, é importante ter conhecimento das propriedades e comportamentos dos solos expansivos quando submetidos a todos os tipos de interferências e mudanças que possam ocorrer em sua estrutura, composição química, propriedades físicas, etc.

É importante salientar que para que se manifeste o potencial expansivo do solo na mudança de umidade, segundo Ferreira e Vilar (2015) destacam-se dois grandes grupos: i) mudanças sazonais e ii) modificações da umidade natural do terreno pela ação humana. As mudanças sazonais estão vinculadas às variações climáticas ao longo do ano.

As oscilações periódicas de umidade na superfície do terreno dependem da relação precipitação/evaporação. Em relação às ações humanas a implantação de uma obra de engenharia provoca uma perturbação local de umidade natural do solo.

Portanto, é necessário investigar o comportamento hidromecânico de solos expansivos não saturados com diferentes misturas, para fornecer dados experimentais que contribuam com relações constitutivas usadas para descrever esse comportamento. Obras geotécnicas exigem análises específicas, e por vezes os solos disponíveis em jazidas próximas aos locais não apresentam propriedades hidromecânicas adequadas aos critérios exigidos, ou não possuem volume suficiente para suprir as demandas das obras.

A incorporação da fibra de coco além de ser um material de bom desempenho tem baixo custo e surge como uma possibilidade de aproveitamento do resíduo de coco, a ser analisada quanto à viabilidade técnica. E atrelado a esta análise pode-se evitar que quantidades de fibras de coco geradas na produção industrial e no consumo poderiam ser aproveitadas em obras geotécnicas, evitando que esses resíduos sejam lançados em corpos de água ou levados para disposição em aterros sanitários ou industriais a elevados custos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é investigar o comportamento hidromecânico de um solo expansivo de Paulista/PE reforçado com fibra de coco verde e analisar a viabilidade da incorporação da fibra de coco verde com ênfase no desempenho destas misturas quanto à formação e à propagação de fissuras por ressecamento.

A fim de se alcançar o objetivo geral proposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar as propriedades físicas do solo e da fibra de coco selecionados para a pesquisa, bem como de compósitos elaborados com estes materiais;
- b) avaliar a condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento, a resistência à compressão, resistência à tração, a expansividade e as características quanto a retenção de água de amostras de solo e misturas solo-fibra de coco, em diferentes percentuais de substituição das fibras em peso, compactadas em laboratório;
- c) verificar a influência da incorporação das fibras de coco, em diferentes proporções, no comportamento físico, hidráulico e mecânico das misturas solo-fibra, em comparação com o solo natural
- d) analisar o comportamento reológico do solo e os efeitos da adição das fibras de coco verde.
- e) avaliar comparativamente o desempenho quanto à formação e propagação de fissuras por ressecamento do solo puro e das misturas solo-fibra de coco;
- f) comparar o comportamento do solo reforçado com fibras de coco estudada com a literatura

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em cinco capítulos, contendo no primeiro uma apresentação acerca do tema estudado com uma introdução de forma mais abrangente, a relevância do tema, o objetivo geral e os objetivos específicos estabelecidos para o desenvolvimento da pesquisa. O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico, que contempla aspectos basilares para uma contextualização e revisão eficaz dos temas abordados na pesquisa, tais como conceitos, características e tipos de aplicações dos temas na pesquisa.

O Capítulo 3 mostra o procedimento metodológico empregado para a realização da pesquisa, abordando informações sobre os materiais que foram utilizados, o processo de coleta, o programa experimental e os procedimentos aplicados nos laboratórios.

No Capítulo 4 são expostos os resultados e discussões relacionados ao estudo, de forma detalhada.

O Capítulo 5 tem a conclusão onde são apresentados os objetivos alcançados na pesquisa, as considerações finais da pesquisa e sugestões para pesquisas futuras que venham a dar continuidade, aprofundar e apresentar outros vieses para a pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fundamentação teórica está dividida em partes. A primeira discorre sobre solos expansivos. A segunda, sobre métodos para a estabilização dos solos expansivos. A terceira reforço do solo com fibras. Posteriormente é abordado o ensaio *squeeze-flow*. Por último, o estudo do processo de propagação de fissuração do solo.

2.1 SOLOS EXPANSIVOS

Solos não saturados expansivos podem ser encontrados em todos os continentes, particularmente em muitos países áridos e semiáridos (ou seja, mais de 60% dos países do mundo), Ferreira (1995), Chaduvula (2017), Al-Shamrani, *et al.* (2018), Mandeep e Ayothiraman (2019) e Abbaspour *et al* (2019) e nessas regiões, uma quantidade limitada de chuvas e uma alta taxa de evaporação resultam em um lençol freático profundo. Os estratos do solo acima do nível do lençol freático existem em condições não saturados. Além da ocorrência de condições não saturadas acima do nível do lençol freático, solos não saturados são amplamente encontrados em aterros compactados, como represas e pavimentos, e sedimentos contendo gás ou óleo no ambiente offshore.

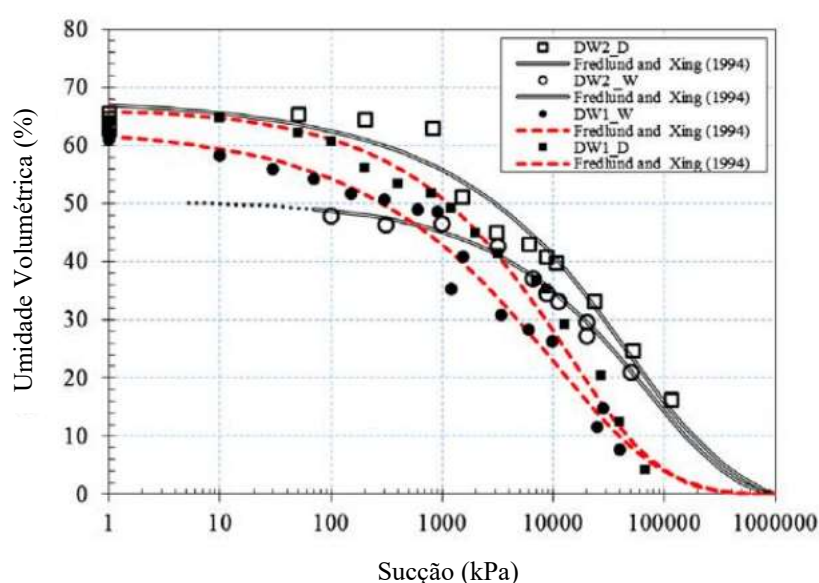
Obras em solos não saturados expansivos se apresentam como desafios para engenharia geotécnica, e com o desenvolvimento recente nas pesquisas desses solos expansivos não saturados, a compreensão do seu comportamento vem alcançando cada vez mais um estágio maior de conhecimento para os engenheiros geotécnicos. Teorias e formulações são desenvolvidas para o comportamento de solos não saturados e são apresentadas para descrever melhor o comportamento desses solos. (Fredlund, 1995).

De acordo Wei-lie Zou, Zhong, J. Ye, (2020) Solos não saturados são frequentemente encontradas na construção de estruturas geotécnicas, incluindo estradas, aterros, barragens, fundações e dutos. Com mudanças volumétricas significativas que normalmente ocorre em argilas expansivas localizadas na zona ativa onde o teor de umidade flutua notavelmente sob a influência do ambiente externo (por exemplo, infiltração, evaporação e precipitação) e também pelas atividades humanas (por exemplo, agricultura, jardinagem e vazamentos de efluentes) isso representa sérias ameaças à estabilidade e capacidade de manutenção das estruturas geotécnicas.

Nos solos não saturados a fase do ar e da água com relação à forma e continuidade é diferente em cada estágio e, portanto, o movimento do ar e da água em um solo não

saturado pode ser diferente quando suas condições de contorno são alteradas (por exemplo, uma mudança na sucção do solo ou tensão de confinamento aplicada ao solo). Para um dado solo, os comportamentos hidráulicos e mecânicos em diferentes estágios de saturação podem ser significativamente diferentes, e as metodologias de pesquisa e técnicas experimentais correspondentes a diferentes estágios são diferentes umas das outras. Na Figura 1 mostra a variação da umidade com a sucção de um solo expansivo em uma pesquisa desenvolvida por AlShamrani *et al.* (2018). Por exemplo, em um solo relativamente seco, a fase aquosa tende a existir apenas nos pequenos vazios (ou cantos dos poros) e é descontínua.

Figura 1- Sucção e Umidade em solos expansivos



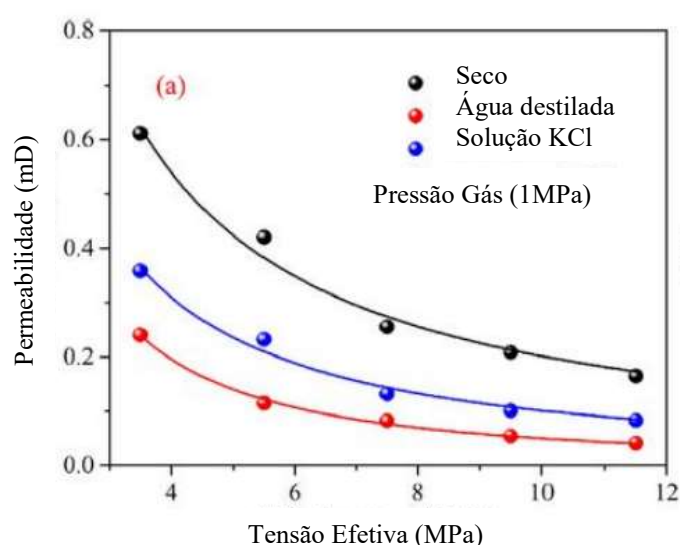
Fonte: Al-Shamrani, *et al.* (2018)

O movimento da água devido a uma mudança no gradiente hidráulico aplicado ocorre via vapor d'água e, portanto, pode não estar em conformidade com a lei de Darcy. Consequentemente, a equalização de sucção é um processo nitidamente lento. Embora a sucção no solo seja alta, a contribuição da sucção para a resistência ao cisalhamento e rigidez é desprezível devido à pequena porção da área molhada. O método de controle de umidade, ao invés da técnica de translação do eixo, é geralmente adotado para o controle de sucção em tal solo.

A mudança de volume de um solo não saturado devido a uma mudança na sucção do solo pode ser substancial e o comportamento volumétrico de um solo não saturado pode ser significativamente diferente de um solo saturado. Por exemplo, um solo expansivo inicialmente não saturado ou solo colapsível geralmente mostra uma mudança

de volume substancial após umedecimento. A mudança de volume induzida por umedecimento pode causar sérios danos aos edifícios apoiados no solo. O coeficiente de permeabilidade à água para um solo em condições não saturadas pode ser várias ordens menor que o coeficiente de permeabilidade à saturação devido a uma redução significativa na área molhada para o fluxo de água. O baixo coeficiente de permeabilidade de solos não saturados pode resultar em um cabo de água subterrânea empoleirado em um solo não saturado sujeito a chuvas e inundações. A Figura 2 que demonstra a variação de permeabilidade de solos expansivos com diferentes tensões e permeantes, Yang, *et al.* (2020).

Figura 2- Comportamento da permeabilidade em solos expansivos



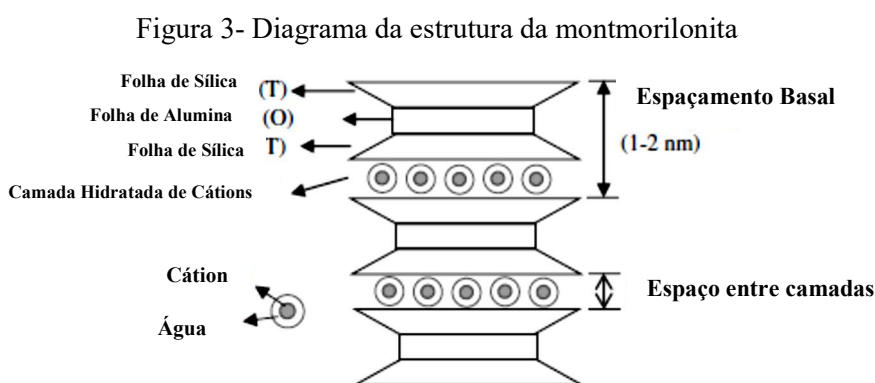
Fonte: Yang, *et al* (2020)

2.1.1 Mecanismos de Expansão em solos

Solos expansivos este termo é usado para descrever solos que tem o potencial de variação de volume devido ao aumento da umidade do solo. Os fenômenos de expansão resultam de causas diferentes, normalmente associadas à presença de minerais de natureza expansiva, como as esmectitas e montmorilonitas, tem-se, um fenômeno complexo, dominado por causas físico-químicas e que, além do aumento de volume, traz consigo outra consequência associada, a tensão de expansão (Ferreira e Vilar, 2015). Algumas características de solos expansivos é que são não saturados, com minerais argílicos, montmorilonita, vermiculita, apresentam contrações e expansões com aparecimento de superfícies de fricção, com drenagem baixa, atividade alta, derivados de rochas ígneas,

basicamente, basalto, diabásios e gabros e de rochas sedimentares basicamente folhelhos, margas e calcários (Ferreira e Vilar, 2015).

Para um solo ter caráter expansivo depende, primariamente, do tipo de argila existente, uma vez que nem todos minerais argilosos experimentam modificações volumétricas este comportamento segundo Asmaa Al-Taie, *et al.* (2016), ocorre devido à presença de minerais expansivos, como a montmorilonita, nestas argilas. Para Zhang, *et al.* (2020) este argilomineral apresenta uma estrutura cristalina que pertencem ao tipo de camada 2: 1 com cada camada consistindo de duas folhas de sílica tetraédrica (T) ensanduichando um octaédrico central (O) folha de alumina (Figura 3), podendo ocorrer nesta estrutura substituições isomórficas como do átomo Si^{4+} por Al^{3+} na sílica tetraédrica e Al^{3+} por Mg^{2+} no octaédrico central de alumina.



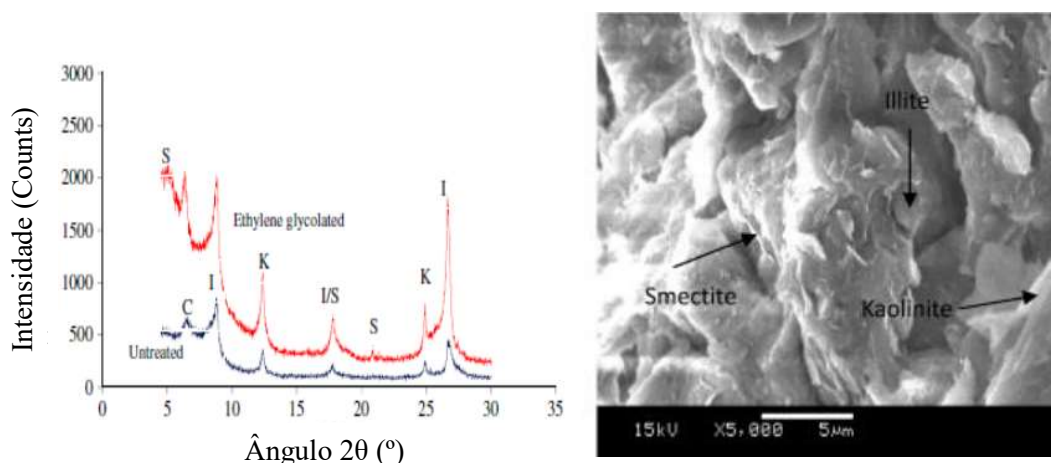
Fonte: Zhang, *et al.* (2020)

Essas argilas naturais têm cargas negativas permanentes nas superfícies, que são equilibradas por contra-íons positivos (também chamados de "cátions interlayer") adsorvido nas superfícies. Nessas argilas inchadas, os cátions intercamadas são geralmente hidratados e também funcionam como ligações para manter as camadas 2:1 adjacentes, resultando em ligação fraca. Argilas esmectitas com interlayer de Na^+ ou Ca^{2+} cátions geralmente exibem uma capacidade expansiva mais alta. Como resultado, as argilas incham (aumentam em volume) quando a água é absorvida e encolhem (diminuem em volume) quando há perda de água. (Asmaa Al-Taie, *et al.* 2016)

A instabilidade pode ser especialmente importante nas argilas esmectitas, em especial, a montmorilonita e a vermiculita, ocorrendo, também, nos interestratificados de montmorilonita com clorita, ilita e vermiculita. A haloisita tem capacidade de expansão, porém, muito mais limitada. Os solos contêm, normalmente, minerais não argílicos, tais como sílica, feldspato e precipitados químicos (Ferreira e Vilar, 2015).

Na Figura 4 abaixo retirada do trabalho de Bi-wei Gong, *et al.* (2015) pode-se ver claramente através das imagens os principais argilominerais presentes em um solo expansivo.

Figura 4- MEV solo expansivo



Fonte: Bi-wei Gong, *et al.* (2015)

A identificação de solos expansivos é um estágio essencial no sucesso de projetos de engenharia, falhas nesse estágio podem levar à ruptura de obras ou à necessidade de recuperação (Ferreira e Vilar, 2015).

2.1.2 Critérios de identificação de solos expansivos

Muitos critérios são utilizados para classificar e caracterizar os solos expansíveis. Ferreira e Vilar (2015) divide os métodos em dois grandes grupos: métodos diretos e indiretos. Os métodos indiretos são aqueles que se utilizam dos índices físicos e limites de consistência ou parâmetros ligados à textura de simples obtenção em ensaios de laboratório e campo para indicar a potencialidade de expansão. Os métodos diretos baseiam-se na medida do potencial de expansão do solo avaliado pelos ensaios edométricos, de placa ou com o expansocolapsômetro.

A Tabela 1 compilada por Schreiner (1987) e Ferreira (1995) mostra vários métodos de identificação de solos expansivos.

Tabela 1- Métodos de identificação de solos expansivos

Métodos	Subdivisões	Critério	Referência
INDIRETOS	Identificativos	Difração e raio-X, Microscopia eletrônica de varredura, Análise termo-diferencial e Adsorção de etilenoglicol e glicerina	Ayala <i>et al.</i> (1986)
		Físico-químico	Fink <i>et al.</i> (1971)
	Orientativos	Granulometria, Consistência e Índices físicos e Classificação Geotécnica	Prikonskij (1952), Skempom (1953), Seed <i>et al.</i> (1962), Van Der Merwe (1964), Chen (1965), Vijayverviya e Ghazzaly (1973), Rodriguez Ortiz (1975), Cuellar (1978), Daksanamurthy e Raman (1973).
		Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Identificação visual.	Patrick e Snethen (1976), Ayala <i>et al.</i> (1986), Ferreira (1990c e 1993a).
	Qualitativos		
	Avaliativos	Ensaio de Expansão de Lambe	Lambe (1960).
DIRETOS	Quantitativos	Expansão Livre e Tensão de Expansão, Ensaios Edométricos Duplos e Simples, placa, Expansocolapsômetro	Seed <i>et al.</i> (1962), Chen (1965), Vijayverviya e Ghazzaly (1973), Rodriguez Ortiz (1975), Cuellar (1978), Jimenez Salas (1980).
		Ensaios Edométricos de Sucção controlada	Escario (1967 e 1969), Aitchison <i>et al.</i> (1973), Johnson (1978), McKeen (1980).

Fonte: (Schreiner, 1987; Ferreira, 1995)

A Tabela 2 apresenta classificações qualitativas de solos expansivos com base em limites de consistência. Essa tabela foi adaptada do trabalho de Ferreira e Vilar (2015) e Sridharan e Prakash, (2000), que analisou 18 solos argilosos sendo 9 caulinitas e 9 montmorilonitas. A Tabela 3 apresenta classificações de solos com base na expansão “livre”. A percentagem de expansão “livre” pode ser obtida pela Equação (1). Alguns métodos utilizam pequenas sobrecargas antes da inundação, como, por exemplo, 7 kPa (Seed *et al.*, 1962) e (Sridharan e Prakash, 2000) e 10 kPa (Vijayvergiya & Ghazzaly, 1973).

$$El (\%) = (\Delta H / H) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

onde: El = expansão “livre”, em percentagem; ΔH = altura da expansão devido à saturação; H = altura do corpo de prova antes da inundação.

Tabela 2- Classificação do grau de expansão pelo Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade

Grau de Expansão	Chen (1965)	Seed et al. (1962)	Daksanamurthy & Raman (1973)	Sridharan e Prakash (2000)	Bureau of Indian Standards	Bowles (1977)
Muito Alto	LL > 60	IP > 35	LL > 70	IP > 60	LL > 70	IP > 35
Alto	40 < LL ≤ 60	20 < IP ≤ 35	50 < LL ≤ 70	30 < IP ≤ 60	50 < LL ≤ 70	25 < IP ≤ 41
Médio	30 ≤ LL ≤ 40	10 ≤ IP ≤ 20	35 < LL ≤ 50	15 ≤ IP ≤ 30	35 < LL ≤ 50	15 < IP ≤ 28
Baixo	LL < 30	IP < 10	20 ≤ LL ≤ 35	IP < 15	20 ≤ LL ≤ 35	IP ≤ 18

Fonte: Autor adaptado de Ferreira e Vilar (2015) e Sridharan e Prakash (2000)

Tabela 3– Critérios de classificação de solos expansivos com base na expansão livre

Critério de Seed et al. (1962)	Critério Sridharan e Prakash, (2000)	Critério de Vijayvergiya & Ghazzaly (1973)	Grau de Expansividade
Expansão livre (%) para tensão de sobrecarga 7 kPa	Expansão livre (%) para tensão de sobrecarga 7 kPa	Expansão livre (%) para tensão de sobrecarga 10 kPa	
0-1	1-5	< 1	Baixa
1-5	5-15	1 - 4	Média
5 - 25	15 - 25	4 - 10	Alta
> 25	> 25	> 10	Muito Alta

Fonte: Autor adaptado de Ferreira e Vilar (2015) e Sridharan e Prakash (2000)

É importante salientar que para que se manifeste o potencial expansivo na mudança de umidade do solo, segundo Ferreira e Vilar (2015) destacam-se dois grandes grupos: i) mudanças sazonais; ii) modificações da umidade natural do terreno pela ação humana. As mudanças sazonais estão vinculadas às variações climáticas ao longo do ano. As oscilações periódicas de umidade na superfície do terreno dependem da relação precipitação/evaporação. Em relação as ações humanas a implantação de uma obra de engenharia provoca uma perturbação local de umidade natural do solo.

2.1.3 Estabilização de solos expansivos

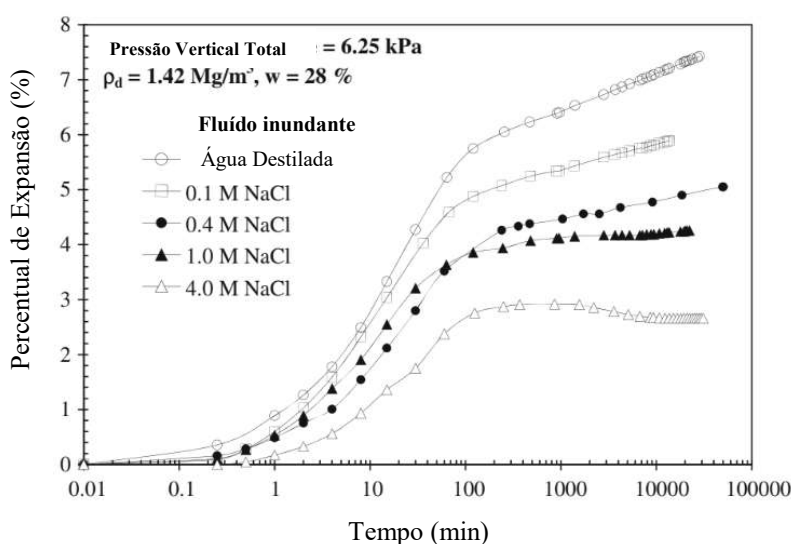
As técnicas de estabilização de solos para melhorar as características geotécnicas de um solo expansivo têm-se revelado cada vez mais importante na resolução de problemas, viabilizando, assim, obras de engenharia. A estabilização dos solos pode ser obtida pelo uso de diferentes técnicas. Desde processo mecânico (a estabilização granulométrica, compactação); tratamento químico (inclusão de aditivos no solo, cal, cimento Portland, betume, resinas, etc) e misturas de dois ou três desses processos. E ainda a inserção de materiais para reforço do solo, em forma de geossintéticos ou fibras, de origem natural ou sintética, (CONSTANTINO 2018, HARIANTO *et al.*, 2008). Outros materiais não convencionais (álcool polivinílico, resíduos de construção e demolição, resíduos de gesso, fibras e cinzas da casca de coco) também tem sido utilizado no melhoramento de solos (MENEZES *et al.* 2019; SILVA; FUCALÉ; FERREIRA, 2019).

A opção por uma ou outra técnica de estabilização é influenciada por uma série de fatores, dentre elas as características dos materiais, as propriedades a serem melhoradas, os custos totais da obra, além da própria finalidade da obra. Nos solos expansivos, em especial, busca-se reduzir a expansividade (tensão de expansão, expansão

“livre”) quando umedecido e contração e a propagação de fissuras quando ressecados. Aqui será destacado alguns desses.

Estudos de estabilização em solos expansivos foram desenvolvidos nos últimos anos, pode-se citar alguns trabalhos como o de Thyagaraj *et al.* (2013), que avaliaram a influência do aumento do soluto NaCl nas proporções de 0,1 até 4M NaCl no processo de expansão de um solo expansivo do estado de Karnataka na Índia. O objetivo da pesquisa foi alcançado com pode-se ver na Figura 5 comparando a inundação da argila expansiva compactada das amostras com água destilada e as soluções de cloreto de sódio da pesquisa.

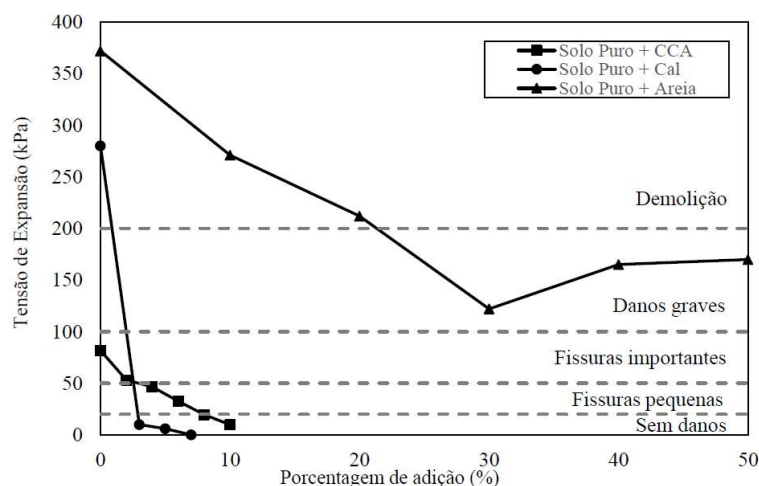
Figura 5– Expansão das amostras do Solo compactado inundado



Fonte: Thyagaraj *et al.* (2013)

Constantino (2018) realizou ensaios laboratoriais no solo natural de Paulista/PE e nas misturas solo com cinza de casca de arroz (CCA) nos percentuais, em peso, de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%. Na Figura 6 percebe-se que o teor da mistura solo-cal reduziu o risco a danos as estruturas, com incremento de areia nas misturas de solo-areia há a redução do risco de demolição à danos graves e com o acréscimo de CCA, as misturas solo-CCA reduzem o risco de fissuras importantes até zerar o risco às estruturas.

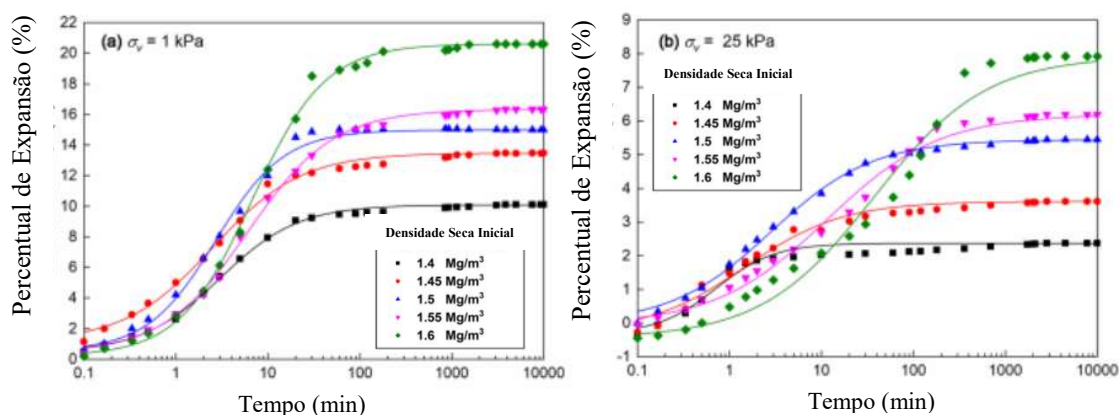
Figura 6 - Tensão de Expansão solo de Paulista/PE e misturas com adição de CCA, Areia e Cal



Fonte: Constantino (2018)

Wei-lie *et al.* (2020) pesquisando uma argila expansiva na China, em diferentes densidades iniciais, 1.4, 1.45, 1.5, 1.55 e 1.6 Mg/m³, detectou que a expansão volumétrica aumenta em solos expansivos na medida em que se aumenta as densidades secas iniciais (Figura 7).

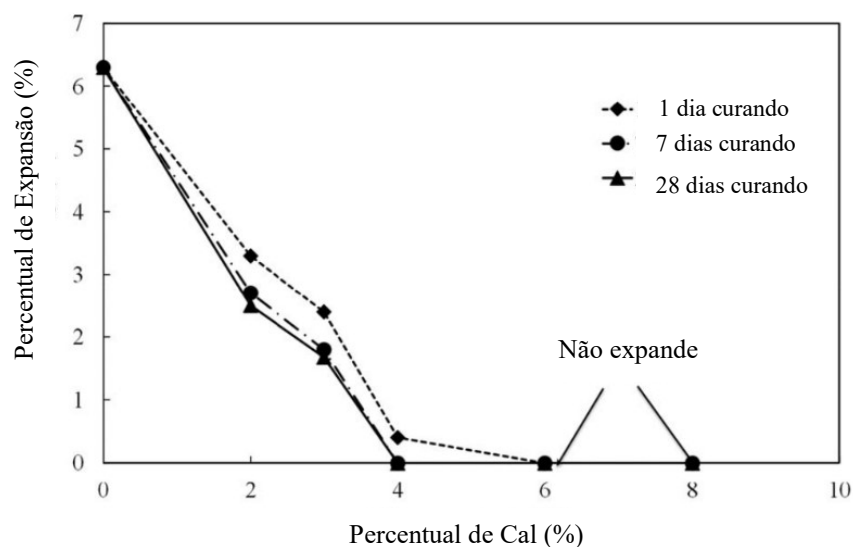
Figura 7 – Expansão volumétrica de solos expansivos em diferentes densidades secas iniciais



Fonte: Wei-lie *et al.* (2020)

Asmaa *et al* (2020) mostraram a influência do percentual da mistura e o tempo de cura de um solo expansivo da Austrália com cal, os percentuais estudados de cal foram de 0%, 2%, 3%, 4%, 6% e 8%, sendo curados em 1, 7 e 28 dias, ficou comprovado que quanto maior o percentual de cal e o tempo de cura melhores são os resultados de estabilização do solo (Figura 8).

Figura 8– Expansão do solo para as amostras não tratadas e tratadas com cal para três diferentes durações de cura.



2.2 REFORÇO DO SOLO COM FIBRAS DE COCO VERDE

Várias fibras naturais têm sido utilizadas nos últimos anos pela sua grande disponibilidade e boa resistência à tração entre elas o sisal, curauá, açaí, juta e coco. As fibras naturais têm como desvantagem, sofrer degradação com o tempo, inerente ao próprio material, assim fibras com maior durabilidade ao longo do tempo, como as fibras de coco, ganham vantagem. O alto teor de lignina, em torno de 40%, presente nas fibras de coco confere durabilidade. As fibras de coco possuem vida útil em campo entre 2 e 10 anos, o que indica sua aplicação em obras geotécnicas, especialmente em obras temporárias (BABU e VASUDEVAN, 2008; HEJAZI *et al.*, 2012).

2.2.1 Fibras de Coco verde

As fibras do coco verde são provenientes do fruto do coqueiro, abundante nos trópicos que tem aumentando seu consumo no mundo ao passar dos anos. No Brasil, segundo dados da FAO (2019), a produção saiu de 477 mil para 2,65 milhões de toneladas em de 1990 a 2016. Silva (2014) aponta que por conta do baixo custo, abundância e disponibilidade, o coco tem uma maior aceitação para comercialização. Dados de 2015 do IBGE apontam que Bahia, Sergipe, Pará, Ceará e Espírito Santo juntos correspondem 72,8% do plantio de coco, com 29,4%, 12,5%, 11,2%, 10,7% e 9,0% respectivamente.

Regionalmente, o estado do Pará detém praticamente todo o fornecimento do Norte do Brasil. A Bahia lidera o Nordeste, com 42,0%. Ceará (17,9%) e Sergipe (15,3%) ocupam o segundo e terceiro lugar na produção nordestina. No Sudeste, especialmente Espírito Santo (55,8%), seguido do Rio de Janeiro (22,3%) e Minas Gerais (13,9%) detêm o plantio de coqueiros (DIAS, 2019). Em um levantamento elaborado pelo Sindcoco (Sindicato Nacional dos Produtores de Coco do Brasil), em torno de 1 bilhão e meio de cocos foram utilizados no ano de 2014 para a indústria da água de coco. Toda essa produção gerou uma quantidade em próxima de 2,5 milhões de quilos de resíduos. Calcula-se que em torno de 80% dos resíduos presentes nas praias brasileiras sejam de cascas de coco verde (LACERDA, 2021). O problema é o volume que este resíduo ocupa nos aterros sanitários, trazendo custos para o orçamento público. (DIAS, 2019).

Após o consumo da água de coco, a casca configura-se como um subproduto. Esta equivale a 85% da massa do fruto do coqueiro (ROCHA *et al.*, 2015). Desta massa, somente 10% é reaproveitado pela indústria no processamento do coco, sendo então a maior fatia rejeitada sem o devido beneficiamento. (ROCHA *et al.*, 2015).

Assim, as cascas de coco em sua maioria são classificadas apenas como rejeitos, porém, com potencialidade ainda não explorada de entrar na produção. Pimenta (2015) cita que empregar corretamente as cascas de coco favorece a preservação do meio ambiente, pois estas passam em torno de oito anos para se decompor. Na Figura 9 mostra a fibra de coco como um passivo ambiental sendo descartado de maneira irregular nas praias e ruas.

Figura 9– Coco como passivo ambiental



Fonte: G1, 2018

O processamento da casca de coco verde que se inicia com a coleta das cascas, transporte e descarregamento na unidade de beneficiamento. Um ponto importante é a desidratação do material que aumenta sua densidade, o que dificulta a retirada de sais na

prensagem e classificação das fibras. Dessa forma, o ideal para garantir a qualidade dos produtos finais é a destinação das cascas à unidade de beneficiamento em até três dias após a abertura do coco (MATTOS *et al.*, 2014).

O material é descarregado na moega de recepção (Figura 10a), a qual possui declividade a fim de conduzi-lo por gravidade até a entrada da linha de processamento. Nesse momento devem ser removidos quaisquer materiais estranhos, como canudos, pedras, plásticos, cascas podres (Figura 10b). A Embrapa Agroindústria Tropical (unidade descentralizada da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária localizada em Fortaleza-CE), junto a metalúrgica Fortalmag, desenvolveu a tecnologia atualmente utilizada no processamento das cascas de coco verde. O equipamento é responsável por realizar os seguintes processos, nesta ordem (MATTOS *et al.*, 2014):

a) Trituração (Figura 10c): um rolo de facas fixas promove o esmagamento da parte fibrosa da casca (mesocarpo) minimizando cortar as fibras, para melhor aproveitamento das fibras longas. Quando não há interesse em aproveitamento das fibras, também podem ser usados equipamentos com outras ferramentas de corte que trituram integralmente a casca, como discos e facas, discos de corte alternados, e moinhos universais.

b) Prensagem (Figura 10d): a casca de coco possui elevada umidade (cerca de 80%), de forma que a maior parte dos sais se encontram em solução. Assim, a partir da passagem do conjunto triturado em prensa rotativa horizontal, o excesso de umidade é extraído e a salinidade é reduzida – resultando em economia de água no posterior processo de lavagem. Vale salientar que a remoção de sais na prensagem é otimizada quanto maior for a umidade das cascas processadas. Ao final dessa etapa se obtém, além das fibras desagregadas, um efluente denominado de “líquido da casca de coco verde” (LCCV) – numa proporção de 30% do peso inicial.

c) Seleção: marteletes fixos helicoidais e uma chapa perfurada permitem separar o pó, o qual cai pela chapa (Figura 10e), das fibras, as quais saem no final do percurso.

Figura 10 - Sequência de etapas para beneficiamento da casca do coco.



Fonte: Adaptado de Mattos *et al.* (2014)

2.2.2 Propriedades Físico-Mecânicas das Fibras de Coco verde

A Tabela 4 traz algumas propriedades físicas de fibras (vegetais e sintéticas) normalmente utilizadas como reforço de compósito. A resistência à tração diz respeito à carga uniaxial por unidade de área aplicada no material no momento de ruptura, o alongamento informa o aumento percentual do seu comprimento durante esse processo, e o módulo de elasticidade é a razão entre tensão e deformação no regime elástico (no qual a deformação é proporcional à tensão e totalmente reversível) (SILVA, 2003)

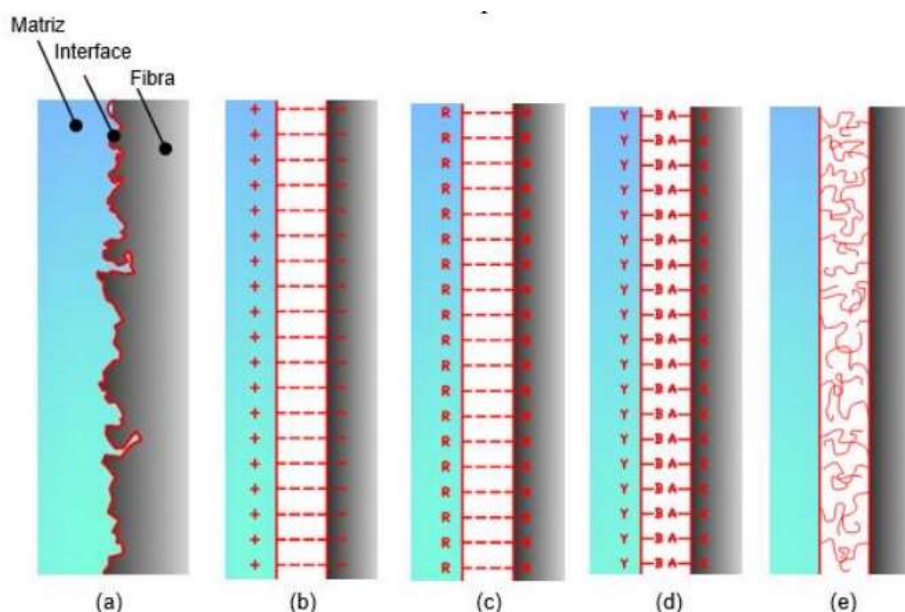
Tabela 4 - Propriedades físicas de fibras utilizadas como reforço

Fibra	Diâmetro (mm)	Densidade (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Absorção Máxima (%)
Algodão	0,01-0,02	1,5 – 1,6	287 - 597	5,5 – 12,6	7 - 8	-
Juta	0,2	1,3	393 - 773	26,5	1,5 – 1,8	214
Sisal	0,05 – 0,3	1,45	511 - 635	9,4 - 22	3 - 7	110
Coco	0,1 – 0,45	1,4-1,52	100-225	3 - 6	12 – 51,4	414 (Autor, 2022)
Vidro	8-14	2,5	2000-3500	70	1,8-3,2	-
Kevlar	12	1,48	2800-3792	131	2,2-2,8	-
Carbono	7-10	1,6-1,9	4000	230-240	1,4-1,8	-

Fonte: Autor adaptado de Silva (2003), e Bordoloi *et al.* (2017)

Com a proposta de reforço com as fibras entender como se dá a adesão entre as fases é muito importante, essa interação se dá principalmente por: encaixe mecânico, atração eletrostática, ligações químicas ou interdifusão de materiais (NOSSA, 2011), conforme mostrado na Figura 11. A adesão mecânica mostrada em (a) é especialmente favorecida pela presença de reentrâncias (rugosidades) na superfície no reforço e ocorrência de contração de matriz durante o processo de cura, provocando uma resistência mais efetiva em carregamentos paralelos à interface (NOSSA, 2011).

Figura 11 - Mecanismos de adesão na interface fibra-matriz (a) adesão mecânica; (b) adesão eletrostática; (c) adesão química entre grupos químicos compatíveis; (d) adesão química com aplicação de agente de acoplamento; (e) adesão por reação ou interdifusão envolvendo polímeros

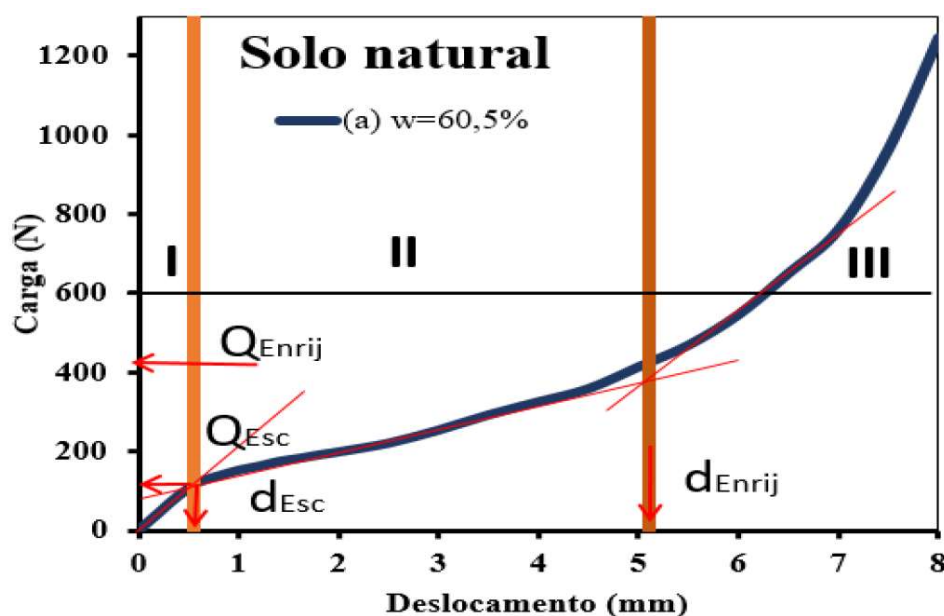


Fonte: Nossa (2011)

A interação entre as partículas do solo e as fibras podem ser analisadas pela reologia e o ensaio *squeeze-flow* permite avaliar a interação. Segundo Melo (2014), no ensaio *squeeze-flow* a compressão pode se dar pela placa superior, pela placa inferior, ou por ambas. O ensaio pode ser realizado com controle de deslocamento ou controle de força e o diâmetro da placa superior pode ser menor, igual ou maior que o diâmetro da amostra.

Os resultados de ensaios com o *squeeze-flow* do solo de natural de Paulista/PE são mostrados na Figura 12. A curva de carga (N) versus deslocamento (mm), seguem um perfil reológico de três estágios. O estágio I equivale a um pequeno deslocamento, apresentando deformação elástica linear e está relacionado provavelmente à tensão de escoamento do material. O estágio II trata-se de um deslocamento intermediário, mostrando uma deformação plástica e/ou viscosa dependendo de suas características. Nesta etapa II o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento. Já no estágio III, ocorre um aumento expressivo da carga necessária para dar continuidade à deformação do material, influenciado pela aproximação dos agregados e o atrito entre eles (CARDOSO, 2009).

Figura 12 - Curva carga versus deslocamento com os três estágios do comportamento reológico.



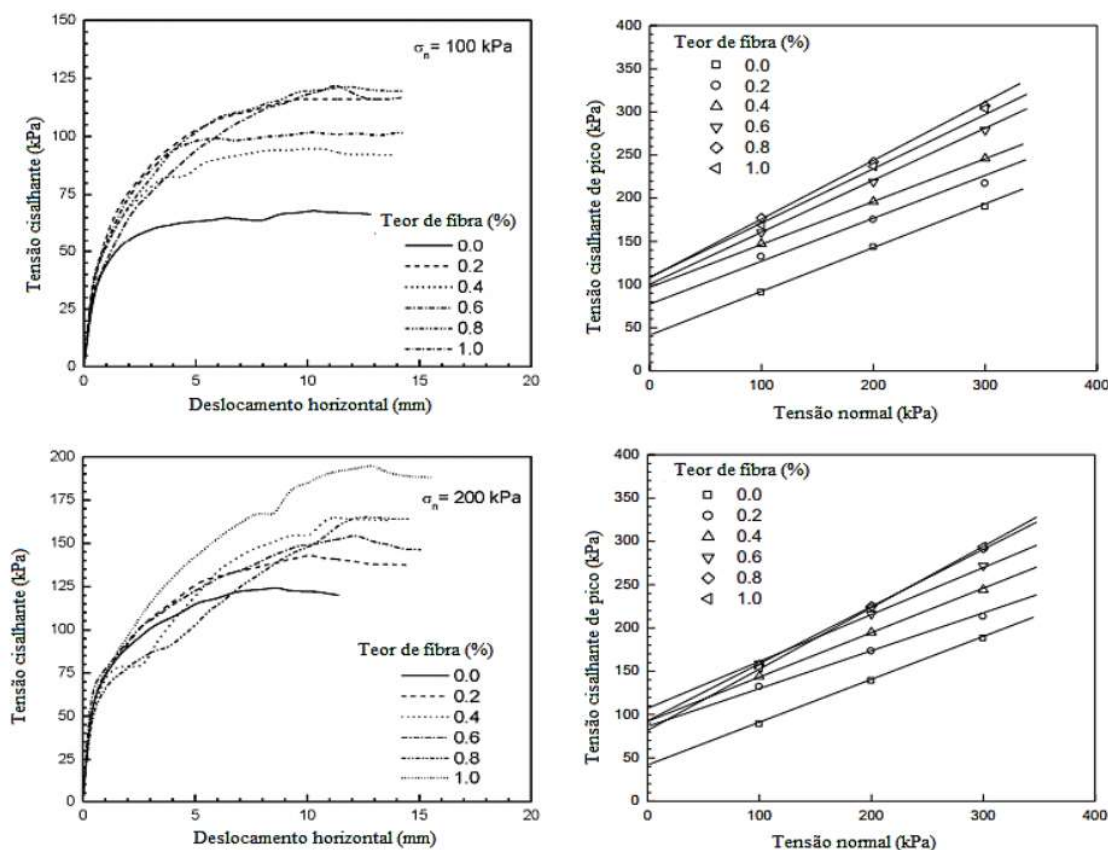
Fonte: Bezerra (2020)

W= umidade; Q_{Esc} = carga de escoamento; σ_{Esc} = tensão de escoamento; d_{Esc} = deslocamento de escoamento; ϵ_{Esc} = deformação de escoamento; Q_{Enrij} = carga inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III); σ_{Enrij} = tensão inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III); d_{Enrij} = deslocamento inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III); ϵ_{Enrij} = deformação inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III); Q_{Final} = carga para deslocamento de 8 mm.

2.2.3 Resistência de solos com fibras

Kar e Pradhan (2011) estudaram a resistência a compressão simples e a resistência ao cisalhamento direto de um solo argiloso localizado em Burla na Índia, misturado com fibras de coco e com fibras de polipropileno, os teores usados foram 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1%. Para o ensaio de compressão simples, houve melhores resultados para 0,6% de fibra, alcançando uma resistência à compressão simples de aproximadamente 160 kPa, diminuindo essa resistência para 140 kPa a partir do teor de 0,8%. (Figura 13).

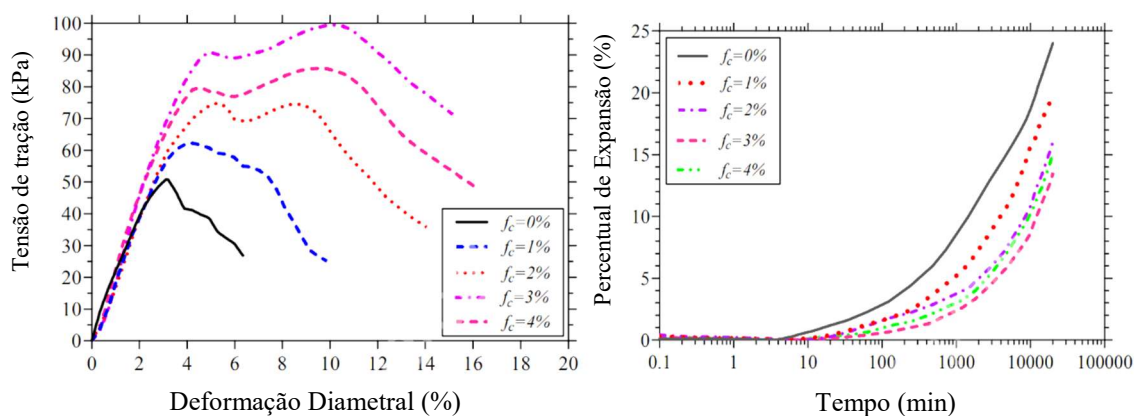
Figura 13 - Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e envoltórias de resistência do solo e das misturas.



Fonte: Kar e Pradhan (2011)

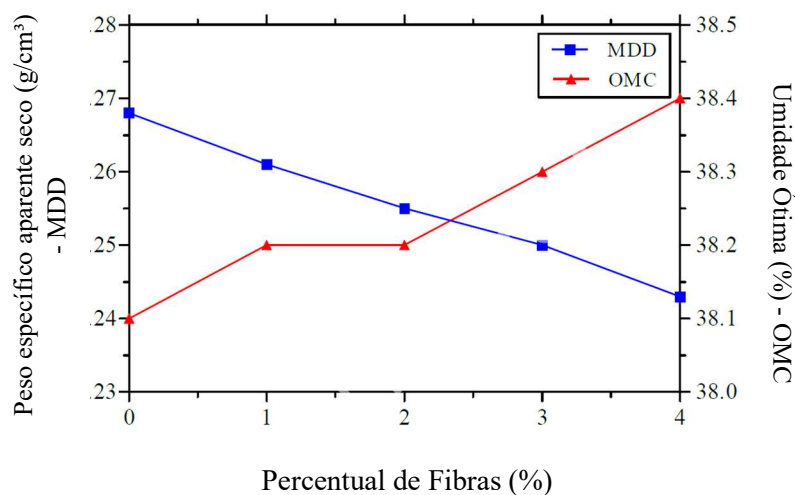
Narani, *et al.* (2019), estudaram o comportamento hidromecânico de um solo argiloso expansivo localizado na cidade Tehran no Iran, misturado com fibras de nylon nas proporções de 0,1, 2, 3 e 4%. Os principais resultados podem ser vistos na Figura 14, observa-se um aumento da resistência e uma diminuição do potencial de expansão com o acréscimo de fibras até um percentual de 3%. Também observa-se na Figura 15 que com o aumento de fibras houve um aumento do teor de umidade ótima e uma diminuição do peso específico máximo aparente seco das misturas na curva proctor.

Figura 14 - Variação tensão com a deformação diametral e potencial de expansão



Fonte: Narani, *et al* (2019)

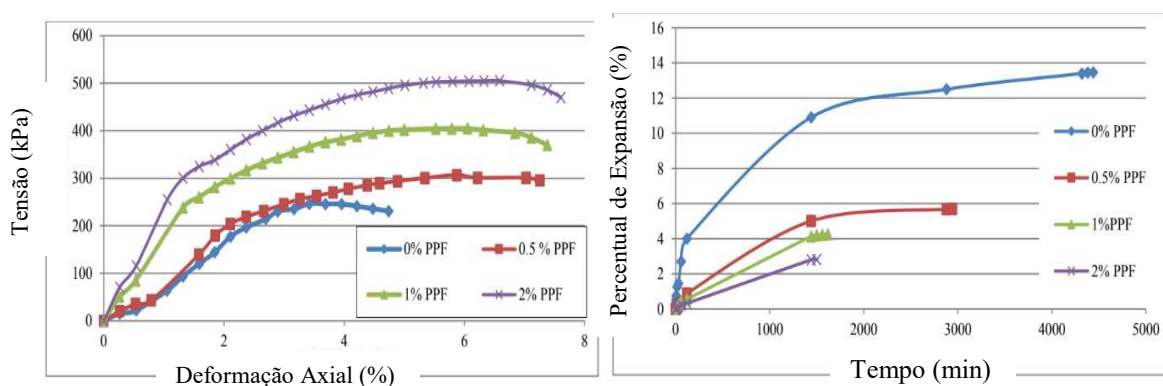
Figura 15 - Variação de umidade ótima e peso específico máximo aparente seco das misturas



Fonte: Fonte: Narani, *et al*. (2019)

Sarah e Hussein (2019), também estudaram o comportamento de um solo expansivo localizado em Bagdá no Iraque reforçado com fibras de polipropileno nos percentuais de 0, 0,5, 1 e 2%. Houve aumento da resistência e diminuição do potencial de expansão com o acréscimo de fibras, o percentual máximo foi de 2%, Figura 16.

Figura 16 - Variação tensão com a deformação axial e potencial de expansão



Fonte: Sarah e Hussein (2019)

2.2.4 Processo de formação de fissuras

Pesquisas sobre o mecanismo de formação e a influência das fissuras no comportamento das argilas expansivas tem aumentado significativamente nos últimos anos, Tang *et al.* (2012) Chaduvula *et al.* (2017), Mandeep e Ayothirama (2019), Narani, *et al.* (2019), Bezerra (2020) e Araújo (2020). Ultimamente, se tem dado bastante atenção aos problemas que ocorrem pela formação de fissuras devido à secagem dos solos, como por exemplo em camadas de cobertura de aterros sanitários e pavimentos rodoviários.

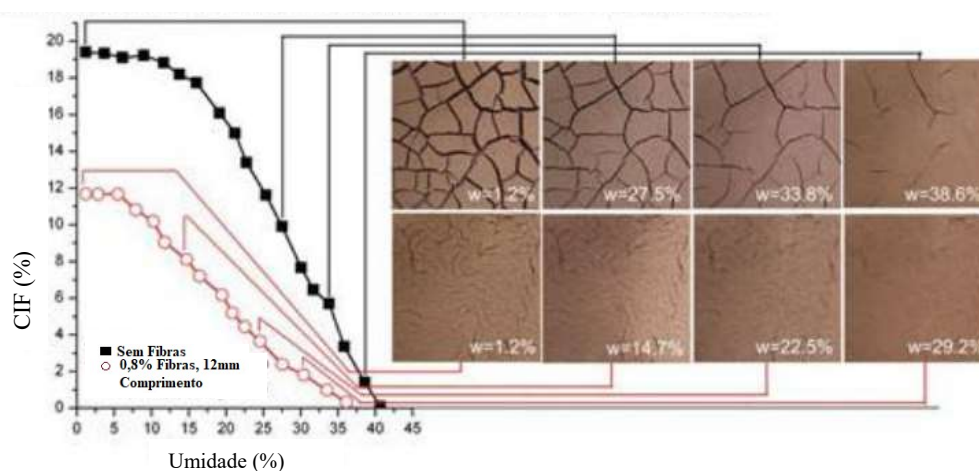
As fissuras em argilas são encontradas no mundo inteiro e, em muitos casos, são catalisadores de vários e inesperados problemas em obras (COTECCHIA e VITONE, *apud* Araújo 2020). Esse é um processo de perda de umidade do solo e que ocasiona a diminuição do seu volume, ou seja, a contração do mesmo. Ao sofrer contração, surge no solo tensões de tração, que a partir de determinado valor, provocam fissuramento até uma certa profundidade.

O início da fissuração ocorre quando a tensão de tração desenvolvida no solo, devido à sucção matricial, excede a resistência à tração do solo uma vez que a fissura é iniciada na superfície do a camada de solo, o topo rachado expõe as camadas subjacentes a condições ambientais adversas causando ciclos alternados de molhar e secar. (Mandeep e Ayothirama, 2019).

Quando uma argila homogênea e completamente saturada é submetida ao ressecamento, tem-se início a evaporação da água superficial. Em geral, o filme de água sobre a superfície evapora primeiro. A Figura 17 mostra o processo de formação de fissuras observado por Tang *et al.* (2012).

Figura 17 - Formação de Fissuras e Umidade

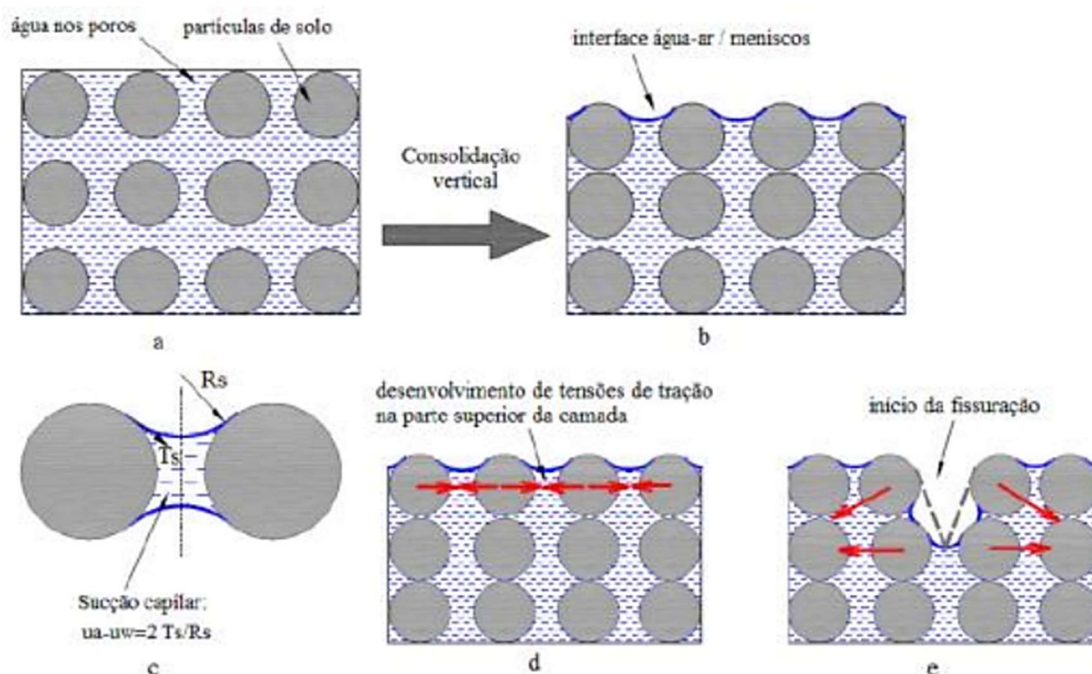
Variação do CIF(%) com umidade, solo natural e o solo reforçado com fibras (Comprimento = 12mm, percentual = 0,8%)



Fonte: Tang, *et al.* (2012)

À medida que a interface água – ar alcança a superfície da camada de solo iniciasse a formação de um menisco (Figura 18a). Dessa maneira, entre essa interface e as partículas de solo, a sucção capilar começa a se desenvolver na parte superior da camada (Figura 18b). Com a continuação da evaporação, a curvatura do menisco capilar aumenta e é acompanhada do acréscimo da sucção capilar e da tensão efetiva entre as partículas de argila. Com isso, a camada de argila se consolida e retrai. Pode-se imaginar que cada partícula da camada superficial sofre a ação de uma força de tração induzida pela sucção capilar desenvolvida entre as partículas vizinhas (Figura 18c), criando um campo de tensões de tração na superfície da camada (Figura 18d). Quando essas tensões ultrapassam a resistência à tração do solo surgem as primeiras fissuras (Figura 18e).

Figura 18 - Processo de formação de fissuras



Fonte: Tang, *et al* (2012)

Costa *apud* Araújo (2020) avaliou comparativamente o desempenho quanto à formação e propagação de fissuras por ressecamento de um silte argiloso, e de misturas deste solo com resíduos da construção civil (RCC) e com fibras de polietileno tereftalano (PET). A relação da área fissurada do solo natural com área total do solo é chamado de fator de intensidade de fissuras (CIF) e a relação do CIF do solo natural com o CIF do solo reforçado é chamado de fator de redução de fissuras (CRR).

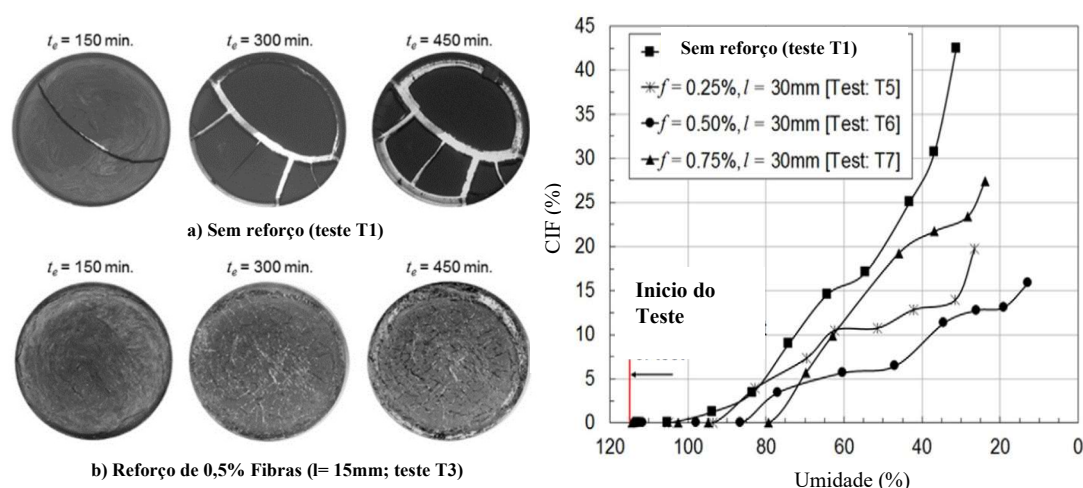
$$CIF\% = (\text{Área Fissurada} / \text{Área Total}) \times 100 \quad (\text{Equação 02})$$

$$CRR = (CIF \text{ não reforçado} - CIF \text{ reforçado}) / CIF \text{ não reforçado} \quad (\text{Equação 03})$$

A evolução das fissuras superficiais foi analisada por Tang *et al.* (2012) utilizando-se a técnica de processamento de imagens e as dimensões das fissuras na superfície foram quantificadas determinando-se o CIF. Os resultados obtidos mostraram que o comportamento quanto ao ressecamento e à formação de fissuras foi significativamente afetado pelos ciclos de umedecimento e secagem e pela adição de materiais alternativos, alterando o padrão de fissuração, retardando a formação de fissuras e reduzindo o fator de intensidade de fissuração, quando comparado ao solo natural.

Chaduvula *et al* (2017) realizaram ensaios de ressecamento em uma argila de Nanded na Índia, com o reforço de fibras sintéticas de PET nas proporções de 0, 0,25, 0,5 e 0,75%. O solo não reforçado apresentou fissuras uniformes, longas e espessas, e o solo reforçado apresentou menos fissuras de menor área fissurada, além do aparecimento de fissuras ter sido retardada, Figura 19.

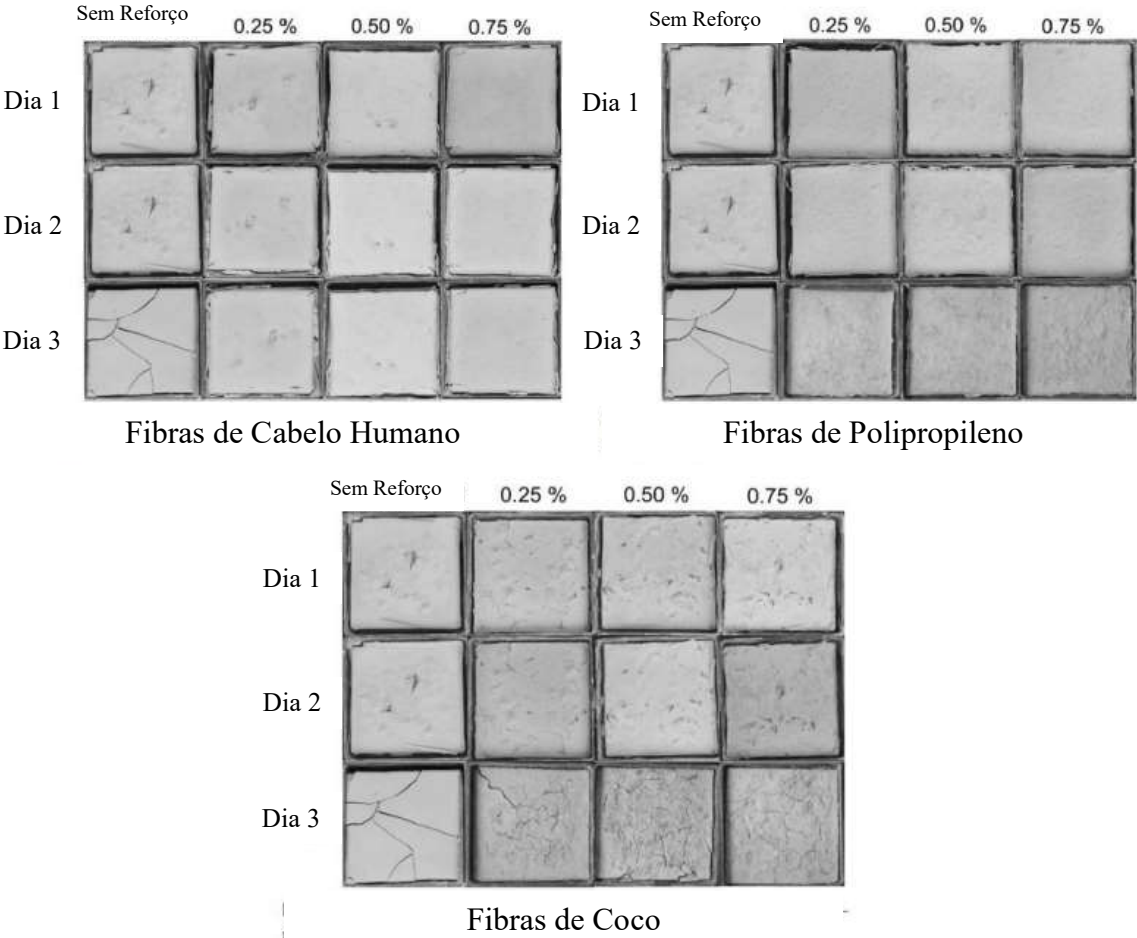
Figura 19 - Variação do CIF para o solo não reforçado (T1) e solo reforçado com fibras (T5, T6, T7) com a umidade.



Fonte: Chaduvula *et al* (2017)

A Figura 20 apresenta resultados da pesquisa dos dados experimentais de ensaios de Mandeep e Ayothirama (2019) com argila expansiva localizada em Nova Deli na Índia reforçado com fibras de Coco, Cabelo Humano e Polipropileno nas proporções de 0, 0,25, 0,5 e 0,75%. As características geométricas e morfológicas das fissuras foram significativamente alteradas pela inclusão aleatória de fibras. Fissuras largas e longas foram observadas no caso de amostra não reforçada, enquanto as amostras reforçadas mostram fissuras curtas e irregulares.

Figura 20 - Evolução das Fissuras nas amostras



Fonte: Mandeep e Ayothirama (2019)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais investigados e o procedimento metodológico empregado no programa de investigação geotécnica de um solo expansivo no município de Paulista-PE, com o objetivo de obter a caracterização física, reológica e hidromecânica do solo natural e de suas misturas com fibras de coco (solo-0,25%Fibra, solo-0,5%Fibra, solo-1%Fibra e solo-2%Fibra).

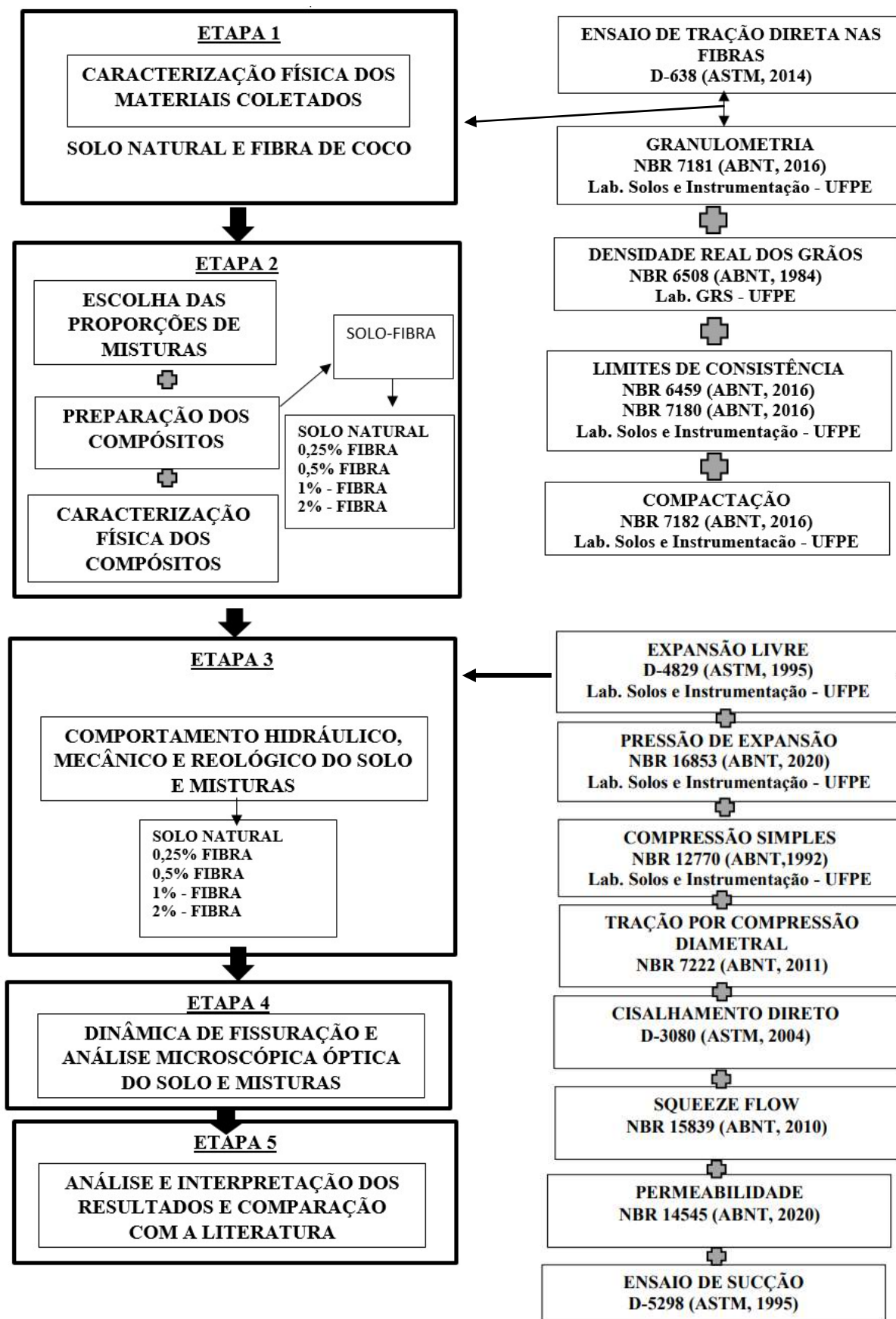
3.1 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O programa de investigação está dividido em 5 etapas. A primeira contempla a preparação do solo e das fibras empregadas na pesquisa, bem como a caracterização física destes materiais a partir de ensaios executados em laboratório, conforme as normas da ABNT e ASTM. A segunda fase está direcionada a escolha dos percentuais de fibras a serem incorporados ao solo, com base nos estudos de Abbaspour *et al.*, (2019), Kodicherla *et al.*, (2019) e Mandeep *et al.*, (2019), a preparação das misturas definidas e a caracterização dos compósitos formados.

Na terceira etapa são realizados ensaios hidráulicos, mecânicos e reológicos no solo natural e nas misturas investigadas. A quarta etapa inclui avaliar a influência das fibras na dinâmica de fissuração e de expansividade, além de realizar uma análise microscópica óptica do solo e misturas. Na quinta e última etapa são desenvolvidas a análise e interpretação dos resultados dos ensaios de laboratório realizados, sendo estes confrontados com a literatura.

O procedimento metodológico adotado pode ser visualizado na Figura 21, que apresenta em fluxo todas as etapas executadas.

Figura 21 - Fluxograma do programa experimental da pesquisa



3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Solo de Paulista/PE

As amostras deformadas do solo expansivo argiloso são provenientes do município de Paulista-PE (Figura 23). O local de pesquisa está situado na estação de tratamento de esgoto da Companhia de Saneamento do Estado de Pernambuco (COMPESA), localizada no bairro do Janga, litoral sul do município de Paulista-PE. A Figura 22 apresenta o local em que foram desenvolvidos os trabalhos experimentais na ETE Janga nas coordenadas UTM: 02996405L; 9123350N. O solo é proveniente do intemperismo físico-químico de argilitos e calcário margoso da Formação Maria Farinha (BASTOS, 1994).

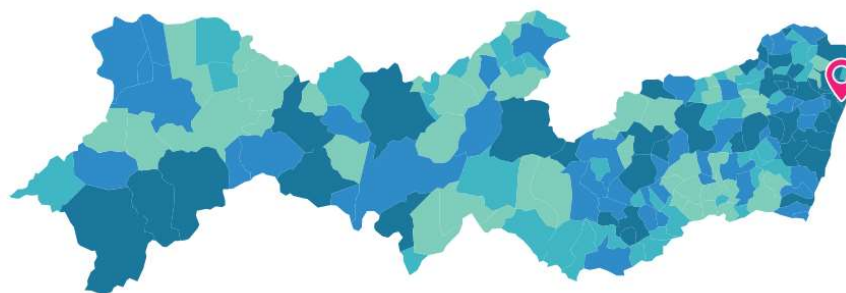
Figura 22 - Local da coleta do solo na ETE-Janga



Fonte: Araújo, 2020

De acordo com o censo 2021 estimado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Paulista ocupa uma área de 97,312 km² tendo uma população estimada em 336.919 habitantes, apresentando a quinta colocação entre os municípios do estado de Pernambuco.

Figura 23 - Localização da cidade de Paulista/PE



Fonte: IBGE, 2021

O estudo do comportamento do solo de Paulista iniciou em 1992. Jucá et al. (1992) analisou o comportamento da argila expansiva através de ensaios laboratoriais e de campo. Em seguida, Bastos (1994) e Justino da Silva (2001) por meio da instrumentação de campo, avaliaram o deslocamento vertical do maciço quando submetido a diferentes condições climáticas, tendo caracterizado a camada ativa do solo até uma profundidade de 3,0 a 3,5 m.

Paiva (2016), Moraes (2017) e Constantino (2018) ampliaram o programa experimental por meio de ensaios de caracterização física, química, mecânica e mineralógica. Paiva (2016), Constantino (2018), Barbosa (2019), Bezerra (2020) e Araújo (2020) realizaram experimentos para analisar o comportamento do solo por meio da adição de cal hidratada, cinza de casca de arroz (CCA), areia e o processo de fissuração.

O solo natural de Paulista tem alta expansividade pelo critério de Vijayvergiya Ghazzaly, ácido (< 7) e a capacidade de troca de cátions é alta ($CTC > 27 \text{ cmol/ kg}$). Há uma interestratificação irregular envolvendo minerais do tipo 2:1 como micas e minerais expansivos (esmectitas e vermiculitas), além da presença de caulinita. A tensão de expansão é alta podendo causar a necessidade de demolição das edificações pelo critério de Jimenez Salas, FERREIRA *et al.*, 2017.

3.2.2 Fibra de coco

As fibras de coco foram fornecidas por uma empresa atuante no ramo de máquinas agrícolas, situada em Fortaleza-CE, fabricada pela usina de beneficiamento da casca do coco (Figura 24). As fibras produzidas são prontas para o uso, porém foi necessário cortá-las, facilitando sua trabalhabilidade, em função da dimensão dos corpos de prova.

Figura 24 - Fibras de Coco



Fonte: Autor, 2022

Nas fibras, além de medir comprimento, diâmetro e peso foi realizado o ensaio de tração direta no laboratório de ensaios mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco DEMEC/UFPE. Este ensaio foi realizado com a caracterização da resistência mecânica à tração direta das fibras de coco in natura ocorreu na prensa universal da Istron - *EMIC* modelo DL 10000, com capacidade de carga de 100kN. Foi utilizado a norma ASTM D638/2014, com velocidade de 1mm/min e célula de carga de 1kN. Como apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Ensaio de tração direta nas fibras de coco



Fonte: Autor, 2022

3.2.3 Misturas Solo – Fibras de Casca de Coco

Os materiais passaram por uma preparação prévia. O solo foi seco ao ar e destorroado, medindo sua umidade higroscópica, posteriormente passado na peneira nº 4 (4,8 mm) para retirada de possíveis grãos com tamanhos maiores, conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016). Nas fibras do coco verde, foi necessário reduzir o seu comprimento. O conteúdo de fibra (ou seja, peso da fibra pelo peso seco do solo) foi escolhido com base nos resultados de Abbaspour *et al.*, (2019). De acordo com este estudo, adotar misturas homogêneas e uniformes com teores de fibra maiores que 4% não são viáveis. A Figura 26 mostra o solo seco ao ar antes do destorroamento e as fibras antes do corte.

Figura 26 - Amostras dos materiais: a) Solo de Paulista/PE, b) Fibras de Coco



Fonte: Autor, 2022

A mistura foi iniciada adicionando 50% do volume total de água destilada ao solo para atingir a umidade desejada. A adesão induzida no solo por esta quantidade de água facilita a distribuição aleatória das fibras (Abbaspour *et al.*, 2019). Adiciona a quantidade designada de fibras (0,25%; 0,5%; 1,00%; 2,00%) junto com a quantidade restante de água. A mistura continua até que esteja uma mistura completamente uniforme de solo e fibras, o diâmetro equivalente das fibras é de 0,3 mm que está entre 0,27 e 0,5 mm, e seu comprimento é de 20 mm que está entre 10 e 30 mm, em acordo as indicações de Abbaspour *et al.*, (2019), Kodicherla *et al.*, (2019) e Mandeep *et al.*, (2019) tendo em vista o diâmetro dos corpos de prova dos ensaios de resistência à compressão usado ser de 50 mm. Devido à natureza orgânica da fibra de coco, não se pode garantir um comprimento exato para todas, havendo uma variação para mais ou para menos, porém procurou-se obter o máximo de homogeneidade possível. As misturas foram mantidas em sacos plásticos impermeáveis por 48 horas para garantir que o teor de água estivesse uniforme em toda a mistura. A Figura 27 apresenta as etapas da preparação do solo e da mistura solo-fibras de coco.

Figura 27 - Preparação das Amostras de solo e das misturas solo – fibra

a) Destorroamento e Peneiramento do Solo, b) Mistura do Solo+Fibra, c) Acondicionamento da mistura e d) Pesagem da Mistura

a) Destorroamento e Peneiramento do solo



b) Mistura do Solo+Fibra



c) Acondicionamento da Mistura



d) Pesagem da Mistura



Fonte: Autor, 2022

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

a) Caracterização Física

Os ensaios de caracterização Física do solo argiloso de Paulista e das misturas de solo-fibra foram: análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, limites de Atterberg e densidade real dos grãos (Figura 28). Foram seguidas as recomendações das normas: Granulometria por peneiramento e sedimentação: ABNT, NBR 7181/2016, Limite de Liquidez: ABNT, NBR 6459/2016, Limite de Plasticidade: ABNT, NBR 7180/2016, Densidade Real dos Grãos: ABNT, NBR 6508/16;

Figura 28 - Ensaios de Caracterização Física do solo e misturas: A) Granulometria por peneiramento, B) Sedimentação, C) Ensaio Casagrande e D) Densidade Real dos Grãos

A) Granulometria por peneiramento



B) Sedimentação



C) Ensaio Casagrande



D) Densidade Real dos Grãos



Fonte: Autor, 2022

Os ensaios de Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez foram realizados sem secagem prévia para evitar a formação de grumos mais resistentes devido à secagem ao ar. A presença de grumos tem importância significativa na homogeneidade das amostras, na análise de fissuras e na interação entre as partículas.

Também foi realizado o ensaio de compactação para determinar os valores da umidade ótima ($W_{ótima}\%$) e do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dmáx}$), de acordo com a ABNT, NBR 7182/2016 (Figura 29).

Figura 29 - Ensaio de Compactação de Solo e Misturas

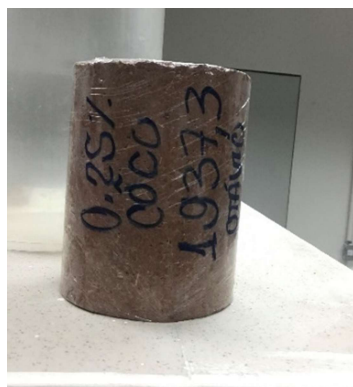


Fonte: Autor, 2022

b) Ensaio de Condutividade Hidráulica

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados para o solo natural e para as amostras preparadas com diferentes teores de fibras com 0,25%, 0,5%, 1% e 2%. Os cinco corpos de provas foram previamente compactados no teor de umidade ótima e densidade seca, correspondente a cada mistura no ensaio de compactação, como apresenta a Figura 30.

Figura 30 - Corpo de prova para ensaio de condutividade hidráulica

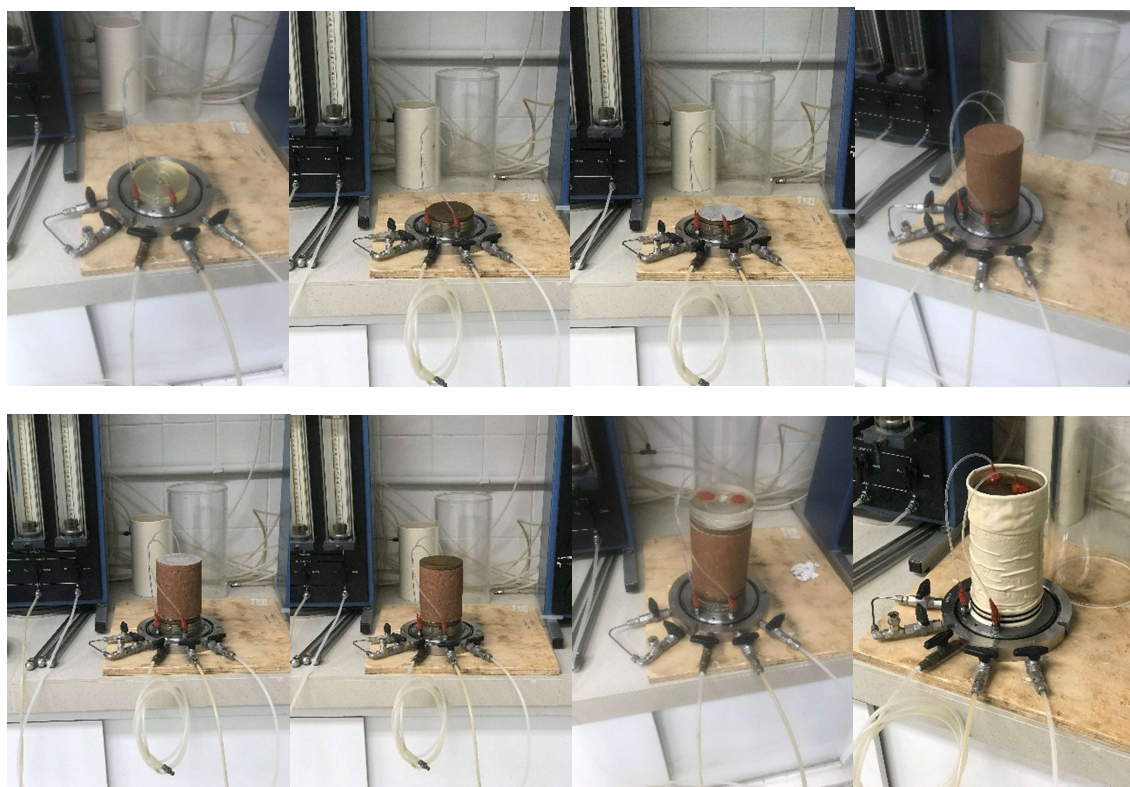


Fonte: Autor, 2022

Foi utilizado para o ensaio os procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 14545/2000 que tem por objetivo a determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável, para este ensaio se utilizou um permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE com amostras de dimensões de 12,7 cm de altura e 10 cm de diâmetro.

As amostras foram preparadas na célula do equipamento na sequência da base até o topo descrita na sequência a seguir: base de acrílico da célula denominada “*bottom cap*”, local de entrada do percolante, pedra porosa, papel filtro, corpo de prova compactado, papel filtro, pedra porosa, tampa de acrílico no topo da amostra denominada “*top cap*” onde foram conectadas as mangueiras de drenagem com o auxílio de silicone adesivo selante tixotrópico monocomponente, antifungo e de cura acética, para devida fixação e vedação. O conjunto foi, então, envolvido por membrana flexível, fixada através de anéis de borracha de seção cilíndrica na base e no topo de acrílico. Com o objetivo de minimizar possíveis variações nos resultados devido essas variáveis citadas foram utilizadas as mesmas pedras porosas em todos os ensaios, na mesma sequência. Na Figura 31 são mostradas imagens em sequência deste procedimento.

Figura 31 - Sequência da montagem da amostra para realização do ensaio de condutividade hidráulica no equipamento Tri-flex da Soil Test – ELE



Fonte: O autor, 2022

A amostra foi colocada na célula do equipamento e assim foi isolada do ambiente externo com a instalação de uma câmara de acrílico com base e tampa metálica, à amostra foi preenchido com água potável até total preenchimento para possibilitar o confinamento do corpo de prova (ver Figura 32), sendo verificada a inexistência de bolhas de ar na superfície.

Figura 32 - Célula montada para realização do ensaio de condutividade hidráulica



Fonte: O autor, 2022

Depois foi realizada a remoção de ar das pedras porosas e das tubulações utilizando água destilada até que não fosse verificado a presença de bolhas de ar. Em seguida, foi iniciado o processo de saturação do corpo de prova, utilizando para verificação da saturação do corpo de prova quando a mensuração do volume de água que entra pela base da amostra é igual ao volume que sai pelo topo, com aplicação de uma tensão confinante de 220 kPa na parede da membrana flexível, 200 kPa na base da amostra e 200 kPa no topo, parâmetros utilizados até concluir o processo de saturação. É a partir da saturação do corpo de prova, que é realizado o ensaio de condutividade hidráulica.

Para determinação do coeficiente de condutividade hidráulica das amostras foi aplicado uma tensão confinante de consolidação de 220 kPa, manteve-se a tensão de 200 kPa na base da amostra e uma redução da pressão no topo da amostra para 50 kPa gerando um gradiente hidráulico de 150 kPa para percolação da água no sentido vertical e ascendente das amostras. Em seguida foram realizadas as medições do volume percolado com o tempo. Os ensaios foram repetidos por três vezes para cada amostra, considerando a média aritmética das medições do volume percolado com o tempo para determinar o coeficiente de condutividade hidráulica saturado das amostras. (Equação 4).

$$k_h = \frac{h \cdot V_p}{t \cdot Ab \cdot \Delta p}$$

Equação (4)

Onde:

k_h : coeficiente de condutividade hidráulica saturada à água (m/s);

h : altura do corpo de prova (m);

V_p : volume percolado (m³);

t : tempo de percolação (segundos);

Ab : área da base do corpo de prova (m²);

Δp : gradiente de pressão aplicado entre a base e o topo do corpo de prova (m).

c) Ensaio do *Squeeze-flow*

O ensaio do *squeeze-flow*, foi executado seguindo a NBR 15839:2010. Foi utilizada uma prensa eletromecânica com velocidade de deslocamento controlada, produzido pela Indústria e Comércio Ronald Top LTDA, com utilização de anéis dinamométricos de 10000 N com constante 0,585 kgf div⁻¹ e 1000 N com constante de 0,505 kgf div⁻¹ da marca Digimess e extensômetros da marca Mitutoyo com sensibilidade de 0,01 mm. A velocidade do ensaio foi de 0,04 mm/s e deslocamento máximo de 8 mm. Foram construídos e utilizados equipamentos para auxiliar na moldagem e garantir a centralização da amostra, foram utilizados os seguintes equipamentos: (a) Gabarito de madeira, (b) placa superior, (c) anel para moldagem com diâmetro interno de 100,2 mm e altura de 10 mm, (d) placa de suporte para nivelamento, (e) Espátula e (f) Placa inferior de metal. A Figura 33 mostra as ferramentas utilizadas no ensaio.

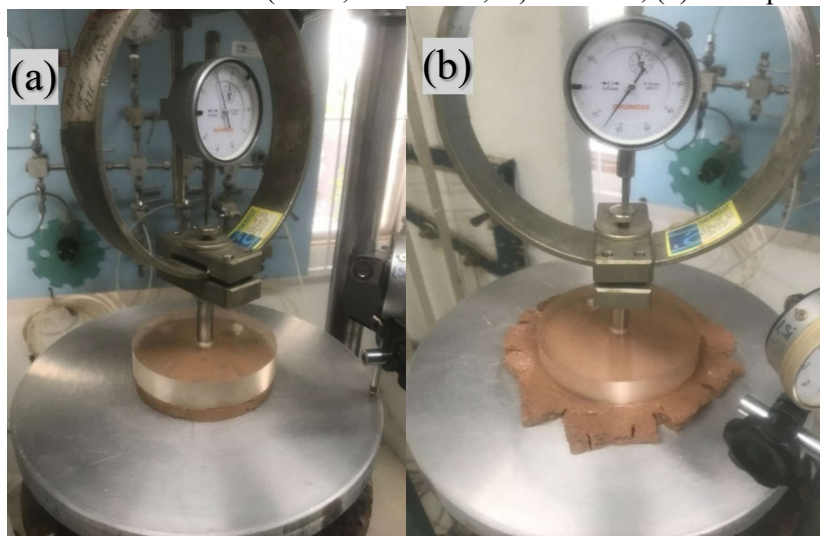
Figura 33 - Ferramentas utilizadas para moldagem de amostras do ensaio squeeze-flow
 a) Gabarito de madeira, (b) placa superior, (c) anel, (d) placa de suporte, (e) espátula e
 (f) Placa inferior de metal.



Fonte: Autor, 2022

Foi calculada a massa de solo necessária para preencher o anel de moldagem, mantendo o índice de vazios constante e igual a 1,31 para todas as amostras ensaiadas, para facilitar a moldagem destas amostras na placa. Foram realizados ensaios *squeeze-flow* nas amostras de solo natural, solo+0,25%Fibra, solo+0,5%Fibra, solo+1%Fibra e Solo+2%Fibra, nas umidades dos ensaios do limite de liquidez e limite de plasticidade do solo natural e das respectivas misturas. A amostra de solo foi colocada sobre a placa inferior utilizando o anel de moldagem e o gabarito. Com o auxílio da espátula, coloca-se uma quantidade do material dentro do molde e faz o preenchimento uniforme. Retira-se o gabarito e em seguida o anel de moldagem. Faz o transporte da placa inferior com a amostra centralizada para a balança para garantir o índice de vazio constante, em seguida o conjunto é levado para a máquina do ensaio e acopla a placa sobre a base. Após calibração do anel de carga e do extensômetro que medirá deslocamento, o ensaio foi iniciado. Os corpos de prova de uma das amostras no início do ensaio e no final são mostrados na Figura 34.

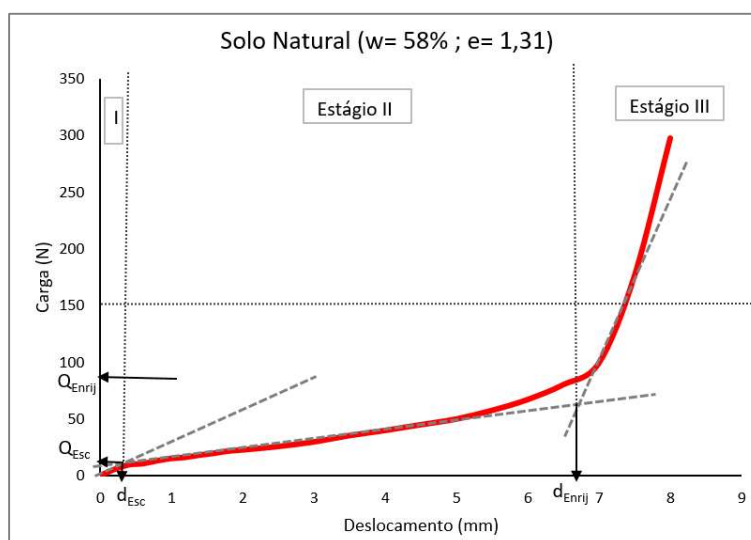
Figura 34 - (a) Amostra solo natural ($w=52,56\%$ e $e=1,31$) no início; (b) solo após ensaio



Fonte: Autor, 2022

Com a curva carga versus deslocamento (Ver Figura 35) os três estágios do comportamento reológico foram aqui definidos pela mudança de comportamento da interação entre as partículas. O final do Estágio I e início do Estágio II é caracterizado pela carga de escoamento (Q_{Esc}) e o deslocamento de escoamento (d_{Esc}). O final do Estágio II e início do Estágio III é caracterizado pela carga inicial de enrijecimento (Q_{Enrij}) e o deslocamento de inicial de enrijecimento (d_{Enrij}). O final do Estágio III é considerado o final do ensaio (no caso para deslocamento de 8 mm, valor máximo adotado para o deslocamento já que o anel de moldagem tinha 10 mm de altura).

Figura 35 - Curva carga *versus* deslocamento com três estágios do comportamento reológico.



Fonte: Autor, 2022

d) Ensaios para Caracterização da Expansão

Para a caracterização da expansão do solo natural e misturas solo-fibras, foram utilizados ensaios edométricos com células convencionais para os ensaios de expansão livre e tensão de expansão a volume constante. Os corpos de prova das amostras de solo natural e misturas solo-Fibras foram compactados na umidade ótima ($W_{ótima}\%$) e peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dmáx}$), obtidos do ensaio de compactação, moldados em anéis nas amostras de solo natural, solo+0,25%Fibra, solo+0,5%Fibra, solo+1%Fibra e Solo+2%Fibra e inseridos nas células convencionais de ensaios edométricos, após a moldagem da amostra no anel metálico, foi feita a montagem da aparelhagem na base da célula de adensamento, na ordem a seguir: pedra porosa inferior, papel filtro, conjunto amostra-anel, papel filtro, pedra porosa superior e cabeçote metálico (top cap); Figura 36.

Figura 36 - Sequência de montagem de corpo de prova para ensaios de expansão



Fonte: Autor, 2022

As variações de altura dos corpos-de-prova foram medidas com o uso de extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm. Todos os ensaios foram executados com anéis metálicos com dimensões igual a 82,5 mm de diâmetro e 20 mm de altura, ou seja, as amostras tinham relação diâmetro/altura superior a 2,5.

d.1) Ensaio de Expansão “Livre”

A execução dos ensaios de Expansão “Livre” ocorreu em células edométricas convencionais, seguindo os procedimentos das Normas ASTM D4829/95 e ABNT, NBR 12007/90. Após a compactação dos corpos de prova, os mesmos foram talhados em anéis de aço inoxidável de diâmetro 87,4 mm e altura 20 mm. Com a amostra moldada no anel, o mesmo era inserido na prensa de adensamento, adicionado água e realizadas as leituras das variações de espessura de cada amostra. As leituras eram realizadas durante o intervalo de 48 horas e foi utilizada uma sobrecarga de 7 kPa.

Figura 37 - Ensaio de Expansão “Livre”



Fonte: Autor, 2022

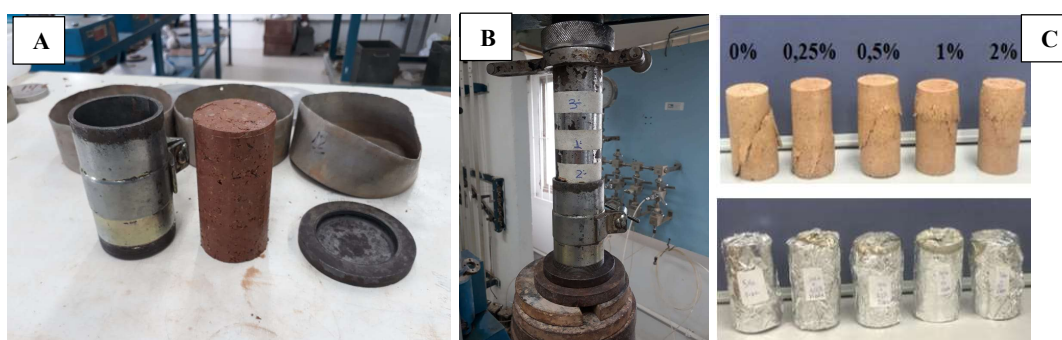
d.2) Ensaios de Tensão de Expansão

A tensão de expansão das amostras de solo natural e misturas solo-fibras foi obtida através do método Volume Constante de acordo com a norma da ABNT NBR16853/2020. O método consiste em inundar o corpo de prova quando o mesmo já estiver na prensa de adensamento, à medida que apresentar expansão e variar de volume, é adicionada uma sobrecarga com o intuito de inibir essa variação de volume. O acréscimo de carga foi realizado até a estabilização da amostra e ao final do ensaio eram somadas as sobrecargas aplicadas, onde as mesmas são consideradas a tensão de expansão do solo.

e) Ensaios de Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral

Os ensaios de compressão simples e diametral teve como base a Norma da ABNT NBR 12770/1992, os corpos de prova foram moldados em três camadas mediante compactação estática. Os corpos de prova eram moldados em um cilindro tripartido de bronze com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, utilizando os resultados do ensaio de compactação onde obtive-se o peso específico aparente seco ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótima ($W_{\acute{o}tima\%}$) do solo e misturas. Após a compactação de cada camada, era realizada a escarificação da superfície afim de garantir a aderência à próxima camada, foi aplicada vaselina na parte interna do cilindro para facilitar a retirada do corpo de prova após a moldagem. Ao final da compactação, os corpos de prova foram pesados e registradas suas alturas e diâmetros com auxílio de um paquímetro. Após a compactação, o corpo de prova era desmoldado e realizado o ensaio após 48 horas. Para os tempos de equalização de umidade de 48 horas, os corpos de prova eram protegidos por papel filme e papel alumínio, devidamente identificados e armazenados em recipiente com umidade constante (Figura 38).

Figura 38 – a) Moldagem de corpos de prova; b) Compactação; c) Ruptura ensaios de compressão

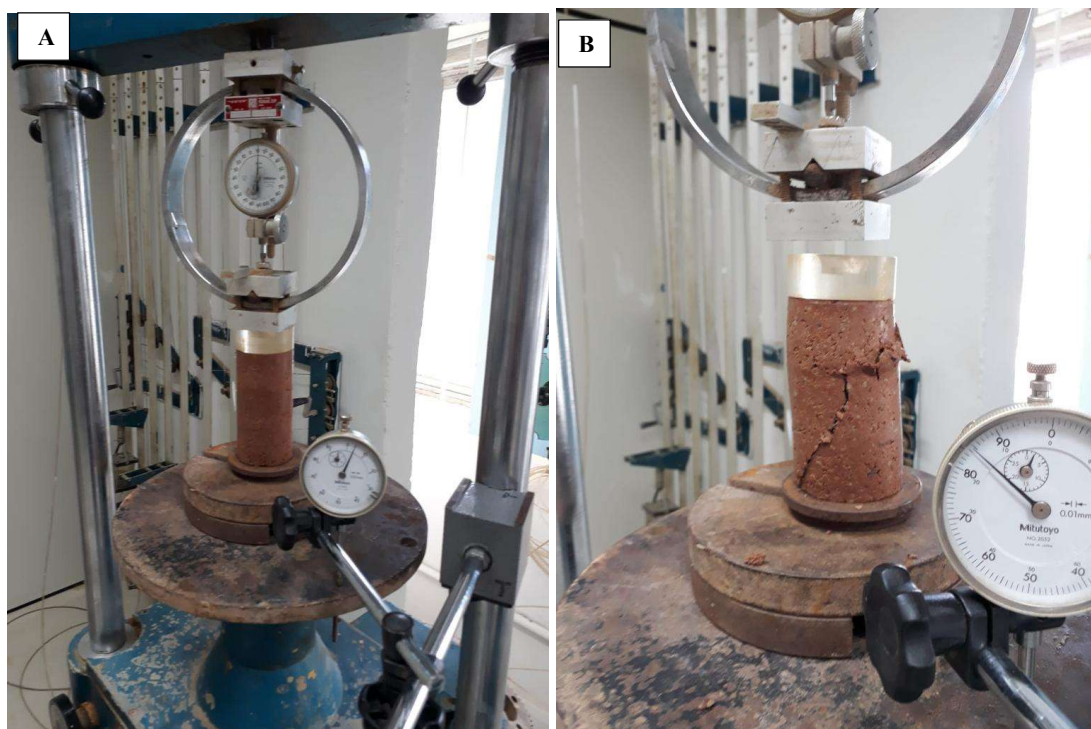


Fonte: Autor, 2022

e.1) Ensaio de Compressão Simples

Os ensaios de compressão simples foram realizados com base a Norma da ABNT NBR 12770/1992, foram moldados dois corpos de prova para cada amostra. Após moldados, os corpos de prova foram pesados e colocados na prensa de compactação. Foi utilizada uma prensa eletromecânica com velocidade de deslocamento controlada, produzido pela Indústria e Comércio Ronald Top LTDA. Com anel dinamométrico de 5kN com constante $0,12 \text{ kgf div}^{-1}$ da marca Digimess e extensômetro da marca Mitutoyo com sensibilidade de 0,01 mm e velocidade de 0,49 mm/min. A resistência à compressão de cada mistura foi obtida através da média aritmética das amostras ensaiadas.

Figura 39 - Ensaio de compressão simples. A) durante ensaio e B) após Ensaio



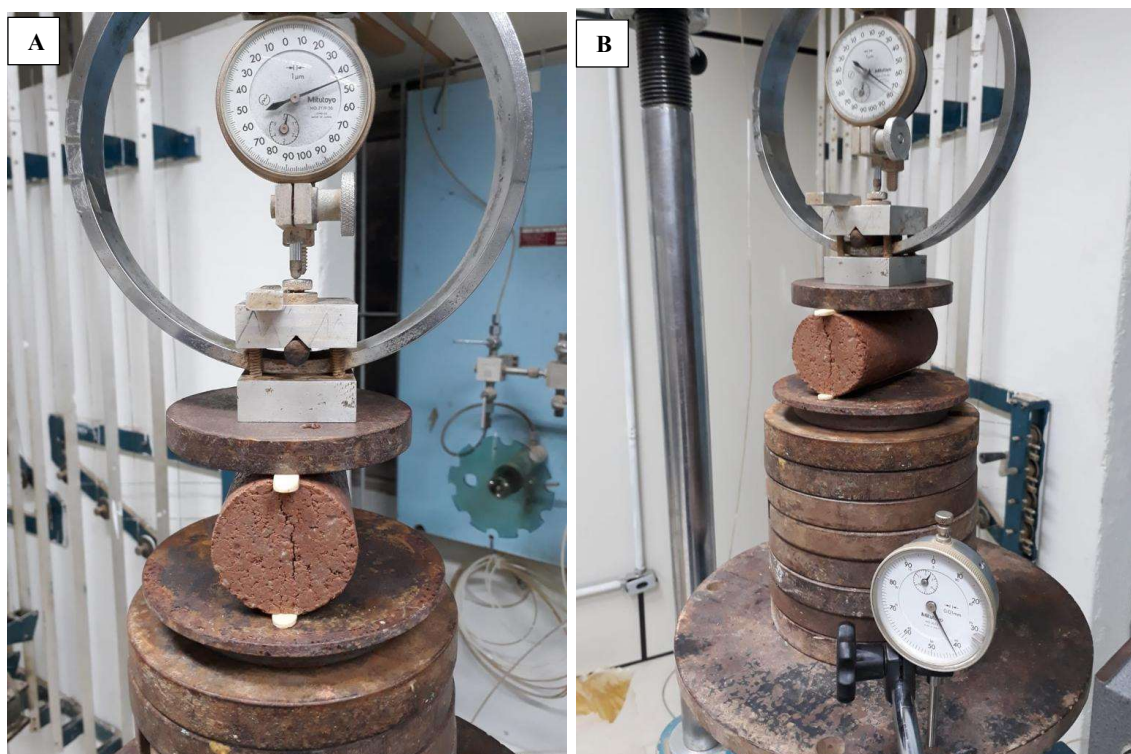
Fonte: Autor, 2022

e.2) Ensaio de Tração por Compressão Diametral

Foi utilizada a norma NBR 7.222/2011, uma vez que não existe uma normatização desse ensaio para solos. Esse ensaio consiste em uma compressão diametral de uma amostra cilíndrica colocada longitudinalmente entre os pratos de uma prensa de compressão simples, em contato com frisos superior e inferior para melhor distribuição da carga.

Os corpos de prova foram moldados e levados à prensa para execução do ensaio, foi utilizada uma prensa eletromecânica com velocidade de deslocamento controlada, produzido pela Indústria e Comércio Ronald Top LTDA. Com anel dinamométrico de 5kN com constante $0,12 \text{ kgf div}^{-1}$ da marca Digimess e extensômetro da marca Mitutoyo com sensibilidade de $0,01 \text{ mm}$ e velocidade de $0,49 \text{ mm/min}$. A resistência à tração pela compressão diametral de cada mistura foi obtida através da média aritmética das amostras ensaiadas.

Figura 40 - Ensaio de Compressão Diametral. A) durante ensaio e B) após Ensaio



Fonte: Autor, 2022

f) Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo natural e as misturas com os diferentes teores de fibras analisados foram obtidos através do ensaio de cisalhamento direto, conforme descrito na norma ASTM D3080 (ASTM, 2004). O ensaio teve o intuito de determinar a influência da adição de fibra de coco nas curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, deslocamento vertical versus deslocamento horizontal e nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, intercepto de coesão (c) e no ângulo de atrito (Φ), em relação ao solo natural. Os corpos de prova eram moldados em duas camadas de uma caixa quadrada de cisalhamento com 10,10 cm de lado e com altura de 4,3 cm, utilizando os resultados do ensaio de compactação onde encontramos o $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e $W_{\acute{o}tima}$ (%) do solo e misturas. Após a compactação de cada camada, era realizada a escarificação da superfície afim de garantir a aderência à próxima camada. Na Figura 41 são apresentadas imagens ilustrando estes procedimentos.

Figura 41 - Moldagem das amostras na caixa de cisalhamento direto



Fonte: Autor, 2022

O equipamento utilizado para o cisalhamento das amostras consistiu em uma prensa de cisalhamento direto com sistema de aplicação de tensão normal constituído de pesos em pendural. As leituras dos deslocamentos verticais e horizontais foram realizadas utilizando extensômetros da marca Mitutoyo com sensibilidade de 0,01 mm e a força horizontal foi lida através de um anel dinamométrico da marca Digimess de constante de $0,16 \text{ kgf div}^{-1}$ e capacidade de 5kN.

Os corpos de prova foram moldados em condições de umidade ótima do solo e das misturas e não inundadas (Figura 42). Este procedimento teve o intuito de avaliar o comportamento da resistência ao cisalhamento do solo e das misturas na umidade ótima. Na condição não inundada as etapas de confecção dos corpos de provas, moldagens e cisalhamento direto das amostras foram realizadas ambas no mesmo dia, tendo em vista que com o passar do tempo as amostras perdem umidade para o meio.

Figura 42 - Amostras para realização do ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Autor, 2022

Foram aplicadas tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa. As mesmas foram mantidas até a estabilização dos deslocamentos verticais. Com o intuito de padronizar os ensaios a compressão foi mantida até ser verificado uma leitura constante do valor de deslocamento vertical, sendo estas acompanhadas através do sensor de leitura vertical do equipamento de cisalhamento. Após a fase de consolidação, o processo de cisalhamento propriamente dito dos corpos de prova era iniciado o cisalhamento dos corpos de prova para cada tensão normal aplicada foi realizado com velocidade constante de 0,038 mm/min de forma que o deslocamento horizontal da caixa de cisalhamento correspondesse a 15 mm em quase 7 horas de ensaio.

g) Avaliação do processo de formação e propagação de fissuras

São apresentados os procedimentos adotados para avaliar o processo de fissuração e propagação de fissuras através da realização de ensaios de fissuração por ressecamento no solo natural e nas misturas solo-0,25%Fibra, solo-0,5%Fibras, solo-1%Fibra e solo-2%Fibra.

g.1) Equipamentos e procedimentos utilizados

O equipamento desenvolvido no Laboratório de Solos Não Saturados da UFPE, Ferreira *et al.* (2019) permitiu o monitoramento das amostras de solo submetidas à secagem, onde a temperatura e umidade relativa são monitoradas com o auxílio de um termo higrômetro, como também o peso do conjunto (amostra + placa) que foi registrado com uma balança de precisão 0,01g (Figura 43).

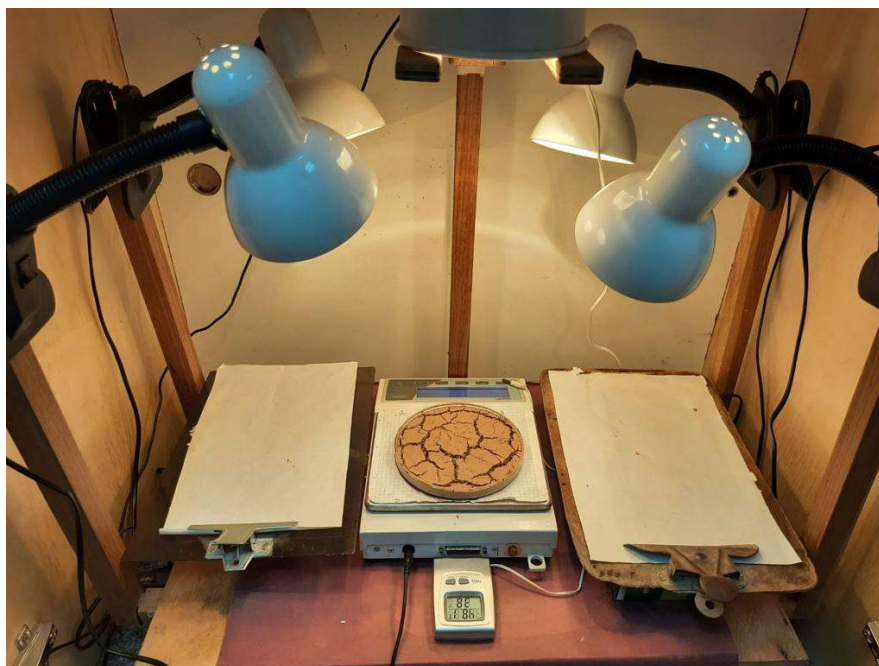
Figura 43 - Placas petri utilizadas na pesquisa



Fonte: Autor, 2022

Foi utilizado um aparato de madeira, o qual possui uma base com cinco hastes que servem de apoio para a balança, luminárias e webcam. Além disso, foi confeccionada uma caixa de madeira para envolver o aparato, com a finalidade de estabilizar a temperatura ambiente ao longo do ensaio. Um termo higrômetro digital do fabricante Inconterm foi instalado dentro do aparato e próximo as amostras para monitorar a temperatura e umidade relativa do ar durante a realização do ensaio. A Figura 44 ilustra o aparato utilizado e o posicionamento dos equipamentos.

Figura 44 - Aparato do ensaio do processo de formação de fissuras.



Fonte: Autor, 2022

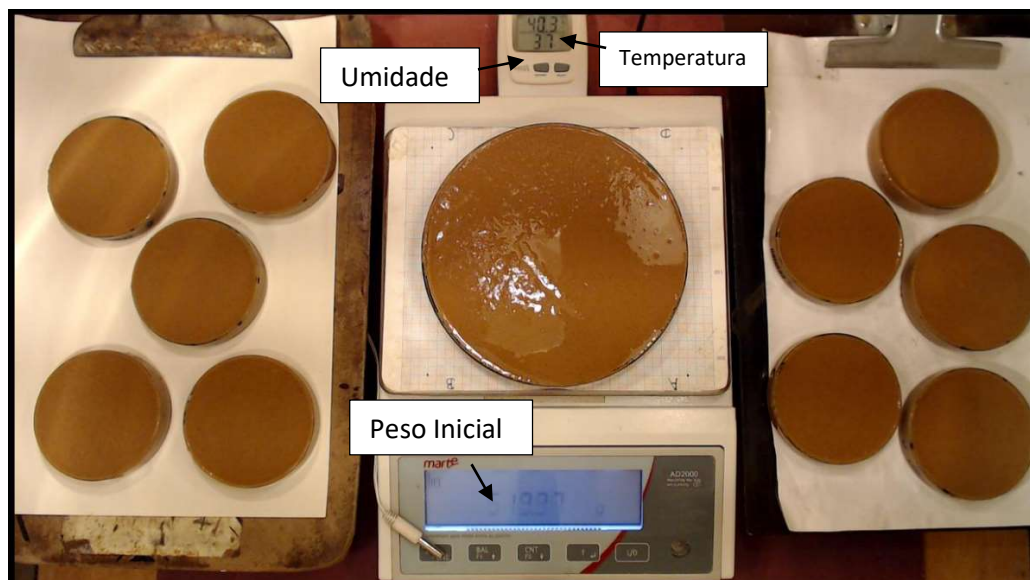
Para as secagens das amostras foram utilizadas cinco lâmpadas incandescentes de 40 W direcionadas para a balança/amostra ensaiada, posicionadas a uma altura de 25 cm da amostra. Todos os ensaios foram monitorados com o auxílio de um webcam localizado no aparato de madeira, a uma altura de 45 cm.

Foram realizados ensaios para analisar a propagação de fissuras nas amostras de solo natural, solo+0,25% Fibra; solo+0,5% Fibra; Solo+1% Fibra e solo+2% Fibra. Todos seguiram o mesmo procedimento de preparação e moldagem (Figura 45). O solo foi misturado com água de forma gradual até chegar a umidade estabelecida. As amostras de solo natural e misturas foram preparadas com umidade próxima a 1,1 vezes o Limite de Liquidez do solo e das misturas. A pasta de solo foi derramada em placas Petri de vidro e pequenos golpes foram dados na borda para remover as bolhas de ar. A superfície da amostra foi nivelada com uma régua para obter uma uniformização. Uma quantidade de solo foi retirada para determinar a umidade inicial.

Após a moldagem, a placa Petri de 146 mm de diâmetro e 15 mm de altura era colocada em cima de uma balança de precisão com sensibilidade de 0,01 g e anotava-se o peso inicial (Figura 45). Essa placa com o solo permanecia, durante todo o ensaio, sobre a balança. Isso permitia a obtenção do peso do conjunto em tempo real, possibilitando a determinação da umidade do solo em qualquer instante. Ao término do ensaio, parte da

amostra de solo era destinada para a obtenção da umidade final pelo método da estufa. Placas menores também foram colocadas dentro do aparato, porém fora da balança para determinação da sucção.

Figura 45 - Início do ensaio de formação de fissuras para a amostra Solo Natural



Fonte: Autor, 2022

Durante o ensaio, as amostras foram monitoradas para obtenção de características relevantes, como o início da primeira fissura, largura média das fissuras, número de segmentos de fissuras, CIF (fator de intensidade de fissuras) e CRR (relação do CIF do solo natural com o CIF do solo reforçado). Para isso, foram tiradas fotografias a cada 10 minutos para serem usadas no processo de análise de imagem. A partir das imagens obtidas verificou-se a formação de fissuras sobre a superfície de cada amostra ensaiada, Figura 46.

Figura 46 - Fim do ensaio de formação de fissuras para a amostra solo natural



Fonte: Autor, 2022

g.2) Coleta e análise das de imagens

Para acompanhar o processo de formação de fissuras, as imagens foram obtidas por meio de uma *webcam Logitech C922 PRO STREAM Full HD* ligada a um notebook. Através do *software* livre *Auto Screenshot Capture* foi possível controlar a captura automática de imagens por um tempo predeterminado de 10 min.

Após a realização dos ensaios, foi feito o processo de seleção das imagens a ser utilizadas para o cálculo dos índices estabelecidos. Como padrão, foi feita a escolha das imagens correspondente a uma variação aproximada de 5% de umidade. A análise de imagens foi realizada no *software ImageJ.exe* o que permitiu realizar comparações entre os padrões de fissuração das amostras ensaiadas, determinar o tempo para o surgimento das primeiras fissuras e calcular diversos índices geométricos, como o CIF e o CRR.

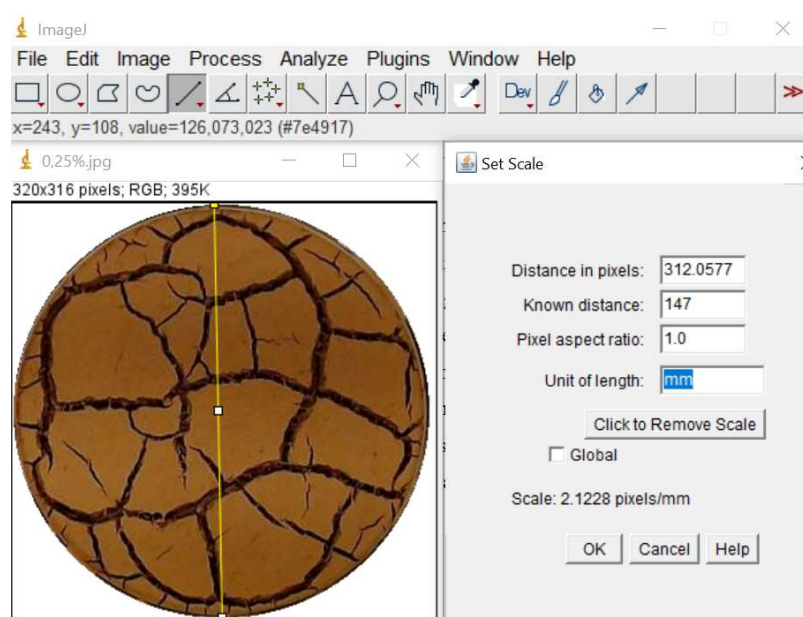
Figura 47 - Coleta e análise das imagens



Fonte: Autor, 2022

Após a seleção das melhores imagens nas unidades desejadas, foi iniciado o procedimento de análise para obtenção dos diversos índices necessários para avaliação do processo de fissuração. Inicialmente foi feita a calibração da escala de acordo com o diâmetro da placa Petri. Na barra de ferramentas utilizou-se a linha (*Straight*) para medir o diâmetro na imagem. Em seguida, no menu *Analyze* e com o comando *Set Scale* inseriu-se o valor do diâmetro em *Known distance*. A escala vai calcular automaticamente quantos pixels existem para cada unidade de medida na imagem. (Figura 48)

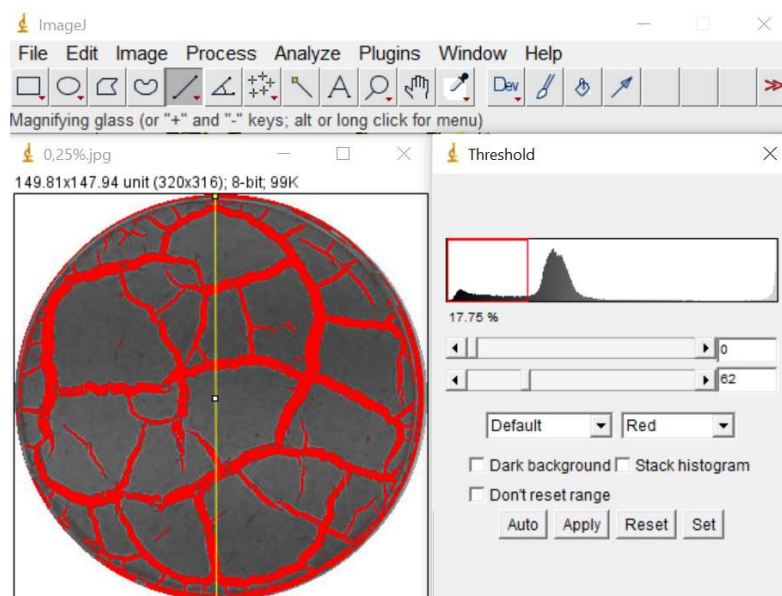
Figura 48 - Medição do diâmetro na imagem



Fonte: Autor, 2022

Após este procedimento deve-se binarizar a imagem dentro do menu *image>type>8-bit*, posteriormente através do menu *Image> Adjust> Threshold* para mensurar a área fissurada dando o polimento na imagem. (Figura 49)

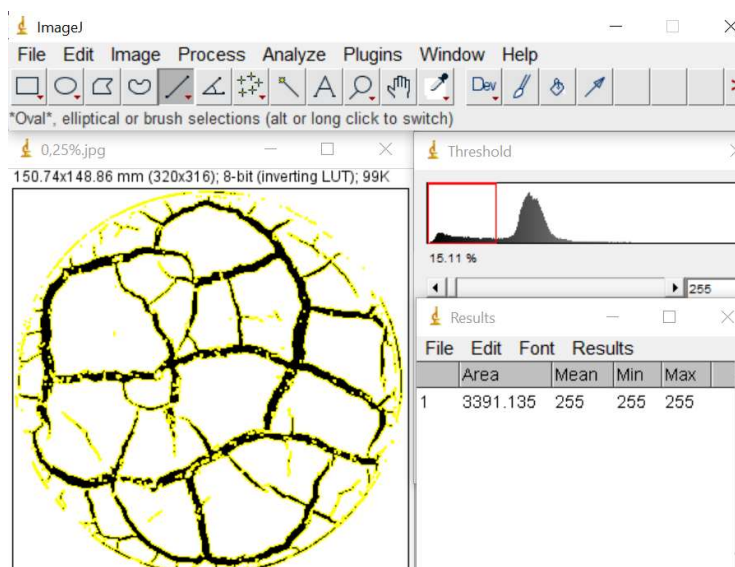
Figura 49 - Binarização da imagem



Fonte: Autor, 2022

A Figura 50 mostra a obtenção da área fissurada através do software ImageJ. Foi utilizado o comando *Create Selection* dentro do menu *Edit>Selection* para que fosse selecionada toda a área fissurada, posteriormente selecionou o menu *Analyze e Measure* para calcular a área fissurada. Com a área fissurada é possível calcular o valor do CIF, que é a área fissurada dividida pela área inicial da amostra.

Figura 50 - Obtenção da área fissurada através do software ImageJ



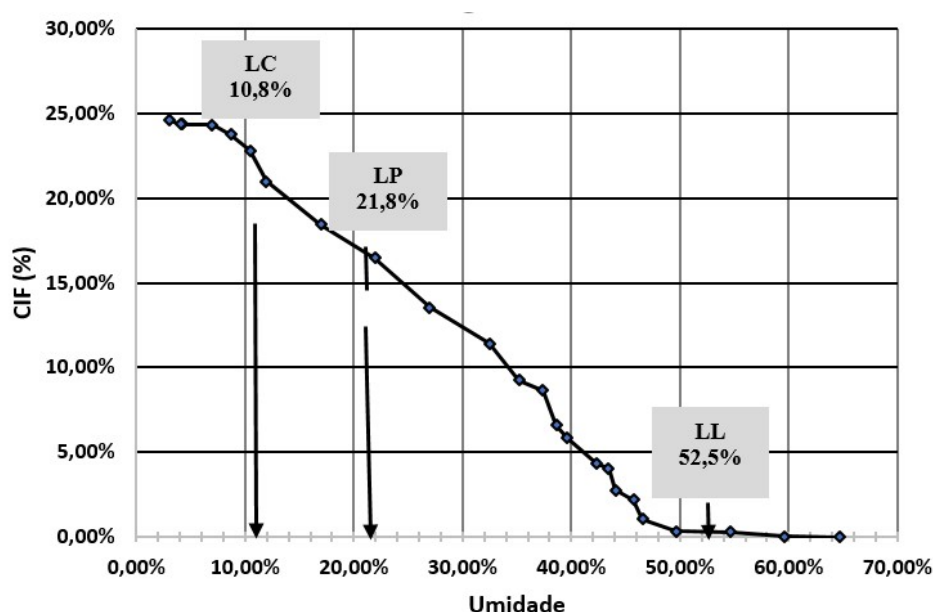
Fonte: Autor, 2022

Na Figura 51 apresenta a análise do processo de formação de fissuras do solo natural, na medida que o solo começa a perder umidade e alcança seu limite de liquidez começa o seu processo de fissuração, após o limite de plasticidade e bem próximo do limite de contração o solo não mais fissura apenas perde umidade com o tempo. O CIF é calculado pela Equação 5.

$$CIF(\%) = \frac{A_f}{A_t} \times 100 \quad \text{Equação (5)}$$

Onde: A_f = Área Fissurada
 A_t = Área Total

Figura 51 - CIF versus Umidade para amostra na condição natural



Fonte: Autor, 2022

g.3) Ensaios para determinação da curva de retenção de água

Placas menores também foram colocadas dentro do aparato, porém fora da balança para determinação da sucção. A sucção total do solo e das misturas foi medida por meio da técnica de papel filtro durante o processo de fissuras. As curvas de retenção de água das misturas com os diferentes teores de fibras foram obtidas através do ensaio de papel filtro, seguindo as diretrizes estabelecidas na norma ASTM D5298 (ASTM, 2010). Buscou-se avaliar a influência da adição de fibras de coco na retenção de água do solo estudado. A curva de retenção de água foi construída através da secagem das amostras e o papel filtro utilizado foi o modelo *Whatman* nº 42. Partindo da condição saturada as amostras foram secadas, no aparato de formação de fissuras, sendo que a cada secagem de 5% de umidade gravimétrica eram retiradas as placas menores e colocados papéis

filtros em contato direto com amostras para determinação da sucção matricial correspondente ao conteúdo de água na amostra.

Após esta etapa, as amostras com os papéis filtros foram envolvidos em camadas de papel filme plástico (PVC) e papel alumínio. Foi adotado um período de equalização de umidade do conjunto amostra-papel de 7 dias. Durante este período as amostras foram conservadas em uma caixa de isopor. Após o tempo de equalização, os papéis filtros de cada amostra foram retirados com auxílio de uma pinça metálica, e imediatamente colocou-se em uma balança de precisão de 0,0001g para determinação do peso úmido do papel. Em seguida, os papéis filtros e parte do solo úmido foram pesados e colocados em cápsulas e levados a secagem em estufa à 100°C por 24 horas. Posteriormente, foram pesados para determinação do teor de umidade do solo e das misturas no equilíbrio (Figura 52).

Figura 52 - Determinação da sucção das amostras



Fonte: Autor, 2022

A sucção matricial correspondente aos diferentes teores de umidade das amostras foi calculada utilizando o teor de umidade dos papéis filtros a partir das equações 6 e 7, proposta por Chandler et al. (1992).

$$\psi = 10^{6,05 - 2,48 \cdot \log(wp)}, \quad wp > 47\% \quad \text{Equação (06)}$$

$$\psi = 10^{4,84 - 0,0622 \cdot wp}, \quad wp \leq 47\% \quad \text{Equação (07)}$$

Onde:

wp: é a umidade do papel filtro em percentagem;

ψ : é a sucção em kPa.

As curvas de retenção de água das diferentes misturas foram plotadas a partir da relação entre a sucção matricial versus umidade volumétrica das amostras. Para melhor visualização da curva de retenção de água do solo natural e das misturas foram realizados ajustes utilizando a equação 8, proposta por van Genuchten (1980).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (a\psi^n)^m]} \quad \text{Equação (08)}$$

Onde:

θ : é a quantidade de água expressa em umidade volumétrica em %;

θ_r : é teor de umidade volumétrica residual em % obtido experimentalmente;

θ_s : é o teor de umidade volumétrica de saturação em % obtido experimentalmente;

ψ : Sucção em kPa;

a e n: são parâmetros de ajuste da curva.

m: $1 - 1/n$

Os ajustes das curvas de retenção de água foram realizados utilizando o software Excel a partir de uma estimativa inicial dos parâmetros a e n do modelo. Em seguida, foram calculados os desvios entre os valores de umidade volumétrica medidos em laboratório e os valores de umidade volumétrica obtidos pelo modelo de van Genuchten (1980) para a estimativa de inicial de a e n.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

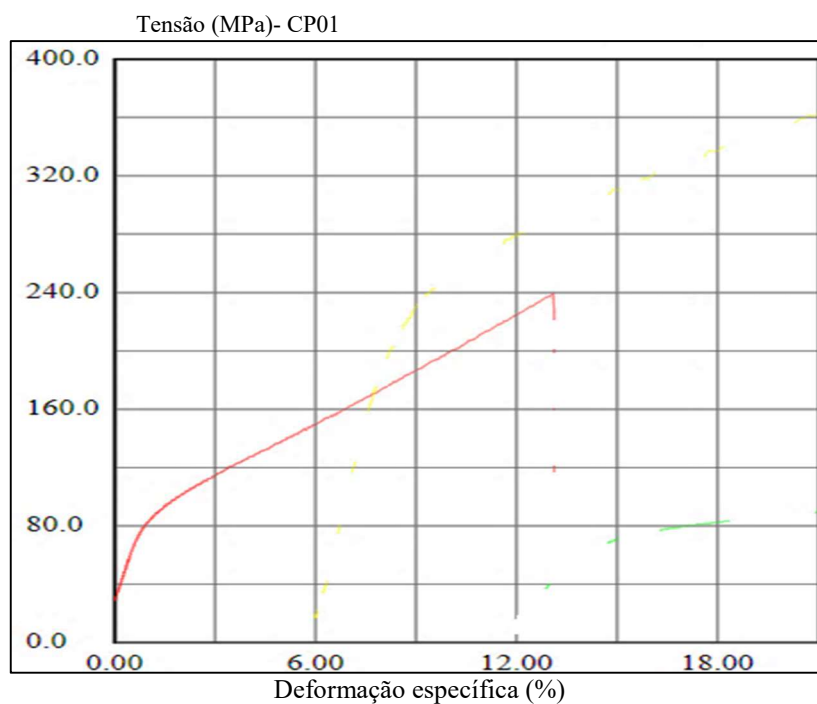
São apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados na fibra de coco verde, no solo expansivo de Paulista-PE e suas misturas com fibras de coco. Os resultados das misturas com 0,25%, 0,5%, 1% e 2% são comparados aos resultados encontrados para o solo natural e com a literatura. São apresentados os resultados da caracterização física, do solo natural e das misturas, a composição granulométrica, limites de Atterberg, peso específico real dos grãos, compactação, condutividade hidráulica, comportamento reológico, avaliação da expansão livre, tensão de expansão, resistência à compressão simples, a resistência à compressão diametral, resistência ao cisalhamento direto, retenção de água e o processo de formação das fissuras.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.1.1 – Caracterização Física da Fibras de Coco

O diâmetro equivalente das fibras é de 0,27 mm que está entre 0,19 e 0,31 mm, e seu comprimento é de 20 mm que está entre 12 e 28 mm. Essas dimensões estão de acordo com as indicações de Abbaspour *et al.*, (2019), Kodicherla *et al.*, (2019) e Mandeep *et al.*, (2019) tendo em vista o diâmetro dos corpos de prova dos ensaios de resistência à compressão usado ser de 50 mm. A umidade higroscópica média é 23,02% enquanto a absorção máxima em 48 horas submersa foi de 414%. O peso específico máximo seco 12,6 kN/m³, ficando um pouco abaixo do encontrado por Bordoloi *et al.* (2017). O resultado obtido no ensaio de tração direta na fibra está mostrado na Figura 53. A análise do resultado mostra que a tensão máxima foi de 239,71 MPa. Este valor está compatível com as tensões máximas obtidas por Bordoloi *et al.* (2017), que obteve valores entre 100 e 225 MPa. A deformação específica máxima (Figura 53) foi de 13,2 %. Essa deformação está dentro dos limites encontrados por Bordoloi *et al.* (2017). O módulo de elasticidade obtido foi 2,16 GPa, que é próximo aos valores encontrados por Bordoloi *et al.* (2017).

Figura 53 - Ensaio de tração direta nas fibras de Coco

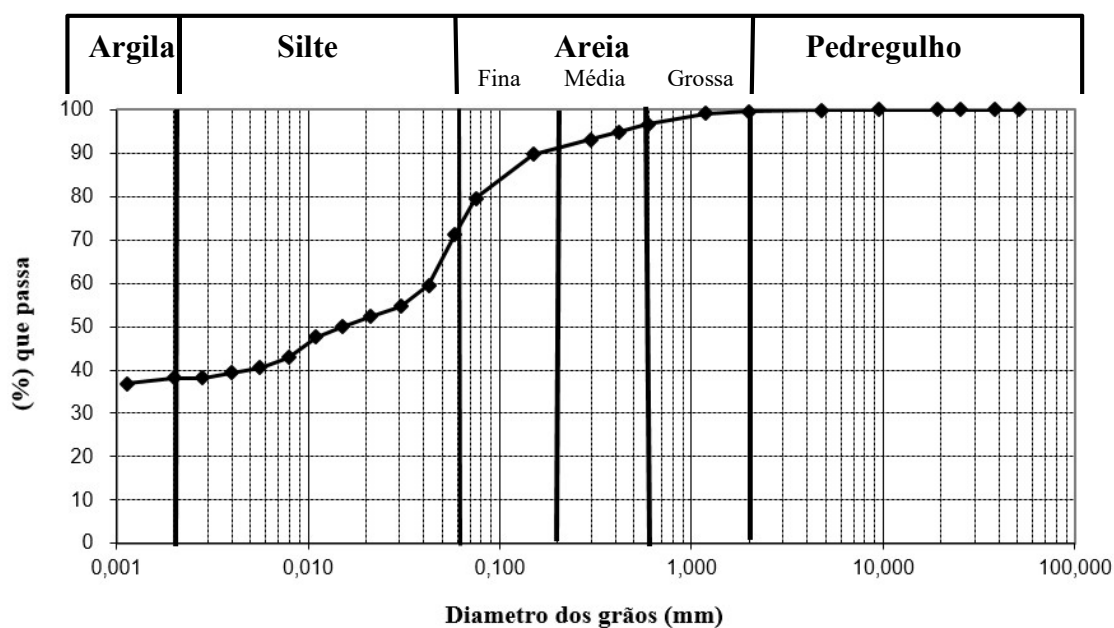


Fonte: Autor, 2022

4.1.2 Caracterização Física do Solo

A partir dos dados obtidos nos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação (com adição de defloculante Hexametáfosfato de Sódio), foi elaborada a curva granulométrica da amostra investigada do solo natural (Figura 54).

Figura 54 - Curva Granulométrica da Amostra do solo de Paulista/PE



Fonte: Autor, 2022

A Tabela 5 mostra as percentagens de material com diâmetro das partículas correspondentes à argila, silte, areia fina, areia média, areia grossa e pedregulho para a amostra estudada, considerando a adição de defloculante no ensaio de sedimentação e comparando com resultados de outros autores que analisaram o solo de Paulista/PE.

Com uso de defloculante, a Amostra é constituída de aproximadamente 37 – 38% de argila, 31% de silte, 25 – 26% de areia fina, 4 – 5% de areia média e 1% de areia grossa. Verifica-se que a amostra de solo aqui analisada apresenta o menor percentual de argila (38%) e um dos maiores percentuais de areia (31%) quando comparado com os outros autores que analisaram o solo de Paulista-PE.

Tabela 5 - Percentual granulométrico de uma amostra do solo de Paulista/PE

Solo	Santos (2008)	Paiva (2016)	Morais (2017)	Constatino (2018)	Araújo (2020)	Autor (2022)
Pedregulho (%)	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Areia (%)	35%	18%	15%	29%	17%	31%
Silte (%)	21%	32%	37%	18%	36%	31%
Argila (%)	44%	50%	48%	53%	47%	38%

Fonte: Autor, 2022

A Tabela 6 apresenta os valores da densidade real dos grãos do solo de Paulista/PE, encontrado na pesquisa e comparando com resultados de outros autores que estudou o mesmo solo. O resultado final foi obtido com a média aritmética do resultado de três ensaios. A análise dos resultados mostrou que o solo apresenta uma densidade real dos grãos de 26,7 kN/m³, valor próximo ao encontrado por Constantino (2018), 26,60 kN/m³ e Araújo (2020), 26,8 kN/m³ que estudou o solo da mesma localidade.

Tabela 6 - Valores da Densidade Real do Solo de Paulista/PE

Autores	Peso Específico Real dos Grãos (kN/m ³)
Constatino (2018)	26,6
Araújo (2021)	26,8
Autor (2022)	26,7

Fonte: Autor, 2022

Na tabela 7 mostra um resumo da caracterização física do solo natural de Paulista/PE.

Tabela 7 - Caracterização física do solo de Paulista/PE

PARÂMETROS	VALORES
Peso Específico Aparente Seco Máximo (kN/m ³)	16,04
Umidade Ótima (%)	21,3
Peso Específico Real (kN/m ³)	26,7
(%) Areia	31
(%) Silte	31
(%) Argila	38
Limite de Liquidez	52,56
Limite de Plasticidade	21,81
Índice de Plasticidade	30,75
Índice de Atividade	0,76
Classificação AASHTO	A-7-6
Classificação SUCS	CH

Fonte: Autor, 2022

4.1.3 Caracterização Física do Solo-Fibra

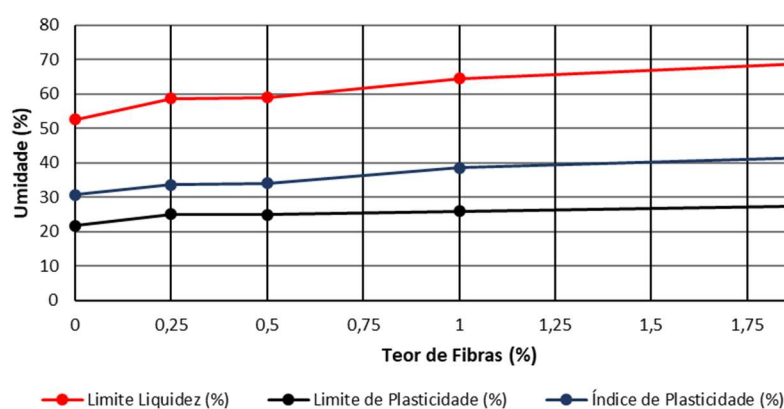
Os valores dos limites de consistência e índice de plasticidade do solo natural e do solo-fibras são apresentados na Tabela 8. A adição da fibra de coco ao solo de Paulista-PE não modificou significativamente a densidade real do solo e sua granulometria em relação a das misturas comportamento foi observado por Menezes *et al.*, (2019). Tanto o solo quanto as misturas solo-Fibras apresentam alta plasticidade ($IP > 15\%$). O limite de liquidez (LL), cresce de 52,56 % (solo) a 69,40 % (solo- 2% fibra) e o limite de plasticidade (LP) também cresce de 21,81% (solo) a 27,63% (solo- 2%fibra), como o LL cresce mais do que o LP, o índice de plasticidade cresce de 30,75% (solo) a 41,77% (solo- 2%fibra), Figura 55. Resultados semelhantes foram encontrados por Mandeep e Ayothiraman (2019), analisando o comportamento de uma argila expansiva da Índia reforçada com fibra de coco. Menezes *et al.*, (2019) estudando a influência adiciona fibra de coco (0,25%; 0,50%, 075% e 1%) em uma areia argilosa de alta plasticidade cuja fração argila não apresentava argilomineral expansivo, verificou que os valores de LL praticamente ficam constante e LP crescem havendo redução de IP quando se adiciona fibra.

Tabela 8 - Valores dos limites de liquidez, limites de plasticidade e índices de plasticidade do solo com diferentes teores de fibras

Teor de Fibra (%)	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	Varição dos Índices de Plasticidade (%)
Solo Puro	52,56	21,81	30,75	-
Solo+0,25%Fibras	58,7	25,11	33,59	2,84
Solo+0,5%Fibras	59	24,94	34,06	3,31
Solo+1%Fibras	64,5	25,92	38,58	7,83
Solo+2%Fibras	69,4	27,63	41,77	11,02

Fonte: Autor, 2022

Figura 55 - Variações dos limites de liquidez, limites de plasticidade e índices de plasticidade do solo com diferentes teores de fibras



Fonte: Autor, 2022

Na Figura 56 são apresentadas as curvas de compactação para as amostras de solo e solo-fibras para os percentuais ($f_c\%$) de 0,25%, 0,5%, 1% e 2%. Todas as amostras apresentam comportamento similar com um único pico. A argila expansiva de Paulista/PE apresentou umidade ótima de 21,3%. Já as umidades ótimas das misturas solo – foram de 22,8% (mistura com 0,25% de fibra), 24,1% (mistura com 2% de fibra), isto é, 1,5% e 3,2% a mais que o valor de conteúdo de água obtido para o solo natural. O valor do peso específico aparente seco para o solo natural foi de 16,04 kN/m³. Para as diferentes misturas observou-se uma variação entre 15,80 kN/m³ (mistura com 0,25% de fibra) e 15,10 kN/m³ (mistura com 2% de fibra), ou seja, respectivamente 0,24 e 0,94 kN/m³ a menos em relação ao valor obtido para o solo natural, Figura 56b.

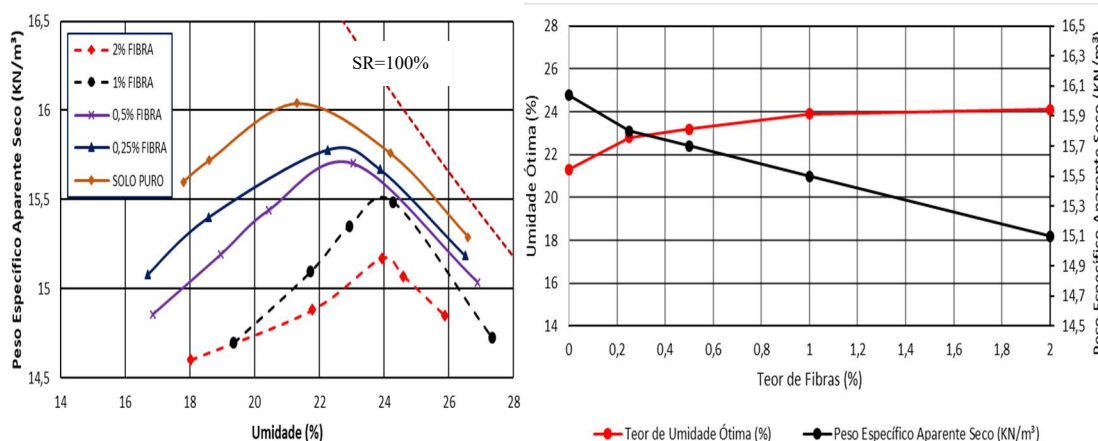
O peso específico aparente seco diminui com o aumento do percentual de fibra. Isso pode ser resultado de: i) a fibra de coco ser um material leve e substitutivo ao solo, o que ocasionou a redução das densidades da mistura (Kodicherla *et al.*, 2019), ii) as fibras evitam que os grãos do solo formem uma boa ligação (Shukla *et al.*, 2017) e iii) a inclusão de fibra leva à segregação dos grãos do solo e induz maior índice de vazios no

solo (Narani *et al.*, 2019). Isto sugere que o aumento no conteúdo de fibra resulte em misturas com maior porosidade.

Figura 56 - Curvas de compactação do Solo Natural e misturas Solo-Fibra de Coco

a) Curvas de compactação

b) variação da umidade e peso específico aparente seco com teor de fibras



Fonte: Autor, 2022

A medida em que se aumenta o percentual das fibras de coco verifica-se o aumento da umidade ótima da mistura, que pode estar fundamentado em: i) adsorção de água por fibras (Shukla, 2017), ii) quando um solo argiloso é misturado com maiores proporções de fibras de coco, ocorre um aumento da espessura da camada dupla difusa deste solo (Kodicherla *et al.*, 2019), iii) o aumento da umidade ótima do solo foi devido uma fina película de água na periferia entre o solo e as fibras, (Abbaspour *et al.*, 2019) e iv) a água livre é deixada para adsorção nas margens da fibra do solo e nos poros macroscópicos devido à alta capacidade de absorção de água das esmectitas, (Narani *et al.*, 2019). Estudos de Abbaspour *et al.*, (2019) mostraram que as variações induzidas por fibras em umidade ótima e o peso específico aparente seco em um solo argiloso são mais elevados do que em solo arenoso, de modo que o aumento teor de fibra no solo argiloso estudado (classificado como CL) traz um aumento de 3% na umidade ótima e uma diminuição de 1% no peso específico seco.

Kodicherla *et al.*, (2019) avaliando a adição de fibras curtas de coco, distribuídas randomicamente, em um solo argiloso expansivo, oriundo de Telangana na Índia, observaram este mesmo comportamento de redução do peso específico aparente seco e aumento do teor de umidade ótima, em relação ao aumento do teor de fibra de coco na mistura. Leema Peter *et al.*, (2016) estudando uma argila expansiva em uma marina na cidade de Cochim no estado litorâneo de Kerala, na região sudoeste da Índia, também

identificou o mesmo comportamento de redução do peso específico aparente seco e aumento do teor de umidade ótima, em relação ao aumento do teor de fibra de coco da mistura. Na Tabela 9 são apresentados os parâmetros de compactação, Peso Específico Aparente Seco máximo e umidade ótima para o solo natural e as diferentes misturas.

Tabela 9 - Parâmetros de compactação do Solo Natural e misturas Solo-Fibra de Coco

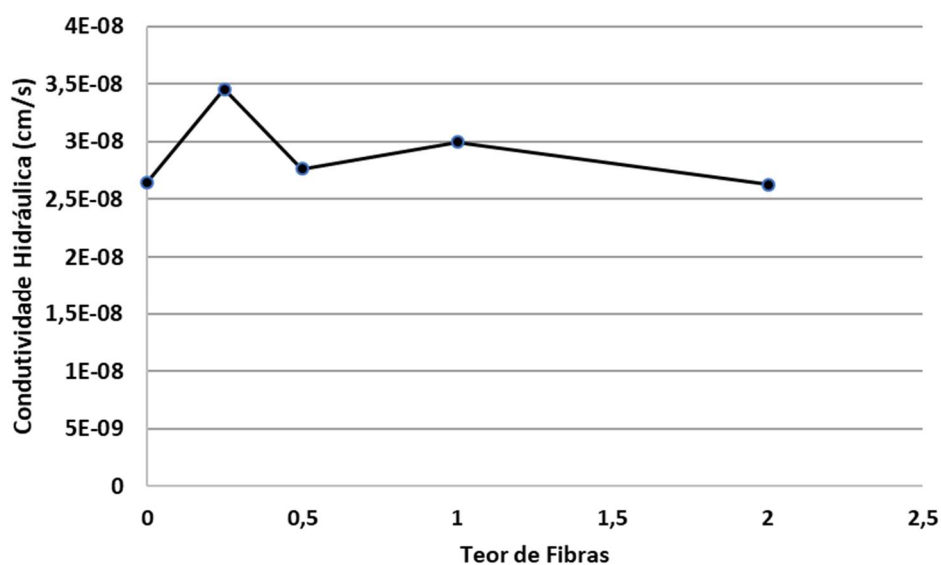
Teor de Fibra (%)	Umidade Ótima (%)	Varição em relação ao solo natural do teor de umidade ótima (%)	Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³)	Varição em relação ao solo natural do Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³)
Solo Puro	21,3	-	16,04	-
Solo+0,25%Fibras	22,8	1,5	15,8	-0,24
Solo+0,5%Fibras	23,2	1,9	15,7	-0,34
Solo+1%Fibras	23,9	2,6	15,5	-0,54
Solo+2%Fibras	24,1	2,8	15,1	-0,94

Fonte: Autor, 2022

4.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Na Figura 57 são apresentados os resultados da condutividade hidráulica saturada do solo natural e das misturas com os diferentes teores de fibras de coco. O solo natural apresentou coeficiente de condutividade hidráulica de $2,64 \times 10^{-8}$ cm/s, nota-se que as misturas com 0,25%, 0,5%, 1% e 2% de fibras de coco apresentaram coeficiente de condutividade hidráulica semelhante ao coeficiente do solo natural com cerca de $3,45 \times 10^{-8}$ cm/s, $2,76 \times 10^{-8}$ cm/s, $2,99 \times 10^{-8}$ cm/s e $2,62 \times 10^{-8}$ cm/s, respectivamente.

Figura 57 - Condutividade hidráulica saturada do solo natural e das misturas com os diferentes teores de fibras de coco



Fonte: Autor, 2022

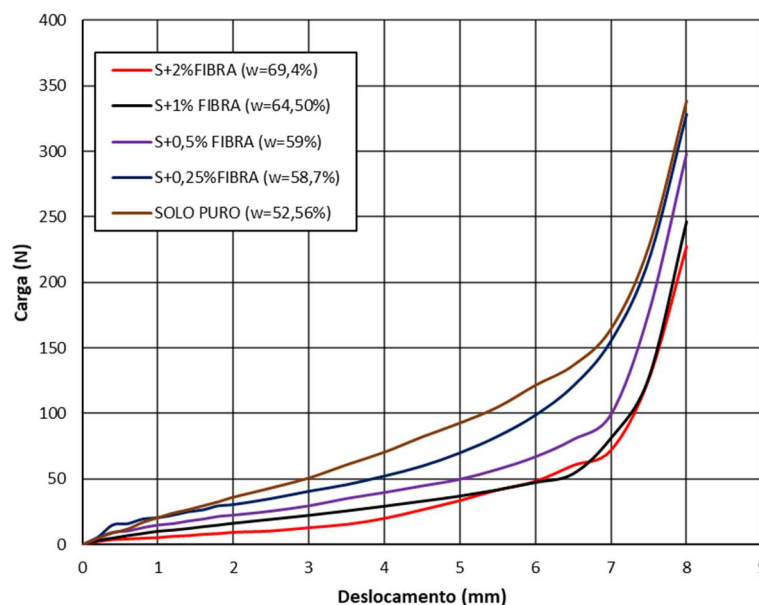
Miller e Rifai (2004) obtiveram resultados similares, que avaliaram misturas de solo argiloso (classificado como CL) com fibras de polipropileno e não observaram mudanças na ordem de grandeza da condutividade hidráulica para o teor de até 1% de fibras nas misturas.

Portanto os teores de fibras não afetaram a condutividade hidráulica significativamente, porém é importante salientar que mesmo a fibra de coco sendo um material de difícil biodegradação devem ser realizados ensaios para verificar o comportamento da condutividade hidráulica e outras propriedades ao longo do tempo.

4.3 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

A Figura 58 apresenta as curvas carga *versus* deslocamento obtidas do ensaio *squeeze-flow* correspondentes às umidades do limite de liquidez do solo natural e das misturas. Observa-se que as curvas do solo e das misturas fluem de forma contínua, sem que haja alguma parada de carga ou de fluir, mostrando a homogeneidade das amostras, dos mecanismos internos de deformação e do fluido do material e a redução do atrito entre a placa (punção) do solo ou misturas. Não se verifica oscilação de carga. São observados os três estágios do perfil reológico. Algumas curvas não possuem todos os estágios no gráfico com todas as umidades ensaiadas (Figura 58).

Figura 58 - Resultados dos ensaios de *squeeze-flow* para as amostras de solo natural e misturas solo+fibras para as umidades do limite de liquidez



Fonte: Autor, 2022

Na Tabela 10 é mostrada a carga (Q_{Esc}) e o deslocamento de escoamento (d_{Esc} , final do Estágio I) e carga inicial de enrijecimento (Q_{Enrij}) e o deslocamento inicial de enrijecimento (d_{Enrij}), final do Estágio II e início do Estágio III, seguindo o procedimento indicado na Figura 12 para o solo natural e misturas solo fibra na umidade do limite de liquidez. A Tensão de Escoamento (σ_{Esc}) e Tensão Inicial de Enrijecimento (σ_{Enrij}) decrescem com o acréscimo de fibras e os deslocamentos associados a essas tensões crescem. Isto se deve ao maior teor de água nas misturas nos limites e liquidez.

Tabela 10 - Índices do comportamento reológico do solo e das misturas no LL

Amostra	Índices e dados do comportamento reológico							
	w (%)	Q_{ESC} (N)	σ_{ESC} (kPa)	d_{ESC} (mm)	Q_{Enrij} (N)	σ_{Enrij} (kPa)	d_{Enrij} (mm)	Q_{Final} (N)
Solo Natural	52,56	24,24	3,07	1,2	136,85	17,35	6	338,35
Solo+0,25%	58,7	22,72	2,88	1,2	121,2	15,37	6,5	328,25
Solo+0,50%	59	21,7	2,75	1,8	99,48	12,61	7	297,95
Solo+1,0%	64,5	16,5	2,09	2	81,4	10,32	7	246,1
Solo+2,0%	69,4	13,3	1,68	3	72,21	9,14	7	227,25

Fonte: Autor, 2022

W= umidade; Q_{ESC} = carga de escoamento; σ_{ESC} = tensão de escoamento; d_{ESC} = deslocamento de escoamento; ϵ_{ESC} = deformação de escoamento; Q_{Enrij} = carga inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III); σ_{Enrij} = tensão inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III); d_{Enrij} = deslocamento inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III); ϵ_{Enrij} = deformação inicial de enrijecimento (final Estágio II e início do III); Q_{Final} = carga para deslocamento de 8 mm.

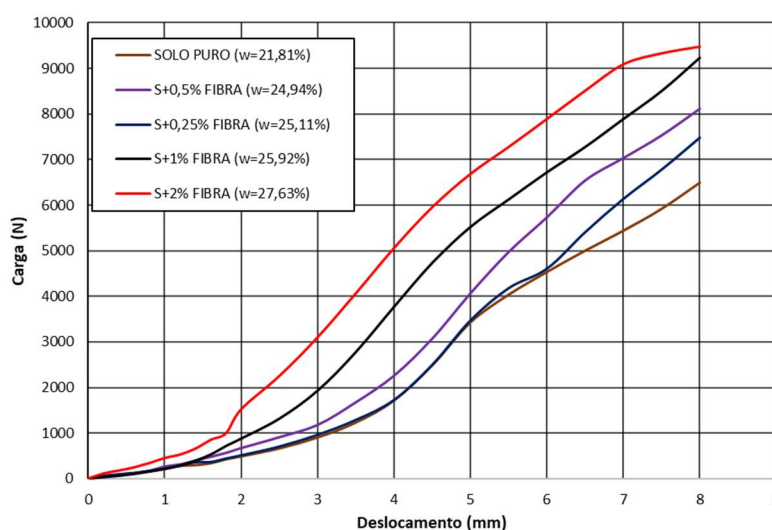
No Estágio I, o material comporta-se como um material sólido apresentando deformação elástica linear e está relacionado à tensão de escoamento do solo e das misturas. É caracterizado por pequenos deslocamentos (< 3 mm) em sua totalidade para o solo e misturas solo+fibra. As maiores tensões de escoamento ocorrem no solo natural desenvolvendo uma redução na medida que se aumenta a proporção de fibras.

O Estágio II inicia no término do Estágio I e se estende de 4,2 mm a 6,6 mm, início do Estágio III. Ocorrem deslocamentos intermediários e a compressão resulta da deformação radial de cisalhamento superando as forças que mantinham o material sob comportamento elástico, trata-se de deslocamento plástico e ou viscoso. No Estágio II, o solo e as misturas são capazes de apresentar deslocamentos sem aumento significativa de força. As maiores tensões de início de enrijecimento ocorrem no solo natural. No Estágio III, (para deslocamentos superiores a 4,2 mm a 6 mm) há um aumento da carga necessária para dar continuidade ao deslocamento, influenciada pela aproximação das partículas e a redução do teor de água do centro para a periferia. A aproximação das partículas e de

outros componentes do sistema submetido a grandes deslocamentos gera força restritiva ao fluxo devido à maior interação das unidades móveis. Assim as forças de atrito preponderam nessa situação. A carga para o deslocamento máximo (8 mm) é maior no solo natural (338,35 N) do que nas misturas solo+fibras, 0,25%(328,25 N), 0,5% (297,95 N), 1%(246,1 N) e 2% (227,25 N).

A Figura 59 apresenta as curvas carga versus deslocamento obtidas do ensaio *squeeze-flow* correspondentes às umidades do limite de plasticidade do solo natural e das misturas utilizadas no ensaio de limite de Plasticidade. Observa-se que quanto menor o teor de água maior a viscosidade elongacional é mais difícil o espalhamento do material. A aproximação e o rearranjo das partículas geram forças restritivas ao fluxo. Não foi verificada nenhuma oscilação de carga, confirmando a homogeneidade das amostras. A variação de umidade altera as características reológicas modificando o perfil das curvas

Figura 59 - Resultados dos ensaios de squeeze-flow para as amostras de solo natural e misturas solo+fibras para as umidades do limite de Plasticidade



Fonte: Autor, 2022

Na Tabela 11 observa-se a carga inicial de enrijecimento (Q_{Enrij}) e o deslocamento inicial de enrijecimento (d_{Enrij}), final do Estágio II e início do Estágio III, seguindo o procedimento indicado na Figura 12, para o solo natural e misturas solo fibra na umidade do limite de plasticidade. A Tensão Inicial de Enrijecimento (σ_{Enrij}) e o deslocamento associado a esta tensão crescem. Como a inserção de fibras de 0,25% a 2% praticamente não altera o limite de plasticidade das misturas, o teor de água no LP é menor que 50% do correspondente teor no LL, o acréscimo do teor de fibra aumenta o entrosamento entre os componentes da mistura aumentando o enrijecimento.

As curvas correspondentes ao limite de plasticidade apresentam apenas dois Estágio II e III, enrijecimento por deformação, com um aumento significativo da carga necessária para dar continuidade a deformação do material, consequentemente, as forças de atrito são predominantes nesse estágio.

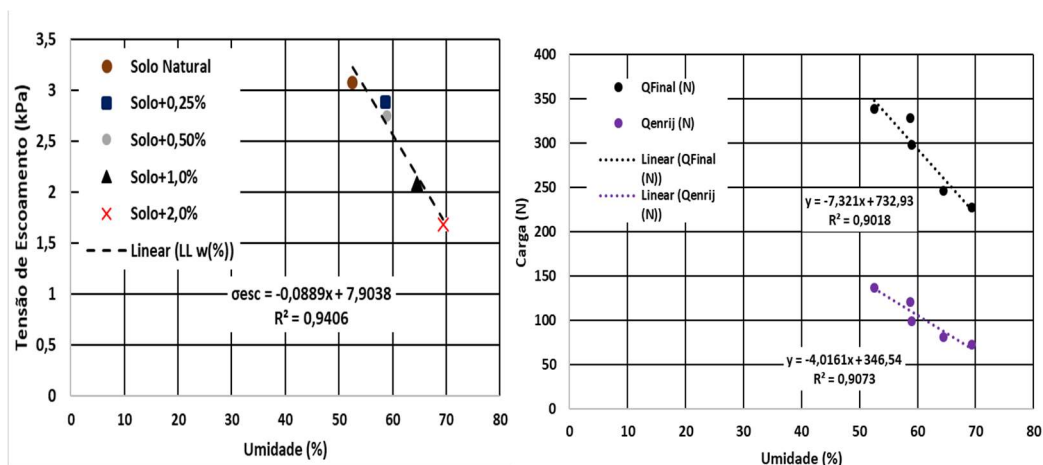
Tabela 11 - Índices do comportamento reológico do solo e das misturas no LP

Amostra	Índices e dados do comportamento reológico				
	w (%)	Q _{Enrij} (N)	σ _{Enrij} (kPa)	d _{Enrij} (mm)	Q _{Final} (N)
Solo Natural	21,81	1714,1	217,41	4	6495,5
Solo+0,25%	24,94	1725,7	218,88	4	7488,0
Solo+0,50%	25,11	4065,7	515,69	5	8113,9
Solo+1,0%	25,92	5528,2	701,19	5	9243,0
Solo+2,0%	27,63	5955,3	755,36	4,5	9477,0

Fonte: Autor, 2022

A Figura 60 apresenta os resultados da variação da tensão de escoamento com a umidade no limite de liquidez. Confirma-se a verificação de Melo (2014) de que a tensão de escoamento nos solos deve variar segundo a umidade e a coesão da amostra. O solo natural e as misturas apresentaram um comportamento em que os valores de tensão de escoamento diminuem com o aumento da umidade. Através de aproximações lineares é possível determinar a umidade que anula a tensão de escoamento, esse valor foi igual a 88,9 %. Além disto também foi observado que a carga para o deslocamento máximo (8 mm), a carga inicial de enrijecimento (Q_{Enrij}) e a carga final (Q_{final}) também diminuem com a aumento da umidade conforme Figura 60.

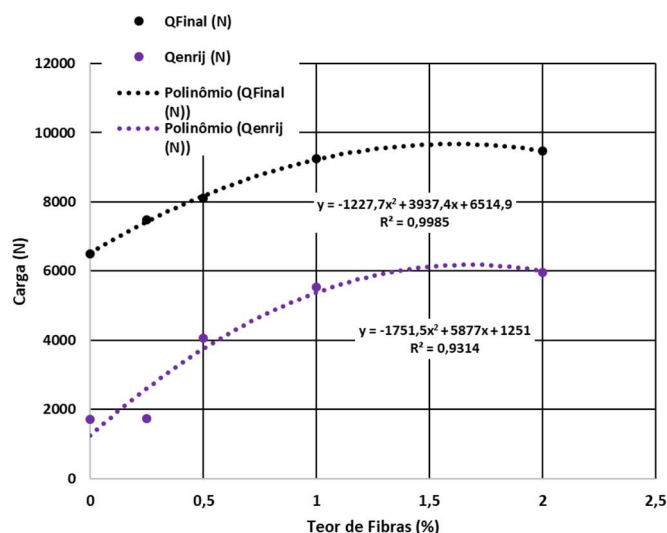
Figura 60 - Correlação da tensão de escoamento, Cargas de enrijecimento e final com umidade



Fonte: Autor, 2022

Com relação as a influência das fibras na caracterização reológica do solo e suas misturas, nota-se que o aumento de fibra na umidade do limite de plasticidade das amostras houve também um aumento da carga inicial de enrijecimento (Q_{Enrij}) e a carga final (Q_{final}) também aumenta com o acréscimo de fibras na amostra, porém quando a amostra chegou a 2% de fibras nota-se uma certa estabilidade dos indicadores, conforme Figura 61.

Figura 61 - Correlação do teor de fibras com a cargas de enrijecimento e final

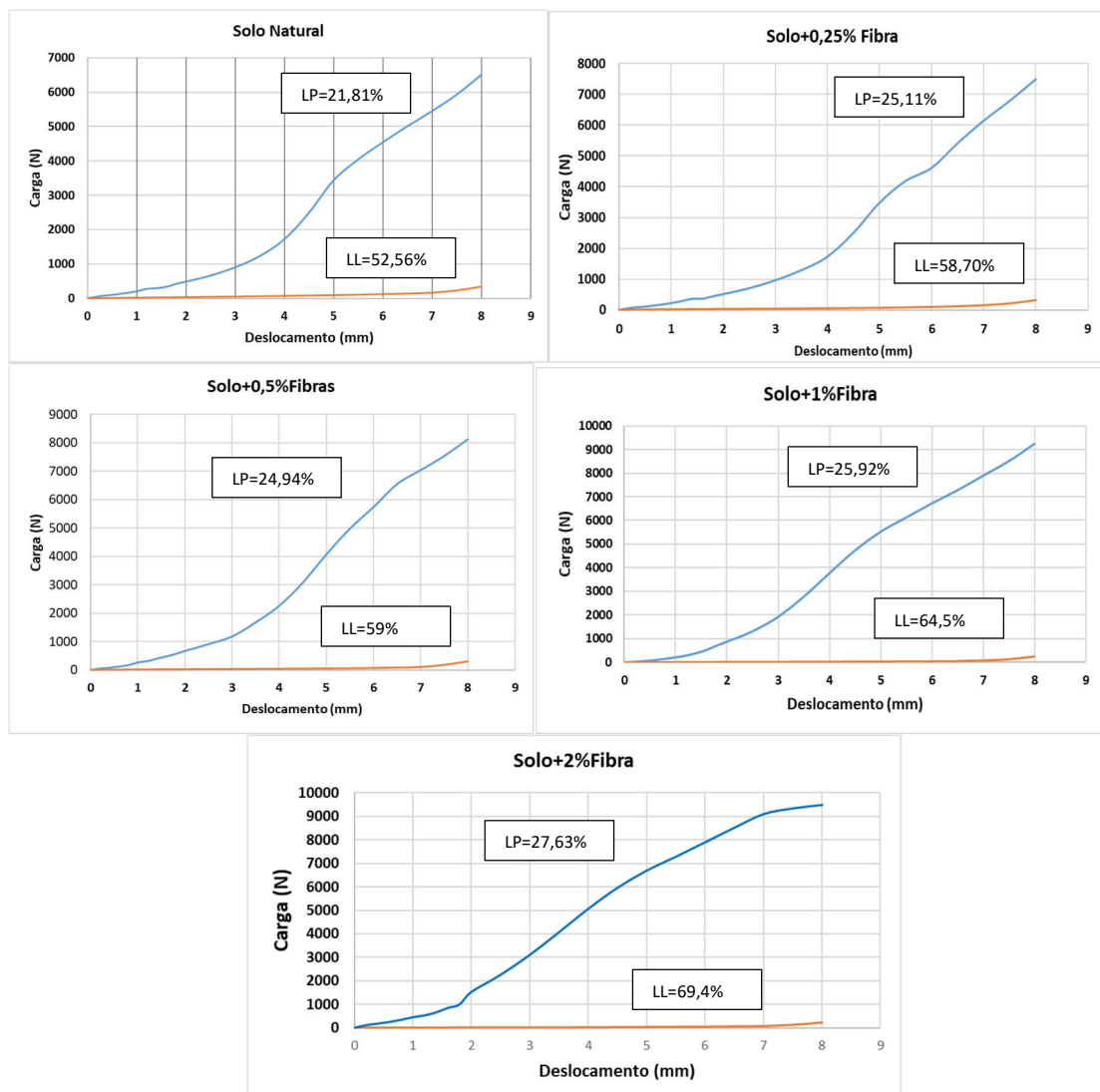


Fonte: Autor, 2022

A Figura 62 apresenta as curvas carga *versus* deslocamento correspondente as umidades do ensaio do limite de plasticidade e limite de liquidez. As curvas das amostras com maiores umidades apresentam um maior deslocamento para determinada força aplicada. As curvas correspondentes ao limite de plasticidade apresentam dois Estágios II e III, enrijecimento por deformação, com um aumento significativo da carga necessária para dar continuidade a deformação do material, conseqüentemente, as forças de atrito são predominantes nesse estágio.

Observa-se que quanto menor o teor de água maior a viscosidade elongacional e mais difícil o espalhamento do material. A aproximação e o rearranjo das partículas geram forças restritivas ao fluxo. Não foi verificada nenhuma oscilação de carga, confirmando a homogeneidade das amostras. A variação de umidade altera as características reológicas modificando o perfil das curvas.

Figura 62 - Carga *versus* deslocamento correspondente as umidades do ensaio do limite de plasticidade e limite de liquidez



Fonte: Autor, 2022

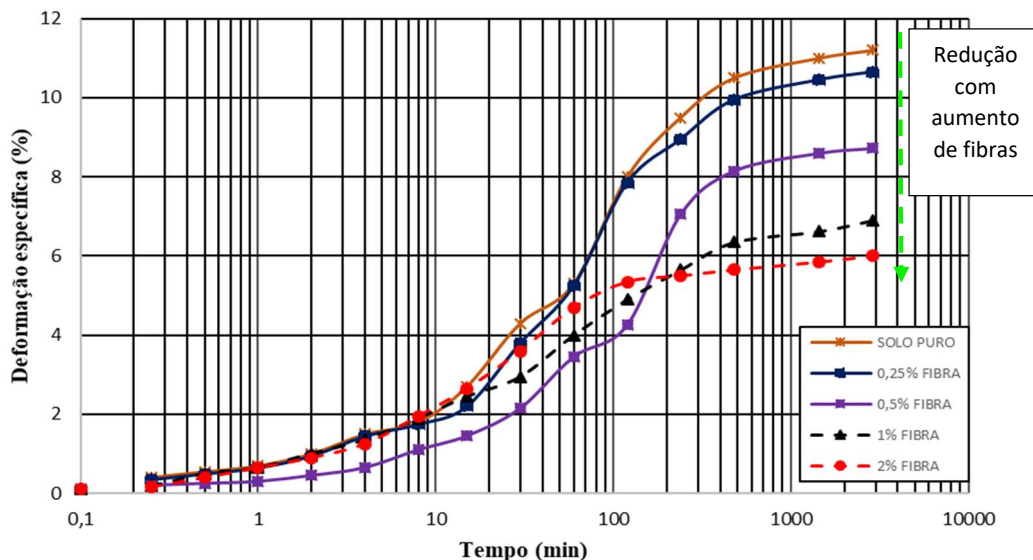
4.4 AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO LIVRE E TENSÃO DE EXPANSÃO DO SOLO E MISTURAS

4.4.1 Ensaio de Expansão Livre

Os ensaios de expansão “livre” foram executados com sobrecarga de 1 kPa no solo natural e nas misturas, todas as amostras foram compactadas de acordo com a umidade ótima do solo e das misturas obtida no ensaio de compactação. Foram obtidos resultados iguais a 11,2%, para o solo natural e 6% para o solo com mistura de 2% de fibra de coco (Figura 63). De acordo com o critério de Cuellar (1978), o grau de expansividade do solo natural é classificado como muito alto (expansão “livre” > 10%),

em relação ao solo com 2% de fibra a classificação fica em alta ($5\% < \text{expansão "livre"} < 10\%$). Justino da Silva (2001) mostra que a expansão livre depende diretamente do peso específico aparente seco e da tensão vertical aplicada.

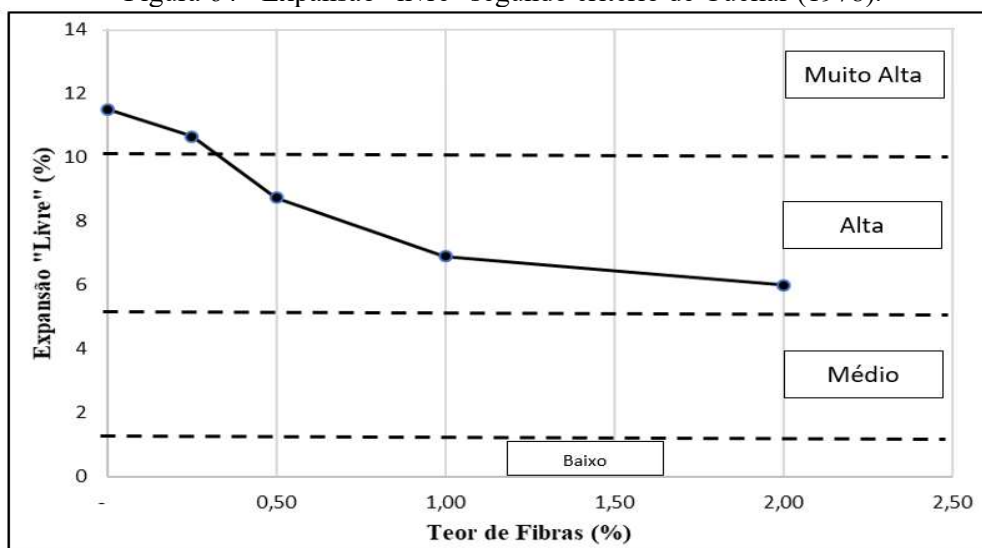
Figura 63 - Resultados dos ensaios de expansão “livre”



Fonte: Autor (2022)

A Figura 64, mostra que o potencial de expansão é restringido pelo reforço com a fibra de coco. O potencial de expansão é diminuído em 4,91%, 22,09%, 38,39% e 46,42%, para teores de fibra de $f_c = 0,25\%$, 0,5%, 1% e 2%, respectivamente, em comparação com o solo natural. Tais tendências foram relatadas por outros pesquisadores e é muitas vezes atribuída à interação solo-fibra, este efeito é reduzida em teores de fibra extremamente altos Narani, *et al.*, 2019. O teor de fibra em 2% pode ser considerado como o teor de fibra que mais diminuiu o potencial de expansão.

Figura 64 - Expansão “livre” segundo critério de Cuellar (1978).



Fonte: Autor, 2022

Em relação a diminuição da expansão do solo, este fenômeno pode estar associado a sinergia induzida no solo pela inclusão das fibras, que funciona como uma malha que impede que o solo expanda e que também pode ser atribuída a: i) substituição de sólidos (grãos do solo) com materiais que não apresentam tendência à expansão (fibras de coco), ii) ligação entre os grãos de argila e as fibras e iii) atrito entre as partículas de argila e as fibras de coco. (Narani, *et al.* 2019)

4.4.2 Tensão de Expansão

A Tabela 12 apresenta a tensão de expansão do solo natural e das misturas solo-fibra nos percentuais (fc%) predeterminados (0,25%, 0,5%, 1% e 2%) resultantes do ensaio do método do volume constante. O solo natural apresentou uma tensão de 101,70 kPa e a adição de fibras de coco resultou na redução gradativa da tensão de expansão à medida que aumentou o teor de fibras no solo. Para os percentuais estudados nesta pesquisa, não foi possível zerar a tensão de expansão, mas para o percentual de 1% de fibra de coco a redução foi de 74,63%, o que pode ser administrado a depender do projeto estrutural a que o solo será exposto.

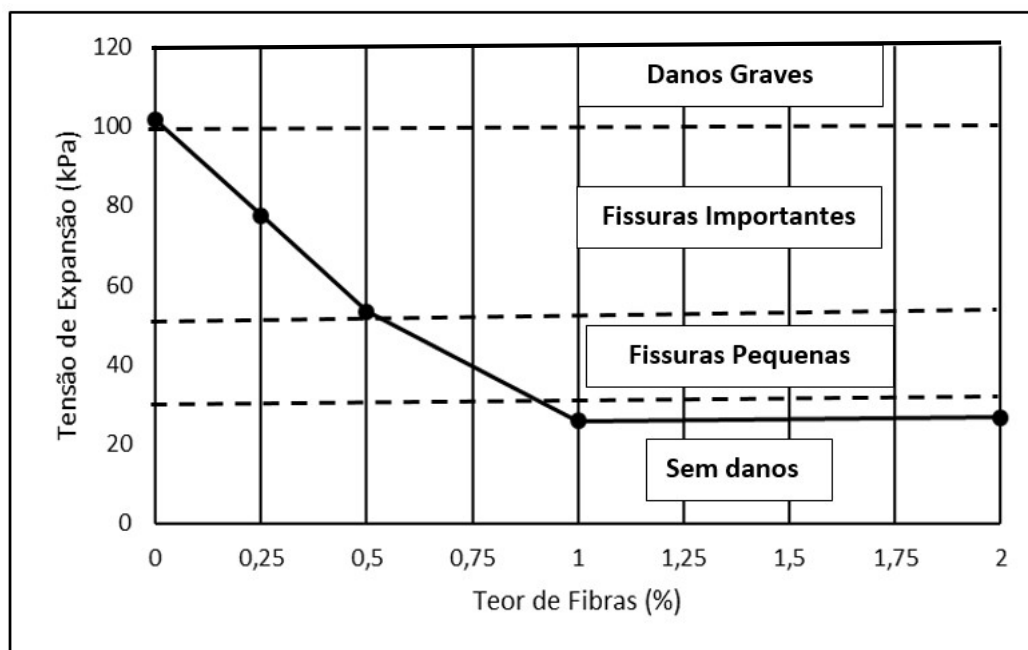
Tabela 12 - Valores das tensões de expansão pelo método do volume constante.

Amostra	Tensão de Expansão (kPa)	Redução (%)
Solo Natural	101,70	-
Solo+0,25% Fibra de Coco	77,50	23,79
Solo+0,50% Fibra de Coco	53,33	47,56
Solo+1,0% Fibra de Coco	25,80	74,63
Solo+2,0% Fibra de Coco	26,60	73,85

Fonte: Autor, 2022

Os valores da tensão de expansão no solo natural compactado na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, apresentou, segundo o critério de Jimenez Salas (1980), possibilidade de ocorrência de danos graves. Com a adição gradativa das fibras de coco, nota-se a redução da tendência de fissuração ou danos às estruturas, passando de Fissuras Importantes (0,25%), Fissuras Pequenas (0,5%) até a possibilidade de não haver Danos as estruturas (1% e 2%), podendo ser observado na Figura 65.

Figura 65 - Tensão de Expansão *versus* teor de fibra de coco e classificação dos danos segundo Jimenez Salas (1980).



Fonte: Autor, 2022

Uma justificativa para essa redução da tensão de expansão está no intertravamento e atrito entre as fibras de coco e as partículas de argila que induzem tensões de tração nas fibras, portanto, a mobilização das fibras leva a uma redução na tensão de expansão e potencial de expansão livre. O entrelaçamento e o atrito entre o solo e as fibras dependem da área de contato entre solo e superfície das fibras. Dados sobre a influência de fibras de coco na expansão de solos expansivos estão atualmente em falta na literatura, no entanto, foi encontrado por Yadav *et al.*, (2019) que a expansão livre diminuiu linearmente como resultado da adição de fibras até um teor de 10%. Essas fibras são diferentes das estudadas em muitas maneiras (geometria, superfície, resistência à tração, proporção, etc.) e, portanto, pode ser comparado com o estudo em tela com algumas restrições.

A Tabela 13 mostra um resumo da influência da adição de fibras de casca de coco nos valores expansão “livre” e tensão de expansão no solo e nas misturas solo – fibra de coco. A inserção da fibra de coco ao solo expansivo de Paulista-PE, reduz a expansão “livre” de muito alta para alta quando adiciona 0,50%, 1,00% ou 2,00% de fibra segundo critério de Cuellar (1978) e tensão de expansão de danos graves para sem danos quando adiciona 1.00% ou 2,00% pelo critério Jimenez Salas (1980).

Tabela 13 - Valores expansão “livre e tensão de expansão no solo e nas misturas solo – fibra de coco.

Solo / Solo - Fibra	Expansão livre (%)	Redução (%)	Tensão de Expansão (kPa)	Redução (%)
Solo Natural	11,20	-	101,70	-
Solo+0,25% Fibra	10,60	4,91	77,50	23,79
Solo+0,50% Fibra	8,72	22,09	53,33	47,56
Solo+1,0% Fibra	6,90	38,39	25,80	74,63
Solo+2,0% Fibra	6,00	46,42	26,60	73,85

Fonte: Autor, 2022

4.5 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA

São apresentados e avaliados os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, e resistência ao cisalhamento direto.

4.5.1 Resistência a Compressão Simples

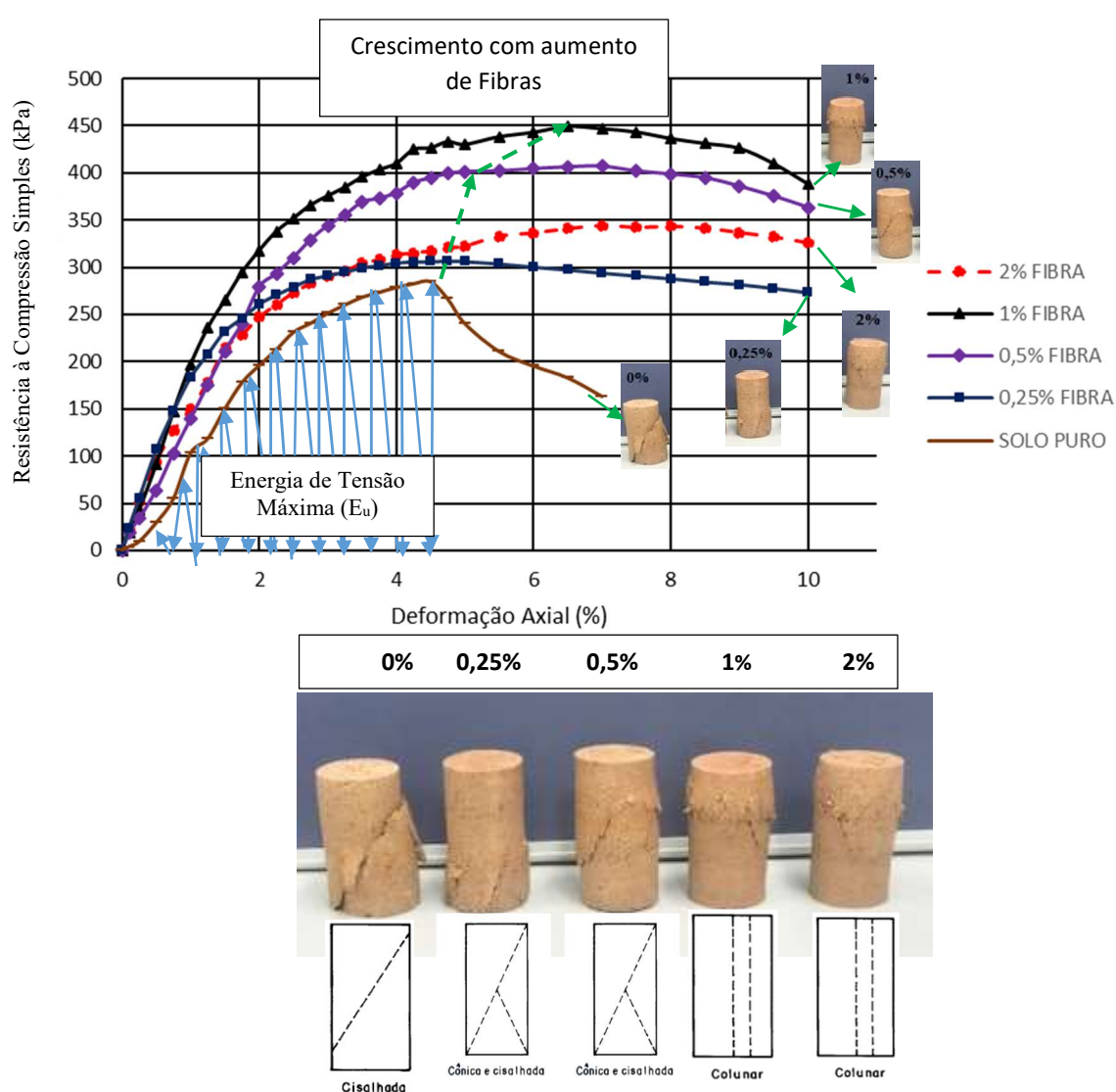
A Tabela 14 apresenta os valores de resistência à compressão obtidos no ensaio de compressão simples. As curvas de tensão axial versus deformação específica de cada amostra investigada são apresentadas na Figura 66. Com a obtenção tensão máxima e da deformação axial de ruptura, observou-se que a crescente adição de fibras tende a aumentar o módulo de elasticidade aumentando a rigidez e apresentado uma ruptura mais plástica, provavelmente devido a fibra ser um material mais flexível que o solo. A energia de tensão máxima (E_u) – Módulo de resiliência, que é a energia de deformação por volume necessária para tencionar um material de um estado sem carregamento até a sua tensão limite de escoamento está representada nas setas azuis na Figura 66, percebe-se que essa energia necessária aumenta com o teor de fibras. Os valores das deformações para tensões máximas, crescentes com o aumento do teor de fibras, mostraram a tendência das misturas se tornar um material mais dúctil que o solo sem o reforço.

Tabela 14 - Valores das tensões de compressão no ensaio de compressão simples.

Amostra	Tensão de Compressão (kPa)	Deformação axial de ruptura (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
Solo Natural	290,91	4,5	10,29
Solo+0,25% Fibra de Coco	306,43	4,8	13,03
Solo+0,50% Fibra de Coco	406,69	7	13,92
Solo+1,0% Fibra de Coco	448,61	6,5	19,67
Solo+2,0% Fibra de Coco	344,12	8	15,01

Fonte: Autor, 2022

Figura 66 - Resistência a Compressão Simples do solo e misturas



Fonte: Autor, 2022

O solo apresenta comportamento de pico, típico de material friável, sendo registrado um aumento da resistência quando a deformação está em 4,5%, Figura 66. Após essa deformação, ocorre um decréscimo das tensões aplicadas. Para as misturas,

verifica-se um comportamento plástico com pequeno amolecimento. Também houve um aumento do módulo de elasticidade com o incremento de fibras até 1%. Observações similares foram obtidas por Kar, Pradhan e Naik (2014) e Sarah e Hussein (2019).

Na Figura 66 observa-se o padrão de ruptura nos corpos de prova constata-se que a resistência à compressão simples aumentou com a inserção de fibras do coco verde, com um aumento de 5,33% para um teor de 0,25% fibra, 39,79% para um teor de 0,5% de fibra, atingindo maior valor com 1% de fibra (54,21% maior que o solo natural). Para o teor de 2%, houve um pequeno decréscimo da resistência, em relação à mistura 1% de fibra, porém continua maior que a resistência à compressão do solo natural, mostrando que não houve uma interação entre a matriz do solo e as fibras melhor que o teor de 1%.

O comportamento do solo natural é alterado completamente com a inclusão de fibras de coco, uma vez que as fibras aumentam a resistência pós-pico e induz um comportamento de amolecimento por deformação na mistura, controlando e mitigando a tensão através da transferência de tensão pelas fissuras para fibras (Bentur e Mindess, 2007). Este comportamento pôde ser observado na pesquisa em misturas com teores de fibra até 1%, de forma que inicialmente, a amostra atinge a resistência máxima à medida que a deformação é aumentada. Isto é seguido por uma ligeira redução na força, enquanto o aumento da tensão leva à mobilização de fibras e transferência de tensão através das fissuras. Houve mudança também no modo de ruptura, sem fibras teve-se uma ruptura cisalhada e com 1% e 2% de fibras o teve-se o modo colunar.

Esta tendência decrescente na resistência à compressão após 1% de fibras também foi relatada por Tafti e Emadi, (2016) ao empregar resíduos fibras de pneus que foram adquiridas durante a produção de pneus mostrou que a incorporação de fibras em dois solos argilosos com diferentes distribuições de partículas levou a um aumento da resistência até um teor de fibra nos percentuais ($f_c\%$) = 1,5% e um decréscimo com maiores teores de fibra. Yadav e Tiwari, (2016) relataram a mesma tendência em o caso da incorporação de fibras de coco em um solo argiloso estabilizado e atribuiu a redução em altos teores de fibras por conta da diminuição da interação solo-fibra e aumento da interação fibra-fibra. Além disso, a mesma tendência foi verificada por Dhar e Hussain (2019), onde adicionar fibras de polietileno até os percentuais ($f_c\%$) = 1,5% para um solo argiloso levou a um aumento na resistência, porém com o acréscimo de mais fibras ao conteúdo conferiu um decréscimo a este parâmetro.

4.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

A Tabela 15 apresenta os resultados da resistência à tração por compressão diametral das amostras de solo natural e suas misturas com fibras nos percentuais de 0,25%, 0,5%, 1% e 2%. As curvas de resistência à tração versus deformação específica de cada amostra investigada são apresentadas na Figura 67. Observa-se que o solo e suas misturas com os percentuais de fibras apresentam comportamento de pico quanto à resistência à tração por compressão diametral, típico de material friável, com resistência máxima, entre 3,5 a 4,5% de deformação. Após esse ponto, ocorre um decréscimo das tensões aplicadas. Observações similares foram obtidas por Kar, Pradhan e Naik (2014), Subramani e Udayakumar (2016) e Narani, *et al* (2019).

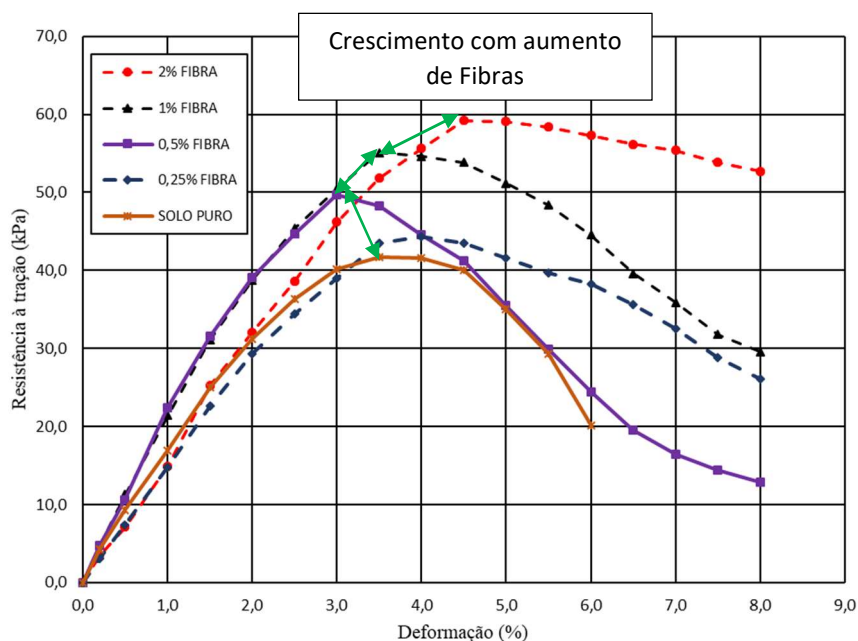
A resistência à tração por compressão diametral aumenta com a inserção de fibras do coco verde, com um aumento de 6,20% para um teor de 0,25% fibra, 19,03% para um teor de 0,5% de fibra, 32,05% para um teor de 1%, atingindo maior valor com 2% de fibra (41,93% maior que o solo natural). A resistência à tração por compressão diametral ilustrados na Figura 67, em comparação com a amostra não reforçada, pode-se perceber que com o aumento de fibras ocorre um aumento da tenacidade do solo aumentando sua deformação e sua resistência máxima. As fibras aumentam a resistência de pico e induz um comportamento de endurecimento por deformação na mistura, controlando e mitigando a tensão através da transferência de tensão pelas fissuras para fibras, que compartilham esforços nas solicitações de tração.

Tabela 15 - Valores das tensões cisalhantes no ensaio de compressão diametral.

Amostra	Tensão Máxima de tração (kPa)	Deformação axial de ruptura (%)	Módulo de Elasticidade à tração (GPa)	Relação com a resistência à compressão
Solo Natural	41,71	3,5	1,33	0,1433
Solo+0,25% Fibra de Coco	44,30	4	1,48	0,1445
Solo+0,50% Fibra de Coco	49,65	3	1,65	0,1220
Solo+1,0% Fibra de Coco	55,08	3,5	1,57	0,1227
Solo+2,0% Fibra de Coco	59,20	4,5	1,54	0,1720

Fonte: Autor, 2022

Figura 67 - Resultados da compressão diametral para o solo natural e as diferentes misturas



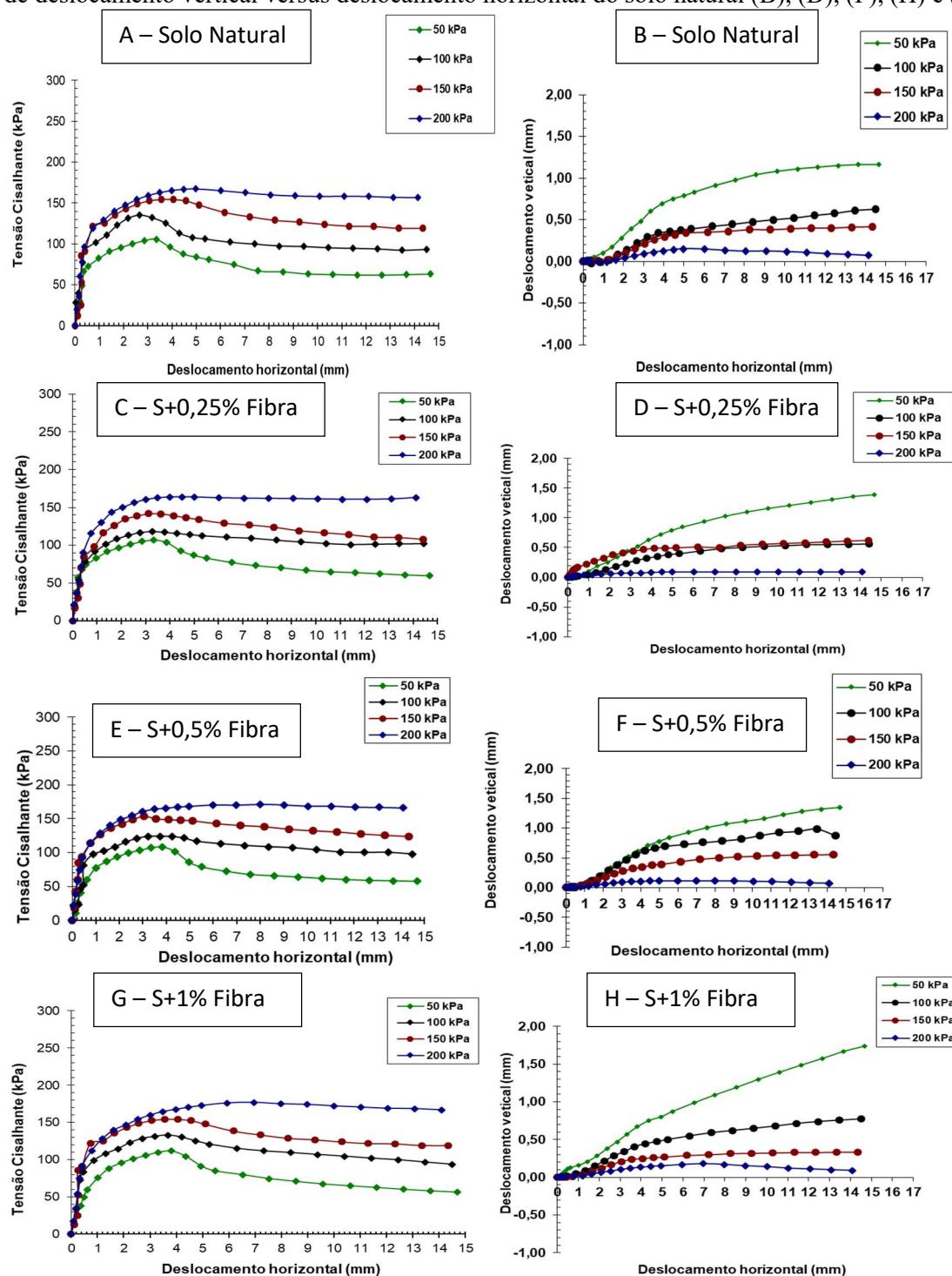
Fonte: Autor, 2022

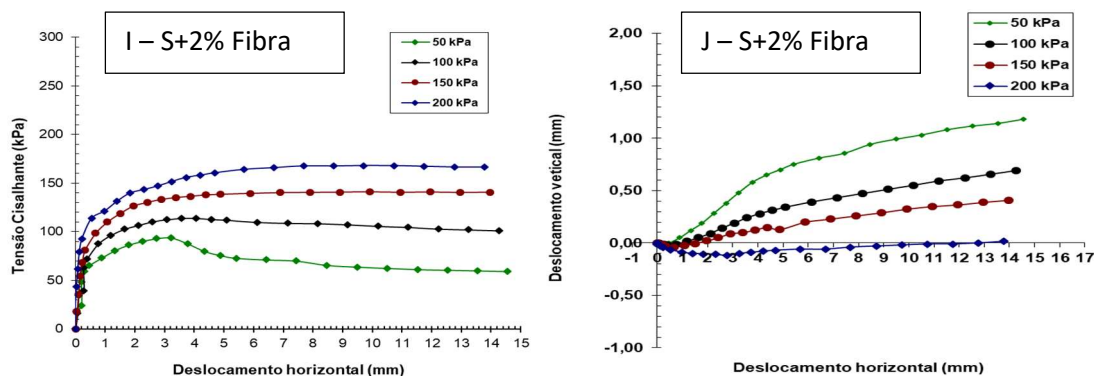
4.5.3 Ensaio de cisalhamento direto

Na Figuras 68 são apresentadas as curvas resultantes do ensaio de cisalhamento direto para as tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa na condição compactada na umidade ótima e peso específico aparente máximo, do solo natural e misturas com 0,25% fibra, 0,5% fibra, 1% de fibra e 2% de fibra. Para todos os acréscimos de fibras de coco e tensões normais de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa as curvas tensão cisalhante versus deslocamentos apresentam comportamento de pico para deslocamentos horizontais que variam entre 2 mm e 3,5 mm (Figura 68 A, C e, E.), e para a tensão de 200 kPa o comportamento é plástico, (Figura 68 G). As curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal apresentam pequena compressão até 1 mm de deslocamento horizontal e depois dilata para todas as tensões normais aplicadas, exceto para (Figura 68

B, D, F e H). A dilatância é tanto maior quando menor for a tensão normal aplicada, isto se deve ao fato que todos os corpos de prova foram moldados com a mesma energia de compactação, apresentando uma mesma tensão induzida a estrutura do solo e durante a mobilização do cisalhamento realiza um trabalho quanto maior quando menor for a tensão normal aplicada.

Figura 68 - Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal (A), (C), (E), (G) e (I) de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal do solo natural (B), (D), (F), (H) e (J).

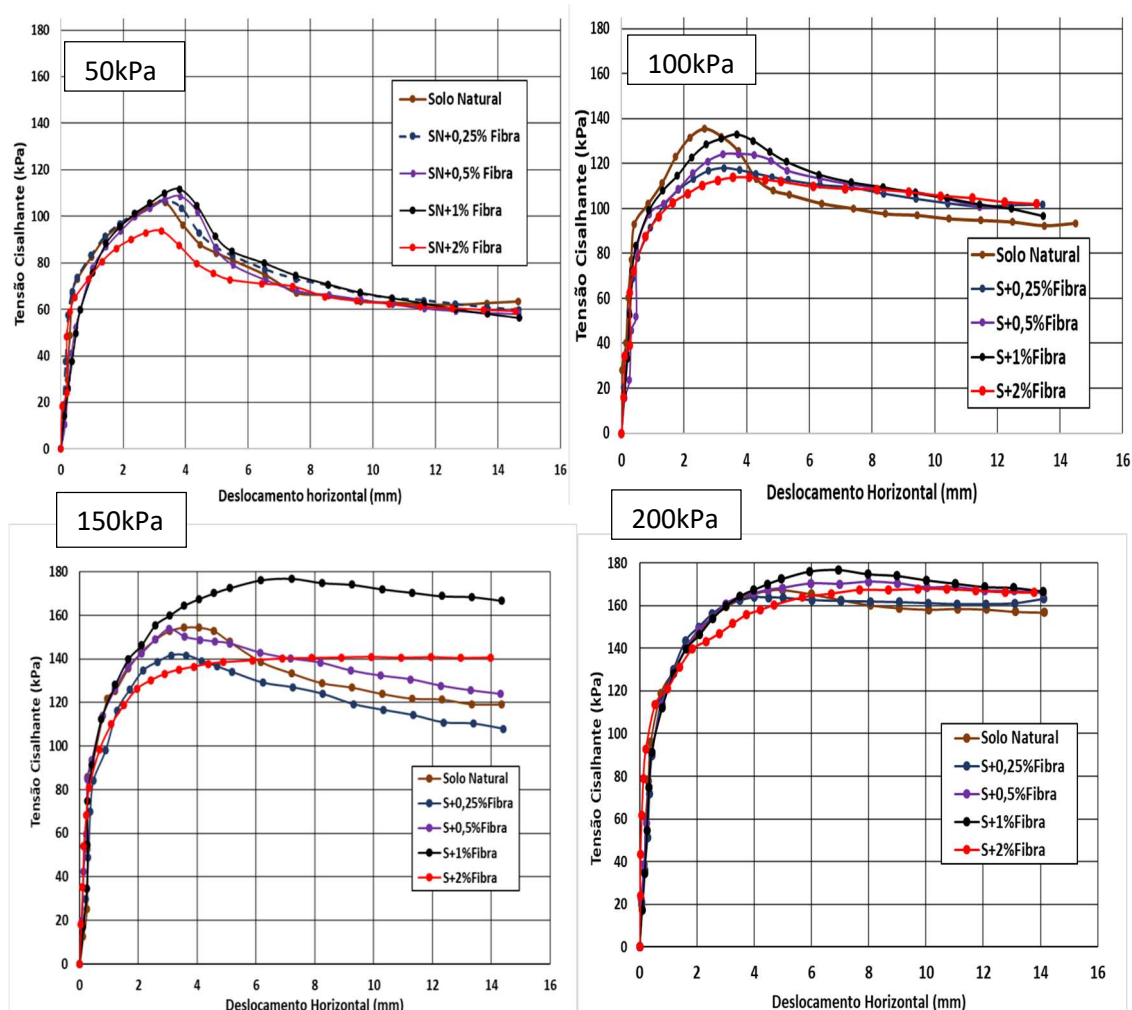




Fonte: Autor, 2022

A Figura 69 apresenta as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para cada tensão e misturas, sendo observado que apenas a mistura S+1% atingiu maior resistência que o solo sem reforço. A diminuição da resistência ao cisalhamento foi observada em todos os ensaios a partir da mistura S+2%, essa redução pode ser explicada pela redução da área de contato entre as partículas do solo e as fibras, havendo uma redução do entrosamento na resistência dos compósitos. As fibras são dispostas aleatoriamente, e não dispostas perpendicularmente ao eixo de corte da caixa de cisalhamento. Observa-se também uma semelhança com os ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral realizados que o solo reforçado com fibras na mistura S+1% apresenta maiores resistências e maiores deformações de ruptura em relação ao solo não reforçado, e que essa resistência começa a cair a partir da mistura S+2%. Observa-se ainda na Figura 69, que para uma mesma tensão normal aplicada a diferença entre a tensão cisalhante de pico e a tensão cisalhante do final do ensaio vai diminuindo a medida que a tensão normal aplica cresce.

Figura 69 - Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para cada tensão e misturas



Fonte: Autor, 2022

A Tabela 16 apresenta os valores das tensões cisalhantes máximas e dos correspondentes do ângulo de atrito e coesão obtidos do solo e das misturas compactados para a tensão máxima e das tensões cisalhantes para o deslocamento de 14 mm (“final de ensaio”). A Figura 64a apresenta as envoltórias de Mohr-Coulomb para tensões cisalhantes máximas e a Figura 64b para as tensões cisalhantes correspondentes ao deslocamento de 14 mm. Verifica-se inicialmente que a adição de fibra de coco ao solo nas proporções de 0,25%, 0,50% e 2,00%, a resistência ao cisalhamento decresce em relação ao solo natural e para a adição de 1,00% de fibra a mistura solo fibra apresenta maior resistência ao cisalhamento do que nas demais misturas e solo natural.

A Figura 70 mostra a variação da coesão (Figura 65a) e do ângulo de atrito (Figura 65b) com a variação do teor de fibra. Graficamente o comportamento desses dois

parâmetros em alguns estudos que realizaram ensaio de resistência ao cisalhamento direto. Em Norsyahariati *et al.* (2016) houve o mesmo comportamento do estudo, em que a inserção de 1% de fibra diminuiu ligeiramente a coesão do compósito, em relação ao solo sem fibras, enquanto que o ângulo de atrito teve um aumento mais acentuado.

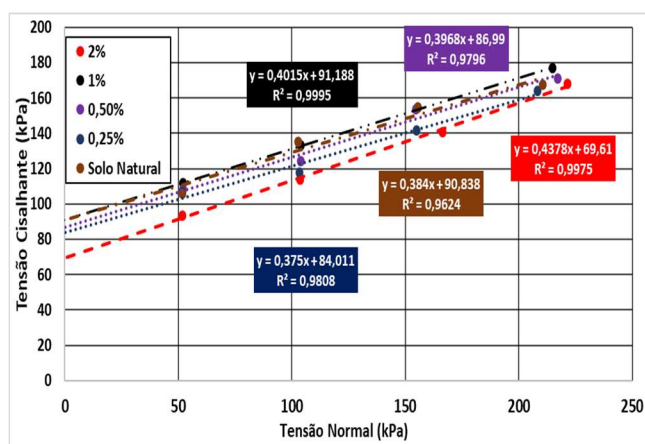
Tabela 16 - Valores das tensões cisalhantes no ensaio de compressão simples.

Amostra	Tensão Máxima σ (kPa)				Ângulo de Atrito (θ)	Coesão (kPa)	Tensão σ (kPa) ($\epsilon=14\text{mm}$)				Ângulo de Atrito (θ)	Coesão (kPa)
	50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa			50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa		
Solo Natural	105,9	135,3	154,4	167,4	21	90,83	63,3	93,3	119,2	156,8	27,88	30,93
Solo+ 0,25%	106,7	118,0	141,6	163,9	20,55	84,01	59,6	102,1	107,9	163,1	28,59	28,83
Solo+ 0,50%	108,4	124,1	153,6	171,1	21,64	86,99	57,8	97,94	123,9	165,8	31,12	23,45
Solo+ 1,0%	111,6	132,9	154,4	176,8	21,87	91,18	56,3	93,75	119,2	166,7	31,59	19,43
Solo+ 2,0%	93,57	113,7	140,8	167,8	23,63	69,61	59,1	101,0	140,6	166,1	33,23	26

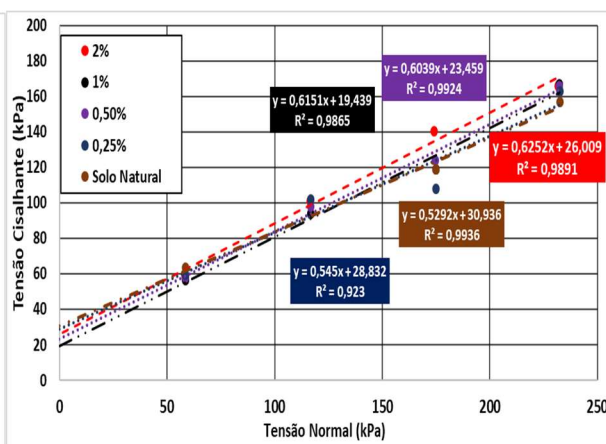
Fonte: Autor, 2022

Figura 70 - Envoltórias de Mohr-Coulomb

a) Tensões cisalhantes máximas.

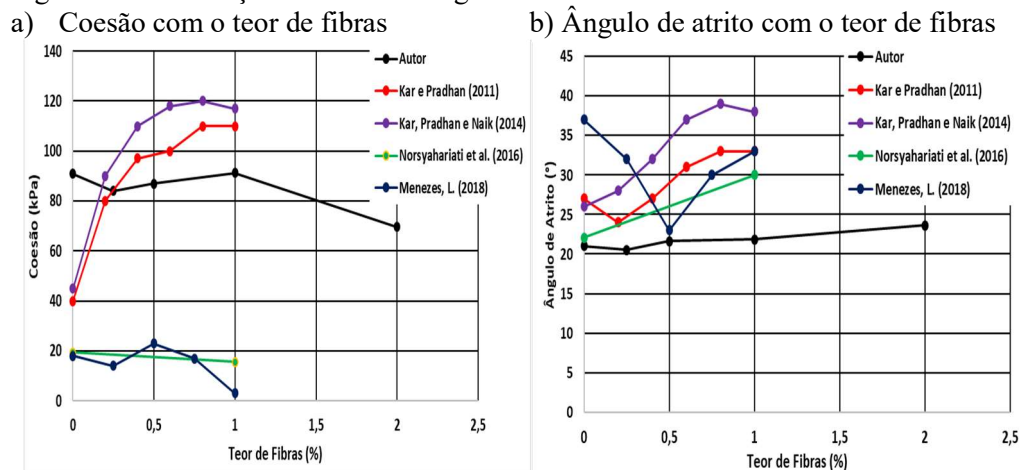


b) Tensões cisalhantes ($\epsilon=14\text{mm}$)



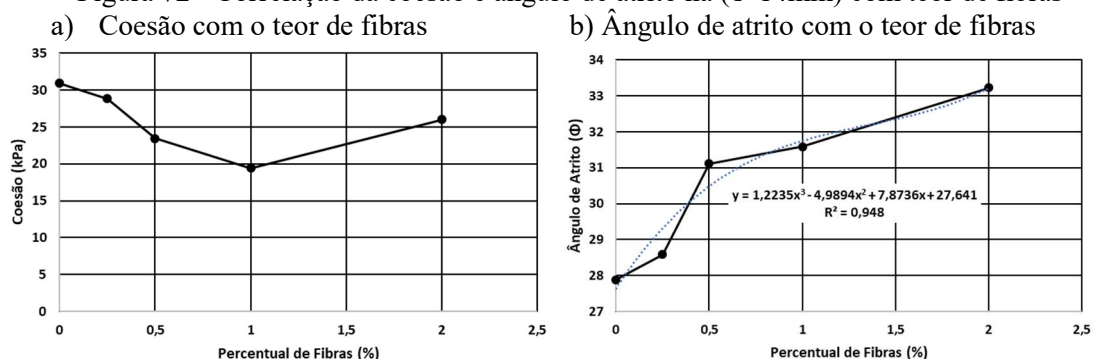
Fonte: Autor, 2022

Figura 71 - Correlação da coesão e ângulo de atrito na tensão máxima com teor de fibras



Fonte: Autor, 2022

Figura 72 - Correlação da coesão e ângulo de atrito na ($\epsilon=14\text{mm}$) com teor de fibras



Fonte: Autor, 2022

A Figura 71 mostra a variação da coesão (Figura 66a) e do ângulo de atrito (Figura 66b) com a variação do teor de fibra. A coesão das misturas solo-fibra cresce quando a adição de fibra aumenta de 0,25% a 1% atingindo o valor máximo (21,87 kPa) a 1% e decresce ao adicionar 2%. Comportamento semelhante foi encontrado por Menezes *et al.*(2019) quando a coesão atinge um máximo a 0,50% de fibra e depois decresce para percentuais maiores de fibras (0,75% e 1%). Norsyahariati *et al.*, (2016) verificaram que a inserção de 1% de fibra diminuiu ligeiramente a coesão do compósito, em relação ao solo sem fibras, enquanto que o ângulo de atrito teve um aumento mais acentuado. Kar e Pradhan (2011) e Kar *et al.*(2014) verificaram que a coesão e angulo de atrito da mistura solo-fibra cresce com o aumento do teor de fibras até 0,75% e depois decresce ou estabiliza. Menezes (2018) observou que a adição de fibra ao solo diminuiu o ângulo de atrito na mistura até 0,50% e depois cresce até 1%. Os valores do ângulo de atrito obtidos no presente estudo crescem com o incremento do teor de fibra atingindo o maior valor (23, 63°) para 2% de fibra adicionada. Na Figura 72 percebe-se para tensões com deformação em 14mm que a coesão do solo tem leve alteração, porém o ângulo de atrito do solo nesta deformação aumenta linearmente com o acréscimo de fibras.

4.5.4 Considerações sobre a influência da adição das fibras da resistência

A Tabela 17 apresenta um resumo da resistência do solo e das misturas solo-fibra de coco obtidas por ensaio de Compressão Simples, Tração por Compressão Diametral e Cisalhamento Direto. O percentual de 1,00% de fibra adicionado ao solo expansivo de Paulista-PE foi o que melhor agregou resistência ao solo natural compactado na umidade ótima. A resistência a compressão simples, à tração por compressão diametral e por cisalhamento direto cresce com adição de fibra de coco. As deformações na ruptura crescem com o incremento de fibras de coco.

Tabela 17 - Valores da resistência do solo e das misturas solo-fibra de coco obtidas por ensaio de Compressão Simples, Tração por Compressão Diametral e Cisalhamento Direto

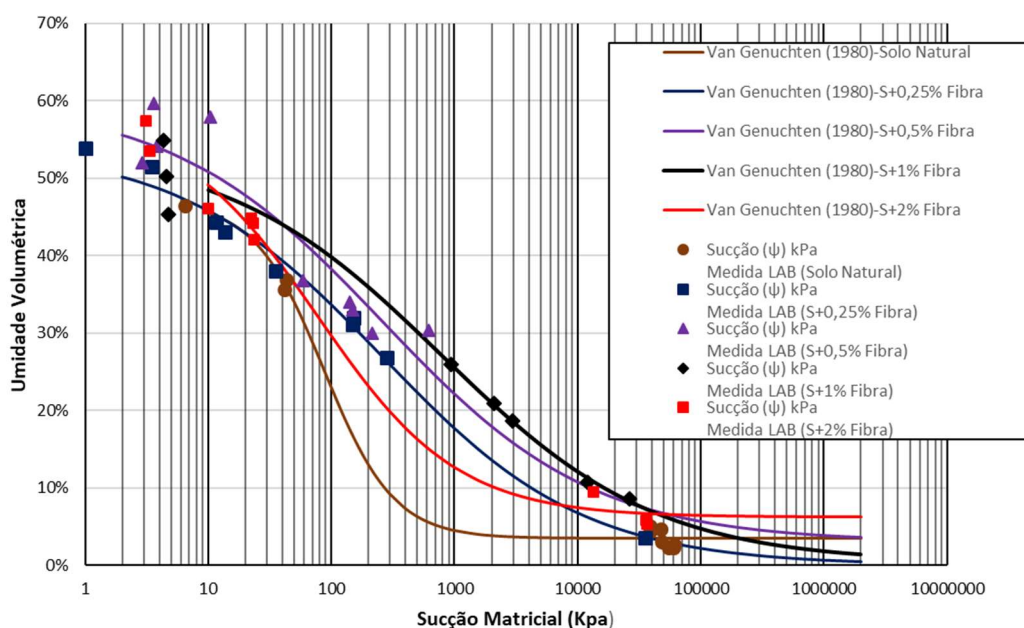
Solo / misturas	Resistência por Compressão Simples		Resistência a tração por comp. diametral		Resistência ao cisalhamento direto			
					Por tensão máxima		Por desl. a 14 mm	
	Resistência (kPa)	ε_{rup} (%)	Resistência (kPa)	ε_{rup} (%)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
Solo Natural	290,91	4,5	41,71	3,5	90,83	21	30,93	27,88
Solo+0,25% Fibra	306,43	4,8	44,30	4,0	84,01	20,55	28,83	28,59
Solo+0,50% Fibra	406,69	7,0	49,65	3,0	86,99	21,64	23,45	31,12
Solo+1,0% Fibra	448,61	6,5	55,08	3,5	91,18	21,87	19,43	31,59
Solo+2,0% Fibra	344,12	8,0	59,20	4,5	69,61	23,63	26	33,23

ε_{rup} -deformação na ruptura, C – coesão ϕ – Ângulo de atrito

4.6 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E NAS MISTURAS SOLO FIBRA

Na Figura 73 são apresentados os dados experimentais das curvas de retenção de água em termos da sucção matricial e umidade volumétrica, bem como suas respectivas curvas de ajuste. É possível observar que as curvas das misturas permaneceram do lado direito do gráfico em relação a curva do solo natural. Isto indica que a presença destes conteúdos de fibras de coco na matriz de solo argiloso aumentou a retenção de água para os mesmos níveis de sucção. O acréscimo de fibras houve um aumento desta retenção até o percentual de 2% que apresentou um trecho da curva, entre 40 e 6000 kPa de sucção, do lado esquerdo do gráfico em relação as curvas do solo das outras misturas, indicando que neste trecho a retenção de água da mistura é menor havendo uma redução em relação às outras misturas.

Figura 73 - Curvas de retenção de água em termos da sucção matricial e umidade volumétrica



Fonte: Autor, 2022

As curvas das misturas com 0,25, 0,5% e 1% de fibras de coco apresentaram comportamento muito semelhante entre si e em relação ao solo natural, porém é possível verificar em ambas as misturas aumentos nas umidades volumétricas de saturação e residual em comparação ao solo natural. As misturas apresentaram também pequenos aumentos no trecho de saturação das curvas, isto é, no trecho antes do ponto de entrada de ar quando comparada ao solo natural, indicando com isto que a adição de fibras de coco ao solo argiloso expansivo aumentou a sucção de entrada de ar atingindo um valor máximo para 1% de fibra.

Para uma umidade 45% a sucção encontrada no solo natural e misturas 0,25%, 0,5%, 1% e 2% foram respectivamente, 7, 11, 35, 41, e 10kPa.

Menezes (2018) afirma que a adição das fibras de coco aumenta os vazios das misturas o que induz a uma maior capacidade de armazenamento de água em relação ao solo natural, isto explica o motivo pelo qual a umidade volumétrica de saturação apresentar acréscimo com o conteúdo da fibra.

Os índices de ajustes obtidos através das curvas de retenção de água do solo natural e das misturas são apresentados na Tabela 18. Observa-se que o ponto de entrada do solo natural foi da ordem de 50 kPa e das misturas com 0,25, 0,5, 1 e 2% foram de 220, 290 e 500 e 100 kPa, respectivamente.

Tabela 18 - Valores das tensões cisalhantes no ensaio de compressão simples.

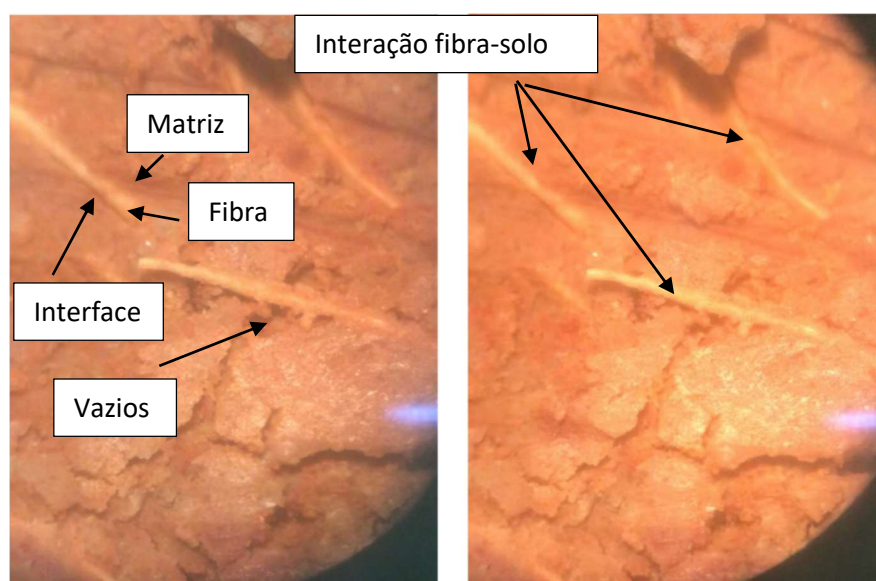
Amostra	Ψ entrada de Ar (kPa)	θ Residual (%)	θ Saturação (%)	n	m	Alfa
Solo Natural	50	3,46	47,0	1,5913321	0,9629278	0,0114
Solo+0,25%	220	0,01	54,0	1,2375340	0,4294754	0,00386
Fibra de Coco						
Solo+0,50%	290	3,00	60,1	1,2080693	0,4192499	0,003864
Fibra de Coco						
Solo+1,0%	500	0,28	54,02	1,2241327	0,407228	0,0012736
Fibra de Coco						
Solo+2,0%	100	1,28	58,1	1,9146773	0,4	0,0128161
Fibra de Coco						

Fonte: Autor, 2022

4.7 PROCESSO DE FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FISSURAS POR RESSECAMENTO

Inicialmente foi utilizado um microscópico ótico com aumento de 100 x para analisar a interação solo fibra após compactação, depois utilizado um programa de processamento de imagem de domínio público (*ImageJ*) para a obtenção de informações detalhadas sobre a mecânica de fissuração da amostra de solo. As fotos obtidas por meio de um webcam foram processadas com esse software, obtendo vários índices para caracterização do padrão de fissuras: Área total fissurada, CIF e CRR.

Figura 74 - Interação fibra solo após a compactação para um solo+1% Fibra



Fonte: Autor, 2022

a) Tempo para surgimento das primeiras fissuras

A primeira fissura inicia em valor de umidade em que as tensões de tração prevalecem por tempo suficiente para provocar o surgimento da fissura. A partir das fotografias, observa-se que em um determinado estágio do processo de secagem, nenhuma fissura foi propagada ou iniciada. Este ponto ocorre quando um aumento adicional das tensões de tração não provoca o aparecimento de novas fissuras nem a propagação de fissuras já existentes.

O tempo para o aparecimento das primeiras fissuras e da umidade inicial do processo de fissuração depende de vários fatores como umidade inicial, temperatura e umidade relativa do ar, heterogeneidade e mineralogia (Tang *et al.*, 2012).

Os valores de densidade real dos grãos (γG), umidade inicial (W_i) e índice de vazios inicial (e_0) norteadores para preparação e moldagem das amostras são mostrados na Tabela 19. Podem ser vistos ainda os valores correspondentes ao tempo para o surgimento das primeiras fissuras (T_{fi}), a umidade da amostra no momento inicial da fissuração (W_{fi}).

Tabela 19 - Umidade das amostras no momento do início das primeiras fissuras.

Amostra	W_i (%)	LL (%)	LP (%)	γG (kN/m ³)	e_0	T_{fi} (h)	W_{fi} (%)
Solo Natural	57,75	52,5	21,81	26,7	1,51	7,66	56,66
Solo+0,25%	64,57	58,7	25,11	26,7	1,51	6,36	53,88
Fibra de Coco							
Solo+0,50%	64,9	59,0	24,94	26,7	1,51	11,6	49,47
Fibra de Coco							
Solo+1,0%	70,4	64,0	25,92	26,7	1,51	9	42,54
Fibra de Coco							
Solo+2,0%	76,34	69,4	27,63	26,7	1,51	8	60,37
Fibra de Coco							

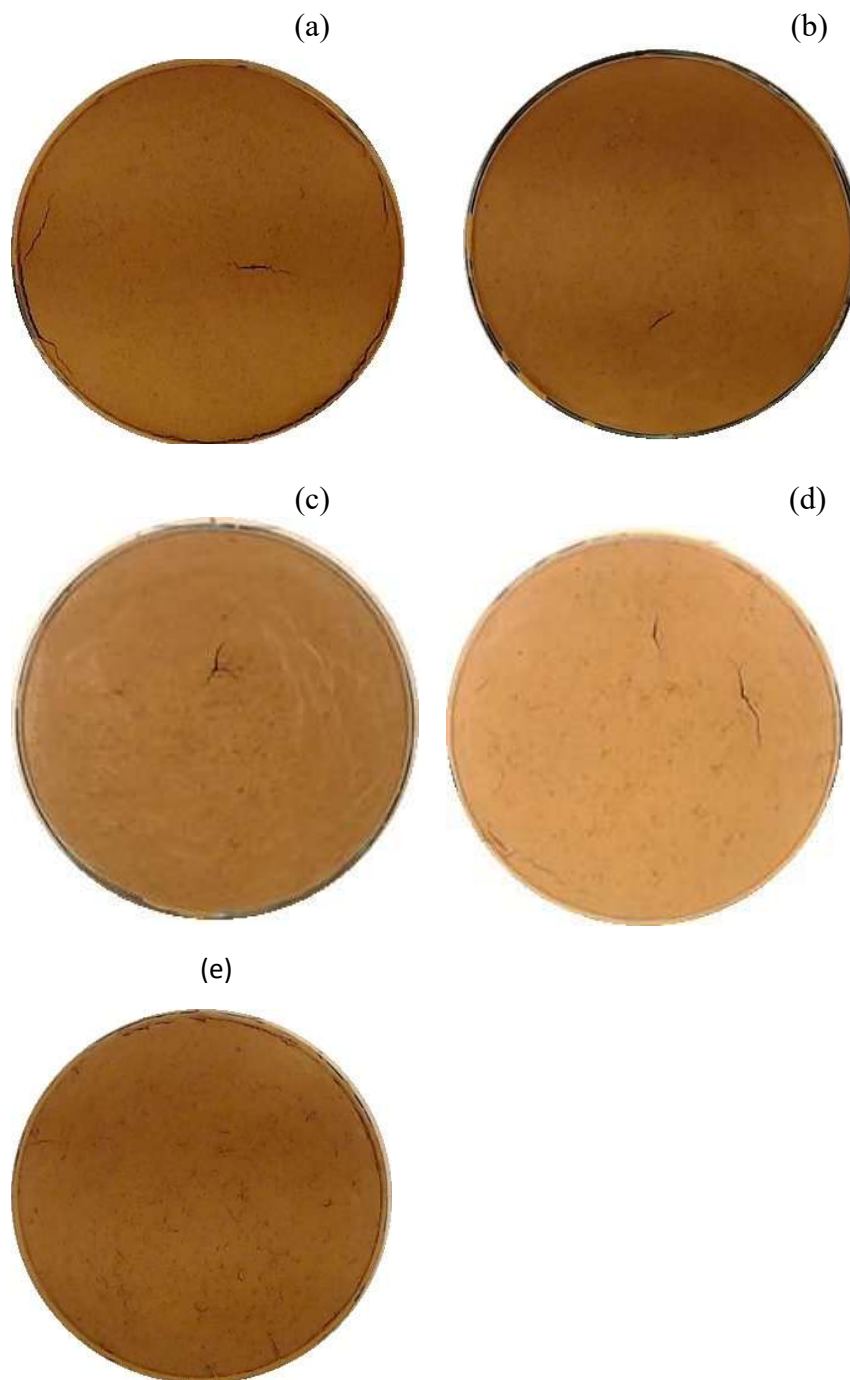
Fonte: Autor, 2022

Observa-se que a amostra de solo natural e S+0,25% Fibras fissuraram em menor tempo de ensaio em relação as outras amostras (7,6 e 6,36 horas respectivamente) seguida pela amostra S+2%, fissurada após 8 horas, por fim aparecem as amostras S+1% Fibra e S+0,5% Fibra com 9 e 11,6 horas respectivamente.

A amostra de solo+2% de fibra foi a que perdeu mais umidade antes do surgimento das primeiras fissuras, 20,91% em relação à umidade inicial. Já o solo natural, fissurou com apenas 1,88 % de perda de umidade. O valor da umidade inicial (no caso estudado,

10% acima do limite de liquidez da amostra) influencia no tempo para surgir as primeiras fissuras, T_{fi} (h), e na umidade no início da fissuração W_{fi} .

Figura 75 - Primeiras fissuras nas amostras ensaiadas: (a) solo natural de Paulista-PE; (b) solo+0,25%Fibra; (c) solo+0,5%Fibra; (d) solo+1% Fibra e (e) Solo+2% Fibra



Fonte: Autor, 2022

b) Análise da propagação de fissuras

Foram selecionadas imagens para avaliar a evolução das fissuras e a determinação do CIF e demais índices ao longo da secagem das amostras. Observou-se que em todos os ensaios houve mudança na cor do solo úmido para a cor do solo após secagem, no final dos ensaios (através da análise das fotografias). Nenhuma mudança significativa de cor ocorreu nos estágios iniciais de secagem. Isto indicou que a perda de umidade era uniforme sobre a superfície da amostra no estado inicial de secagem. Analisando as imagens dos ensaios com amostras de solo natural, Solo+0,25%Fibra, Solo+0,5%Fibra, Solo+1% Fibra e Solo+2%Fibra, percebe-se que as fissuras seguem um padrão diferente para cada percentual de fibra de coco adicionado ao solo.

b1) Análise da propagação de fissuras no solo natural

A umidade inicial do ensaio solo natural é de 57,8 % (correspondente a 1,1 vezes o limite de liquidez) e índice de vazios de 1,51. A sequência de imagens da Figura 74 mostra o aparecimento e evolução das fissuras ao longo de aproximadamente 28 horas de ensaio. Este ensaio teve o surgimento de fissuras com direcionamento da borda para o centro, a partir da contração do solo. Considerando que o ensaio teve duração de 28 horas, que as primeiras fissuras apareceram a 7,1 horas e que após 24 horas de observação praticamente não se observava mais desenvolvimento de fissuras, o processo de fissuração teve duração de 9,3 horas.

À medida que a umidade do solo foi reduzindo, ocorreu contração e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo. De modo geral, uma fissura secundária tem origem em uma fissura primária, mostrando o formato “T” ou “Y”, semelhante ao encontrado por Tang *et al.*, (2012).

Nas Figuras 76 e 77, na curva CIF *versus* Umidade, pode-se observar um aumento não linear do CIF com a perda de umidade, após 10,49 % de umidade o CIF tem uma tendência de estabilização e apresenta decréscimo próximo ao fim do ensaio, quando a umidade atinge 3,06 %.

Figura 76 - Sequência processo de formação de fissuras solo natural

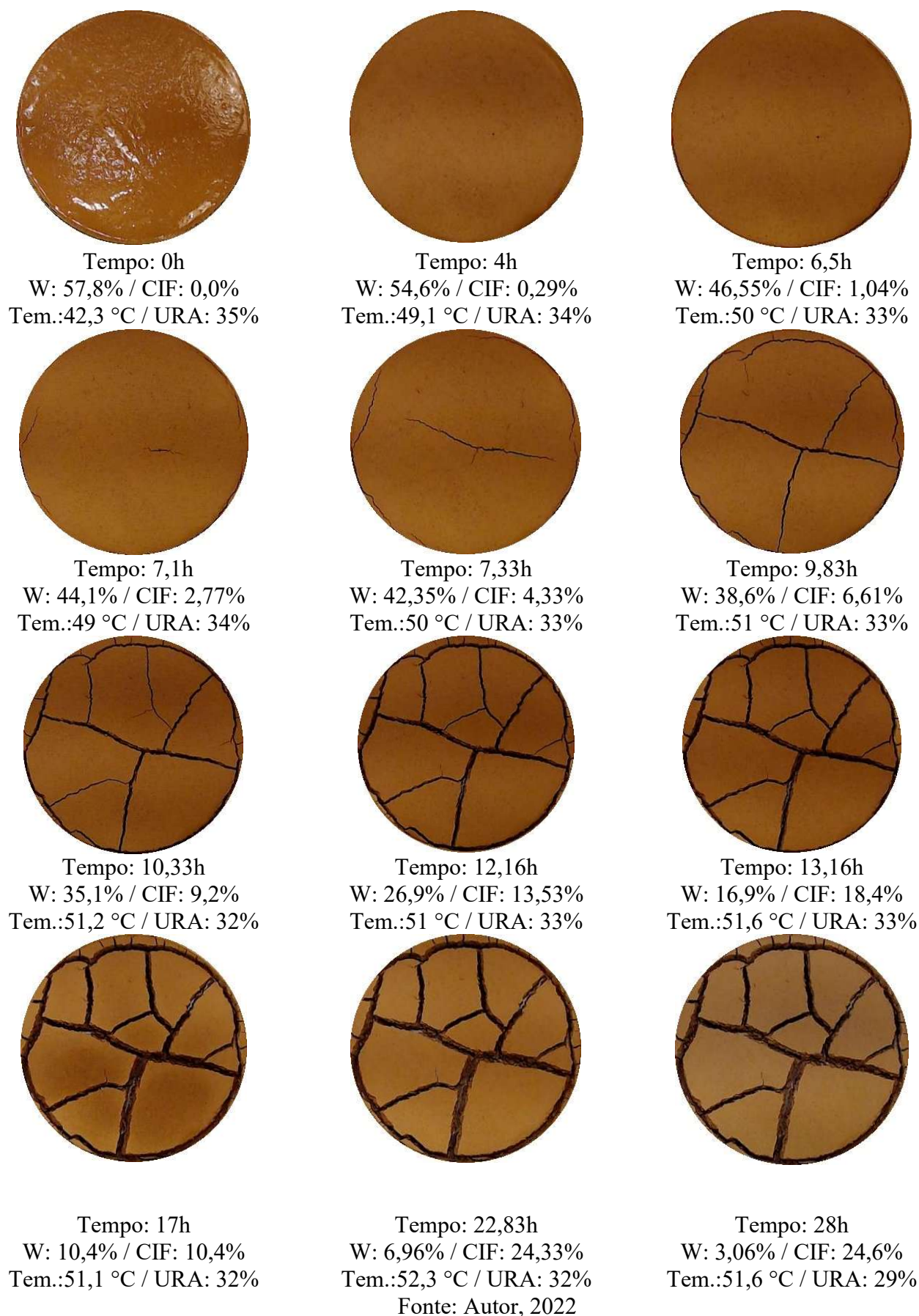
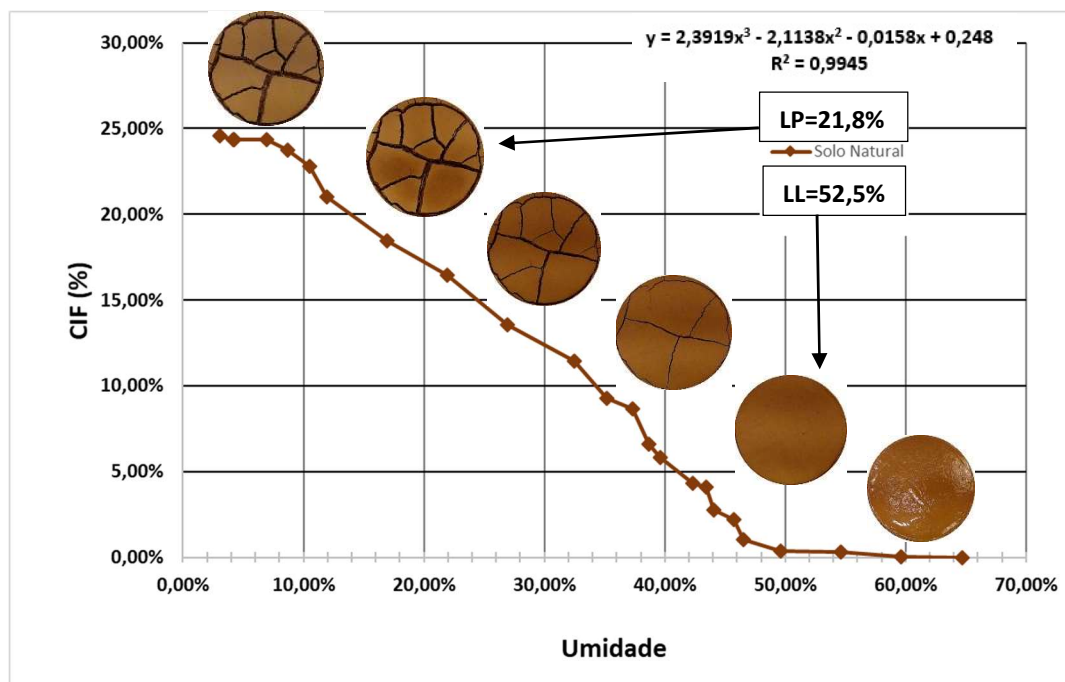


Figura 77 - Curva CIF versus Umidade



Fonte: Autor, 2022

b.2 - Análise da propagação de fissuras na mistura solo + 0,25%Fibra de coco

A umidade inicial da mistura solo+0,25% Fibra é de 64,5 % (correspondente a 1,1 vezes o limite de liquidez) e índice de vazios de 1,51. A sequência de imagens da Figura 76 mostra o aparecimento e evolução das fissuras ao longo de aproximadamente 28 horas de ensaio. Este ensaio teve o surgimento de fissuras com direcionamento da borda para o centro, a partir da contração do solo. Considerando que o ensaio teve duração de 28 horas, que as primeiras fissuras apareceram a 6,3 horas e que após 24 horas de observação praticamente não se observava mais desenvolvimento de fissuras, o processo de fissuração teve duração de 10,5 horas.

À medida que a umidade do solo foi reduzindo, ocorreu contração e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo. De modo geral, uma fissura secundária tem origem em uma fissura primária, mostrando o formato “T” ou “Y”. Houve uma pequena redução do CIF% em todo o trecho em relação ao solo natural. (CIF final do Solo natural foi de 24,3% enquanto o CIF do solo reforçado com 0,25% Fibra foi de 21,5% apresentando uma redução de 11,52%, tendo um CRR final de 17,1%.

Nas Figuras 78 e 79, na curva CIF *versus* Umidade, observa-se aumento não linear do CIF com a perda de umidade, após 10,78 % de umidade o CIF tem uma tendência de estabilização e decréscimo próximo ao fim do ensaio, em umidade de 4,26%.

Figura 78 - Sequência da formação de fissuras da mistura solo+0,25% Fibra



Tempo: 0h
W: 64,5% / CIF: 0,0%
Tem.:49,7 °C / URA: 41%



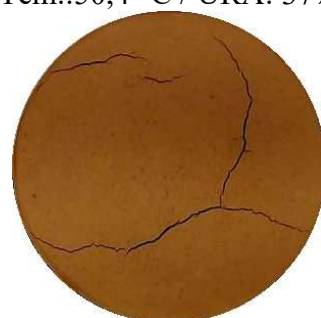
Tempo: 4,16h
W: 53,8% / CIF: 0,1%
Tem.:50,4 °C / URA: 37%



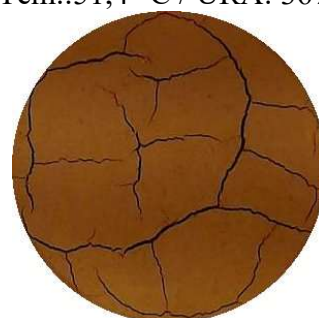
Tempo: 5,5h
W: 47,74% / CIF: 0,2%
Tem.:51,4 °C / URA: 36%



Tempo: 6,33h
W: 45,1% / CIF: 0,39%
Tem.:51,8 °C / URA: 34%



Tempo: 7h
W: 42,59% / CIF: 1,45%
Tem.:51,1 °C / URA: 35%



Tempo: 8,13h
W: 38,4% / CIF: 5,44%
Tem.:52,1 °C / URA: 34%



Tempo: 8,33h
W: 36,1% / CIF: 6,87%
Tem.:52,1 °C / URA: 33%



Tempo: 10,16h
W: 26,58% / CIF: 13,06%
Tem.:52,1 °C / URA: 32%



Tempo: 12,5h
W: 16,77% / CIF: 17,19%
Tem.:52,1 °C / URA: 34%



Tempo: 13,5h
W: 10,7% / CIF: 19,1%
Tem.:52,5 °C / URA: 34%



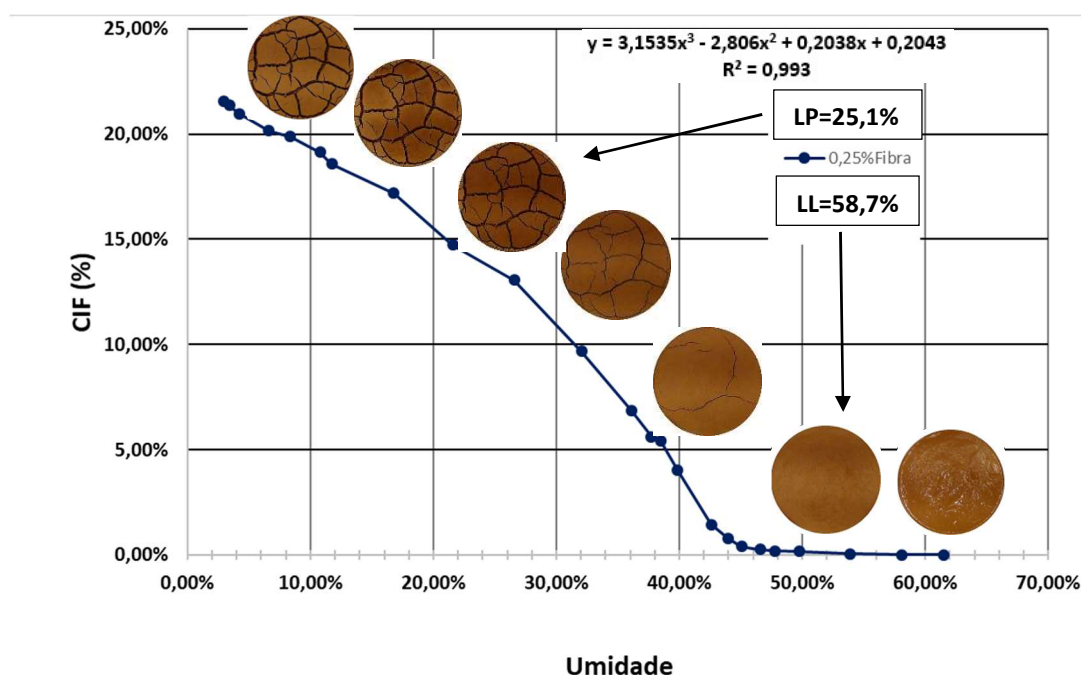
Tempo: 15,83h
W: 6,61% / CIF: 20,16%
Tem.:52,5 °C / URA: 34%



Tempo: 28h
W: 3,39% / CIF: 21,56%
Tem.:52,4 °C / URA: 32%

Fonte: Autor, 2022

Figura 79 - Curva CIF versus Umidade (Solo+0,25% Fibra)



Fonte: Autor, 2022

b.3 - Análise da propagação de fissuras na mistura solo + 0,5%Fibra de coco

A umidade inicial da mistura solo+0,5% Fibra é de 64,9 % (correspondente a 1,1 vezes o limite de liquidez) e índice de vazios de 1,51. A sequência de imagens da Figura 78 mostra o aparecimento e evolução das fissuras ao longo de aproximadamente 28 horas de ensaio. Este ensaio teve o surgimento de fissuras com direcionamento da borda para o centro, a partir da contração do solo. Considerando que o ensaio teve duração de 33 horas, que as primeiras fissuras apareceram a 11,6 horas e que após 28 horas de observação praticamente não se observava mais desenvolvimento de fissuras, o processo de fissuração teve duração de 16,4 horas.

À medida que a umidade do solo foi reduzindo, ocorreu contração e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo. De modo geral, uma fissura secundária tem origem em uma fissura primária, mostrando o formato “T”, “Y” e “V”. Houve uma redução do CIF% em todo o trecho em relação ao solo natural. (CIF final do Solo natural foi de 24,3% enquanto o CIF do solo reforçado com 0,5% Fibra foi de 19,85% apresentando uma redução de 18,31%, tendo um CRR final de 21,1%. Nas Figuras 80 e 81, na curva CIF *versus* Umidade, observa-se aumento não linear do CIF com a perda de umidade, após 7,56 % de umidade o CIF tem uma tendência de estabilização e decréscimo próximo ao fim do ensaio, em umidade de 3,68%.

Figura 80 - Sequência da formação de fissuras da mistura solo+0,5% Fibra



Tempo: 0h
W: 64,9% / CIF: 0,0%
Tem.:44,6 °C / URA: 43%



Tempo: 6h
W: 49,47% / CIF: 0,17%
Tem.:44 °C / URA: 43%



Tempo: 8,66h
W: 44,92% / CIF: 1,05%
Tem.:44 °C / URA: 44%



Tempo: 12,82h
W: 37,85% / CIF: 4,46%
Tem.:44°C / URA: 43%



Tempo: 16,65h
W: 30,95% / CIF: 10,38%
Tem.:43,4°C / URA: 44%



Tempo: 19,65h
W: 24,33% / CIF: 12,81%
Tem.:43,6 °C / URA: 44%



Tempo: 21,65h
W: 15,34% / CIF: 16,80%
Tem.:43,6 °C / URA: 43%



Tempo: 26,81h
W: 11,58% / CIF: 17,61%
Tem.:44,2 °C / URA: 42%



Tempo: 28,81h
W: 9,21% / CIF: 18,41%
Tem.:44,6 °C / URA: 43%



Tempo: 30,81h
W: 7,56% / CIF: 19,18%
Tem.:44,6 °C / URA: 43%



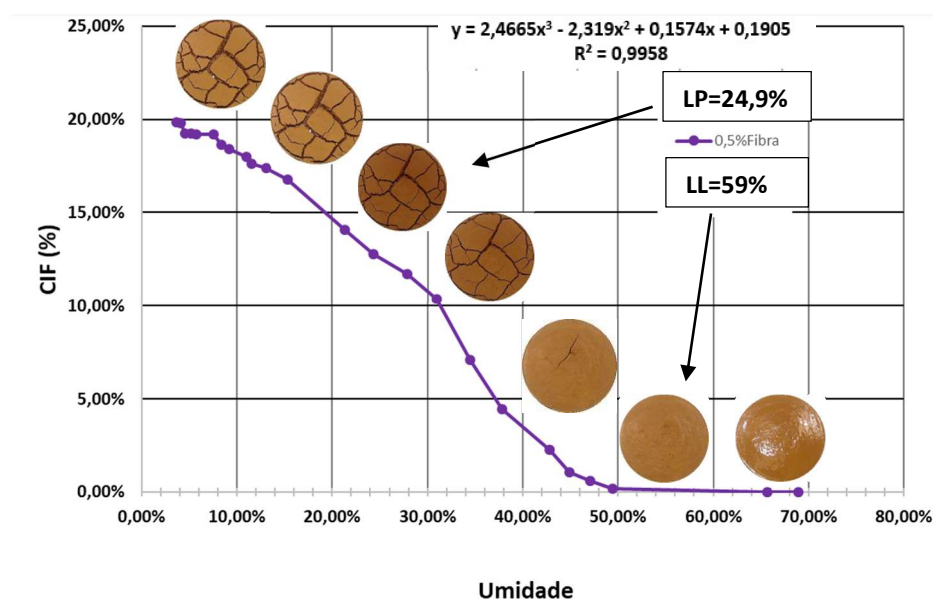
Tempo: 32h
W: 5,19% / CIF: 19,23%
Tem.:44,6 °C / URA: 43%



Tempo: 33h
W: 4,09% / CIF: 19,78%
Tem.:44,2 °C / URA: 43%

Fonte: Autor, 2022

Figura 81 - Curva CIF versus Umidade (Solo+0,5% Fibra)



Fonte: Autor, 2022

b.4 - Análise da propagação de fissuras na mistura solo + 1%Fibra de coco

A umidade inicial da mistura solo+1% Fibra é de 70,95 % (correspondente a 1,1 vezes o limite de liquidez) e índice de vazios de 1,51. A sequência de imagens da Figura 82 mostra o aparecimento e evolução das fissuras ao longo de aproximadamente 28 horas de ensaio. Este ensaio teve o surgimento de fissuras com direcionamento da borda para o centro, a partir da contração do solo. Considerando que o ensaio teve duração de 28 horas, que as primeiras fissuras apareceram a 9 horas e que após 24 horas de observação praticamente não se observava mais desenvolvimento de fissuras, o processo de fissuração teve duração de 15 horas.

À medida que a umidade do solo foi reduzindo, ocorreu contração e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo. De modo geral, uma fissura secundária tem origem em uma fissura primária, mostrando o formato “Y”, “V” e uma principal em forma de espiral. Houve uma grande redução do CIF% em todo o trecho em relação ao solo natural. (CIF final do Solo natural foi de 24,3% enquanto o CIF do solo reforçado com 1% Fibra foi de 15,12% apresentando uma redução de 37,77%, tendo um CRR final de 47,7%. Nas Figuras 82 e 83, na curva CIF *versus* Umidade, observa-se aumento linear do CIF com a perda de umidade, a partir de 42,54% até 3,81% de umidade onde o CIF tem uma tendência de estabilização.

Figura 82 - Sequência da formação de fissuras da mistura solo+1% Fibra



Tempo: 0h
W: 70,9% / CIF: 0,0%
Tem.:43,8 °C / URA: 47%



Tempo: 4,83h
W: 49,40% / CIF: 0%
Tem.:46,3 °C / URA: 41%



Tempo: 6h
W: 46,91% / CIF: 0,03%
Tem.:46,6 °C / URA: 42%



Tempo: 7,16h
W: 43,6% / CIF: 0,09%
Tem.:46,6°C / URA: 41%



Tempo: 8,16h
W: 41,22% / CIF: 0,21%
Tem.:47°C / URA: 41%



Tempo: 9,66h
W: 35,95% / CIF: 3,75%
Tem.:47 °C / URA: 41%



Tempo: 12h
W: 30,71% / CIF: 6,18%
Tem.:47 °C / URA: 40%



Tempo: 15,33h
W: 21,20% / CIF: 8,8%
Tem.:47 °C / URA: 40%



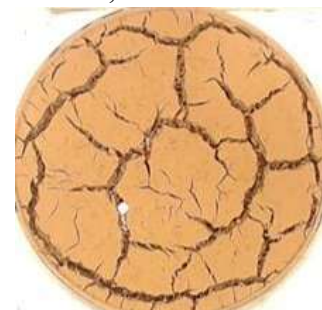
Tempo: 17,16h
W: 16,73% / CIF: 10,53%
Tem.:47,4 °C / URA: 40%



Tempo: 19h
W: 8,79% / CIF: 13,55%
Tem.:46,6 °C / URA: 41%



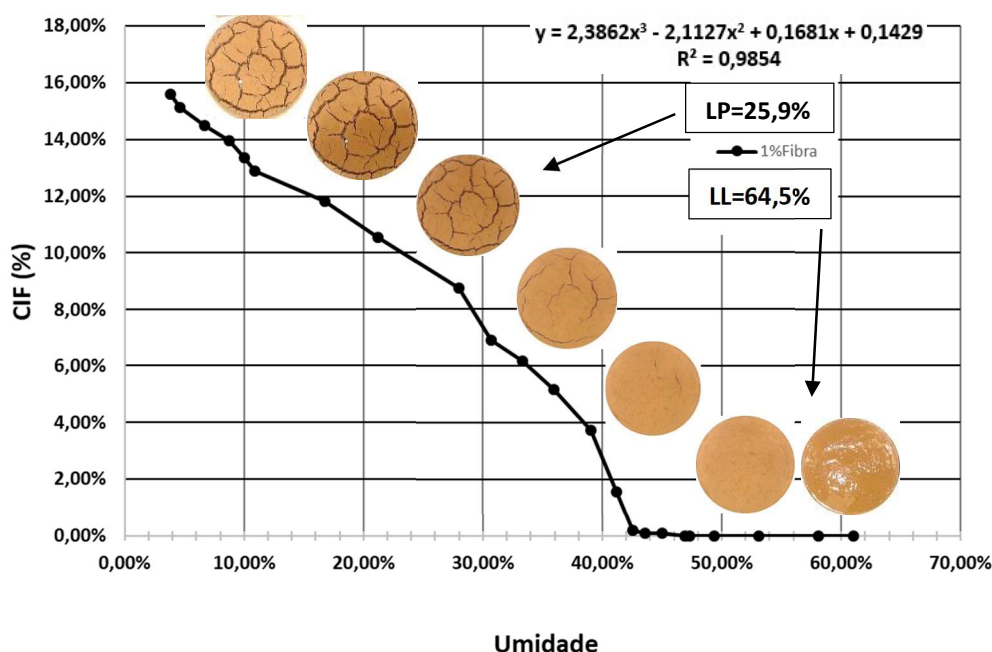
Tempo: 22h
W: 6,71% / CIF: 13,95%
Tem.:46,3 °C / URA: 41%



Tempo: 28h
W: 3,81% / CIF: 15,12%
Tem.:48,1 °C / URA: 38%

Fonte: Autor, 2022

Figura 83 - Curva CIF versus Umidade (Solo+1% Fibra)



Fonte: Autor, 2022

b.5 - Análise da propagação de fissuras na mistura solo + 2%Fibra de coco

A umidade inicial da mistura solo+2% Fibra é de 76,34 % (correspondente a 1,1 vezes o limite de liquidez) e índice de vazios de 1,51. A sequência de imagens da Figura 84 mostra o aparecimento e evolução das fissuras ao longo de aproximadamente 30 horas de ensaio. Este ensaio teve o surgimento de pequenas fissuras com direcionamento da borda para o centro, a partir da contração do solo. Considerando que o ensaio teve duração de 30 horas, que as primeiras fissuras apareceram a 10 horas e que após 24 horas de observação praticamente não se observava mais desenvolvimento de fissuras, o processo de fissuração teve duração de 14 horas.

À medida que a umidade do solo foi reduzindo, ocorreu contração e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo. De modo geral, uma fissura secundária tem origem em uma fissura primária, mostrando o formato “Y” e “V” porém bem menores em relação as misturas anteriores. Houve uma grande redução do CIF% em todo o trecho em relação ao solo natural. (CIF final do Solo natural foi de 24,3% enquanto o CIF do solo reforçado com 2% Fibra foi de 6,43% apresentando uma redução de 73,53%, tendo um CRR final de 79,56%. Nas Figuras 84 e 85, na curva CIF *versus* Umidade, observa-se aumento linear do CIF com a perda de umidade, a partir de 48,84% até 7,13% de umidade onde o CIF tem uma tendência de estabilização.

Figura 84 - Sequência da formação de fissuras da mistura solo+2% Fibra



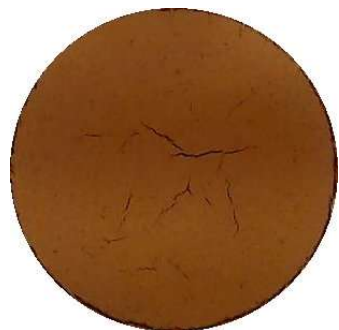
Tempo: 0h
W: 76,34% / CIF: 0,0%
Tem.:44 °C / URA: 44%



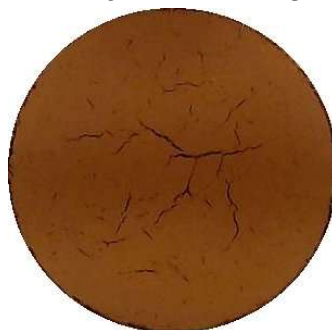
Tempo: 8,5h
W: 52,59% / CIF: 0,09%
Tem.:45 °C / URA: 43%



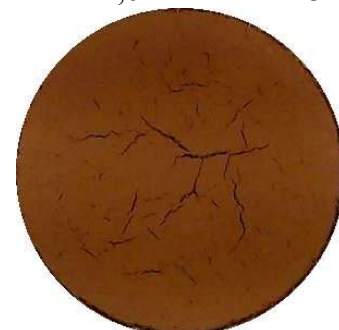
Tempo: 10,5h
W: 47,33% / CIF: 0,27%
Tem.:44,6 °C / URA: 43%



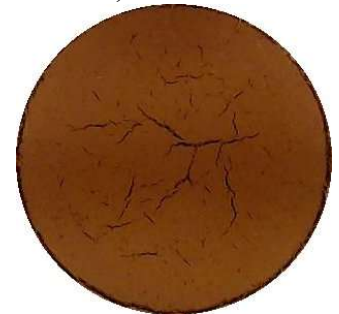
Tempo: 12,5h
W: 44,8% / CIF: 0,71%
Tem.:44,8°C / URA: 43%



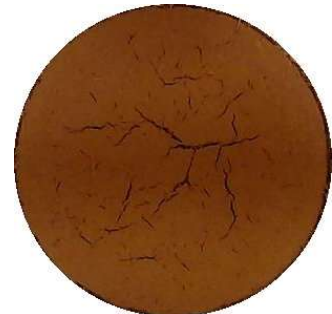
Tempo: 15h
W: 38,91% / CIF: 1,52%
Tem.:45°C / URA: 43%



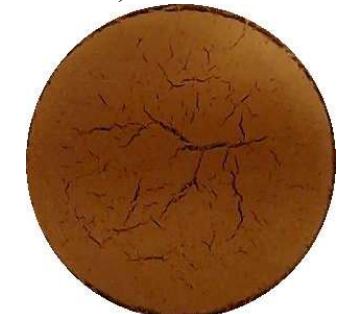
Tempo: 16h
W: 35,46% / CIF: 1,86%
Tem.:44,8 °C / URA: 42%



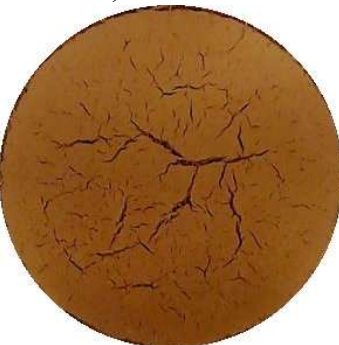
Tempo: 17h
W: 34,97% / CIF: 2,57%
Tem.:44,6 °C / URA: 43%



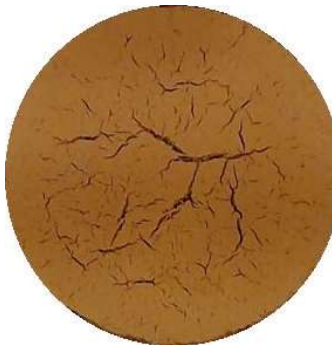
Tempo: 18h
W: 33,61% / CIF: 2,82%
Tem.:45 °C / URA: 43%



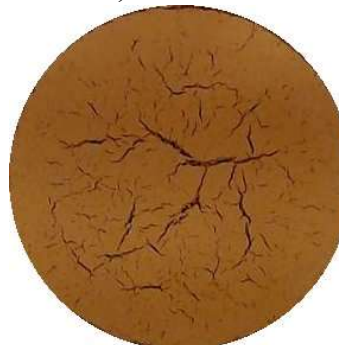
Tempo: 21,5h
W: 25,78% / CIF: 4,43%
Tem.:44,6 °C / URA: 44%



Tempo: 23,83h
W: 21,05% / CIF: 4,65%
Tem.:44,6 °C / URA: 42%



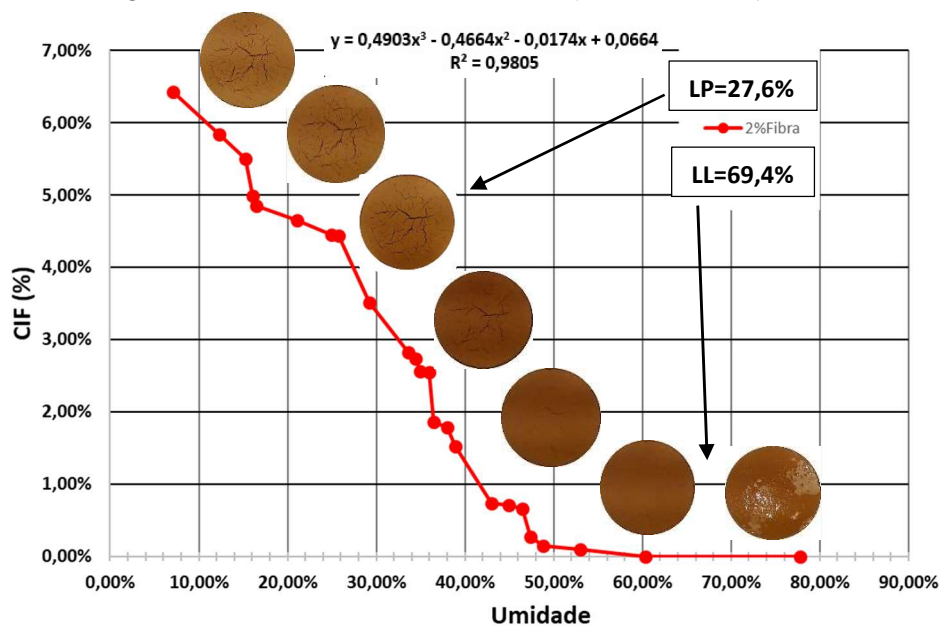
Tempo: 25h
W: 16,04% / CIF: 4,98%
Tem.:45,2 °C / URA: 43%



Tempo: 30h
W: 7,13% / CIF: 6,43%
Tem.:44,6 °C / URA: 42%

Fonte: Autor, 2022

Figura 85 - Curva CIF versus Umidade (Solo+2% Fibra)



Fonte: Autor, 2022

Observa-se que houve uma redução significativa na área fissurada do solo expansivo argiloso de Paulista/PE com o incremento das fibras de coco verde. Na Figura 86 percebe-se a comparação do solo natural com o solo reforçado.

Figura 86 - Comparativo da formação e propagação das fissuras e o tempo no solo e misturas

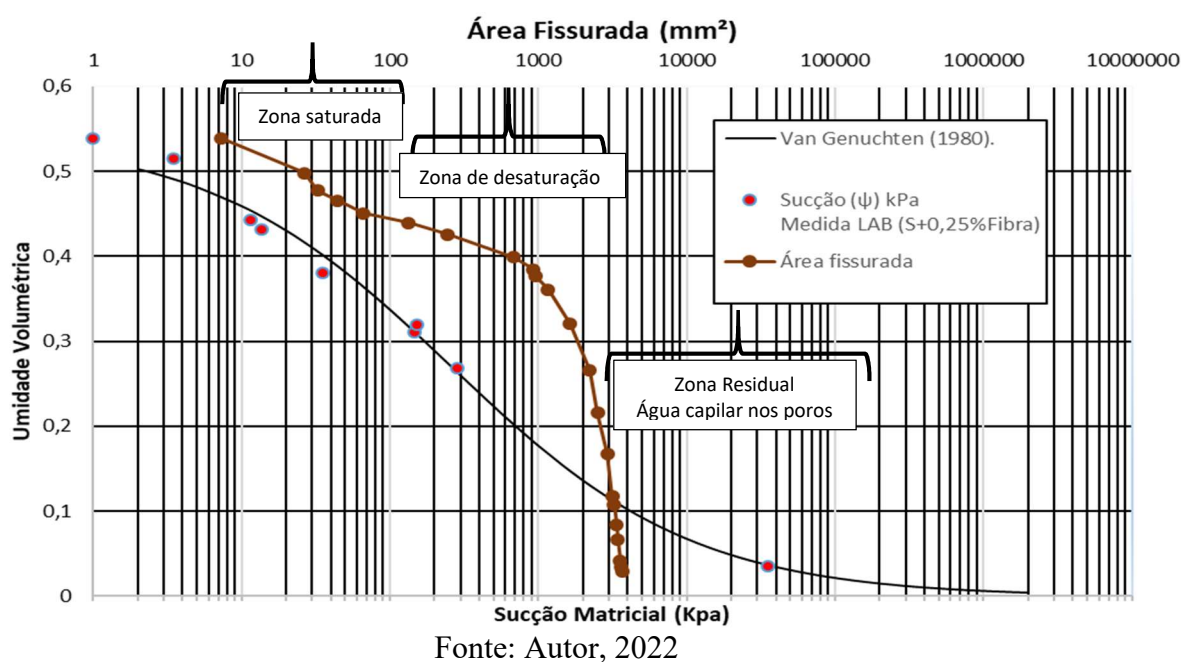
<u>Amostra</u>	<u>Tempo=0h</u>	<u>Tempo=10h</u>	<u>Tempo=12h</u>	<u>Tempo=24h</u>
Solo Natural				
Solo+0,25% Fibra				
Solo+0,5% Fibra				
Solo+1% Fibra				
Solo+2% Fibra				

Fonte: Autor, 2022

b5 - Comparação do processo de propagação de fissuras no solo natural e nas misturas solo-0,25%Fibra, solo-0,5%Fibra, solo-1%Fibra e solo-2%Fibra.

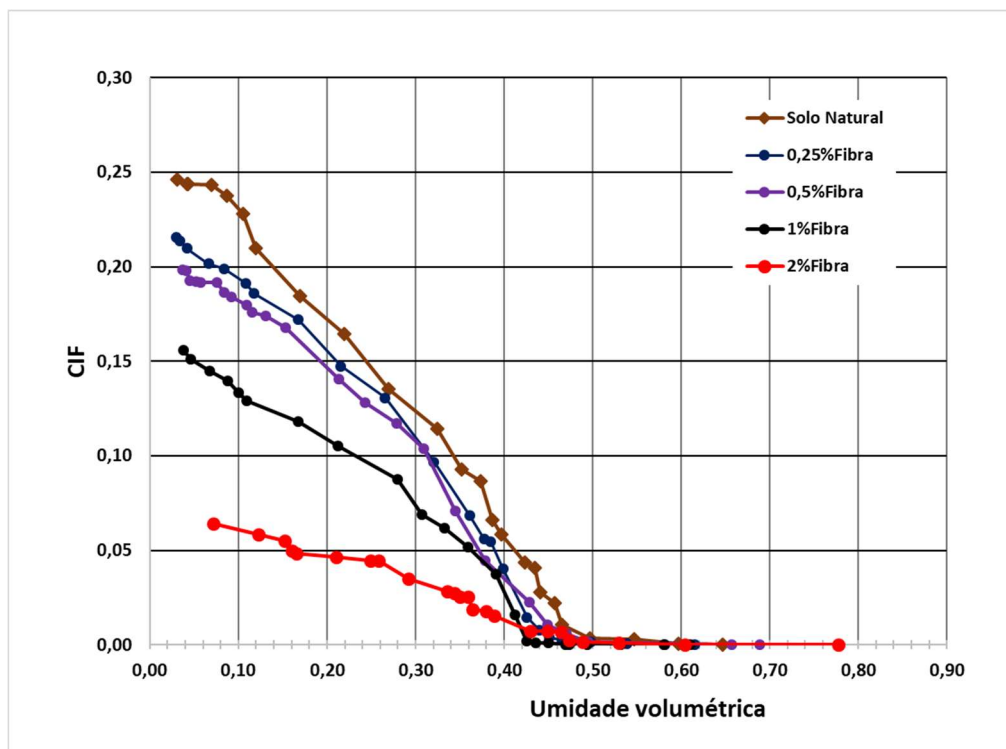
No solo não reforçado as fissuras primárias iniciam na superfície quando a tração no solo, devido à sucção na secagem, atinge o limite de resistência à tração do solo, e devido à falta de qualquer reforço de tração, atingem toda a profundidade (Peron *et al.* 2009 e Costa *et al.* 2013), este comportamento pode ser observado na Figura 87, verifica-se o aumento da área fissurada com o aumento da sucção da amostra.

Figura 87 - Correlação da área fissurada e a sucção do solo



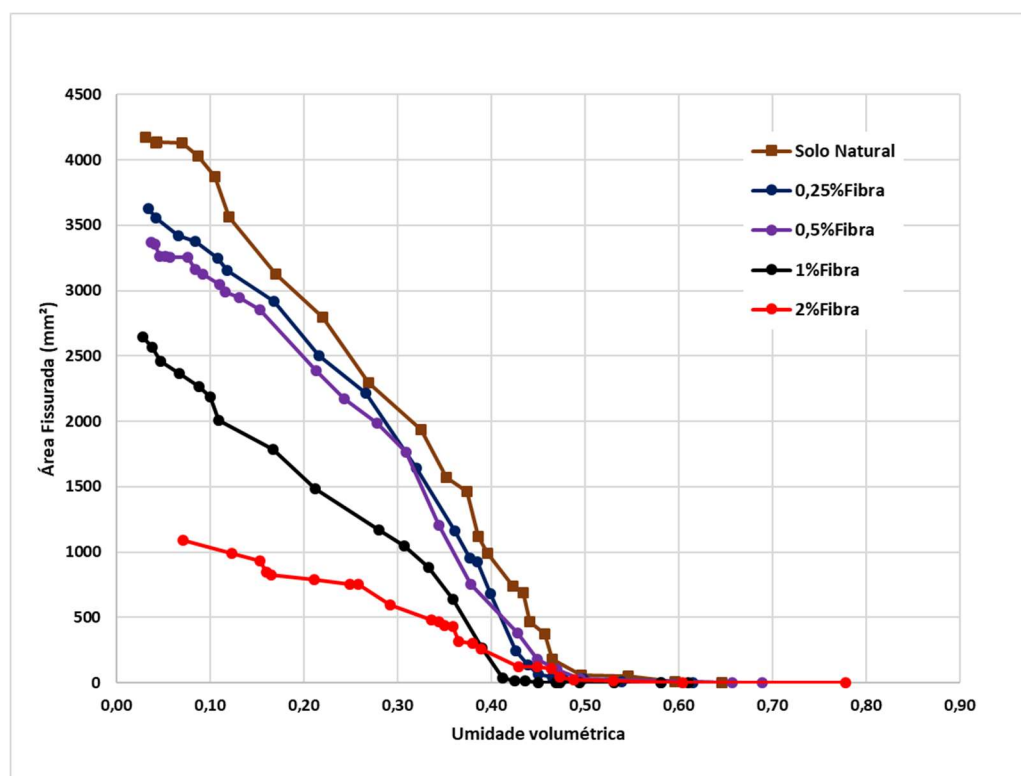
A contração ocorre independentemente causando um aumento na distância interseccional, que é chamado de largura da fissura. As Figuras 88 e 89 mostram a evolução típica das fissuras do solo natural e das misturas com diferentes percentuais de fibras (solo-0,25%Fibra, solo-0,5%Fibra, solo-1%Fibra e solo-2%Fibra).

Figura 88 - Evolução do CIF versus Umidade do solo natural e misturas solo+fibras



Fonte: Autor, 2022

Figura 89 - Área Fissurada versus Umidade do Solo natural e misturas Solo+ Fibras



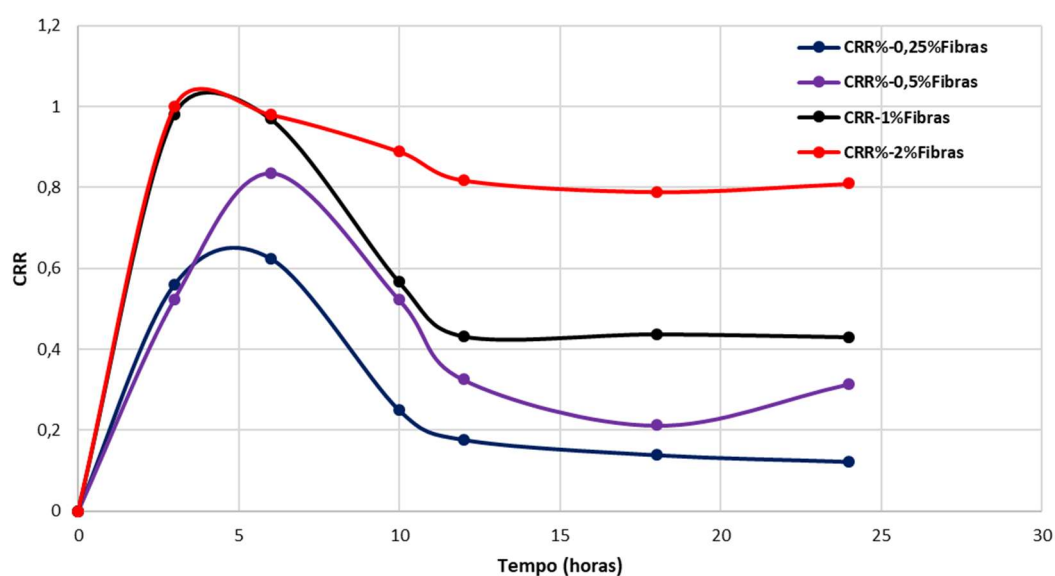
Fonte: Autor, 2022

As Figuras 88 e 89 mostram a variação do CIF e da área conforme a diminuição da umidade do solo natural e misturas solo+fibras. O CIF para as amostras não reforçadas é sempre superior ao CIF da amostra reforçada. A resistência à tração da fibra reduz o potencial de fissuração do solo, que é observada na diminuição do CIF nas amostras com reforço de fibra de coco, esse potencial aumenta na medida que aumenta-se o teor de fibras, caracterizando uma relação inversamente proporcional ao CIF. Fissuras curtas e irregulares em solo reforçado mostram um CIF mais baixo preservando a integridade geral da amostra e retendo a fissuração da amostra em seções diferentes. Observações semelhantes foram relatadas e feitas por Chaduvula *et al.* (2017) para fibra de poliéster, Qiang *et al.* (2014) para fibras de coco.

A Figura 90 mostra a variação da CRR com o tempo para diferentes teores de fibras. Cerca de 12% a 81% de redução é observada no potencial de fissuração do solo reforçado com diferentes teores fibras. Essa redução de fissuras pela inclusão de fibras tem sido relatada na literatura (Miller e Rifai 2004; Tang *et al.* 2012; Olgun 2013; Qiang *et al.* 2014; Chaduvula *et al.* 2017).

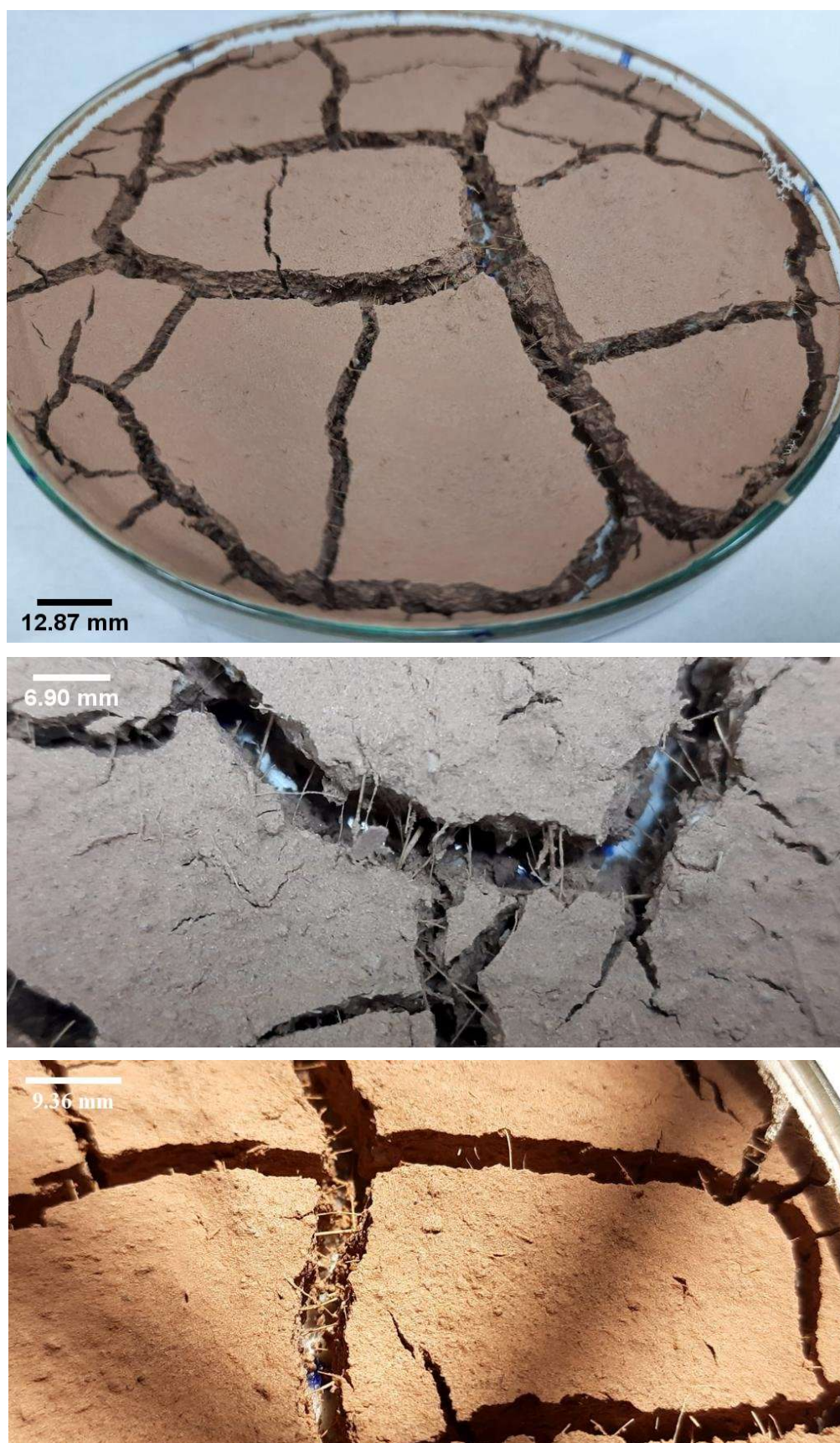
Com o aumento do tempo de secagem, todas as amostras reforçadas com fibra mostram um aumento da CRR. Uma maior porcentagem de reforço se correlaciona com uma mudança na CRR para todas as amostras reforçadas com fibra. Uma maior porcentagem de fibras na amostra proporciona uma melhor ligação entre fibras e argila, que por sua vez aumentam a força de tensão da amostra (Figura 91).

Figura 90 - Variação do CRR em função do tempo no solo natural e reforçado



Fonte: Autor, 2022

Figura 91 - Interação Fibra de coco e o solo no processo de formação de fissuras



Fonte: Autor, 2022

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

São apresentadas as principais conclusões deste trabalho que teve como objetivo investigar o comportamento hidromecânico de um solo expansivo de Paulista/PE reforçado com fibra de coco verde e analisar a viabilidade da incorporação da fibra de coco verde com ênfase no desempenho destas misturas quanto à formação e à propagação de fissuras por ressecamento e as sugestões para próximos trabalhos sobre o tema.

5.1 CONCLUSÕES

Ensaio de laboratório foram realizados para avaliar o potencial de fissuração e o comportamento hidromecânico de um solo expansivo de Paulista/PE não reforçados e reforçados com fibra de coco verde em diferentes percentuais.

A inserção da fibra ao solo aumenta o limite de liquidez, índice de plasticidade, umidade ótima, a sucção de entrada do ar e a umidade de saturação (importante para uso em camada de cobertura de aterro sanitário), a tensão de início de enrijecimento e decresce o peso específico aparente seco máximo, tensão de escoamento na umidade do limite de liquidez. Praticamente não altera a densidade real da mistura, a condutividade hidráulica não excede (10^{-9} m/s) e propriedades física do solo. Empregando os dados do ensaio da condutividade hidráulica, os valores medidos provam que a condutividade hidráulica não se altera significativamente com a adição da fibra, em nenhuma amostra o valor excede a permeabilidade de (10^{-9} m/s).

O acréscimo de fibras reduz a tensão de expansão do solo de 101,7 kPa do solo natural para 25,8 kPa para o solo com 1% de fibra de coco, uma redução de 74,63%, com a mistura de solo-fibra de 2% o potencial de expansão não decresce tendendo a estabilidade.

Na resistência a compressão simples e compressão diametral a inclusão de fibras de coco altera o comportamento de resistência à tração e ao cisalhamento do solo. A resistência a tração no ensaio de compressão diametral aumenta com o aumento do teor fibra sendo o melhor percentual de 2%, onde a resistência à tração é aumentada em 42% comparando com o solo natural. Em relação à compressão simples, o melhor percentual de fibra é de 1% apresentando um aumento na tensão máxima de 57,49%.

No ensaio de cisalhamento direto, o solo e as misturas assumiram um comportamento material friável para tensões de consolidações até 150 kPa e plástico com o aumento das tensões aplicadas. Para a tensão cisalhante de pico o ângulo de atrito cresce

12% e a coesão atinge o valor máximo para 1% de acréscimo de fibra. Para a deformação do ensaio (14 mm) o ângulo de atrito cresce 19% para 2% de fibra adicionada e a coesão decresce 37% para 1% de adição de fibra.

Está comprovado que a adição de fibras de coco pode efetivamente diminuir a área fissurada durante o processo de secagem. O fator de intensidade da fissura (CIF) diminuí à medida que o teor de fibras aumenta, levando à máxima redução de fissuras no percentual de 2%. Do ponto de vista morfológico, a inclusão de fibras tende a modificar as fissuras largas que ocorreu no solo natural em fissuras estreitas. Devido à resistência à tração das fibras, as fibras diminuíram as fissuras mantendo a amostra intacta com o reforço de 2% de fibras. As fibras de coco verde fornecem a resistência de tração necessária no solo argiloso, superando as fissuras de secagem, mostra que o solo reforçado com fibra de coco verde pode ser considerado um método eficiente para resistir as fissuras por secagem. A técnica de processamento de imagem utilizada foi útil na quantificação dos padrões de fissuras e fornece informações úteis sobre a área da fissura e largura das fissuras.

De acordo com os resultados citados, pode-se inferir que as fibras de coco verde podem ser efetivamente empregadas como agentes de reforço para melhorar as características geotécnicas de solos expansivos. As fibras misturadas aos solos podem ser usadas como forros e coberturas impermeáveis em aterros municipais de resíduos sólidos e o seu emprego como técnica de melhoramento pode reduzir um passivo ambiental.

5.2 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

A seguir são listadas algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Realizar os mesmos ensaios com os mesmos teores de fibras, porém misturando com outros passivos ambientais de granulometria semelhante;
- Realizar os mesmos ensaios com os mesmos teores de fibras, porém de outros comprimentos;
- Realizar os mesmos ensaios com teores de fibras maiores.
- Realizar os mesmos ensaios com outros tipos de fibras.
- Realizar ensaios de adensamento do solo reforçado com fibras.
- Estudar o efeito de fibras de coco para solos colapsíveis.
- Avaliar o tempo de durabilidade das fibras em contato com o solo
- Avaliar a micro e macroestrutura das misturas do solo com fibras de coco.

REFERÊNCIAS

- AHMED M. AL-MAHBASHI, TAMER Y. ELKADY & MOSLEH A. AL SHAMRANI (2018). Hysteresis soil-water characteristic curves of highly expansive clay. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 22:9, 1041-1059, DOI: 10.1080/19648189.2016.1229232.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, D4829: **Standard test method for expansion index of soils**. Philadelphia, PA, 4p, 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, D5298: **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. Philadelphia, PA, 6p, 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-3080. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions**. Philadelphia, PA 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-638 , **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. Philadelphia, PA 2014.
- 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.
- ASMAA AL-TAIE; MAHDI DISFANI; ROBERT EVANS; AND ARUL ARULRAJAH. Effect of Swell–Shrink Cycles on Volumetric Behavior of Compacted Expansive Clay Stabilized Using Lime; **Int. J. Geomech.**, 2020, 20(11).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7181 (2016). Solo – **análise granulométrica**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 12770. Solo – **Resistência à compressão simples**. 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7222. Argamassa e concreto – **Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7182 (2016). Solo – **Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 14545 - (2020). Solo – **Determinação de Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 16853 – (2020) Solo – **Ensaio de Adensamento Unidimensional**. Rio de Janeiro.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 6508, (2016). **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro.

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

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

BABU, G.L.S.; VASUDEVAN, A.K. Strength and stiffness response of coir fiber soil mixture. **Journal of Materials in Civil Engineering** v 23, p. 571-577, 2008.

BANCO DO NORDESTE DO BRASIL. (2018). **Produção de coco: o Nordeste é destaque nacional**. Caderno Setorial ETENE. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/374/3/2018_CDS_61.pdf. Acesso 10/04/2022.

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.

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.

BENTUR, A., MINDESS, S., 2007. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**, Second ed. ed. Taylor & Francis.

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 em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

BORDOLOI S., GARG A., SEKHARAN S. **Uma Revisão das Propriedades Físio-Bioquímicas das Fibras Naturais e Sua Aplicação no Reforço do Solo**. Av. Civil Eng. Mater. 2017; 6 :323-359. doi: 10.1520/ACEM20160076.

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.

CHADUVULA, U., VISWANADHAM, B. V. S., KODIKARA, J. (2016). Desiccation cracking behavior of geofiber-reinforced expansive clay. *In: geo-chicago 2016*

sustainable geoenvironmental systems, 2016. Proceedings [...]. Virginia, American Society of Civil Engineers, 2016, p. 368-77.

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.

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

COSTA S, KODIKARA J, SHANNON B (2013) Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments. **Géotechnique** 63: 18–29. <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.105>

CUELLAR, V. (1978). Análisis Crítica de los Métodos Existentes para el Empleo de Arcillas Expansivas em obras de Carreteras y Recomendaciones Sobre las Técnicas Más Idóneas Para se Uso habitual en España Laboratório del Transporte y Mecanica del suelo, **Madrid**. 321p.

DHAR, S., HUSSAIN, M., 2019. The strength behaviour of lime-stabilised plastic fibre-reinforced clayey soil. **Road Mater. Pavement Des.** 20, 1757–1778. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1468803>

DIAS, N.B., SCHNEIDER, P.Z., DINIZ, G.de L., & CELESTE, W.C. Aproveitamento da casca de coco para uso energético. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 5, n. 3,p. 179-195, 2019.

DRISCOLL, R., CRILLY, M., Subsidence damage to domestic buildings, Lessons learned and questions asked, London, **Building Research Establishment**, 2000

FAO. Food Agriculture Organization. **World production of the natural foods**. Disponível em: www.faostat.org/family-farming-2014/pt/. Acesso em: 10 março. 2019.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e Expansão em Solos Naturais devido a Inundação**. Tese de Doutorado. 1995. 379 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1995.

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. **In: Revista Brasileira de Ciência do Solo** (no prelo). 2019.

FERREIRA, S. R. M.; PAIVA, S. C. ; VIANA, R. B. ; MORAIS, J. . Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. **Materia-Rio de Janeiro** (1517-7076), v. 22, p. 1-12, 2017.

FERREIRA, S. R. M; VILAR, O. M. Solos não saturados no contexto geotécnico. **Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Capítulo 15: Solos colapsíveis e expansivos. São Paulo: ABMS, 2015.

FREDLUND, D. G. **The scope of unsaturated soil mechanics: an overview**. 1^o international conference on unsaturated soils. Paris. Vol. 1, 1155-1177. 1995.

G1 - Cerca de 20 toneladas de lixo são recolhidas por dia nas praias de São Luís, diz prefeitura – Disponível em
<<https://g1.globo.com/ma/maranhao/noticia/2018/09/03/cerca-de-20-toneladas-de-lixo-sao-recolhidas-por-dia-nas-praias-de-sao-luis-diz-prefeitura.ghtml>> acesso em: abr. 2022

HARIANTO, T.; HAYASHI, S.; DU, Y. J.; SUETSUGU, D. Effects of fiber additives on the desiccation crack behavior of the compacted Akaboku soil as a material for landfill cover barrier. **Water Air Soil Pollut**, v. 194, n. 1-4, Apr. 2008. p. 141-149.

HEJAZI, S.M.; SHEIKHZADEH, M.; ABTAHI, S.M.; ZADHOUSH. A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and Building Materials, Elsevier Ltd**, v30, p 110-116, 2012.

HONGHUA ZHAO; JUN LIU; JING GUO; CHUNJI ZHAO; AND BI-WEI GONG. “Reexamination of Lime Stabilization Mechanisms of Expansive Clay”. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Volume 27 Issue 1 - January 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Cidades IBGE, Paulista/PE**, 2021. Disponível em:
<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/paulista/panorama>>. Acesso em: 17 Fev. 2022.

JIMENEZ, S. J. A. Cimentaciones em terrenos expansivos o cola sables. in: **Geotecnia Y Cimentos** 111, Vol. 1, ED. Rueda, Madrid.PP533-650, 1980.

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

JUNRAN ZHANG; GENG NIU; XUCHANG LI; DE’AN SUN. “Hydro-mechanical behavior of expansive soils with different dry densities over a wide suction range”, **Acta Geotechnica**. 2020.

JUSTINO DA SILVA, J. M. **Variação Volumétrica de uma Argila Expansiva não Saturada Submetida a Diferentes Condições Climáticas**. Tese (Doutorado em engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 249 p., 2001.

KAR, R. K.; PRADHAN, P. K. Strength and compressibility characteristics of randomly distributed fiber-reinforced soil. **International Journal of Geotechnical Engineering**, IJGE. N 5, p. 235-243. 2011.

KAR, R. K.; PRADHAN, P. K; NAIK, A. Effect of Randomly Distributed Coir Fibers on Strength Characteristics of Cohesive Soil. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, EJGE v. 19, p. 1567-1583, 2014.

KODICHERLA, S.P.K., NANDYALA, D.K. Influence of randomly mixed coir fibres and fly ash on stabilization of clayey subgrade. **Geo-Engineering** 10, 3 (2019).
<https://doi-org.ez16.periodicos.capes.gov.br/10.1186/s40703-019-0099-1>.

LACERDA, M. S., LEITÃO, F. O Coco Verde No Contexto Da Economia Circular: Uma Revisão Sistemática Da Literatura. **Revista Agronegócio e Meio Ambiente**. Maringá, v. 14, n. 3, p. 667-679, 2021.

LEEMA P., P. K JAYASREE, K. BALAN, ALAKA RAJ S. Laboratory Investigation In The Improvement Of Subgrade Characteristics Of Expansive Soil Stabilised With Coir Waste. **Transportation Research Procedia** 17 (2016) 558 – 566

MANDEEP SINGH BASSON¹ & RAMANATHAN AYOTHIRAMAN¹. Effect of human hair fiber reinforcement on shrinkage cracking potential of expansive clay. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**.
<https://doi.org/10.1007/s10064-019-01685-x> /Published online: 13 December 2019 (2020) 79:2159–2168

MATTOS, A. L. A.; ROSA, M. de F.; CRISÓSTOMO, L. A.; BEZERRA, F. C.; CORREIA, D.; VERAS, L. de G. C. Beneficiamento da casca de coco verde. **Embrapa Agroindústria Tropical**. 2014. Disponível em:<http://www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo_3830.pdf>. Acesso em: 04/02/2022.

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.

MENEZES, L. C. P.; SOUSA, D. B.; FUCALE, S.; FERREIRA, S. R. M. Analysis of the physical-mechanical behavior of clayey sand soil improved with coir fiber. **Soils and Rocks**, v. 42, n. 1, Apr. 2019. p. 31-42.

MENEZES, L.C.P. **Análise do comportamento físico e mecânico de solo areno-argiloso reforçado com fibras do coco verde**. Dissertação de Mestrado da Universidade de Pernambuco, Recife. Pernambuco, 153p., 2018.

MILLER, C. J.; RIFAI, S. Fiber reinforcement for waste containment soil liners. **Journal of Environmental Engineering**, v. 130, n. 8, p. 891-895, 2004.

MIRZABABAEI, M., MIRAFTAB, M., MOHAMED, M., MCMAHON, P., 2013. Unconfined Compression Strength of Reinforced Clays with Carpet Waste Fibers. **J. Geotech. Geoenvironmental Eng.** 139, 483–493.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000792](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000792).

MISRA, A.; BASU, D. Sustainability in geotechnical engineering. **Internal Geotechnical Report**. Connecticut, 2011.

NARANI, S.S, M. ABBASPOUR, S.M.MIR MOHAMMAD HOSSEINI, E. AFLAKI, F. MOGHADAS NEJAD, 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** (2019),
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119151>

NELSON, J.D., MILLER, D.J., **Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering**, New York, John Wiley & Sons, 1992.

- NG C.W.W, ZHAN L.T, BAO C.G, FREDLUND D.G, GONG B.W (2003) Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration. **Geotechnique** 53(2):143–157
- NORSYAHARIATI, N. D. N.; NISA, A. J. F. N.; SADIQ, M. A. S.; JULIANA. G. A. Influence of Agricultural Wastes on Shear Strength Properties of Soil. **Matec Web of Conferences**. V. 47. 2016.
- NOSSA, T. de S. **Estudo comparativo das tensões na interface de compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de carbono, aramida e vidro**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2011.
- OLGUN M (2013) Effects of polypropylene fiber inclusion on the strength and volume change characteristics of cement-fly ash stabilized clay soil. **Geosynth Int** 20:263–275. <https://doi.org/10.1680/gein.13.00016>
- 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.
- PÉRON, H., DELENNE, J.Y., LALOU, L., EI YOUSSEFI, M.S. Discrete element modelling of drying shrinkage and cracking of soils. **Computers and Geotechnics**, 36, p.61– 69, 2009.
- PIMENTA, A.S.; SANTOS, R.C.; CARNEIRO, A.C.O.; CASTRO, R.V.O. Utilização de Resíduos de coco (Cocos nucifera) carbonizado para a produção de briquetes. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1. 2015.
- QIANG X, HAI-JUN L, ZHEN-ZE L, LEI L (2014) Cracking, water permeability and deformation of compacted clay liners improved by straw fiber. **Engineering Geology** (2014), doi: 10.1016/j.enggeo.2014.05.0.
- ROCHA, A.M., *et al.* Aproveitamento de Fibra de Coco para Fins Energéticos: Revisão e Perspectivas. **Congresso Sobre Geração Distribuída E Energia No Meio Rural**, São Paulo: Universidade Federal de São Paulo. v. 9. 2015. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/agrener2015/sites/default/files/tematica8/744.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2022.
- ROSA, M. F.; MATTOS, A. L. A.; CRISÓSTOMO, L. A.; FIGUEIREDO, M. C. B. de; BEZERRA, F. C.; VERAS, L. G.; CORREIA, D. Aproveitamento da casca de coco verde. In: CARVALHO, J. M. M. de (Org.). **Apoio do BNB à pesquisa e desenvolvimento da fruticultura regional**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, p. 165-190, 2009.
- SARAH HUSSEIN E H. A. ALI. Stabilization of Expansive Soils Using Polypropylene Fiber. **Civil Engineering Journal**. 2019
- SCHREINER, H. D. State of the art review on expansive soils. **Imperial College**, London, 1987.

SEED H. B., MITCHELL, J. K., CHAN, C. K. Studies of swell and swell pressure characteristics of compacted clays. **HRB Bulletin**, 3, No.3, 12-38.1962.

SENHORAS, E. M. **Estratégias de uma agenda para a cadeia agroindustrial do coco**: Transformando a ameaça dos resíduos em oportunidades eco-eficientes. Monografia, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2003.

SHUKLA, S.K., 2017. Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering, Developments in **Geotechnical Engineering**. Springer Nature, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3063-5>

SILVA, A. C.; FUCALÉ, S.; FERREIRA, S. R. M. Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso. **Matéria**, v. 24, n. 2, 2019. 12 p.

SILVA, A.C. Reaproveitamento da casca de coco verde. **Revista Monografias Ambientais**, v.13, n.5, p. 4077–4086. ISSN 2236-1308. 2014.

SILVA, G. O.; JERONIMO, C. E. M. Estudo de alternativas para o aproveitamento de resíduos sólidos da industrialização do coco. **Revista Monografias Ambientais**, v. 10, n. 10, p. 2193-2208, 2012.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVEIRA, V.; ARAGÃO, T. R. de P. **Viabilidade financeira de instalação de uma unidade de beneficiamento de cascas de coco verde**. Revista iPecege, v. 2, n. 3, p. 72-85, 2016.

SRIDHARAN, A E PRAKASH, K, **Classification procedures for expansive soils**. ENGENCE, 2000

SUBRAMANI, T.; UDAYAKAMUR, D. Experimental Study on Stabilization of Clay Soil Using Coir Fibre. **International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management**, IJAIEM. V. 5, n. 5, Maio, 2016.

TAFTI, M.F., EMADI, M.Z., 2016. Impact of Using Recycled Tire Fibers on the Mechanical Properties of Clayey and Sandy Soils. **Electron. J. Geotech. Eng.** 21, 7113–7225.

TANG, CHAO-SHENG, *et al.*. "Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced clayey soil." **Canadian Geotechnical Journal**, vol. 49, no. 9, 2012, p. 1088+. Gale Academic OneFile,.

THYAGARAJ, T., RAO, S.M. Osmotic Swelling and Osmotic Consolidation Behaviour of Compacted Expansive Clay. **Geotech Geol Eng** 31, 435–445 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9596-0>

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

VIJAYVERGIYA, V.N. & GHAZZALY, O.I. (1973). Prediction of Swelling Potencial for Natural Clays. **3rd International Conference on Expansive Soils**, Hayfa, v. I, pp. 227-236

WEI-LIE ZOU, ZHONG HAN E JIA-BING. Influence of external stress and initial density on the volumetric behavior of an expansive clay during wetting. **Environmental Earth Sciences** (2020) 79:211 <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08960-1>

YADAV, J.S., GARG, A., TIWARI, S.K., 2019a. Strength and ductility behaviour of rubberised cemented clayey soil. *Proc. Inst. Civ. Eng. - Gr. Improv.* **1–38**. <https://doi.org/10.1680/jgrim.19.00017>

YADAV, J.S., TIWARI, S.K., 2016. Behaviour of cement stabilized treated coir fibre-reinforced clay-pond ash mixtures. *J. Build. Eng. J.* **8**, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.05.005>

YANG SHEN, WEN SHI, SHAOYU LI, LONG YANG, JIANTING FENG, MINGJUN GAO, "Study on the Electro-Osmosis Characteristics of Soft Clay from Taizhou with Various Saline Solutions", **Advances in Civil Engineering**, vol. 2020, Article ID 6752565, 13 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6752565>