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

MARTHA MARIA BEZERRA SANTOS

INFLUÊNCIA DA INSERÇÃO DA CASCA DA AMÊNDOA DO CACAU NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO, MECÂNICO E NO PROCESSO DE FISSURAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO

Recife
2023

MARTHA MARIA BEZERRA SANTOS

INFLUÊNCIA DA INSERÇÃO DA CASCA DA AMÊNDOA DO CACAU NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO, MECÂNICO E NO PROCESSO DE FISSURAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO

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

Área de concentração: Geotecnia.

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

Recife

2023

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

S237i Santos, Martha Maria Bezerra.
Influência da inserção da casca da amêndoa do cacau no comportamento hidráulico, mecânico e no processo de fissuração de um solo expansivo / Martha Maria Bezerra Santos. – 2023.
147 f.: il., fig., e tab.

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

1. Engenharia civil. 2. Reforço com partículas. 3. Resíduos agrícolas. 4. Propagação de Fissura. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2023-149

MARTHA MARIA BEZERRA SANTOS

INFLUÊNCIA DA INSERÇÃO DA CASCA DA AMÊNDOA DO CACAU NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO, MECÂNICO E NO PROCESSO DE FISSURAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO

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

Aprovada em 07/06/2023.

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Sílvio Romero de Melo Ferreira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

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

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Sérgio Carvalho de Paiva (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco

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

Dedico este trabalho aos meus pais, Márcia e Eduardo, meu irmão Edmar e aos meus avós Noelia, José Luiz, Anina e Eduardo (*IN MEMORIAN*).

AGRADECIMENTOS

Tentarei aqui pôr em palavras algo que para mim é inexpressível. Acredito que somente agradecer não seja o suficiente, mas até então é o único meio que encontro. Primeiramente, agradeço a Deus pela saúde, pessoas e oportunidades com que me presenteou para que eu pudesse chegar até aqui. Nada teria acontecido se faltasse um desses três pilares.

Aos meus pais e meu irmão, que acompanharam cada momento da minha jornada, obrigada pelo incentivo e pelos conselhos, mesmo quando não entendiam sobre metade do que eu falava. Obrigada por me ensinarem a trilhar o caminho que escolhi com independência, mas não sozinha.

Ao meu orientador, Silvio Romero, meus sinceros agradecimentos pela orientação deste trabalho, pelo estímulo e por todo conhecimento compartilhado. Obrigada por demonstrar que o caminho acadêmico em que acredito é possível.

Ao meu tio Ulisses, minha eterna gratidão pelo apoio, companhia e por tornar o período em Recife mais tranquilo e leve. Iaggo e Suania, obrigada pela amizade em mais uma etapa alcançada. Agradeço demais pela presença de vocês em cada momento e espero que nossos caminhos não se afastem.

Ao professor Sérgio Paiva, muito obrigada pela ajuda com as análises química, de grande contribuição para esta pesquisa e, acima de tudo, pela paciência em transmitir o conhecimento das interpretações.

Ao professor Fernando Jucá, obrigada pelas oportunidades de crescimento profissional, pela confiança em mim depositada, pelo apoio nos sonhos a serem conquistados e pelos conselhos sempre sinceros.

Aos colegas Iálysson, Joas e Heitor, obrigada pela parceria. Sem vocês o primeiro ano online teria sido muito mais solitário. Ao grupo do laboratório de solos e do GRS, meu mais sincero obrigada pelo acolhimento. Gutemberg e Antônio Brito, Aline, Sávio, Rayanne e Daniela sou grata pela amizade, conhecimentos e conversas compartilhadas. Me lembrarei de cada momento com muito carinho.

Um agradecimento especial às minhas escolas de dança e aos amigos angariados através dela. A Ballare Studio de Dança, obrigada pela presença

sempre, mesmo que distante, e a Duetto Escola de Dança e Movimento, obrigada por me permitir continuar imersa e evoluindo nessa arte.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a Marcus Túlio, Limão e meu avô José Luiz pela ajuda nas áreas que não dominava.

À CAPES, fomentadora da bolsa de estudos. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Suérior – Basil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao CIC pela disponibilização das cascas da amêndoa do cacau utilizadas nessa pesquisa.

A todos que me ajudaram, ainda que da forma mais simples, ou sem nem mesmo saber, minha mais sincera gratidão.

RESUMO

Os principais resíduos gerados pela agroindústria do cacau são constituídos principalmente pela casca do fruto (6 toneladas para cada 1 tonelada de amêndoas) e pela casca da amêndoa (700.000 toneladas ao ano). A Bahia é um grande produtor do cacau e o volume desses resíduos tende a aumentar. Além do mais, o estado apresenta a ocorrência de solo expansivos, como o massapê. Assim, busca-se analisar a possibilidade de se estabilizar um solo expansivo que, para fins de estudo, foi utilizado o solo de Paulista-PE, com a casca da amêndoa do cacau. Ensaios de laboratório foram realizados em amostras compactadas de solo natural, e misturas de solo com a casca, nas proporções em peso de 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5%. Ensaios de: granulometria, massa específica dos grãos, limites de consistência, compactação, condutividade hidráulica, expansão livre, tensão de expansão, squeeze flow, compressão simples e diametral, cisalhamento direto, formação e propagação de fissuras e sucção por secagem foram realizados. A condutividade hidráulica reduziu da ordem de 10^-9 cm/s para a ordem de 10^-11 cm/s com as misturas de 7,5%, 10% e 12,5%. A mistura de solo+10%casca é a que apresentou melhor resultado, reduzindo a expansão “livre” do solo natural de 12,50% para 8,90% e reduzindo a tensão de expansão em 71,36%. As demais misturas apresentaram um aumento do valor de expansão livre. A casca da amêndoa do cacau no solo não melhorou a resistência a compressão simples e tração por compressão diametral. A coesão diminuiu e o ângulo de atrito das misturas diminuiu incialmente, seguido por um aumento. A casca no solo fez com que o processo de fissuração ocorresse de forma mais rápida, diminuísse a área fissurada final (80,55% para a mistura de solo+12,5%) e elevou a sucção de entrada de ar e da umidade de saturação. Por meio dos resultados, pode-se compreender que a casca da amêndoa do cacau pode ser utilizada para reduzir a tensão de expansão de um solo expansivo, assim como pode ser utilizada para coberturas de aterros municipais de resíduos sólidos. O seu uso também pode reduzir um passivo ambiental gerado pela agroindústria.

Palavras-chave: reforço com partículas; resíduos agrícolas; propagação de Fissura.

ABSTRACT

The main residues generated by the cocoa agroindustry consist mainly of the fruit husk (6 tons for every 1 ton of almonds) and the almond husk (700,000 tons per year). Bahia is a major producer of cocoa and the volume of this residue tends to increase. Furthermore, the state presents the occurrence of expansive soils, such as massapê. Thus, we seek to analyze the possibility of stabilizing an expansive soil that, for the purposes of the study, was used in the soil of Paulista-PE, with the shell of the cocoa bean. Laboratory tests were carried out on compacted samples of natural soil, and mixtures of soil with bark, in weight proportions of 2.5%, 5%, 7.5%, 10% and 12.5%. Tests of particle size, grain density, consistency limits, hydraulic compaction, conductivity, free expansion, expansion stress, squeeze flow, simple and diametral pressure, direct shear, formation and propagation of cracks and suction by drying were carried out. The hydraulic conductivity reduced from the order of 10^-9 cm/s to the order of 10^-11 cm/s with the mixtures of 7.5%, 10% and 12.5%. The mixture of soil + 10% bark presented the best results, reducing the “free” expansion of the natural soil from 12.50% to 8.90% and reducing the expansion tension at 71.36%. The other mixtures showed an increase in the free expansion value. The cocoa bean shell in the soil did not improve the resistance to simple compression and tensile by diametral compression. Cohesion decreased and the friction angle of the mixtures initially decreased, followed by an increase. The bark in the soil made the cracking process faster, reduced the final cracked area (80.55% for the soil mixture + 12.5%) and increased the suction of air intake and moisture from saturation. Through the results, it can be understood that the cocoa bean shell can be used to reduce the expansion stress of an expansive soil, as well as it can be used to cover solid waste landfills. Its use can also reduce an environmental liability generated by the agroindustry.

Keywords: reinforcement with particles; agricultural waste; crack propagation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da região turística Costa do Cacau – Bahia..... 30
Figura 2 - Partes constituintes do cacau..... 30
Figura 3 - Processo de produção do chocolate..... 32
Figura 4 - Mapa indicativo dos países com identificação de solos expansivos..... 36
Figura 5 - Principais argilominerais expansivos..... 39
Figura 6 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos..... 45
Figura 7 - Mapa de localização da cidade de Paulista – PE..... 50
Figura 8 - Local de coleta da amostra na ETE..... 50
Figura 9 - Mapa de localização do município de Ilhéus – BA..... 51
Figura 10 - Localização do Centro de Inovação do Cacau (CIC)..... 51
Figura 11 - Farelo da Casca da amêndoa do Cacau..... 52
Figura 12 - Fluxograma da metodologia experimental..... 54
Figura 13 - Etapas de preparação do solo..... 55
Figura 14 - Etapas de preparação das cascas da amêndoa do cacau..... 55
Figura 15 - Preparação das misturas..... 56
Figura 16 - Caracterização física..... 57
Figura 17 - Procedimento de preparação do corpo de prova para determinar a condutividade hidráulica..... 59
Figura 18 - Montagem da célula de adensamento..... 60
Figura 19 - Célula na prensa de adensamento para caracterização da expansão..... 61
Figura 20 - Moldagem dos corpos de prova para ensaios de compressão..... 62
Figura 21 - Posicionamento dos corpos de prova para o ensaio de compressão simples e tração por compressão diametral..... 62
Figura 22 - Prensa de cisalhamento..... 63
Figura 23 - Corpos de prova ensaiados nas tensões de consolidação de 50, 100, 150 e 200 kPa, da esquerda para a direita..... 64
Figura 24 - Instrumentos usados para moldagem do corpo de prova para o ensaio do squeeze-flow..... 64
Figura 25 - Moldagem do corpo de prova do squeeze-flow..... 65

Figura 26 - Determinação dos três estágios do comportamento reológico..... 66
Figura 27 - Esquematização do aparato utilizado no ensaio de fissuração..... 67
Figura 28 - Instrumentação para ensaio de fissuras..... 68
Figura 29 - Procedimento para determinação da sucção total e matricial..... 69
Figura 30 - Variação da massa específica dos grãos de acordo com a adição da casca da amêndoa do cacau..... 72
Figura 31 - Resultados dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação..... 73
Figura 32 - Curvas granulométricas dos materiais analisados..... 74
Figura 33 - Resultados do ensaio do limite de liquidez do solo e de suas misturas com a casca da amêndoa de cacau..... 75
Figura 34 - Variação do limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade de acordo com a adição da casca da amêndoa do cacau..... 75
Figura 35 - Curvas de compactação do solo e das misturas com a casca da amêndoa do cacau..... 76
Figura 36 - Comparativo entre as curvas de compactação do solo e das misturas com a casca da amêndoa do cacau..... 77
Figura 37 - Relação estabelecida entre a massa específica aparente seca e umidade ótima com o teor adicionado da casca da amêndoa do cacau..... 78
Figura 38 - Preparação para o ensaio de condutividade elétrica na casca da amêndoa do cacau..... 82
Figura 39 - Condutividade hidráulica do solo e das misturas com a casca da amêndoa do cacau..... 83
Figura 40 - Resultados dos ensaios de squeeze-flow para as amostras de solo e misturas com a casca da amêndoa do cacau, nas umidades próximas da reta do LL..... 84
Figura 41 - Variação da tensão de escoamento com a umidade..... 87
Figura 42 - Variação da tensão de enrijecimento com a umidade..... 88
Figura 43 - Variação da tensão de escoamento e enrijecimento com a deformação..... 89
Figura 44 - Formas dos corpos de prova ao final do ensaio squeeze-flow para 91

as amostras de solo e misturas com a casca da amêndoa do cacau.....
Figura 45 - Flor Zinnia Angustifolia Profusion Orange…… 91
Figura 46 - Resultados obtidos por meio do ensaio de expansão livre..... 92
Figura 47 - Expansão livre de acordo a adição da casca da amêndoa do cacau..... 93
Figura 48 - Tensão de expansão em função da adição da casca de amêndoa do cacau e classificação de acordo com Jimenez Salas (1980)..... 95
Figura 49 - Resistência à compressão simples do solo e misturas com a casca de amêndoa de cacau..... 96
Figura 50 - Resistência média à compressão simples do solo e das misturas..... 97
Figura 51 - Correlação entre tensão cisalhante máxima e deformação axial com o teor adicionado de casca da amêndoa do cacau..... 98
Figura 52 - Resistência à compressão diametral do solo e misturas casca de amêndoa do cacau..... 99
Figura 53 - Resistência média à compressão diametral do solo e misturas..... 100
Figura 54 - Correlação entre a tensão cisalhante máxima e a deformação com o teor de adição da casca da amêndoa de cacau..... 101
Figura 55 - Curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal..... 102
Figura 56 - Curvas deslocamento vertical x deslocamento horizontal..... 103
Figura 57 - Curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal nas tensões de 50, 100, 150 e 200 kPa para o solo e misturas..... 104
Figura 58 - Envoltória de Mohr-Coulomb do solo e das misturas com a casca da amêndoa do cacau..... 105
Figura 59 - Correlação entre o ângulo de atrito e coesão com os teores adicionados de casca da amêndoa do cacau..... 106
Figura 60 - Primeiras fissuras nas amostras de solo e misturas..... 108
Figura 61 - Evolução das fissuras no ensaio da amostra de solo natural..... 110
Figura 62 - Relação entre umidade e tempo para a amostra de solo natural..... 111
Figura 63 - Relação entre CIF e umidade da amostra de solo natural..... 111
Figura 64 - Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração para 111

o solo natural.....
Figura 65 - Evolução das fissuras no ensaio da amostra de solo+2,5%casca..... 113
Figura 66 - Relação entre umidade e tempo para a amostra de solo+2,5%casca..... 114
Figura 67 - Relação entre CIF e umidade para a mistura de solo+2,5%casca..... 114
Figura 68 - Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração da mistura de solo+2,5%casca..... 114
Figura 69 - Evolução das fissuras no ensaio da amostra de solo+5%casca 116
Figura 70 - Relação entre umidade e tempo para a amostra de solo+5%casca..... 117
Figura 71 - Relação entre CIF e umidade para a mistura de solo+5%casca 117
Figura 72 - Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração da mistura de solo+5%casca..... 117
Figura 73 - Evolução das fissuras no ensaio da amostra de solo+7,5%casca..... 119
Figura 74 - Relação entre umidade e tempo para a amostra de solo+7,5%casca..... 120
Figura 75 - Relação entre CIF e umidade para a mistura de solo+7,5%casca..... 120
Figura 76 - Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração da mistura de solo+7,5%casca..... 120
Figura 77 - Evolução das fissuras no ensaio da amostra de solo+10%casca..... 122
Figura 78 - Relação entre umidade e tempo para a amostra de solo+10%casca..... 123
Figura 79 - Relação entre CIF e umidade para a mistura de solo+10%casca..... 123
Figura 80 - Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração da mistura de solo+10%casca..... 123
Figura 81 - Evolução das fissuras no ensaio da amostra de solo+12,5%casca..... 125

Figura 82 - Relação entre umidade e tempo para a amostra de solo+12,5%casca..... 126
Figura 83 - Relação entre CIF e umidade para a mistura de solo+12,5%casca..... 126
Figura 84 - Evolução dos índices geométricos de fissuração da mistura de solo+12,5%casca..... 126
Figura 85 - Comparativo dos resultados de tempo e umidade dos ensaios realizados no solo e misturas com a casca da amêndoa de cacau..... 127
Figura 86 - Comparativo dos índices geométricos de fissuração nas amostras de solo e misturas com a casca da amêndoa de cacau..... 128
Figura 87 - Vídeos da propagação de fissuras nas amostras de solo e misturas com a casca da amêndoa do cacau..... 129
Figura 88 - Curvas características de sucção matricial para as amostras de solo e misturas com a casca da amêndoa de cacau..... 130
Figura 89 - Curvas características de sucção total para as amostras de solo e misturas com a casca da amêndoa de cacau..... 131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Alguns trabalhos publicados no Brasil nos últimos 17 anos sobre solos expansivos..... 37
Tabela 2 - Métodos de identificação de solos expansivos..... 41
Tabela 3 - Processo de identificação indireta desenvolvido por Altmeyer (1955) 42
Tabela 4 - Processo de identificação indireta desenvolvido por Chen (1965) 42
Tabela 5 - Processos indiretos de identificação de solos expansivos..... 42
Tabela 6 - Métodos de estabilização para solos expansivos..... 43
Tabela 7 - Massa específica dos grãos do solo, casca da amêndoa e misturas..... 71
Tabela 8 - Comparação entre as massas específicas do solo já obtidas..... 71
Tabela 9 - Classificação dos materiais utilizados com e sem defloculante..... 72
Tabela 10 - Limite de Atterberg do solo e das misturas..... 75
Tabela 11 - Resultados da massa específica aparente seca, umidade ótima e suas variações obtidas pelo ensaio de compactação do solo natural e misturas..... 77
Tabela 12 - Comparação entre os resultados da caracterização física do solo de Paulista-PE com a adição de cal e casca da amêndoa..... 78
Tabela 13 - Resultados das análises químicas do solo, casca da amêndoa de cacau e misturas..... 79
Tabela 14 - Resultados obtidos para cálculo da condutividade hidráulica..... 83
Tabela 15 - Índices e dados do comportamento reológico do solo e das misturas com a casca da amêndoa do cacau..... 85
Tabela 16 - Valores das umidades iniciais e finais no centro e na periferia das amostras, dos ensaios de squeeze-flow para solo e misturas com a casa da amêndoa do cacau..... 90
Tabela 17 - Tensão de expansão do solo e das misturas com a casca da amêndoa do cacau pelo método do volume constante..... 94
Tabela 18 - Valores das tensões cisalhantes no ensaio de compressão simples..... 97
Tabela 19 - Valores das tensões cisalhantes no ensaio de compressão 98

simples da cal e casca da amêndoa do cacau.....
Tabela 20 - Valores das tensões cisalhantes no ensaio de compressão diametral..... 100
Tabela 21 - Valores das tensões cisalhantes para o solo e misturas..... 105
Tabela 22 - Umidade das amostras de solo e misturas no início da fissuração..... 107
Tabela 23 - Valores de ajuste da equação de Van Genuchten para sucção matricial..... 130
Tabela 24 - Valores de ajuste da equação de Van Genuchten para sucção total..... 131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CIC	Centro de Inovação do Cacau
CIF	Crack Intensity Factor
COMPESA	Compainha de Saneamento do Estado de Pernambuco
CPT	Ensaio de penetração do cone
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IP	Índice de Plasticidade
LAB	Pontos obtidos em Laboratório
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
SPT	Sondagem à Percussão
TCC	Trabalho de conclusão de curso
URA	Umidade Relativa do Ar
VG	Curva de Van Genuchten

LISTA DE SÍMBOLOS

W	Umidade (%)
k_h	Coeficiente de condutividade hidráulica saturada à água (cm/s)
h	Altura do corpo de prova (cm)
d	Diâmetro do corpo de prova (cm)
V_p:	Volume percolado (cm^3)
t	Tempo (s)
A_b	Área da base do corpo de prova (cm^2)
Δp	Gradiente de pressão aplicado entre a base e o topo do corpo de prova (m)
Ψ	Sucção (kPa)
Wp	Umidade do papel filtro (%)
Θ	Umidade volumétrica (%)
Θr	Umidade volumétrica residual (%)
Θs	Umidade volumétrica de saturação (%)
a e n	Parâmetros de ajustes da curva de Van Genuchten
ρ_s	Massa específica dos grãos (kN/m^3)
ρ_d	Massa específica aparente seca (kN/m^3)
w_o	Umidade ótima de compactação (%)
Q_{esc}	Carga inicial de escoamento (N)
D_{esc}	Deslocamento inicial de escoamento (mm)
σ_{esc}	Tensão inicial de escoamento (kPa)
ε_{esc}	Deformação de escoamento (%)
Q_{enrij}	Carga inicial de enrijecimento (N)
D_{enrij}	Deslocamento inicial de enrijecimento (mm)
σ_{enrij}	Tensão inicial de enrijecimento (kPa)
ε_{enirj}	Deformação de enrijecimento (%)
D_{Final}	Carga final para deslocamento de 8 mm (N)
Φ	Ângulo de Atrito (°)
C	Coesão (kPa)
T	Tempo (h)

w_i Umidade inicial (%)

w_{fi} Umidade final (%)

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**23**
1.1	PROBLEMÁTICA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	23
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	**Objetivos Gerais**	**24**
1.2.2	**Objetivos Específicos**	**25**
1.3	HIPÓTESES DA PESQUISA	25
1.4	PREMISSAS	25
1.5	DELIMITAÇÕES	26
1.6	LIMITAÇÕES	26
1.7	CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTADO DA ARTE	26
1.8	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	27
2	**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**	**29**
2.1	DO CACAU AO CHOCOLATE: PRODUÇÃO E RESÍDUOS	29
2.1.1	**Breve histórico da produção do cacau**	**29**
2.1.2	**O cultivo do cacau, a produção do chocolate e os resíduos gerados**	**31**
2.1.3	**Aplicações do resíduo da produção cacaueira**	**32**
2.2	SOLOS EXPANSIVOS: IDENTIFICAÇÃO, DEFINIÇÃO E ESTABILIZAÇÃO	35
2.2.1	**Identificação de solos expansivos no Brasil e no mundo**	**35**
2.2.2	**Definição de solos expansivos**	**38**
2.2.3	**Métodos para identificação de solos expansivos**	**40**
2.2.4	**Métodos para estabilização de solos expansivos**	**42**
2.3	MATERIAIS COMPÓSITOS RELACIONADOS AOS SOLOS EXPANSIVOS	44
2.3.1	**Solo reforçado com fibras**	**46**
2.3.2	**Solo reforçado por partículas**	**48**
3	**MATERIAIS E MÉTODOS**	**49**
3.1	MATERIAIS	49
3.1.1	**Solo Expansivo**	**49**
3.1.2	**Casca da amêndoa do cacau**	**51**

3.2 MÉTODOS 53
3.2.1 Preparação do material 55
3.2.2 Caracterização Física e Química 56
3.2.3 Condutividade Hidráulica 58
3.2.4 Ensaios para caracterização da expansão 59
3.2.5 Ensaios para compressão simples e tração por compressão diametral 61
3.2.6 Ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento 63
3.2.7 Ensaio para caracterização reológica 64
3.2.8 Ensaios para avaliação da formação e propagação de fissuras 66
3.2.8.1 Equipamentos 66
3.2.8.2 Moldagem e execução do ensaio 68
3.2.8.3 Determinação da Sucção 69
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 71
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA 71
4.1.1 Massa específica dos grãos 71
4.1.2 Análise granulométrica 72
4.1.3 Limites de Atterberg 74
4.1.4 Compactação 76
4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA 79
4.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA 83
4.4 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA 84
4.5 EXPANSIVIDADE 92
4.5.1 Expansão Livre 92
4.5.2 Tensão de Expansão 93
4.6 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA 95
4.6.1 Compressão Simples 95
4.6.2 Compressão Diametral 99
4.6.3 Cisalhamento Direto 101
4.7 ANÁLISE DA FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FISSURAS 106
4.7.1 Análise do início do processo de fissuração 106
4.7.2 Análise da propagação de fissuras 108
4.7.2.1 Solo Natural 108

4.7.2.2 Solo + 2,5% casca 112
4.7.2.3 Solo + 5% casca 115
4.7.2.4 Solo + 7,5% casca 118
4.7.2.5 Solo + 10% casca 121
4.7.2.6 Solo + 12,5% casca 124
4.7.2.7 Considerações sobre o processo de propagação de fissuras no solo natural e misturas com a casca da amêndoa do cacau 127
4.8 CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DO SOLO E MISTURAS ... 129
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 133
5.1 CONCLUSÕES 133
5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 135
REFERÊNCIAS 136

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O estudo do solo é uma das áreas mais complexas da Engenharia Civil, e de suma importância. Comumente, pode-se pensar que esse estudo é realizado apenas por meio de ensaios de campo, com a sondagem geotécnica por meio da sondagem à percussão (SPT). Em um melhor cenário, pode-se pensar na realização do ensaio de penetração do cone (CPT) ou ensaios de laboratório, mais rotineiramente os de caracterização.

A grande variedade de solos existente é o que torna essa área de atuação tão complexa. É necessário sensibilidade do profissional em campo para identificar solos que podem trazer problemas para a edificação e consequentemente identificar as informações de que precisa e de quais ensaios solicitar para obtê-las. Argilas moles, com baixa capacidade de resistência, solos expansivos, colapsíveis e dispersivos são alguns dos solos mais problemáticos de lidar.

Uma das soluções já utilizadas para os solos problemáticos é a substituição de grandes volumes de massa de solo. Porém, essa é uma solução que já não é tão viável atualmente, devido aos altos custos de movimentação, transporte de material e identificação de uma jazida que atenda ao volume necessário.

Desse modo, cada vez mais se busca a estabilização de solos problemáticos por meio da criação de materiais compósitos, onde a matriz é o solo e o reforço varia das mais diversas formas, como a utilização de fibras sintéticas ou naturais, materiais particulados e estabilizantes químicos.

Dentre os solos problemáticos, um que causa problemas recorrentes nas residências são os solos expansivos. São solos que, devido a estrutura e composição dos seus argilominerais, expandem quando em presença de água e apresentam o processo de fissuração quando submetidos a um período seco.

No Brasil, esse tipo de solo já foi identificado em estados como Pernambuco, Paraná, Mato Grosso, Ceará, Santa Catarina, Sergipe, Rio Grande do Sul, São Paulo, Bahia, Acre, Rio Grande do Norte e Amazonas (SIMÕES, 1987). No Estado

de Pernambuco e Rio Grande do Sul grande foi o estudo dos materiais viáveis de utilização para a estabilização dos solos expansivos (FERREIRA, 2008). De acordo com os 40 trabalhos publicados nos últimos 17 anos, a Bahia, que tem um exemplo clássico de um solo expansivo, o massapê, não apresenta tantos estudos de caso de estabilização com resíduos provenientes do próprio estado.

Paralelamente, a Bahia também é conhecida nacionalmente pela sua produção de cacau, que em seu auge foi responsável pelo desenvolvimento de diversas cidades do litoral sul baiano. Com o passar dos anos, a exportação do cacau teve um declínio e os produtores passaram a explorar a possiblidade de produção e venda do chocolate fabricado a partir do próprio cacau produzido. Desse modo, ocorre atualmente, o desenvolvimento de indústrias produtoras de chocolate na região.

Assim como em qualquer outra indústria, esse ramo gera resíduos, e entre eles está a casca do fruto e a casca da amêndoa do fruto. O volume produzido mundialmente da casca do fruto é estimado entre 8.000 e 12.000 toneladas por ano pois apenas a amêndoa é utilizada para a fabricação do chocolate (EL-SHEKEIL; SAPUAN; ALGRAFI, 2014). Já o farelo de cacau, foi estimado em 2016 pela Organização Internacional do Cacau em 700 mil toneladas por ano no mundo.

Desse modo, este trabalho apresenta uma avaliação da influência da inserção da casca da amêndoa do cacau no comportamento hidráulico, mecânico e no processo de fissuração de um solo expansivo. Trata-se de uma pesquisa pioneira no uso da casca da amêndoa do cacau como reforço de solo e portanto, sendo necessário a utilização de metodologia aplicada à utilização da amêndoa do cacau em compósitos a base de gesso e em substituição ao cimento nas argamassas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

Avaliar a influência da inserção da casca da amêndoa do cacau no comportamento hidráulico, mecânico e no processo de fissuração de um solo expansivo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência da casca da amêndoa do cacau na caracterização física e química do solo e no comportamento reológico e mecânico do solo;
- Investigar a eficácia do uso das cascas da amêndoa do cacau para combater a expansão do solo;
- Analisar a formação e propagação de fissuras do solo natural e compará-la com as das misturas do solo com a casca;
- Determinar a porcentagem ideal de substituição da casca da amêndoa do cacau em cada caso analisado.

1.3 HIPÓTESES DA PESQUISA

Pressupõe-se que a mistura de solo com a casca da amêndoa do cacau estabilize a expansividade do solo, através do reforço com partículas, já que o material não é fibroso. Além disso, supõe-se que a inserção das cascas no solo natural seja capaz de controlar a propagação das fissuras e que diminua a sua permeabilidade à água.

1.4 PREMISSAS

Se tem como premissa que, ainda que a substituição do cimento pela casca da amêndoa do cacau e o compósito a base de gesso reforçado com essa casca tenha apresentado eficácia, o mesmo pode não ocorrer para os compósitos deste material com solos expansivos. Isto porque, devido à variação volumétrica causada pela presença dos argilominerais, o uso de materiais orgânicos como estabilizantes ainda demanda estudos. A amenização da expansão foi tentada com algumas variedades de estabilizantes químicos, fibras sintéticas ou naturais e materiais particulados, mas nunca até então, com a inserção da casca da amêndoa do cacau. Além disso, a pesquisa tem como premissa a necessidade de uso dos resíduos gerados pela

indústria do chocolate, para que o material seja reaproveitado da melhor maneira possível.

1.5 DELIMITAÇÕES

A atual pesquisa se restringe ao estudo de um solo expansivo e de um material estabilizante. Ou seja, não haverá variações no tipo de solo e nem na composição física e química do estabilizante. Ocorrerá uma variação apenas na porcentagem de adição deste material ao solo, para que se possa ter um melhor entendimento do impacto dessa adição quando comparadas com as amostras de solo natural.

1.6 LIMITAÇÕES

Para melhor compreensão do desenvolvimento deste trabalho, algumas restrições precisam ser mencionadas. São elas:

- Quantidade restrita de literatura sobre o uso da casca da amêndoa do cacau como reforço de solo, fazendo com que a determinação dos teores estudados fosse baseada em estudos realizados para compósitos a base de geso e utilização da casca como substituição ao cimento nas argamassas;
- Capacidade do anel dinamométrico para realização do ensaio do Squeeze-flow de 1000 N, fazendo com que algumas das amostras tivessem seus ensaios encerrados antes de atingir os 8 mm de deformação;
- O solo utilizado foi apenas da camada de 1 m a 1,40 m, ou seja, na ocorrência de variação do tipo de solo de conforme a camada utilizada, características podem distinguir.

1.7 CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTADO DA ARTE

Diversos trabalhos já foram realizados para a estabilização de solos expansivos pelos mais diversos meios, seja por meio de reforço com fibras sintéticas, fibras

naturais, ou materiais particulados, como cinzas e solos granulares. Do mesmo modo, sabe-se que a busca pelo reaproveitamento dos resíduos da agroindústria apresenta cada vez mais demanda. Assim, ainda que materiais de origem natural já tenham sido analisados como reforço de solos, sempre há possibilidade para novas descobertas, e a atual pesquisa busca contribuir da seguinte forma:

- Análise da viabilidade de utilizar a casca da amêndoa do cacau como estabilizante da expansão de um solo, um material até então pendente de estudo;
- Verificação da influência da casca no comportamento reológico e na resistência mecânica do solo, situação nunca analisada;
- Investigação da formação e propagação de fissuras no solo reforçado com partículas da casca da amêndoa do cacau;

1.8 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho se encontra segmentado em cinco capítulos, subdivididos em tópicos mais específicos para melhor compreensão do objeto de estudo. Desse modo, os capítulos ficam assim divididos: 1 – Introdução; 2 – Revisão Bibliográfica; 3 – Materiais e Métodos; 4 – Resultados e Discussões e por fim, 5 – Conclusões.

No primeiro capítulo, foram apresentadas informações básicas relacionadas aos temas abordados nesta pesquisa, como uma breve contextualização dos solos expansivos, os problemas gerados, o reaproveitamento de resíduos na geotecnia e o rejeito gerado pela produção do chocolate.

No capítulo 2 tem-se uma revisão dos assuntos considerados importantes para a compreensão desta pesquisa, fundamentada em trabalhos científicos desenvolvidos. Essa etapa é de grande importância, pois permite a construção do embasamento teórico utilizado para o desenvolvimento da metodologia experimental.

O capítulo 3 tem a finalidade trazer as especificações sobre a origem e preparação dos materiais utilizados na pesquisa e trazer detalhes do programa experimental seguido e das referências que foram utilizadas para a execução de cada ensaio. Os ensaios de caracterização e os mais usuais foram descritos de

maneira suscinta, devido ao procedimento de ensaio ser devidamente descrito e detalhado nas normas. Ensaios como o Squeeze-Flow e do de propagação de fissuras foram mais detalhados devido ao seu incomum.

No capítulo 4 são apresentadas as análises dos dados obtidos por meios dos experimentos descritos no capítulo anterior

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas com a pesquisa, sintetizando o conhecimento alcançado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a revisão de literatura dos assuntos importantes para a compreensão desta pesquisa. Inicialmente são abordados os aspectos da produção do cacau e do chocolate, sua geração de resíduos e a utilização desses resíduos no mercado e na engenharia. Em seguida, as definições de materiais compósitos e sua aplicação na engenharia geotécnica. Por fim, são apresentadas as definições, métodos de identificação, estabilização e aplicações dos solos expansivos.

2.1 DO CACAU AO CHOCOLATE: PRODUÇÃO E RESÍDUOS

2.1.1 Breve histórico da produção do cacau

Mais conhecido como a matéria-prima utilizada para a fabricação do chocolate, o cacau é um fruto que se adaptou ao clima de algumas regiões do Brasil. Sua origem pode ser atribuída às regiões da América Central, onde os povos indígenas pré-colombianos de El Salvador utilizavam o fruto até mesmo como moeda de troca (CUENCA; NAZÁRIO; 2004).

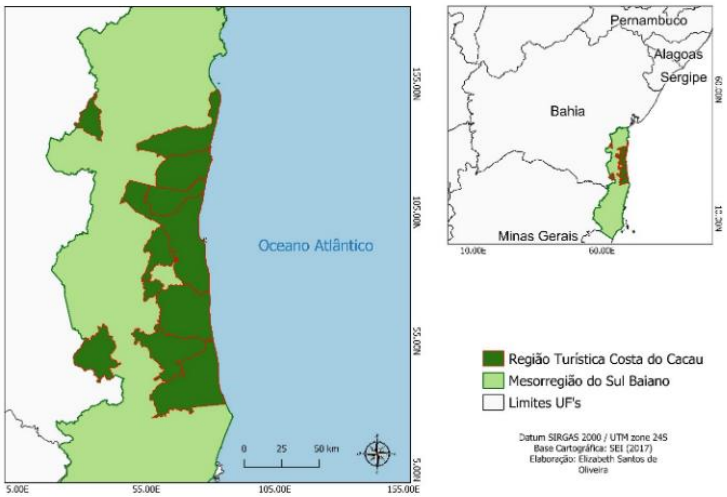
Segundo Alvarenga *et al.* (1994) esses povos faziam um suco com a polpa da fruta e com as sementes torradas e misturadas à farinha de milho era feita uma pasta doce e comestível que, desidratada, pode ser consumida posteriormente como bebida quente e aromatizada, conhecido como chocolate quente.

Ainda de acordo com Cuenca e Nazário (2004), com o envio do cacau em 1585 para a Espanha e o consequente aumento no seu consumo no continente europeu, o cultivo espalhou-se para outras localidades como América do Sul, Ásia e África. No Brasil, o cacau se adaptou muito bem ao sul da Bahia, Norte, norte do Espírito Santo e Norte de Minas Gerais. (BRAINER, 2021).

Atualmente, de acordo com Faostat (2022), os maiores produtores de cacau são a Costa do Marfim com 39,0% da produção mundial, seguido por Gana (15,4%), Indonésia (14,0%), Nigéria (6,3%), Equador (5,1%), Camarões (5,0%) e, em sétimo lugar o Brasil, com 4,6%. Da produção brasileira, 69,7% do cacau é produzido na Bahia e, em seu período auge, foi uma das principais responsáveis pelo desenvolvimento da região sul baiana, levando ao enriquecimento e surgimento de

cidades como Ilhéus, Itacaré, Maraú, Ipiaú, Una, Canavieiras, Itabuna, Uruçuca, Santa Luzia, Pau Brasil e São José da Vitória. De acordo com o Ministério do Turismo (2020) esses são os 11 municípios constituintes da Costa do Cacau e podem ser localizados no mapa representado pela Figura 1. (BRAINER, 2021).

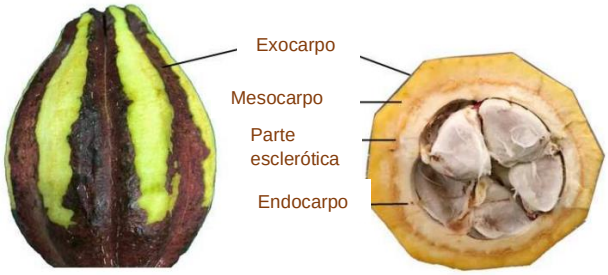
Figura 1 - Localização da região turística Costa do Cacau - Bahia



Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2020)

Segundo Kreibich (2016) o cacau é fruto de uma espécie de árvore conhecida como cacaueiro, de nome científico *Theobroma cacao L.* Possui uma expectativa de vida em mais de 100 (cem) anos, chegando a atingir 4 a 8 metros de altura. Seu fruto, o cacau, possui até 25 cm em comprimento, e contém em torno de 30 a 40 sementes, que medem de 2 a 3 cm de comprimento. Essas sementes são revestidas por uma polpa branca. As partes que compõem o fruto do cacau podem ser vistas na Figura 2.

Figura 2 - Partes constituintes do cacau



Fonte: Adaptado de Lu *et al.* (2018)

2.1.2 O cultivo do cacau, a produção do chocolate e os resíduos gerados

De acordo com Pinheiro e Silva (2017) a cadeia produtiva do cacau gera um excesso de resíduo vegetal, principalmente no que diz respeito a casca do fruto. Segundo os autores, cerca de 80% dos resíduos dessa indústria são representados por esse material. Ressaltam também que, para produzir uma tonelada de amêndoas, ocasiona-se a produção de seis toneladas de casca de cacau fresca (MORORÓ, 2006; SODRÉ, 2008). Segundo El-Shekeil, Sapuan e Algrafi (2014), a produção mundial por ano estimada dessa casca é entre 8000 e 12000 toneladas

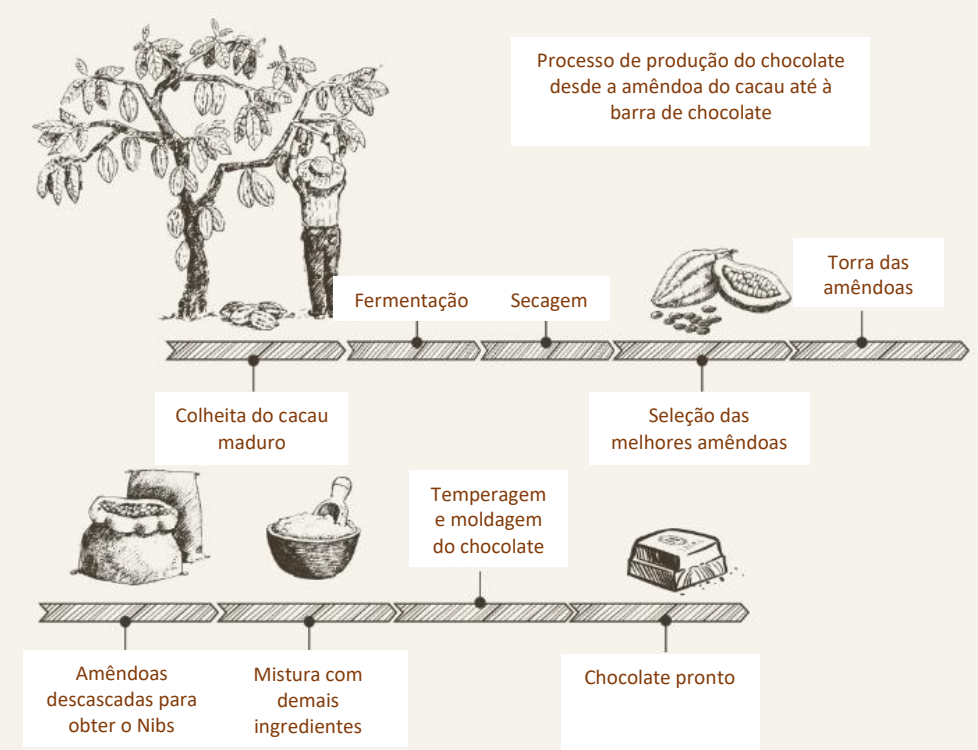
Do mesmo modo, Gonzales *et al.* (2013) ressalta dois importantes resíduos gerados na indústria cacaueira. O primeiro, como já foi citado, é a casca do fruto do cacau, que não tem aproveitamento para as práticas de adubação do cacaueiro, pois, a disposição da casca na própria lavoura favorece a proliferação de doenças, como a vassoura-de-bruxa. Além disso, devido à decomposição do resíduo, odores fétidos são liberados no local. (BARAZARTE *et al*., 2003)

O segundo principal resíduo, é o farelo de cacau, resultante do processo de torrefação da amêndoa, para se obter a manteiga de cacau e o chocolate (GONZALES., *et al*., 2003). No ano de 2016, a Organização Internacional de Cacau estimou a geração mundial em 700 mil toneladas do farelo de cacau.

A produção do chocolate ocorre conforme mostrado na Figura 3. Pela imagem, nota-se que os principais resíduos ressaltados pelos autores são gerados ainda no início do processo, sendo que o resíduo proveniente da casca é gerado no momento de escolha das amêndoas e o farelo é resultante do descascamento das amêndoas após a torrefação.

Assim, pelos dados apresentados, nota-se que o volume de resíduos da indústria cacaueira juntamente com a produção do chocolate é alto. Visando um reaproveitamento, alguns pesquisadores como Gonzales *et al.* (2013), Chepote *et al.* (2005), Pires *et al.* (2004), Pinheiro e Silva (2016), Silva (2018), Guerrero, Suárez e Orozco (2017), Ishola *et al.* (2019), Juncioni (2021), Silva *et al.* (2015), Yaw *et al.* (2015) e Veloso *et al.* (2021) estudaram possíveis aplicações práticas para estes materiais.

Figura 3 - Processo de produção do chocolate



Fonte: Adaptado de Haoma (2022)

2.1.3 Aplicações do resíduo da produção cacaueira

A utilização dos resíduos da produção cacaueira e do chocolate em diversos campos estão sendo cada vez mais estudados. As principais aplicações analisadas são voltadas para a própria lavoura, de forma que o resíduo retorne aos produtores para aumentar a sua produtividade com um menor custo. Entretanto, outras aplicações como a geração de energia, produção de etanol e reforço de materiais também foram estudadas.

Gonzales *et al.* (2013) faz um estudo apontando algumas perspectivas que poderiam ser utilizadas para aproveitamento integral do fruto do cacaueiro de forma sustentável. Segundo os autores, essa biomassa residual composta pelo farelo e casca do cacau, que seria descartada no ambiente, pode ser utilizada para a produção do biogás, biofertilizantes, briquetes e como substrato para a produção de enzimas. Isso é também, uma forma de agregar valor à lavoura, contribuindo para o desenvolvimento da economia.

No caso do biofertilizante, Chepote *et al.*, (2005) mostrou que utilizar o composto de casca de cacau em conjunto com o adubo mineral, promoveu o crescimento do diâmetro do caule do próprio cacaueiro, aumento das concentrações de fósforo, magnésio e zinco na folha do cacaueiro, além de levar a uma produção mais expressiva de cacau. É uma das opções mais atrativas de utilização do resíduo por possibilitar ao produtor usar o resíduo da lavoura em benefício próprio, reduzindo seus custos e aumentando a produção.

Para a alimentação animal, Pires *et al.* (2004) estudaram o reaproveitamento do farelo para a alimentação de ovinos e chegaram à conclusão de que a substituição em 30% do milho e do farelo de soja em pelo farelo de cacau, não afeta a alimentação dos ovinos, sem efeitos no consumo de matéria seca, proteína bruta, fibra em detergente neutro, ganho de peso e conversão alimentar, reduzindo o custo do concentrado em 17,55%. Entretanto, o autor destaca que esse farelo é reaproveitado como alimentação animal de forma restrita devido à presença de substâncias tóxicas.

Pinheiro e Silva (2017) e Silva (2018) realizaram, respectivamente, uma revisão de literatura e uma pesquisa sobre a utilização desses resíduos sólidos para a produção de etanol, caracterizando o material, estudando a hidrólise ácida e realizando o processo de fermentação para a obtenção do etanol. Segundo o autor, os resultados obtidos são animadores e os resíduos sólidos da casca de cacau são viáveis para a obtenção de açúcares fermentescíveis, sendo que a quantidade de etanol obtida foi satisfatória, com teores alcoólicos de 19,2% e 21,5% (°GL).

Guerrero, Suárez e Orozco (2017) implementaram um método colombiano, para extrair a pectina obtida do subproduto da indústria do cacau, com baixo custo e alto grau de extração. Segundo os autores, as pectinas são moléculas complexas formadas por polissacarídeos, principalmente por unidades de ácido galacturônico, utilizadas como agentes gelificantes e estabilizantes na indústria alimentícia e cosmética, além de terem propriedades terapêuticas e aumentarem a ação dos princípios ativos, permitindo seu uso também na indústria farmacêutica. Os autores também recomendam ampliar os estudos acerca de suas características reológicas.

Com relação à aplicação à Engenharia Civil, os resíduos da agroindústria tiveram alguns estudos correlacionados. Ishola *et al.* (2019) buscou catalogar os

resíduos da agricultura que já foram utilizados como aditivos para melhoria de solos residuais tropicais. Entre os resíduos, estão inclusas as cinzas das cascas de serragem, obtidas pela queima de madeiras, cinzas da casca de arroz, cinzas de alfarroba, cinzas de óleo de palma, cinzas da folha de banana, cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, cinzas da casca de coco, cinzas da folha de bambu, cinza de espiga de milho, cinza da casca de mandioca, cinzas de casca de palma.

Os resíduos listados acima, já foram aplicáveis em melhorias de concreto, melhorias geotécnicas e estradas. Entretanto, é válido informar que as cinzas das folhas de banana e a cinzas do óleo de palma possuem poucas informações. Assim, esses dois materiais necessitam de mais estudos para entender suas propriedades e potencial. (ISHOLA *et al., 2019).*

Juncioni (2021), buscou analisar a viabilidade de se desenvolver compósitos termoplásticos com as matrizes poliolefínicas dos resíduos vegetais da casca do cacau. O autor comenta que a incorporação da farinha da casca do fruto do cacau em matrizes poliolefínicas proporcionaram amostras com maior rigidez, mas que, conforme o esperado, reduz a resistência ao impacto e a sua ductibilidade.

Por sua vez, Silva *et al.* (2015) avaliaram a utilização das cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau como substituição ao cimento. Os autores comentam que a adição das cinzas incrementou em até 15% a absorção de água e de até 12% no índice de vazios das argamassas. Ao final, concluíram que a cinza de biomassa pode ser inserida como elemento inerte em materiais à base de cimento.

Yaw et al. (2015) chegou à conclusão de que esse resíduo pode ser utilizado como o estabilizante estudado para a produção de tijolo de terra compactada em uma porcentagem de 10%, pois um incremento maior diminuiu, gradativamente, as propriedades do material. Importante ressaltar que os autores notaram também que as cinzas não atenderam as recomendações da ASTM C 618 para materiais pozolânicos e mesmo assim tiveram um efeito positivo. (YAW *et al.,* 2015).

A pesquisa de Veloso *et al.* (2021) caracterizou compósitos à base de gesso reforçado com partículas da casca da amêndoa do cacau, em proporções de 0,0%; 2,5%; 5,0%; 7,5% e 10% em substituição a massa de gesso. Os autores comprovaram a potencialidade do resíduo do cacau ser utilizado no compósito,

afirmando que a inclusão de até 8,15% do material atendeu a normalização em todos os ensaios realizados.

Com relação à estabilização de solos expansivos, Tiza Michel e Iorver (2016) em sua revisão bibliográfica, identificaram os resíduos de agricultura que já foram estudados como estabilizantes. São eles: cinza de bagaço de cana-de-açúcar, cinzas da casca de amendoim, cinzas dos resíduos de azeitonas, cinzas de casca de trigo, cinzas de casca de mandioca, casca de ovo, cinzas de espigas de milho, cinzas de casca de noz, cinzas da casca de painço e cinzas da casca de coco.

Entretanto, apesar desses resíduos da agroindústria já terem sido estudados, outros apresentam pouco ou nenhuma pesquisa como estabilizante de solos expansivos. São eles: batata, inhame, laranja, banana, grãos de soja, folhas da floresta, cacau, ovos, tabaco, algodão, painço, sorgo, centeio, entre outros. (TIZA MICHAEL; IORVER, 2016).

2.2 SOLOS EXPANSIVOS: IDENTIFICAÇÃO, DEFINIÇÃO E ESTABILIZAÇÃO

2.2.1 Identificação de solos expansivos no Brasil e no mundo

De acordo com Mahler (1994) a identificação de solos expansivos vem ocorrendo em todo mundo. Segundo o autor, continentes como as Américas (Canadá, EUA, México, Argentina, Venezuela e outros), África (Marrocos, África do Sul, Gana, etc.), Europa (Espanha, França, Turquia, etc.), Ásia (China, Índia, etc.) e Oceania (Austrália) já tiveram solos identificados como expansivos.

Jones e Jefferson (2012) relatam a identificação de solos expansivos na Inglaterra, que custam ao país cerca de 3 bilhões de euros devidos aos danos. Os autores afirmam que este seria o maior problema geotécnico da Inglaterra.

Do mesmo modo, Nelson e Miller (1992) afirmam que nos Estados Unidos, uma em cada quatro residências possuem problemas causados por solos expansivos, e que esses problemas geram mais perda financeira que os terremotos, enchentes, furacões e tornados juntos.

No Equador, Hernandez *et al*. (2017), Dobrescu e Calarasu (2015) e Fries *et al*. (2020) já identificaram solos expansivos no país. Por sua vez, Ikeagwuani e

Nwonu (2019) estudou solos expansivos encontrados na Nigéria. Ikeagwuani *et al*. (2020) afirmam também que em Camarões são encontrados esse tipo de solo.

De modo geral, Paiva (2009) elaborou um mapa onde identificou todos os países que já identificaram solos expansivos, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Mapa indicativo dos países com identificação de solos expansivos

Fonte: Adaptado de Paiva (2009)

Com relação ao Brasil, já foram identificados solos expansivos em diversas regiões, sendo as principais formações expansivas localizadas nas bacias sedimentares do Recôncavo Baiano, do Paraná e do Rio Grande do Sul (SIMÕES, 1987). Em Pernambuco, Ferreira, Amorim e Varejão-Silva (2008) analisaram solos expansivos em diversos municípios, como Afrânio, Petrolina, Cedro, Cabrobó, Salgueiro, Floresta, Serra Talhada, Petrolândia, Inajá, Ibimirim, Carnaíba, Nova Cruz, Paulista, Olinda, Recife e Cabo.

Ao realizar uma busca pelos trabalhos publicados acerca dos solos expansivos de 2005 a 2022, foram encontradas cerca de 40 pesquisas, incluindo trabalhos de conclusão de curso (TCC), dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos. As regiões mencionadas como local de origem dos solos expansivos encontrados foram: Pernambuco, Paraná, Mato Grosso, Ceará, Santa Catarina, Sergipe, Bahia, Rio Grande do Sul, Acre, Rio Grande do Norte, São Paulo e Amazonas.

A cidade e estado de cada pesquisa, assim como seus autores e conteúdos desenvolvidos podem ser encontrados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Alguns trabalhos publicados no Brasil nos últimos 17 anos sobre solos expansivos (continua)

Local	Conteúdo desenvolvido	Referência
Agrestina - PE	Estabilização do solo com casca de arroz e cal hidratada	Silva (2018); Silva, Bello e Ferreira (2020)
Araucária - PR	Análise de diferentes meios para estabilizar um solo expansivo em plataforma ferroviária	Nakashima, Saito e Hella (2014)
Baixada Cuiabana - MT	Principais métodos para a estabilização da expansão dos solos saprolíticos de filitos	Ribeiro, Valin e Ribeiro Júnior (2014)
	Influência da expansão do solo na obtenção dos parâmetros geotécnicos obtidos com ensaios de laboratório	Ribeiro e Ribeiro Júnior (2014)
	Controle da expansão do solo saprolítico de filito com cal hidratada cálcica para construções populares	Ribeiro Júnior e Conciani (2005)
Bonito - PE	Avaliação do comportamento hidromecânico e do processo de fissuras de solo expansivo	Silva (2019)
Cabrobó - PE	Estudar o comportamento geotécnico do solo argiloso, potencialmente expansivo, estabilizado com cal	Barbosa (2013)
Cabrobó -PE Paulista - PE Ipojuca - PE	Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios e de suas misturas com cal	Paiva (2009)
Cabrobó-PE	Análise do comportamento geotécnico de solos estabilizados com cinza de casca de arroz	Lacerda (2019)
Cuiabá - MT	Solo residual expansivo como matéria prima na fabricação de tijolos de solo-cal com cura acelerada	Silva *et al.* (2012)
Floresta - PE	Avaliação do potencial expansivo de sedimentos da bacia do Jatobá	Gurgel e Junior (2016)
Icó - CE	Compactação para reduzir o potencial de colapso/expansão de um massapê silto argiloso	Chagas, Moura e Carneiro (2017)
Ipojuca - PE	Comportamento de variação de volume devido à inundação do solo quando misturado com areia	Ataíde (2017)
	Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal	Paiva, Lima, Ferreira e Ferreira (2016)
Joinville - SC	Estabilização do solo incorporando areia verde de fundição residual	Santos (2015)
Nordeste	Identificação de solos expansivos e colapsíveis no Nordeste brasileiro a partir de Redes Neurais Artificiais geradas em Pernambuco	Holanda *et al*. (2021)
Nossa Senhora do Socorro - SE	Estabilização do solo com polímero industrial	Morais (2018)
	Adição de agregado reciclado de resíduo da construção civil para estabilização do solo	Cunha (2018)
Paulista - PE	Melhoramento do solo com cimento e PET	Ramalho (2019)
	Caracterização geotécnica da expansividade do solo	Morais (2017)
	Estabilização do solo com cinza de casca de arroz	Constantino (2018)
	Análise da interação interpartículas e do processo de fissuração de um solo expansivo tratado com areia, cal e cinza de casca de arroz	Bezerra (2020)
	Análise do processo de fissuras e do comportamento de estacas granulares ancoradas submetidas a secagem e umedecimento em solo expansivo	Araújo (2020)
	Avaliação da expansão do solo melhorado com cal	Ferreira *et al.* (2017)
	Previsão da resistência à compressão simples de um solo expansivo estabilizado com cimento através do índice porosidade/teor volumétrico de cimento	Guedes, Tenório e Braz (2021)
Petrolândia - PE	Mudança de volume pela variação do teor de água em um vertissolo	Ferreira e Ferreira (2009)

Tabela 1 - Alguns trabalhos publicados no Brasil nos últimos 17 anos sobre solos expansivos (conclusão)

Local	Conteúdo desenvolvido	Referência
Propriá - SE	Diagnóstico e proposta de solução para obra de canal assente em solo expansivo	Santos (2021)
Recôncavo Baiano - BA	Estudo Geológico - Geotécnico dos Solos Expansivos da Região do Recôncavo Baiano	Oliveira, Jesus e Miranda (2006)
Rio Branco - AC	Avaliação de métodos de determinação da densidade em solos de diferentes atividades da fração argila	Costa *et al.* (2013)
	Estudo dos solos em misturas de bases para pavimentação com agregados de argila calcinada	Barbosa, Marques e Guimarães (2018)
Rio Negrinho e Vila Volta Grande - SC	Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação	Corrêa (2008)
Salvador-BA	Aplicação de geoprocessamento na avaliação de movimento de massa em Salvador-BA	Campos *et al.* (2005)
Santa Maria - RS	Solos Expansivos: Estudo de caso em Santa Maria/RS	Soares, Pires e Conterato (2013)
Santa Maria da Boa Vista - PE	Melhoramento de solo colapsível e expansivo	Marinho (2018)
Santana do Cariri - RN	Potencial do uso de resíduo de mineração de rocha calcária para estabilização de solos expansivos	Batista (2021)
Santana do São Francisco - SE	Estabilização granulométrica de solo argiloso com inclusão de PET micronizado	Moura (2020)
São Paulo - SP	Estabilização de solos com ligantes com elevado teor de escória para pavimentação	Kawahashi *et al*. (2010)
Sousa - PB	Estudo de Caso para fundação em solo expansivo	Ribeiro (2019)
Urucu - AM	Análise do comportamento mecânico do solo para fins de pavimentação	Souza (2009)

Fonte: A Autora (2023)

2.2.2 Definição de solos expansivos

Pode-se afirmar que solos expansivos são solos não-saturados, cuja tendência é sofrer uma variação em seu volume ao ter seu teor de umidade variado. O aumento de umidade pode gerar um aumento de volume do solo e com a secagem, pode ocorrer a redução desse volume. (VILAR; FERREIRA, 2015)

Presa (1980) define o solo expansivo como um solo que, compactado ou em estado natural, apresenta uma variação volumétrica elevada, causando prejuízos em obras sobre ele assentadas ou nas proximidades.

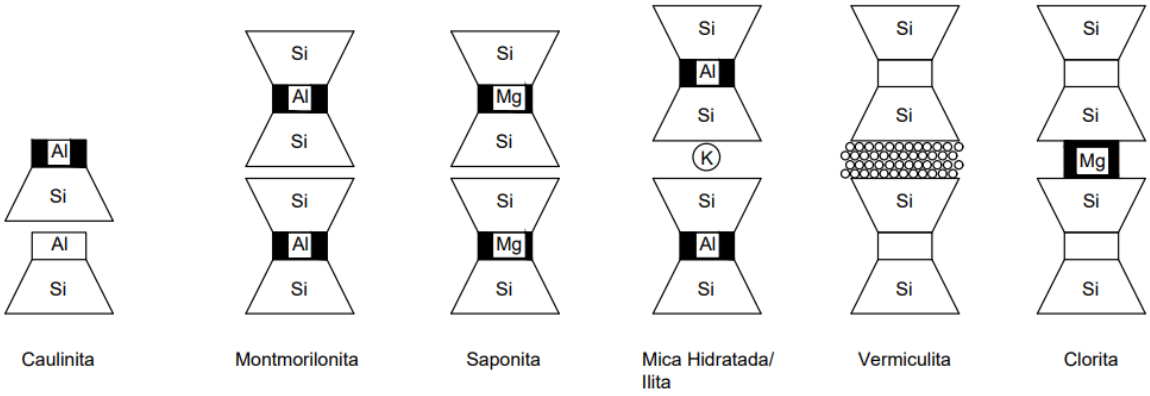
A expansão desse solo tem causas diferentes, embora seja comumente associada à presença de minerais de natureza expansiva. Assim, Vilar e Ferreira (2015) afirmam que esse processo é dominado por causas físico-químicas, que, além do aumento de volume, gera a tensão de expansão, ou seja, a tensão que o solo exerce quando expande.

Chen (1988) afirma que existem dois requisitos para que um solo possa ser expansivo. São eles os fatores intrínsecos, ou seja, as características próprias do

solo, como a composição mineralógica, textura e estrutura, e os fatores extrínsecos, como o clima da região, bioma, disponibilidade hídrica do local, evapotranspiração e a atuação do homem no local.

Em relação aos fatores intrínsecos, Vilar e Ferreira (2015) afirmam que solos com argilominerais de estrutura 2:1, como a montmorilonita e a vermiculita, são alguns dos casos mais recorrentes em solos expansivos. A Figura 5 a seguir traz os principais argilominerais expansivos.

Figura 5 - Principais argilominerais expansivos



Fonte: Adaptado de Carvalho (1997) *apud* Paiva (2009)

A caulinita possui uma estrutura do tipo 1:1, formada por uma folha tetraedral constituída por silício coordenados tetraedricamente por átomos de oxigênio (SiO_4) e outra folha octaedral, composta por alumínio coordenados octaedricamente a oxigênio e agrupamentos OH. (CAGLAR, 2012)

A montmorilonita e a saponita, por sua vez, possuem uma estrutura 2:1 e fazem parte do grupo das esmectitas. Nesse grupo, a célula unitária possui carga elétrica negativa, precisando de um cátion para balancear a estrutura, sendo denominado de cátion trocável, pois podem variar de forma reversível. (COELHO; SANTOS; SANTOS, 2007). Segundo Fabris (2006) e pela Figura 5, a saponita é relativamente rica em magnésio.

Ainda segundo Fabris (2006), a ilita compreende o modelo composto por duas folhas tetraédricas de sílica que encaixam em uma folha octaédrica onde o íon pode ser variável entre o Al^{+3}, Fe^{+3}, Fe^{+2} ou Mg^{+2}. Entre as folhas tetraédricas são encontrados íons K^{+}. Já a vermiculita é constituída por camadas estruturais típicas

das micas trioctaédricas separadas por moléculas de água orientadas, tendo sua expansão mais limitada do que a montmorilonita. O autor traz também que a clorita difere das outras estruturas por apresentar em sua composição outra folha octaédrica em que o cátion coordenado normalmente é Mg^{+2}.

Quanto aos fatores extrínsecos, o trabalho Ferreira e Ferreira (2009) traz que a disponibilidade de água é o fator preponderante, de forma que, se num período a precipitação excede a evapotranspiração e em outro período ocorre o inverso, tem-se uma mudança sazonal na umidade das camadas mais superficiais do terreno, podendo gerar a expansão num período e ressecamento em outro. Ferreira e Ferreira (2009) ainda pontuam que essa precipitação e evapotranspiração são diretamente influenciadas pelo clima e pela vegetação.

Nelson e Miller (1992) realizam uma listagem de fatores que influenciam a expansão de um solo, como a mineralogia da argila, a química da água no solo, sucção no solo, plasticidade, estrutura e textura do solo e a densidade seca. Os mesmos autores também trazem as situações do solo que influenciam nessa expansão. As variações de umidade, o clima, água do subsolo, drenagem e fontes de água superficiais, vegetação, permeabilidade, temperatura, história de tensões, condições do solo *in situ*, carregamento e o perfil do solo também influenciam em uma maior ou menor expansão.

2.2.3 Métodos para identificação de solos expansivos

Segundo Morais (2017) consegue-se identificar os solos expansivos por dois critérios básicos. O primeiro é através do levantamento de informações acerca do local por meio de observações superficiais, como topografia, vegetação, sinais de contração do solo, fissuras na edificação e relatos dos moradores da região. O segundo critério é por meio da análise de resultados de laboratório, utilizando alguns dos métodos de identificação.

Ferreira (1995) traz esses métodos de identificação divididos em Métodos Indiretos e Métodos Diretos. Os métodos indiretos podem ainda ser divididos em Identificativos, Qualitativos e Orientativos, enquanto os métodos diretos podem ser divididos em Avaliativos e Quantitativos.

A avaliação da expansividade nos métodos indiretos é realizada baseada em ensaios de granulometria, índices físicos, limites de consistência e identificação

mineralógica por meio da difração de raio-x, microscopia eletrônica de varredura, análise termo-diferencial físico-químicos. O solo pode ainda ser analisado por meio da identificação visual, geologia, geomorfologia e pedologia.

Já os métodos diretos, o que é analisado é a tensão de expansão induzida ou a tensão necessária para impedir sua expansão. Os ensaios utilizados para essa análise são os ensaios de expansão de Lambe, de expansão livre e pressão de expansão, edométrico simples, duplo e com sucção controlada (FERREIRA, 1995). Tais informações foram sintetizadas na Tabela 2 a seguir, também por Ferreira (1995).

Tabela 2 – Métodos de identificação de solos expansivos

Métodos	Subdivisões	Base para definição do critério	Referências
Indireto	Identificativos	Difração de raio-x; Microscopia Eletrônica de varredura; Análise termodiferencial; Adsorção de etileno-glicol; Físico-químicos	Cacerdo et al. (1986) e Fink et al. (1971)
	Qualitativos	Granulometria; Consistência e Índices Físicos; Classificação geotécnica	Priklonskij (1952); Skempton (1953); Seed et al. (1962); Van Der Merwe (1964); Chen (1965); Vijayverviya e Ghazzaly (1973); Rodriguez Ortiz (1975); Cuellar (1978)
	Orientativos	Geologia; Pedologia; Geomorfologia; Identificação visual	Patrick e Snethen (1976); Carcedo et al. (1986); Ferreira (1990c e 1993a)
Direto	Avaliativos	Ensaio de expansão de Lambe	Lambe (1960)
	Quantitativos	Ensaios de expansão livre e tensão de expansão; Ensaio edométrico simples e duplo; Ensaio edométrico com sucção controlada	Seed et al. (1960); Chen (1965); Vijayverviya e Ghazzaly (1973); Rodriguez Ortiz (1975); Cuellar (1978); Jimenez Salas (1980); Escario (1967 e 1969); Aitchison et al. (1974); Johnson (1978); Mc Keen (1980)

Fonte: Adaptado de Ferreira (1995)

De acordo com Paiva (2009), Altmeyer em 1955, desenvolveu um método que permite a classificação do grau de expansão do solo ao se observar as características de contração. O critério utilizado e desenvolvido pelo autor pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 – Processo de identificação indireta desenvolvido por Altmeyer (1955)

Contração Linear	Limite de Contração (%)	Expansão Provável (%)	Grau de Expansão

< 5	> 12	< 5	Não Crítico
5 a 8	10 a 12	0,5 a 1,5	Marginal
> 8	< 10	< 10	Crítico

Fonte: Adaptado de Altmeyer (1955)

Paiva (2009) complementa ao identificar o processo indireto realizado por Chen (1965), que se baseia na granulometria, no limite de liquidez (LL) e no ensaio de SPT (Tabela 4).

Tabela 4 – Processo de Identificação indireta desenvolvido por Chen (1965)

% Passante na peneira N° 200	Limite de Liquidez	SPT	Provável Expansão	Grau de Expansão
> 95	> 60	> 30	> 10	Muito Alta
60 a 95	40 a 60	20 a 30	3 a 10	Alta
30 a 60	30 a 40	10 a 20	1 a 5	Média
< 30	< 30	< 10	< 1	Baixa

Fonte: Adaptado de Chen (1965)

Marinho (2018), além dos métodos citados acima, mostra também a classificação segundo Seed *et al*. (1962) e Daksanamurthy e Raman (1973) que, assim como Chen (1965), classifica o solo baseado no limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP). Tais critérios podem ser analisados na Tabela 5.

Tabela 5 – Processos indiretos de identificação de solos expansivos

	Grau de Expansão			
Autor	**Muito Alto**	**Alto**	**Médio**	**Baixo**
Seed *et al*. (1962)	IP > 35	20 < IP ≤ 35	10 ≤ IP ≤ 20	< 10
Daksanamurthy e Raman (1973)	LL > 70	50 < LL ≤ 70	35 < LL ≤ 50	20 ≤ LL ≤ 35

Fonte: Adaptado de Marinho (2018)

2.2.4 Métodos para estabilização de solos expansivos

Sabe-se que a expansividade do solo traz consequências negativas para as edificações. Desse modo, visando a melhoria geotécnica dos solos, costuma-se empregar técnicas de estabilização que possibilitam resultados melhores do que apenas a aplicação de técnicas preventivas.

Tais técnicas, como a impermeabilização da área, tem o caráter de apenas evitar o problema, não o solucionando definitivamente, pois qualquer dano a essa

camada impermeabilizante ou uma mudança no lençol freático do terreno permitem a infiltração e, consequentemente, a expansão (CONSTANTINO, 2018).

A solução do problema é conhecida como estabilização do solo, que são frequentemente realizadas de dois modos, a estabilização mecânica e a estabilização química. (CONSTANTINO, 2018; ESTABRAGH *et al*., 2012). Tais métodos podem ser utilizados de forma independente ou combinados.

Segundo Petry e Little (2002) para as argilas expansivas a estabilização físico-química é preferência entre os engenheiros pela sua durabilidade. Constantino (2018) em sua revisão, traz algumas técnicas mecânicas e químicas que foram descritas na Tabela 6.

Tabela 6 – Métodos de estabilização para solos expansivos

	Técnicas	**Processo**	**Referências**
Mecânica	Compactação	Densifica o solo, reduzindo o volume de ar; aumenta a resistência ao cisalhamento e diminui a compressibilidade; aumenta a capacidade de carga e reduz as características de expansão do solo	Attom (1997); Ferber et al. (2009); Hussain (2017)
	Ciclos de molhagem e secagem	Inunda-se o solo até que o inchaço completo seja obtido, seguido de secagem correspondente ao conteúdo original de água. Repete-se o ciclo até o equilíbrio	Constantino (2018); Soltani et al. (2017); Estabragh et al (2013)
	Reforço	Uso de materiais fibrosos (geossintéticos ou fibras distribuídas aleatoriamente natural ou sintética), criando uma rede de reforço 3D, intertravando os grãos do solo em uma unidade de massa.	Hejazi et al (2012)
	Resíduos	Consiste em retirar parte do material e substituir por materiais não expansivos como areia e pedregulhos. Por ter um custo elevado de execução, tem-se estudado a utilização de resíduos sólidos nessas misturas.	Ahmed, Hassan e Lotfi (2019); Ogila (2016); Partor et al. (2019)
Química	Adição de aditivos	Utiliza-se aditivos como cal, cimento Portland, silicatos de sódio, materiais betuminosos, resinas e compostos de fósforo	Bahar, Benazzoug e Kenai (2004); Javadi (2011); Taheri et al. (2012); Soltani (2017)

Fonte: Adaptado de Batista (2021)

Ikeagwuani e Nwonu (2019) apresentam em seu trabalho, as vantagens e desvantagens desses métodos. Os autores afirmam que a estabilização mecânica é

um procedimento mais simples de ser realizado, requer mão de obra pouco especializada, não necessita de testes laboratoriais demorados, além de servir como uma alternativa de gestão de resíduos eficaz para aterros.

Entretanto, a atividade física *in situ* a ser executada é prolongada, devido ao controle de qualidade, possui um resultado pouco previsível, especialmente em técnicas de secagem e umedecimento, e de forma geral, não são eficientes quando as condições do solo são críticas. (IKEAGWUANI; NWONU, 2019)

Quanto a estabilização química, os autores pontuam que a quantidade de aditivo de forma geral é muito baixa, de custo pouco relevante, não é um processo demorado, é um modo de gestão de reciclar subprodutos de indústrias e sua efetividade não depende de outras circunstâncias.

As desvantagens dessa estabilização se encontram na dificuldade de gerar em campo as condições simuladas em laboratório, além da liberação de compostos nocivos, que podem contaminar o lençol freático. Por fim, caso o custo de obtenção do aditivo seja proibitivo, em relação à quantidade necessária, ou quando as condições desfavoráveis predominam (reações solo-cal, sulfato, estabilização induzida por craqueamento, etc.), o uso dessa técnica pode não ser adequado. (IKEAGWUANI; NWONU, 2019)

2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS RELACIONADOS AOS SOLOS EXPANSIVOS

A estabilização mecânica dos solos expansivos, como descrito na Tabela 6, nada mais é do que a geração de um material compósito para se estabilizar a expansividade. Assim, é importante resgatar alguns conceitos, ainda que básicos, para a melhor compreensão da pesquisa.

Pode-se afirmar que o material compósito é originado através da combinação de dois ou mais materiais a fim de se atingir propriedades que não são encontradas nesses materiais isoladamente. (VENDRUSCOLO, 2003).

Callister (2012) por sua vez, define materiais compósitos como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, conduzindo a uma melhor combinação de propriedades. São incluídos nesses materiais as ligas metálicas, cerâmicas e os polímeros multifásicos.

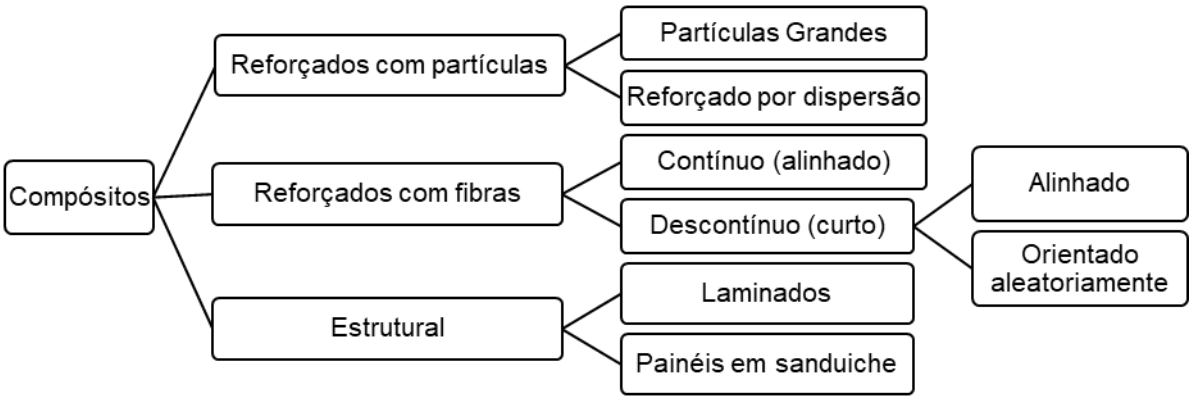
Iozzi *et al.* (2010) exemplifica as propriedades mais buscadas pela combinação de materiais como sendo resistência mecânica, tenacidade, peso, dureza, condutividade, resistência à corrosão, desempenho em altas temperaturas, entre outras.

Entretanto, há uma grande variedade de compósitos ocorre naturalmente no ambiente, como, por exemplo, a madeira e os ossos. Assim, no contexto dessa pesquisa, um material compósito é um material multifásico feito artificialmente. (CALLISTER, 2012)

De acordo com Budinski (1996), esses materiais compósitos são constituídos essencialmente por duas fases: a matriz (seja ela de resinas epóxi, silicones, concretos, solos, argamassas, etc.) e o elemento de reforço ou fase dispersa (fibras, partículas, aço, etc.)

Segundo Callister (2012), pode-se classificar os materiais compósitos em três divisões principais: os compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais. A fase dispersa para os compósitos reforçados com partículas tem eixos iguais, enquanto para os compósitos reforçados com fibras há uma grande razão entre o comprimento e o diâmetro. Na Figura 6 tem-se a classificação possíveis dos materiais compósitos.

Figura 6 – Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos



Fonte: Adaptado de Callister (2012)

No que se refere a compósitos reforçados com partículas, esses podem ser subdivididos em compósitos com partículas grandes e compósitos reforçados por

dispersão, e a sua diferença está associada ao mecanismo do reforço ou aumento da resistência. (CALLISTER, 2012)

Um exemplo bem conhecido de compósito com partículas grandes é o concreto, em que a matriz é o cimento e a areia e a brita os particulados. Já os compósitos reforçados por dispersão, as partículas são, em geral, muito menores e as interações no nível atômico ou molecular que levam ao aumento de resistência. Por essas definições, Oliveira (2018) trata o solo reforçado como um material compósito, onde o solo é a matriz e a fibra ou partícula é o material de reforço. (CALLISTER, 2012).

2.3.1 Solo reforçado com fibras

A utilização de reforço mecânico no solo por meio de fibras é uma das opções viáveis para a estabilização de solos expansivos e essa técnica vem sendo utilizada há décadas, segundo Miguel (2020). Citando os autores Majundar (1975), Hoover et al. (1982) e Bentur e Mindess (2007), Miguel (2020) traz que a aplicação desta técnica ocorre desde a Civilização Mesopotâmica, que utilizavam palhas em tijolos das construções.

Com o passar do tempo, tal técnica de reforço evoluiu de forma que, da observação da influência das raízes de planta no cisalhamento dos solos, passou-se ao estudo da inserção de fibras naturais ou sintéticas. (ENDO; TSURUTA, 1969; ANDERSLAND; KHATTAK, 1979; GRAY; OHASHI, 1983; MIGUEL, 2020). Shukla (2017) afirma que, de modo geral, as fibras podem ser divididas em naturais ou sintéticas.

Miguel (2020) em seu estudo do comportamento mecânico de um solo dispersivo e sulfatado reforçado com fibras de vidro menciona que alguns inconvenientes são associados às fibras naturais, como a falta de padrão, baixa rigidez e suscetibilidade a biodegradação.

Carvalho, Fangueiro e Neves (2014) avaliaram a durabilidade de fibras naturais para a geotécnica. As fibras estudadas foram as fibras de coco, sisal e banana, onde o que buscou-se avaliar foi a influência dos raios ultravioletas, calor e umidade. Ao final, os autores perceberam que as fibras apresentaram uma maior degradação nos primeiros 15 dias, o que provocou uma redução da resistência a

tração superior a 50% da resistência inicial. Os autores afirmam que a fibra de banana foram as que tiveram degradação mais rápida, inviabilizando seu uso, enquanto as fibras de coco e sisal se degradaram mais lentamente

Wang *et al*. (2017) realizou uma investigação sobre a resistência de um solo expansivo reforçado com fibra de juta, e chegaram à conclusão que as fibras são eficazes na compensação de perda de resistência pós-pico e na melhoria do cisalhamento e dos parâmetros de resistência do solo expansivo. O teor de fibra ideal obtido foi de 0,6% e o comprimento ideal entre 12 e 18 mm

Gusmão (2020) estudou a influência dos ciclos de secagem e molhagem em misturas de solos argilosos compactadas com fibras de coco verde e chegou a conclusão que a adição das fibras melhorou o comportamento do solo, além de aumentar a resistência de pico e diminuir a queda da resistência pós-pico, aumentando também os parâmetros de coesão e ângulo de atrito, fatores importantes na resistência ao cisalhamento do solo.

Os resultados de Gusmão (2020) são semelhantes aos de Wang *et al*. (2017). Ao comparar com o solo sem as fibras, a autora percebeu também que enquanto a passagem pelos ciclos gerava uma tendência de redução da tensão cisalhante, a adição das fibras minimizou esse efeito.

Faustino (2022) por sua vez estudou a estabilização com fibras da casca de coco verde, chegando à conclusão de que a adição de 1% de fibras foi o ideal para a redução da tensão de expansão.

É importante ressaltar que as fibras naturais não são oriundas apenas de plantios, podendo ser também de origem animal, como pelos e penas, que possuem a queratina como componente característico, uma proteína de elevada dureza e alta resistência à degradação. (MARTÍNEZ-HERNÁNDES; VELASCO-SANTOS, 2012).

Ayala, Carvalho e Martínez-Hernández (2016) estudaram a melhoria de solos por meio de fibras naturais provenientes das penas de frango, que são normalmente descartadas em lixões ou aterros sanitários. Os autores verificaram que a adição dessas fibras levou a redução do peso específico aparente seco do solo, tendendo a aumentar a umidade ótima.

2.3.2 Solo reforçado por partículas

Tiwari, Satyam e Puppala (2021) estudaram a resistência e durabilidade de um solo expansivo estabilizado com cinzas recicladas e cinzas naturais de coco,

concluindo que as cinzas possuem um caráter cimentício e podem ser utilizadas como alternativa para a estabilização de solos em uma abordagem sustentável. Já as fibras de coco, forneceram ao solo uma maior resistência compressiva e a adição de resistência à tração foi mínima. Quando estudadas de forma combinada, os autores chegaram afirmam que 20% de cinzas e 0,50% de fibras de coco podem ser consideradas proporções ótimas e eficazes no tratamento de um solo expansivo.

Aguiar (2019) analisou o solo expansivo de Paulista-PE e sua estabilização com cimento Portland e resíduo do polimento de rochas ornamentais e comparou os resultados com os dados obtidos por Tenório (2018) de estabilização com a cal. A mistura solo-cimento-resíduo apresenta melhor de resistência à compressão simples, quando comparada com a mistura solo-cimento.

Entretanto, Aguiar (2019) afirma que a mistura com a cal tem melhores resultados para a compressão simples, principalmente pela cal estabilizar a expansão do solo. Os custos envolvendo a estabilização com os três tipos foi semelhante, por se tratar da cidade de Campina Grande, onde o resíduo pode ser obtido por doações da empresa. O custo por kg, por sua vez, é menor para a estabilização com cal. O autor conclui que o resíduo de polimento de rochas ornamentais foi positivo em relação ao aumento da compressão simples e o construtor deu preferência a esse resíduo pela disponibilidade da região.

Santos, Possari e Pacheco (2020) levantaram o estado da arte de solo com agregado miúdo reciclado de concreto e afirmaram que o estudo do reaproveitamento desses resíduos se iniciou entre 1986 e 1997, principalmente para argamassas e concretos. Lentamente as pesquisas foram voltando-se para obras de geotécnica, em 2007 e evoluindo.

Ramalho (2019) analisou o melhoramento do solo expansivo com cimento e politereftalo de etileno (PET) micronizado e concluiu que a substituição de 15% do solo por PET promoveu um aumento de 119% da resistência apresentada pelo solo expansivo estabilizado com cimento e as resistências médias variaram de 420 kPa até 516 kPa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na pesquisa e a metodologia utilizada para obter a caracterização física, reológica e hidromecânica do solo natural e de suas misturas com a casca da amêndoa de cacau e avaliar a influência dos diferentes teores no comportamento do solo, na propagação das fissuras e na expansividade.

3.1 MATERIAIS

Os materiais de estudos foram: o solo expansivo do município de Paulista, Pernambuco, cascas da amêndoa do cacau (farelo de cacau) e a mistura do solo com as cascas.

3.1.1 Solo Expansivo

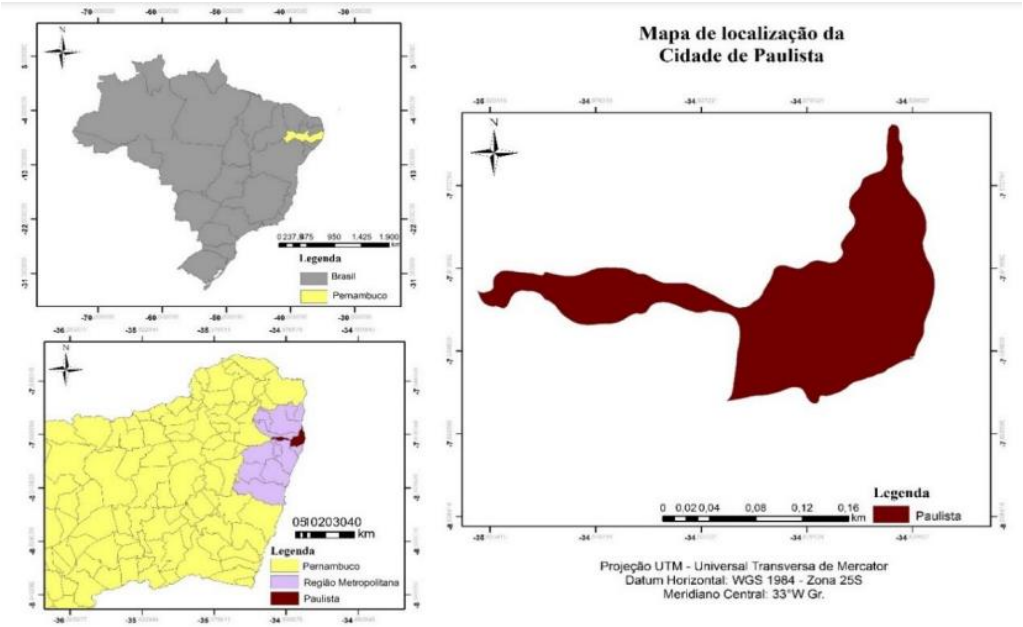
O solo expansivo utilizado é proveniente de amostras deformadas coletadas por Araújo (2020), na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Companhia de Saneamento do Estado de Pernambuco (COMPESA), bairro do Janga (latitude de 7° 55’ 35”S e longitude de 34° 50’ 49”W), no município de Paulista na camada que vai de 1,0 m a 1,40 m.

A localização do município e o local da coleta da amostra do solo podem ser vistos na Figura 7 e Figura 8, respectivamente.

O estudo do solo deste município iniciou-se com Costa Nunes *et al*. (1982) e, desde então, diversos trabalhos foram realizados. Jucá *et al.* (1992), Bastos (1994) e Justino da Silva (2001) caracterizaram a camada ativa na profundidade de 3,0 a 3,5 m por meio do deslocamento vertical do maciço em diferentes condições climáticas. Segundo Bastos (1994), esse solo é originário do intemperismo físico-químico de argilitos e calcário margoso da Formação Maria Farinha.

Outros estudos com este solo foram desenvolvidos, principalmente no que diz respeito a sua estabilização. Paiva (2016), Morais (2017), Constantino (2018), Barbosa (2019), Bezerra (2020), Araújo (2020), Faustino (2022) e Aráujo (2023) analisaram a adição de cal hidratada, cinza de casca de arroz, areia, fibra de coco verde, fibras de pneu e o processo de expansão e fissuração.

Figura 7 - Mapa de localização da cidade de Paulista - PE



Fonte: IBGE (2014)

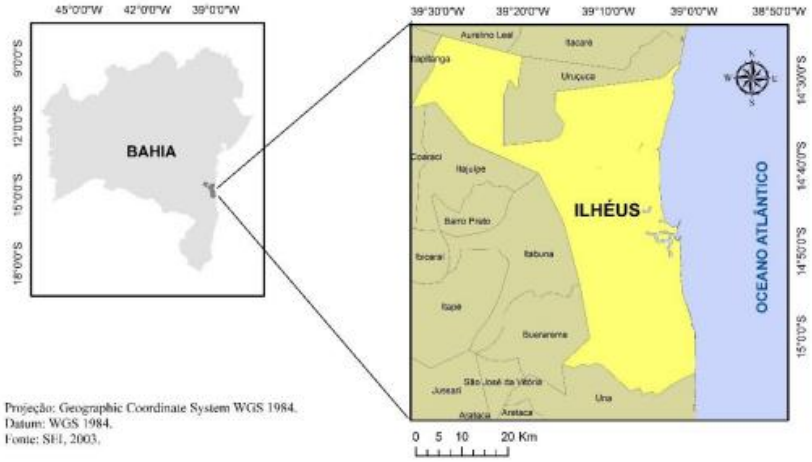
Figura 8 - Local de coleta da amostra na ETE

Fonte: Araújo (2020)

3.1.2 Casca da amêndoa do cacau

As cascas da amêndoa do cacau foram fornecidas pelo Centro de Inovação do Cacau (CIC), situado na Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Ilhéus, Bahia (latitude de 14° 47’ 49’’S e longitude de 39° 10’ 14’’ W). Na Figura 9 pode-se localizar Ilhéus e na Figura 10 encontra-se o CIC está na UESC.

Figura 9 - Mapa de localização do município de Ilhéus -BA



Fonte: Lobo, Santos e Lavenère-Wanderley (2017)

Figura 10 - Localização do Centro de Inovação do Cacau (CIC)

Fonte: Google Earth (acessado em 17/01/2023)

O CIC é uma iniciativa do Parque Científico e Tecnológico do Sul da Bahia, inaugurado em 2017 e faz análises variadas em amêndoas de cacau para ajudar no desenvolvimento do mercado, buscando aproximar compradores de produtores de cacau de qualidade.

As cascas fornecidas são provenientes do processo de extração do nibis do cacau por meio da torrefação. O produto rejeitado é em forma de farelo, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Farelo da Casca da amêndoa do Cacau

Fonte: A Autora (2023)

Para a realização das misturas não foi realizado nenhum beneficiamento ao material. Por não ser composto por fibras, a determinação da tração do material também não foi realizada. Entretanto, foi realizada a densidade real dos seus grãos, por meio da ABNT NBR 7181 (2020) e ABNT NBR 6508 (2016) respectivamente.

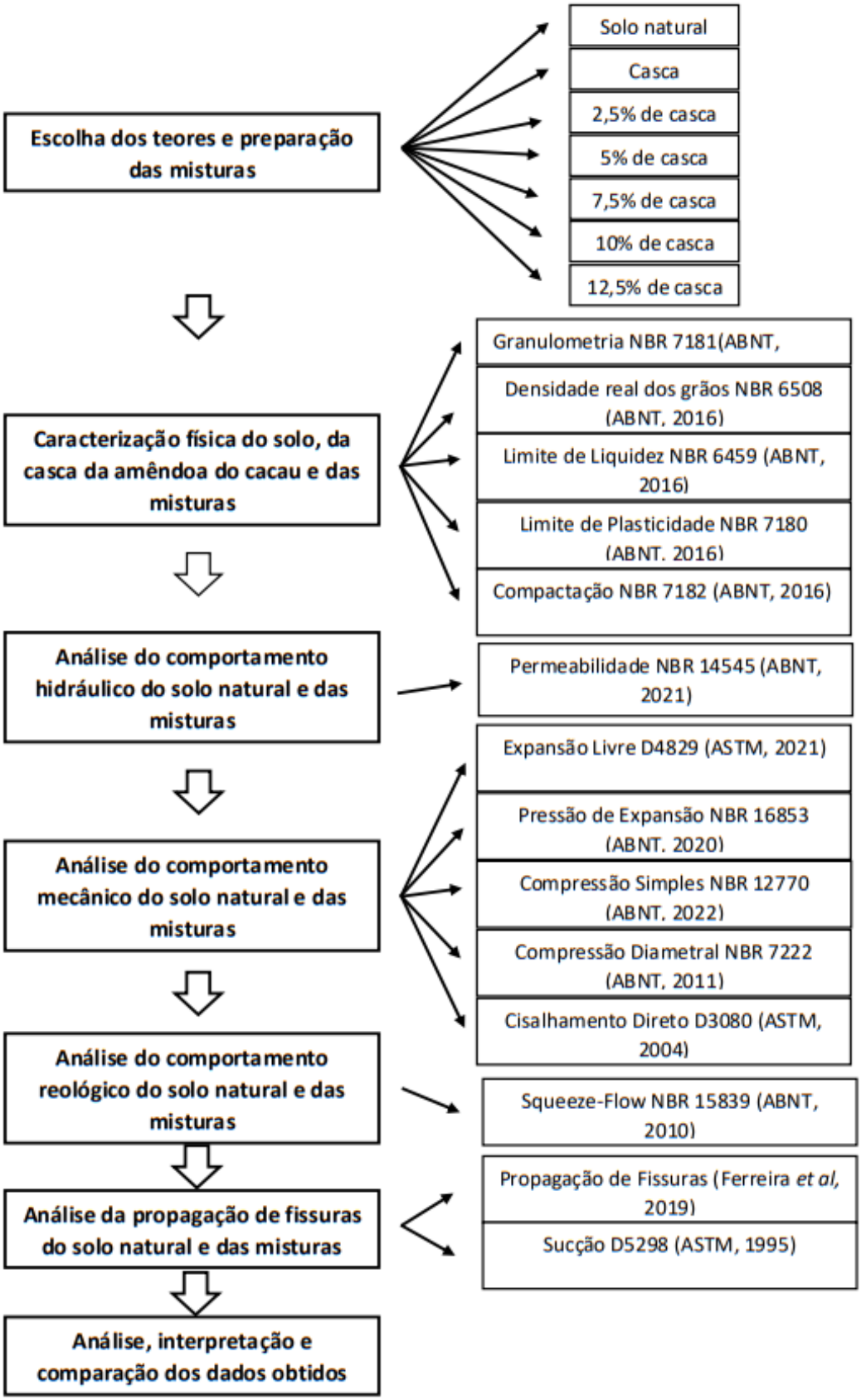
3.2 MÉTODOS

O procedimento metodológico de pesquisa iniciou-se com a preparação do solo e a obtenção das cascas da amêndoa do cacau utilizadas na pesquisa e a caracterização desses materiais de acordos com as normas da ABNT e ASTM. Em seguida determinaram-se os teores de casca a serem misturados ao solo e realizou-se a caracterização dessas misturas.

Pode-se visualizar melhor essa metodologia por meio da Figura 12, que resume em um fluxograma o procedimento descrito acima. As etapas principais serão descritas nos itens subsequentes.

A escolha das porcentagens de casca a serem utilizados foi baseada nos estudos de Yaw *et al.* (2015) e Veloso *et al.* (2021), que apontaram proporções ideais de 10% e 8,15% de casca respectivamente. Visando analisar pontos antes e após essas proporções ideais sugeridas pelos autores, foram definidas inicialmente as proporções de 2,5%; 5%; 7,5%; 10%. Após a realização de alguns ensaios, notou-se a necessidade de incluir a proporção de 12,5%.

Figura 12 – Fluxograma da metodologia experimental



Fonte: A Autora (2023)

3.2.1 Preparação do material

Para o início dos experimentos, o solo foi destorroado, passado na peneira n° 4 e armazenado em sacos impermeáveis, para a determinação de umidade, conforme a sequência apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Etapas de preparação do solo

(a) Destorroamento (b) Solo passado na peneira n° 4 (c) Armazenamento em sacos (d) Determinação umidade

Fonte: A Autora (2023)

As cascas da amêndoa do cacau também foram armazenadas em sacos impermeáveis para a determinação da sua umidade higroscópica em uma estufa entre a 65°C, conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016). O Processo pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Etapas de preparação das cascas da amêndoa do cacau

(a) Separação da amostra (b) Armazenamento (c) Determinação umidade

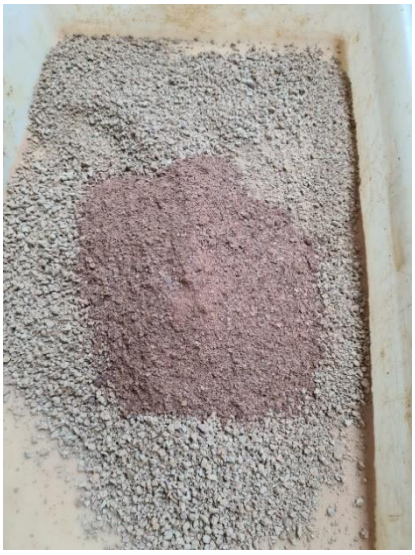
Fonte: A Autora (2023)

A composição das misturas foi realizada por peso. Assim, pesou-se o solo seco ao ar, descontou-se desse peso úmido a umidade higroscópica e determinou-

se o peso seco de casca a ser adicionada. Sabendo a umidade higroscópica da casca, determinou-se o peso úmido da casca a ser adicionada.

A composição do material foi iniciada misturando o solo destorroado seco ao ar à casca da amêndoa de cacau sem adição de água (Figura 15). Devido às umidades diferentes dos dois materiais, a mistura foi armazenada em sacos impermeáveis, para a determinação da umidade em uma estufa a 65°C, do mesmo modo que o demonstrado na Figura 13 e 14 para o solo e para a casca de amêndoa de cacau pura.

Figura 15 – Preparação das misturas



Fonte: A Autora (2023)

3.2.2 Caracterização Física e Química

Os procedimentos e normas técnicas seguidos para a caracterização física do solo e das misturas foram:

- Granulometria: NBR 7181 (ABNT, 2016);
- Limite de Liquidez: NBR 6459 (ABNT, 2016);
- Massa Específica dos Grãos: NBR 6508 (ABNT, 2016);
- Compactação: NBR 7182 (ABNT, 2016).

Na Figura 16 é mostrada a caracterização física sendo realizada.

Figura 16 – Caracterização física

(a) Peneiramento (b) Sedimentação (c) Limite Liquidez

(d) Limite Plasticidade (e) Massa Específica real dos grãos (f) Compactação

Fonte: A Autora (2023)

A caracterização química foi realizada baseada na Metodologia de Análise de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA (1997) e EMBRAPA (2011).

Através da análise química, buscou-se avaliar a qualidade do solo, das misturas e da casca da amêndoa. Para isso foram realizados os seguintes ensaios:

- Potencial Hidrogeniônico em água (pH_{h2o})
- Condutividade Elétrica no Extrato de Saturação (CE)
- Capacidade de Troca Catiônica de Cátions (CTC-T)
- Porcentual de Saturação de Base (V)
- Percentual de Saturação de Sódio
- Saturação por Alumínio

- Soma das Bases (S)
- Saturação por Sódio e Óxidos

3.2.3 Condutividade Hidráulica

O ensaio de condutividade hidráulica do solo e das misturas foi realizado conforme a ABNT NBR 14545/2000 por um permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE. Os corpos de prova foram compactados em formato cilíndrico na umidade ótima de cada material.

Cada amostra foi inserida na célula do equipamento seguindo a seguinte ordem: base de acrílico por onde entra a água, pedra porosa, papel filtro, corpo de prova compactado, papel filtro, pedra porosa, top cap (para conectar as mangueiras de drenagem) e envolvimento do conjunto por uma membrana flexível.

Ligas de borracha foram utilizadas para fixar a membrana ao conjunto e as mangueiras de drenagem foram conectadas ao top cap. Assim, a célula foi isolada e preenchida com água, de forma que não existissem mais bolhas de ar nas mangueiras e pedras porosas e aplicou-se uma tensão confinante na base e no topo da amostra (Figura 17).

Após a saturação do corpo de prova, ou seja, quando o volume de água que entra na base do corpo de prova é igual ao volume que sai pelo topo, mediu-se o fluxo e o coeficiente de condutividade hidráulica pode ser determinado por meio da Equação 1.

$$k_h = \frac{h \cdot V_p}{t \cdot A_b \cdot \Delta p} \quad (1)$$

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

h: altura do corpo de prova (m);

V_p: volume percolado (m^3);

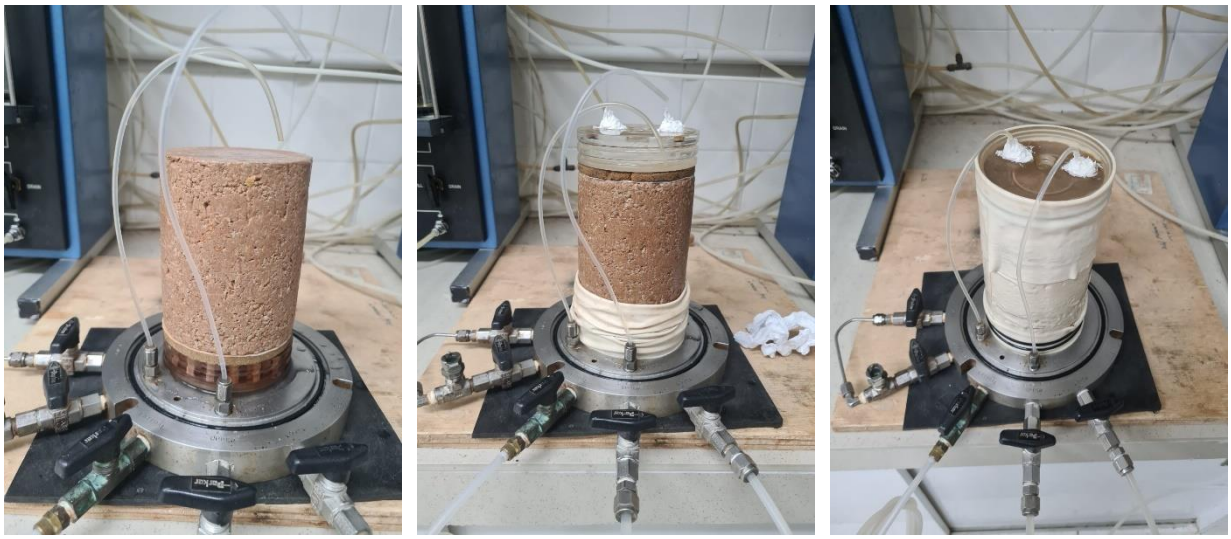
t: tempo de percolação (s);

A_b: área da base do corpo de prova (m^2);

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

Figura 17 – Procedimento de preparação do corpo de prova para determinar a condutividade hidráulica: (a) base de acrílico, pedra porosa, papel filtro e corpo de prova; (b) pedra porosa de topo, top cap e membrana flexível; (c) envolvimento do conjunto pela membrana flexível; (d) ligas elásticas para garantir o isolamento; (e) célula isolada e preenchida com água; (f) célula conectada ao permeâmetro triflex.

(a) (b) (c)



(d) (e) (f)

Fonte: A Autora (2023)

3.2.4 Ensaios para caracterização da expansão

Para determinar a expansão livre e a tensão de expansão do solo e das misturas, foi necessário utilizar ensaios edométricos com células convencionais. Para a moldagem dos corpos de prova, inicialmente compactou-se o material na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, obtidos através do ensaio de compactação. Em seguida, os anéis de cravação para moldar o corpo de prova

foram inseridos nas células de ensaios edométricos. A Figura 18 traz a ordem de montagem seguida em todas as células utilizadas.

Figura 18 - Montagem da célula de adensamento: (a) célula edométrica (1), pedras porosas (2) e papeis filtro (3), (b) solo moldado no anel de cravação (4) e (c) célula montada

(a) (b) (c)

Fonte: A Autora (2023)

Segundo a norma ASTM D4829/1995 e da ABNT NBR 12007/1990, os ensaios para caracterizar a expansão livre foram executados inserindo a amostra na célula de ensaio edométricos na prensa de adensamento (Figura 19 (a)). Foi adicionado água destilada e medidas as variações de espessura de cada amostra por meio de um extensômetro com precisão de 0,01 mm. As leituras foram realizadas em um intervalo de 48h.

Para a caracterização da tensão de expansão foi utilizado o método de Volume Constante para a determinação da tensão de expansão conforme a ABNT NBR 16853/2020. Para isso, coloca-se a célula na prensa de adensamento e inunda-se o corpo de prova. À medida que a expansão for verificada no extensômetro, deve-se acrescentar uma sobrecarga que estabilize esta variação de volume. Não havendo mais variação no extensômetro, o ensaio pode ser finalizado e as sobrecargas devem ser somadas e através delas calculou-se a tensão de expansão (Figura 3.19 (b)).

Figura 19 - Célula na prensa de adensamento para caracterização da expansão

(a) Expansão Livre (b) Tensão de Expansão

Fonte: A Autora (2023)

3.2.5 Ensaios para compressão simples e tração por compressão diametral

Segundo a ABNT NBR 12770/1992, os corpos de prova foram moldados em três camadas por meio de compressão estática em um cilindro de bronze com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A determinação do volume total de material a ser utilizado foi calculado baseado na umidade ótima e peso específico aparente seco obtidos do ensaio de compactação.

Para garantir a adesão da próxima camada, era feita a escarificação da superfície da última camada de solo. Após a compactação, desmoldava-se o corpo de prova e realizavam-se os ensaios (Figura 20).

Tanto o ensaio de compressão simples quanto o de tração por compressão diametral foram realizados em duplicata. Em caso de divergência de resultados, moldava-se um terceiro corpo de prova para verificação e foi retirado a média aritmética dos corpos de prova que apresentaram resultados semelhantes.

Nos dois ensaios foram utilizados o anel dinamométrico de 5 kN com constante de 0,12 kgf div^{-1} e os extensômetros possuíam precisão de 0,01 mm. A velocidade utilizada foi de 0,49 mm/min.

Figura 20 – Moldagem dos corpos de prova para ensaios de compressão

(a) Molde (b) Compactação estática (c) Corpos de prova moldados

Fonte: A Autora (2023)

A realização do ensaio de compressão simples foi baseada na ABNT NBR 12770/1992. Após moldados, os corpos de prova foram pesados e levados a prensa de compactação eletromecânica (Figura 21 (a)). Já para o ensaio de tração por compressão diametral, utilizou-se a ABNT NBR 7222/2011. Assim, os corpos de prova foram posicionados de forma que o carregamento fosse aplicado no sentido do diâmetro. Foram colocados pratos na parte superior e inferior, para melhor distribuir o carregamento (Figura 21 (b) e (c)).

Figura 21 – Posicionamento dos corpos de prova para o ensaio de compressão simples e tração por compressão diametral

(a) Compressão Simples (b) Compressão diametral (c) Compressão diametral

Fonte: A Autora (2023)

3.2.6 Ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento

Segundo o procedimento da ASTM D3080/2004, buscou-se verificar se a adição da casca da amêndoa do cacau tem influência na resistência ao cisalhamento. Para isso, moldou-se estaticamente o corpo de prova em três camadas. Após a compactação de cada camada, escarificava-se antes de compactar a próxima, para garantir a aderência entre as duas camadas. O volume de solo a ser utilizado em cada camada foi determinado pelo peso específico aparente seco e pela umidade ótima obtidos do ensaio de compactação.

Para a execução do ensaio foi utilizada uma prensa de cisalhamento direto onde a aplicação de tensão normal se dá por meio de um pendural, conforme a Figura 22 (a). As leituras dos deslocamentos verticais e horizontais eram feitas por meio dos extensômetros com precisão de 0,01 mm. A força normal, por sua vez, foi obtida por meio de um anel dinamométrico de 5 kN e constante de 0,12 kgf/div (Figura 22 (b) e (c)).

Figura 22 – Prensa de cisalhamento

(a) Prensa de cisalhamento

(b) Extensômetro vertical

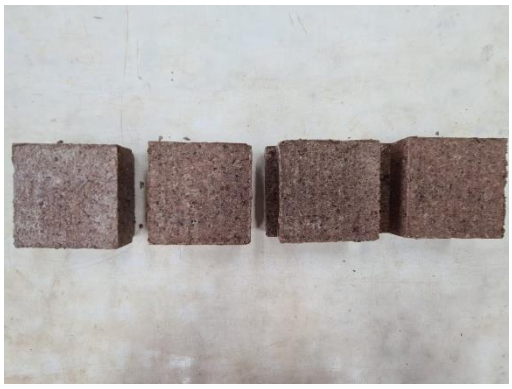
(c) Extensômetro horizontal e anel dinamométrico

Fonte: A Autora (2023)

Iniciou-se o ensaio com a fase de consolidação, na qual foram aplicadas as tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa. Desse modo, para cada mistura foram moldados e ensaiados quatro corpos de prova, conforme Figura 23. Após o período de consolidação aplicou-se uma velocidade 0,067 mm/min, mantida até se atingir o deslocamento horizontal de 15 mm. O tempo aproximado de ensaio foi de 4 horas.

Figura 23 – Corpos de prova ensaiados nas tensões de consolidação de 50, 100, 150 e 200 kPa, da esquerda para a direita

(a) Vista superior



(b) Vista Lateral

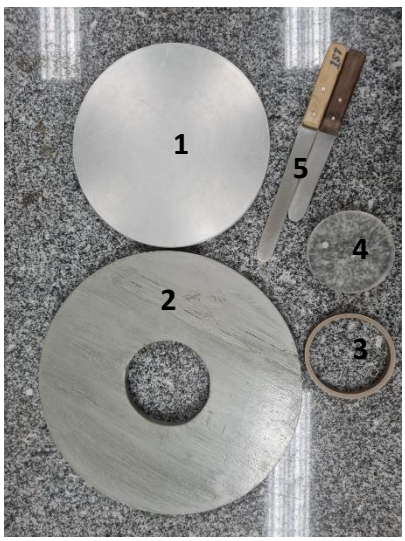
Fonte: A Autora (2023)

3.2.7 Ensaio para caracterização reológica

Baseado na ABNT NBR 15839/2010, foi utilizado uma prensa eletromecânica, um anel dinamométrico de 1000 N e constante de 0,505 kgf/div e dois extensômetros com precisão de 0,01 mm. A velocidade utilizada no ensaio foi de 0,042 mm/s e um deslocamento máximo admitido de 8 mm.

Para a moldagem do corpo de prova no centro da placa foram utilizados os equipamentos mostrados na Figura 24.

Figura 24 – Instrumentos usados para moldagem do corpo de prova para o ensaio do squeeze-flow



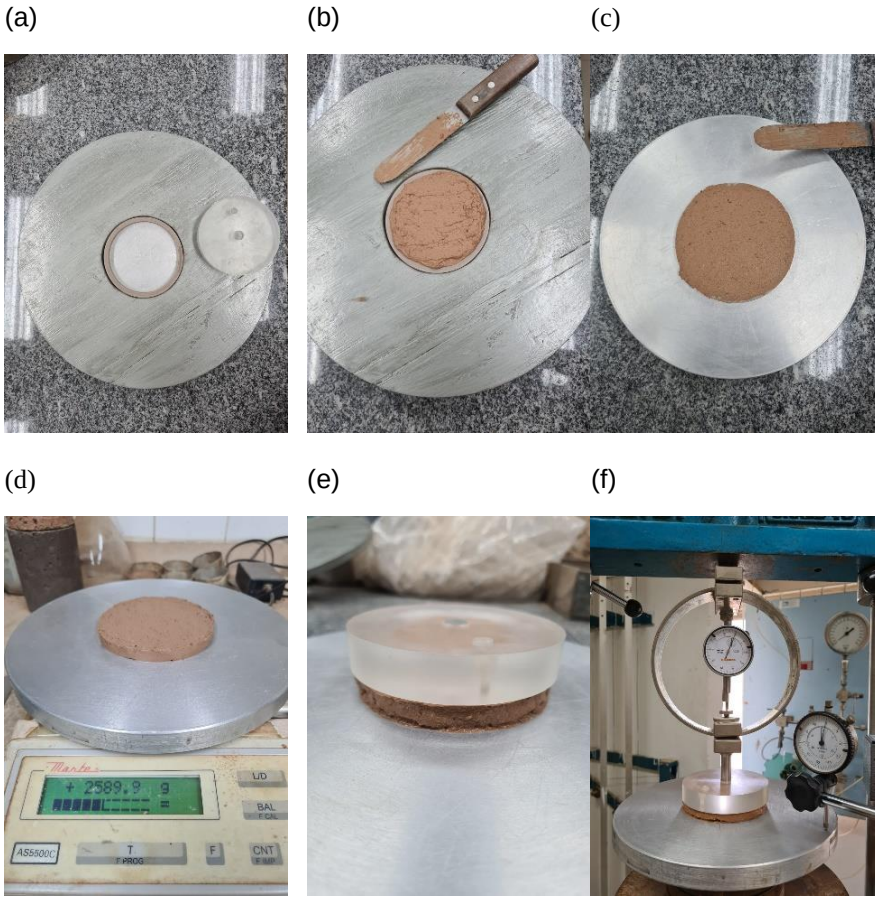
Legenda:

1. Placa para base de metal
2. Gabarito de madeira
3. Anel para moldagem com diâmetro interno de 100,2 mm e altura de 10 mm.
4. Placa superior de acrílico com diâmetro de 100,16 mm.
5. Espátulas

Fonte: A Autora (2023)

Para a moldagem dos corpos de prova, foi inicialmente calculado a massa de solo necessária, sendo utilizado o índice de vazios constante igual a 1,72 baseado no trabalho de Bezerra (2020). Foi realizado o ensaio nas umidades correspondentes ao ensaio de limite de liquidez do solo natural e das misturas. As etapas do ensaio podem ser verificadas na Figura 25.

Figura 25 – Moldagem do corpo de prova do squeeze-flow: (a) posicionamento do gabarito de madeira e do anel na placa de metal, (b) colocação do solo dentro do molde, (c) uniformização do solo, (d) pesagem na balança, (e) colocação da placa superior e (f) corpo de prova na prensa, centralizado, com os anéis e extensômetros ajustados

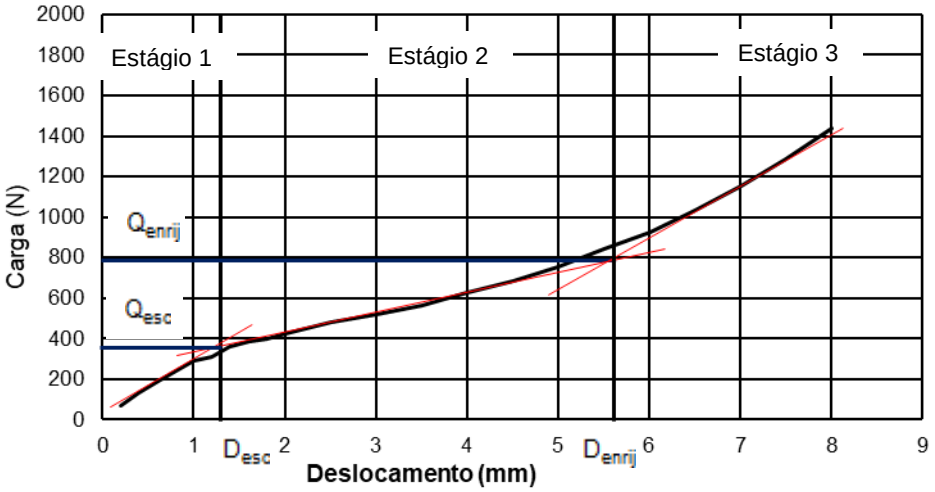


Fonte: A Autora (2023)

Para o início da moldagem, centralizou-se o gabarito de madeira e o anel na placa de metal, homogeneizou-se o solo com a água e, com auxílio da espátula, o material foi posto no molde. Por fim, sua superfície foi uniformizada. Após a retirada do gabarito e do anel de moldagem, pesou-se a placa de metal com a amostra na balança, a fim de garantir que a massa do corpo de prova estivesse semelhante à massa calculada prevista.

Após a verificação, colocava-se a placa superior e o corpo de prova era levado para a prensa e centralizado. Em seguida, o anel de carga e o extensômetro eram regularizados para o início das leituras. De posse dos resultados, determinou-se a curva de carga x deslocamento (Figura 26).

Figura 26 – Determinação dos três estágios do comportamento reológico



Fonte: A Autora (2023)

Nesta curva, determinou-se os três estágios do comportamento reológico, que foram definidos pela mudança de comportamento da interação entre as partículas. A carga de escoamento (Q_{esc}) e o deslocamento de escoamento (D_{esc}) caracteriza o final do Estágio I e o início do Estágio II. Já o final do Estágio II e o início do Estágio III é caracterizado pela carga inicial de enrijecimento (Q_{enrij}) e o deslocamento inicial de enrijecimento (D_{enrij}). O final do estágio III é considerado o final do ensaio (no caso, o deslocamento de 8 mm)

3.2.8 Ensaios para avaliação da formação e propagação de fissuras

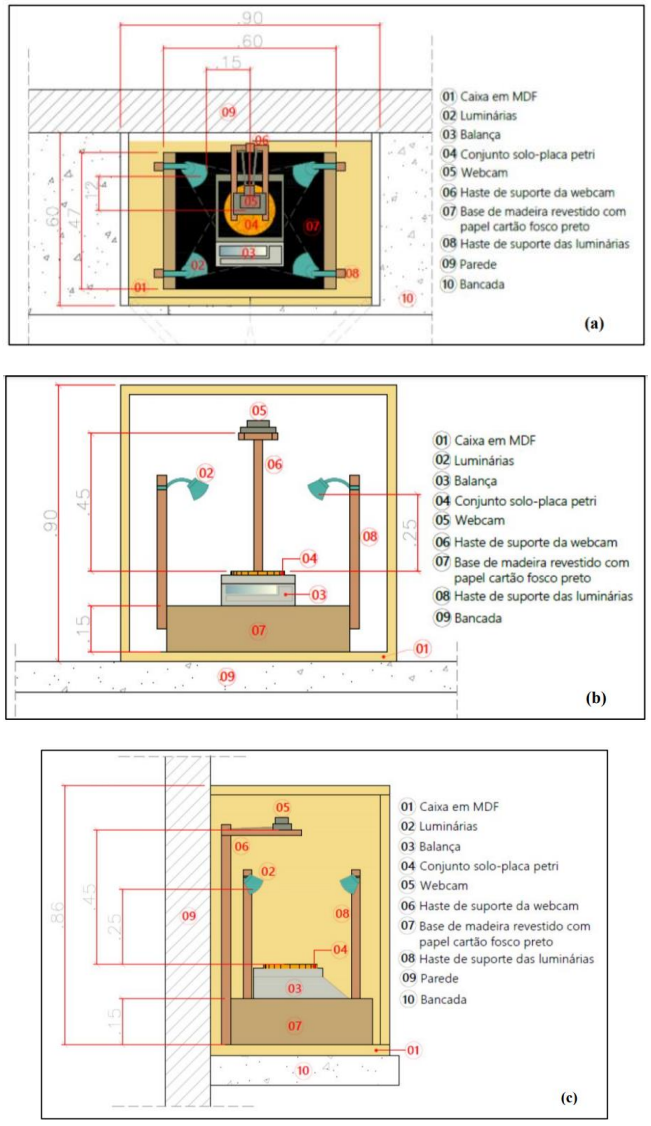
3.2.8.1 Equipamentos

Foi utilizado o equipamento desenvolvido no Laboratório de Solos Não Saturados da UFPE, conforme o descrito por Ferreira *et al.* (2019), que permite monitorar a evolução das amostras de solo submetidas à secagem. A temperatura e a umidade relativa foram monitoradas com o auxílio de um termo-higrômetro, e o

peso do conjunto (amostra + placa) foi registrado com uma balança de precisão de 0,01g.

O aparato de madeira com cinco hastes, serve de apoio para a balança, luminária e webcam e a caixa de madeira que envolve o aparato tem por finalidade estabilizar a temperatura ambiente ao longo do ensaio. Para a secagem das amostras foram utilizadas quatro lâmpadas incandescentes de 40 W direcionadas para a amostra ensaiada e em uma altura de 25 cm da amostra. O ensaio foi monitorado por meio da webcam, localizada no aparato de madeira, em uma altura de 45 cm. Na Figura 27 é mostrada a esquematização do aparato utilizado e a Figura 28 mostra o aparato em laboratório.

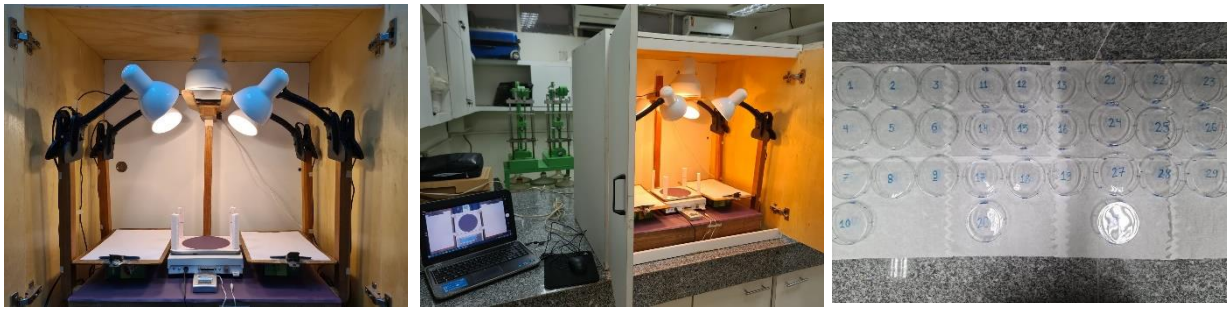
Figura 27 – Esquematização do aparato utilizado no ensaio de fissuração



Fonte: Ferreira *et al.* (2019)

Figura 28 - Instrumentação para ensaio de fissuras: (a) caixa de madeira, com lâmpadas, balança, termo-higrômetro e webcam, (b) computador para monitoramento e (c) placas petri

(a) (b) (c)



Fonte: A Autora (2023)

3.2.8.2 Moldagem e execução do ensaio

Para o solo puro e todas as misturas foram utilizados os mesmos procedimentos descritos a seguir.

Inicialmente calculou-se a massa de solo necessária para cada amostra. Em seguida misturou-se a água de forma gradual até que se atingisse a umidade estabelecida de 1,4 vezes o Limite de Liquidez do material. A pasta do material foi posta nas Placas Petri e pequenos golpes foram dados nas laterais para remover o máximo possível as bolhas de ar. Para a uniformização, utilizou-se uma espátula, e uma parte do solo foi retirada para se determinar a umidade inicial.

A placa petri de 146 mm de diâmetro e 15 mm de altura foi posta na balança, onde se leu o peso inicial. Esta placa permaneceu na balança por todo o ensaio para que se obtivesse o peso do conjunto em tempo real e fosse determinado a umidade do solo a qualquer momento. O ensaio teve seu término definido quando o material na placa atingia a umidade do limite de contração determinado por Cavalcanti (2017) (aproximadamente 15%) ou umidade inferior, até a estabilização. Ao final, parte da amostra era utilizada para determinação da umidade final.

Observou-se o início da primeira fissura, separação das bordas da placa, comprimento das fissuras, largura média das fissuras, número de segmentos de fissuras e Crack Intensity Factor (CIF). Para isso, foram tiradas fotografias a cada 15 min.

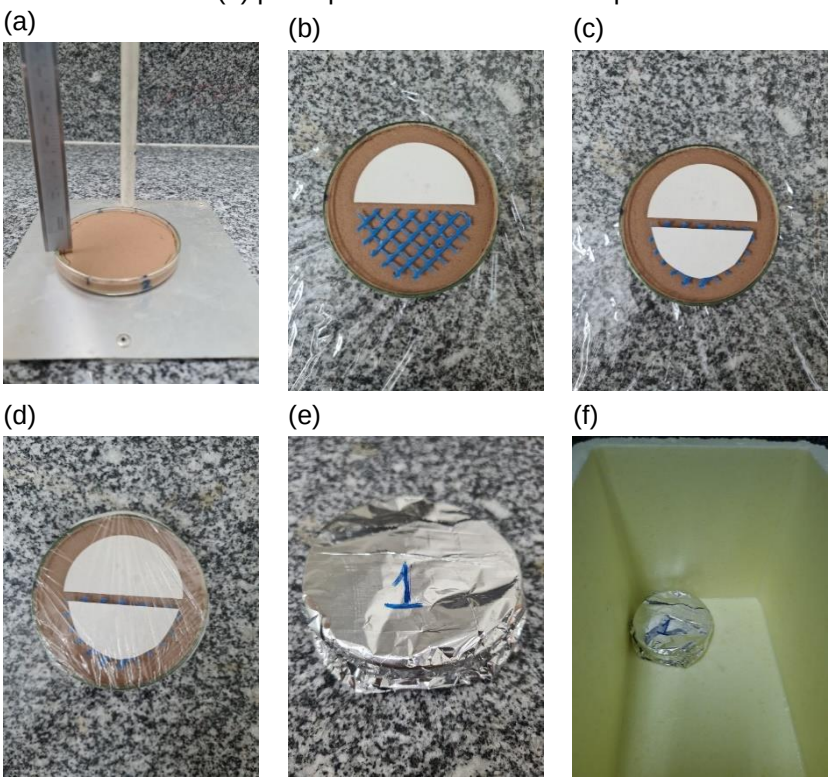
Essas fotografias foram obtidas por meio da webcam Logitec C922 PRO STREAM *Full* HD conectada a um notebook, no qual, por meio do *software* livre *Auto*

Screenshot Capture foi possível programar a captura automática num intervalo de 30 min. Selecionando as imagens que mais se aproximavam da variação aproximada de 5% da umidade, calcularam-se os índices geométricos estabelecidos através das medições realizadas no *software* ImageJ.exe.

3.2.8.3 Determinação da Sucção

As placas menores posicionadas lateralmente à placa maior tiveram por finalidade a determinação da sucção matricial e total do solo por meio da técnica do papel filtro, seguindo o que preconiza a ASTM D5298/2010. Aproximadamente a cada 5% de umidade perdido pela placa central, era retirada uma das placas menores. A variação de altura do solo foi medida e em seguida colocado papel filtro em contato direto com amostras e em contato com uma tela plástica para determinação da sucção matricial e total. Em seguida, as amostras eram envoltas em camadas de papel filme e alumínio, armazenados em um isopor por um período de equalização de umidade de 7 dias (Figura 29).

Figura 29 – Procedimento para determinação da sucção total e matricial: (a) medição da variação de altura do solo, (b) papel filtro e tela plástica em contato com o solo, (c) papel filtro em contato com a tela plástica, (d) placa petri embrulhada em papel filme, (d) placa petri embrulhada em papel alumínio e (e) placa petri armazenada no isopor



Fonte: A Autora (2023)

Após este período, retirou-se o papel filtro com auxílio de uma pinça metálica e pesou-se o papel filtro numa balança de precisão de 0,0001 g. Após a pesagem, levou-se o papel úmido e parte do solo para serem secos em uma estufa entre 60 e 65°C por 72h para as misturas e em uma estufa a 100°C por 24h para o solo puro. Em seguida, pesou-se o material para a determinação do teor de umidade.

Com essa diferença nos teores de umidade das amostras, as equações 1 e 2 proposta por Chandler *et al*. (1992) foram utilizadas.

$$\psi = 10^{3,05-2,48\cdot \log_{wp}},\ wp>47\% \quad (1)$$

$$\psi = 10^{4,84-0,0622\cdot wp},\ wp \leq, 47\% \quad (2)$$

Sendo:
Ψ = sucção em kPa;
wp = umidade do papel filtro (%);

As curvas de retenção de água dos diferentes materiais foram realizadas por meio da relação de sucção matricia lx umidade volumétrica das amostras, utilizando o modelo de Van Genuchten (1980), Equação 3.

$$\theta = \theta r + \frac{\theta s - \theta r}{[1+(a\cdot\psi^n)]^n} \quad (3)$$

Sendo:

Θ = Umidade volumétrica (%);
Θr = umidade volumétrica residual (%), obtida experimentalmente;
Θs = umidade volumétrica de saturação (%), obtida experimentalmente;
Ψ = sucção em kPa;
a e n = parâmetros de ajustes da curva;
m = 1 – 1/n.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo descreve os resultados obtidos através dos ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, limites de Atterberg, compactação, condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento direto, resistência à compressão simples e diametral, expansão livre, tensão de expansão, comportamento reológico e propagação de fissuras, realizados na casca da amêndoa do cacau, no solo expansivo de Paulista e nas respectivas misturas entre esses dois materiais. São comparados os resultados do solo natural com as misturas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.1.1 Massa específica dos grãos

Os resultados para a massa específica dos grãos (ρ_s) dos materiais utilizados se encontram na Tabela 7. Como o solo de Paulista- PE já foi caracterizado em alguns trabalhos, compara-se a massa específica dos grãos na Tabela 8 mostrando que o valor obtido de 26,22 kN/m³ é próximo aos resultados da literatura.

Tabela 7 – Massa específica dos grãos do solo, casca da amêndoa de cacau e misturas

Material:	**Casca**	**Solo Natural**	**Solo+2,5% Casca**	**Solo+5% Casca**	**Solo+7,5% Casca**	**Solo+10% Casca**	**Solo+12,5% Casca**
ρ_s (kN/m³):	14,39	26,22	25,09	23,51	23,79	22,95	22,86

Fonte: A Autora (2023)

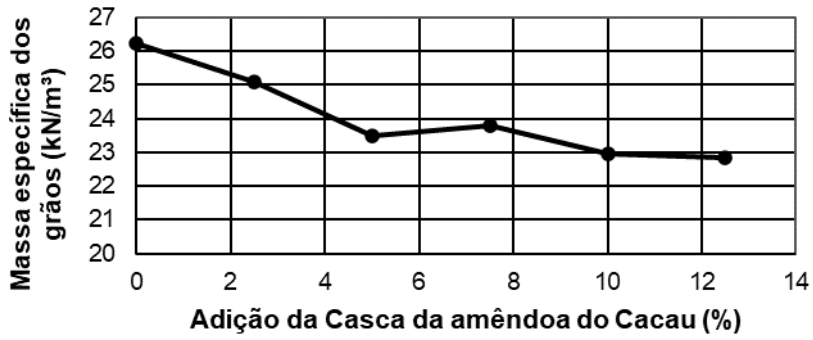
Tabela 8 – Comparação entre as massas específicas do solo já obtidas

Solo	**Constantino (2018)**	**Barbosa (2019)**	**Araújo (2020)**	**Faustino (2022)**	**Autora (2023)**
ρ_s (kN/m³):	26,60	26,81	26,80	26,70	26,22

Fonte: A Autora (2023)

Comparando a massa específica dos grãos do solo com a casca da amêndoa do cacau e as misturas solo+casca, nota-se que o resultado do solo (26,22 kN/m³) é quase duas vezes maior que a casca da amêndoa do cacau (14,39 kN/m³). Assim, com o acréscimo do material orgânico no solo, a massa específica dos grãos diminui de forma quase uniforme, com valores muito próximos para as misturas de solo+10% e 12,5%casca, como pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 – Variação da massa específica dos grãos de acordo com a adição da casca da amêndoa de cacau



Fonte: A Autora (2023)

4.1.2 Análise granulométrica

A fração de argila, silte, areia e pedregulho dos materiais estudados, obtidas pelo ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação com e sem defloculante se encontram na Tabela 9, e as curvas granulométricas obtidas estão na Figura 31. A Figura 32 permite a comparação entre os resultados por apresentar as curvas granulométricas em uma única imagem.

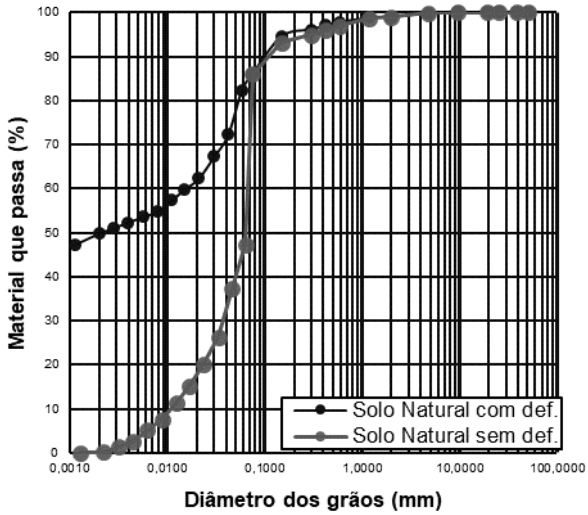
Tabela 9 – Classificação dos materiais utilizados com e sem defloculante

Material:	**Solo Natural**		**Solo+2,5% Casca**		**Solo+5% Casca**		**Solo+7,5% Casca**		**Solo+10% Casca**		**Solo+12,5% Casca**	
	Sem Def.	Com Def.	Sem Def.	Com Def.	Sem Def.	Com Def.	Sem Def.	Com Def.	Sem Def.	Com Def.	Sem Def.	Com Def.
Pedregulho	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Areia	52%	18%	75%	18%	33%	16%	69%	19%	38%	22%	70%	22%
Silte	46%	32%	25%	32%	55%	29%	31%	34%	52%	38%	30%	30%
Argila	2%	50%	0%	50%	12%	55%	0%	47%	10%	40%	0%	48%

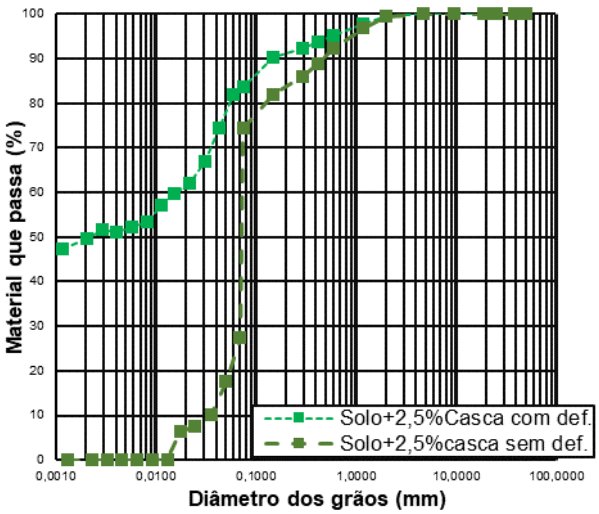
Fonte: A Autora (2023)

Figura 31 - Resultados dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação

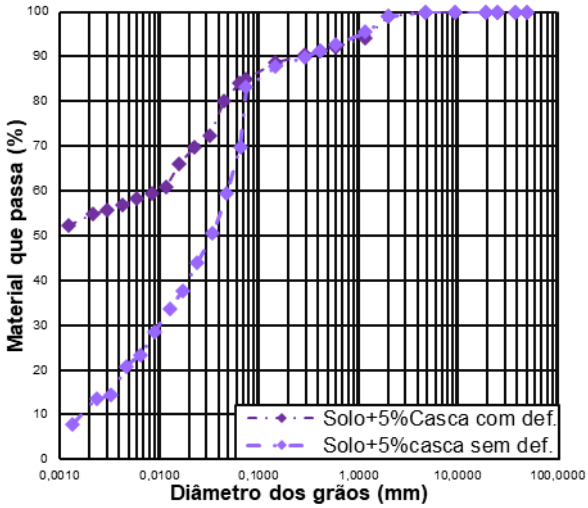
(a) Solo Natural



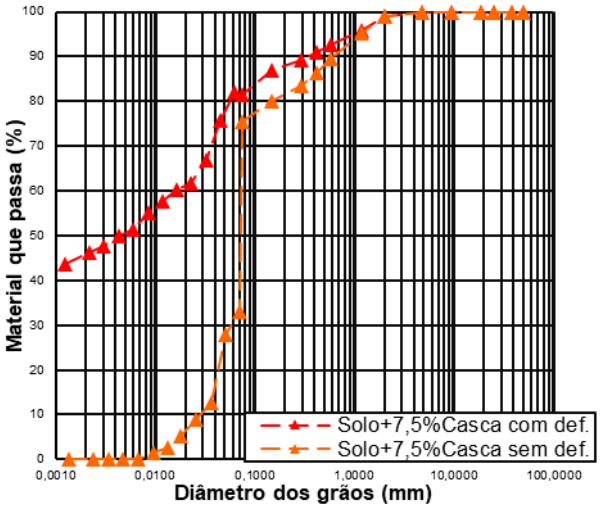
(b) Solo+2,5%casca



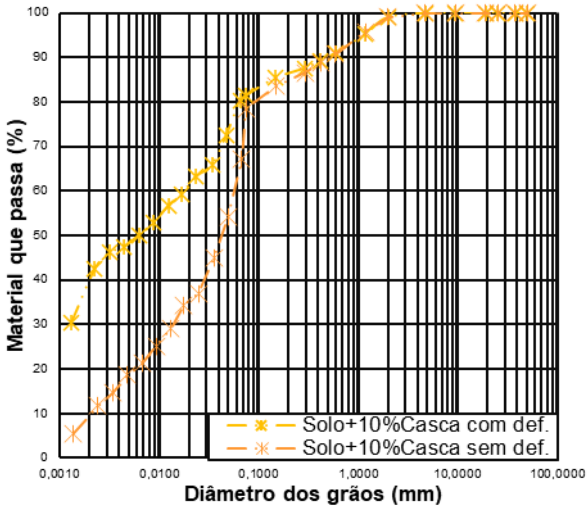
(c) Solo+5%casca



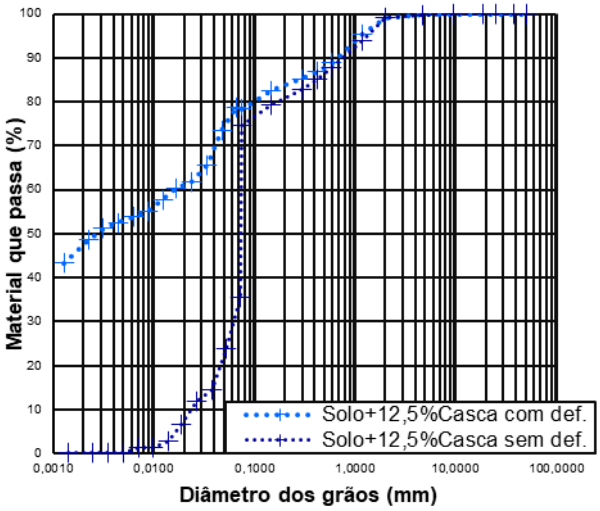
(d) Solo+7,5%casca



(e) Solo+10%casca

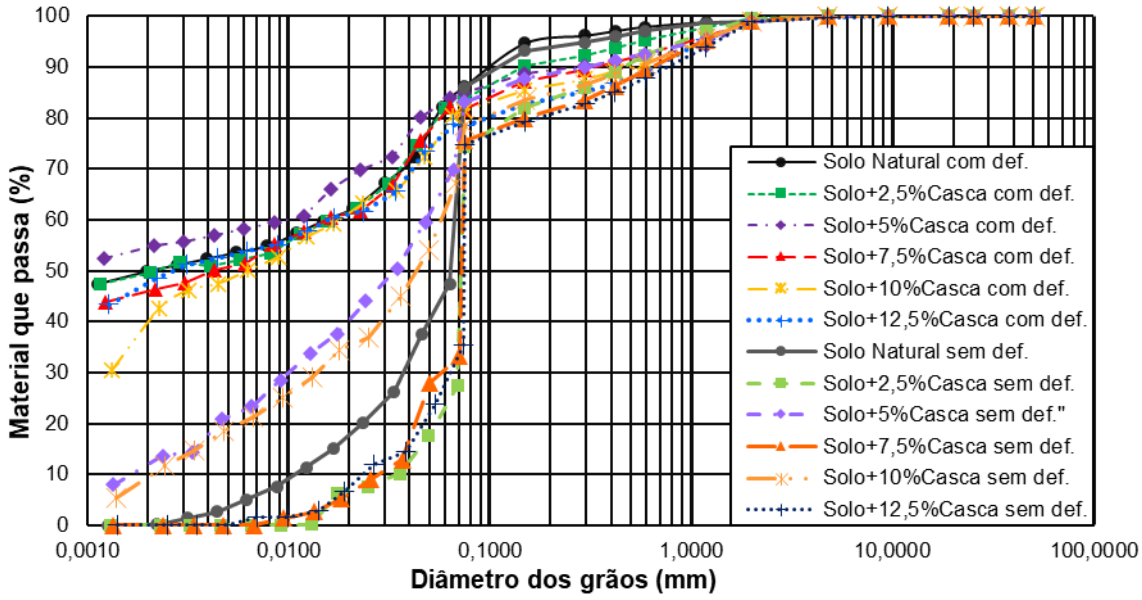


(f) Solo+12,5%casca



Fonte: A Autora (2023)

Figura 32 – Curvas granulométricas dos materiais analisados



Fonte: A Autora (2023)

A adição da casca de amêndoa de cacau ao solo de expansivo de Paulista tem pequena influência na distribuição granulométrica das misturas nos ensaios utilizando o defloculante. Há uma leve tendência de acréscimo da fração areia (de 18% no solo para 22% no Solo+10%Casca) e pequena redução da fração argila (de 50% no solo para 47% no Solo+7,5%Casca). Isto está associado aos fatos da massa específica real dos grãos do solo (26,22 kN/m^3) ser superior à da casca de amêndoa de cacau (14,39 kN/m^3), as proporções da casca de amêndoas adicionadas ser no máximo de 12,5%.

Nos ensaios realizados sem defloculante, percebe-se que há a aglutinação das partículas, desde o ensaio do solo natural. As misturas de solo+5% e 10%Casca diminuem a aglutinação das partículas do solo natural, enquanto as misturas de solo+2,5%, 7,5% e 12,5%Casca aumentam a aglutinação de forma semelhante.

4.1.3 Limites de Atterberg

Os resultados obtidos para os limites de liquidez (LL) são apresentados na Tabela 10 e Figura 33 e os valores do limite de plasticidade (LP), bem como o índice de plasticidade (IP) do solo e das misturas estudados são apresentados Tabela 10. Há uma tendência de acréscimo nos valores do LL, e do LP com a adição de casca

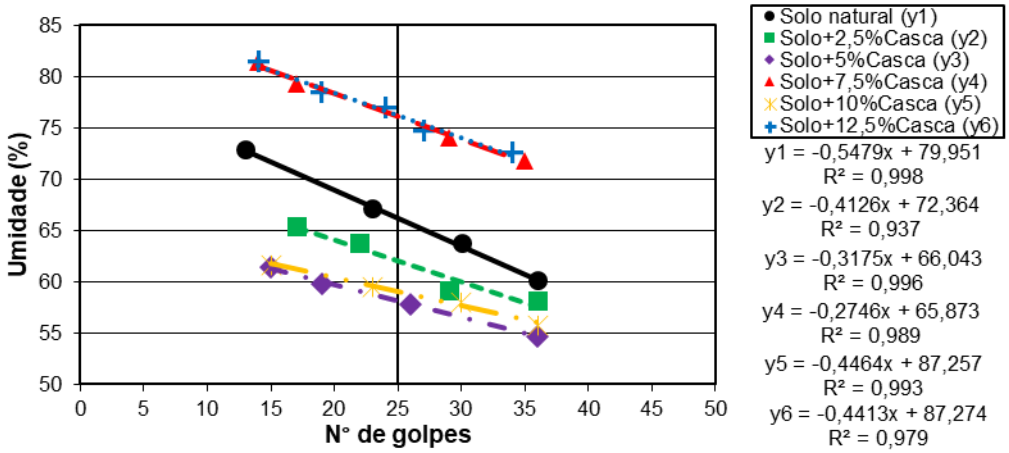
de amêndoa de cacau ao solo de expansivo de Paulista – PE. No entanto, os valores do LP crescem mais que os do LL havendo uma redução no IP (Figura 34). Comportamento similar ocorre quando se adiciona cal hidratada a este solo (Paiva 2016). Utilizando o critério de Seed et al. (1962), o solo natural e a amostra solo+7,5%casca são solos com expansão muito alta, e as demais misturas solos com alta expansão.

Tabela 10 – Limite de Atterberg do solo e das misturas

Parâmetros	Solo Natural	Solo+2,5% Casca	Solo+5% Casca	Solo+7,5% Casca	Solo+10% Casca	Solo+12,5% Casca
LL (%)	66,25	62,05	58,10	76,10	59,01	76,25
LP (%)	26,03	32,50	33,93	39,58	34,48	46,65
IP (%)	40,22	29,55	24,17	36,52	24,53	29,60

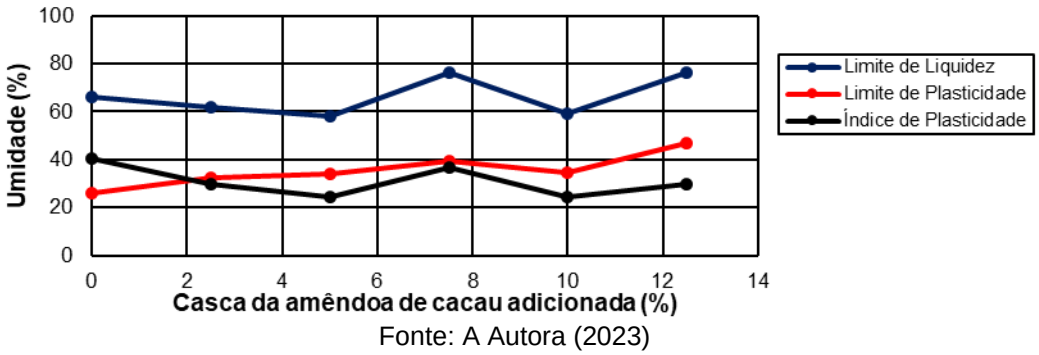
Fonte: A Autora (2023)

Figura 33 – Resultados do ensaio do limite de liquidez do solo e de suas misturas com a casca da amêndoa do cacau



Fonte: A Autora (2023)

Figura 34 – Variação do limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade de acordo com a adição da casca da amêndoa do cacau

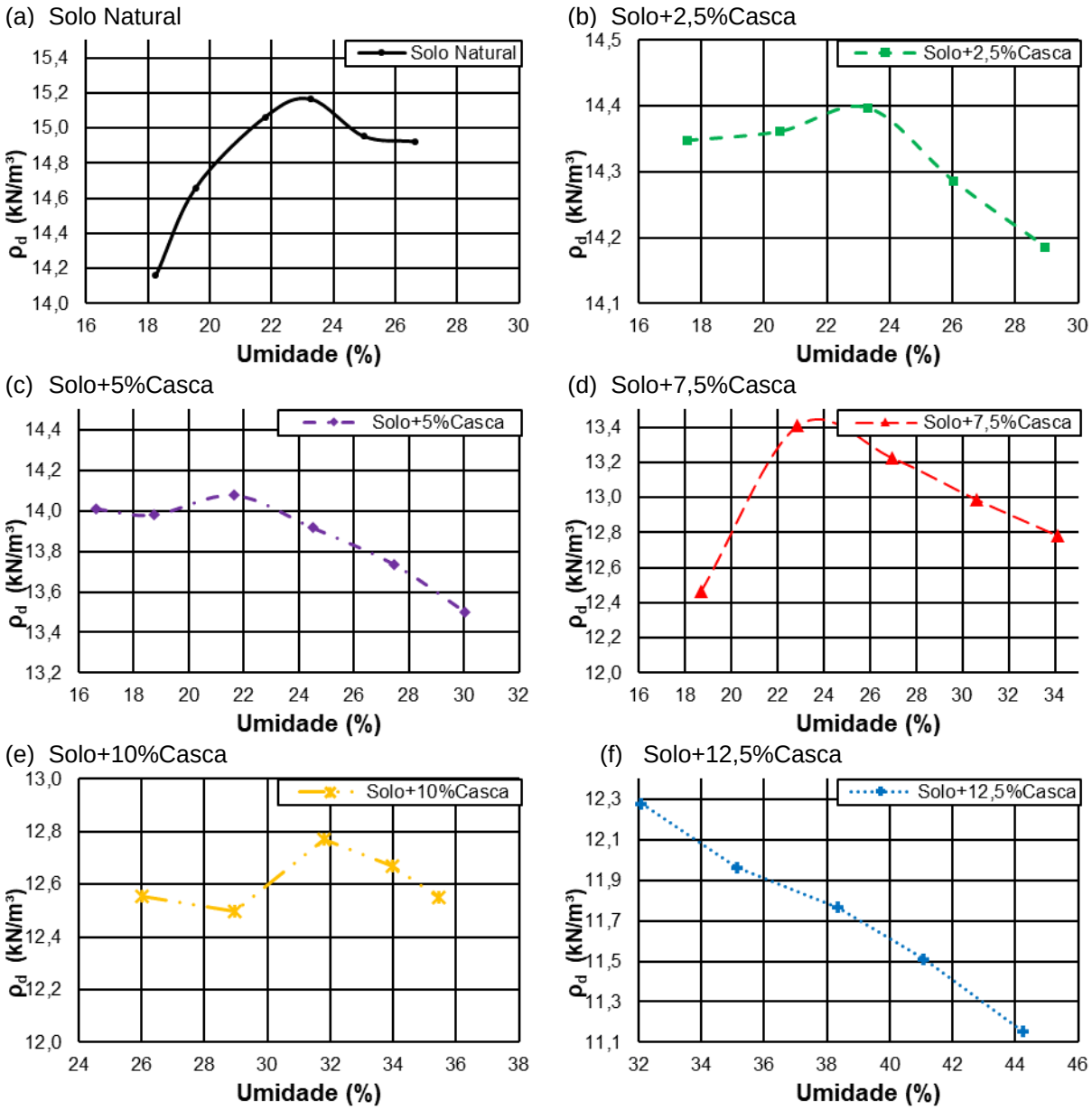


Fonte: A Autora (2023)

4.1.4 Compactação

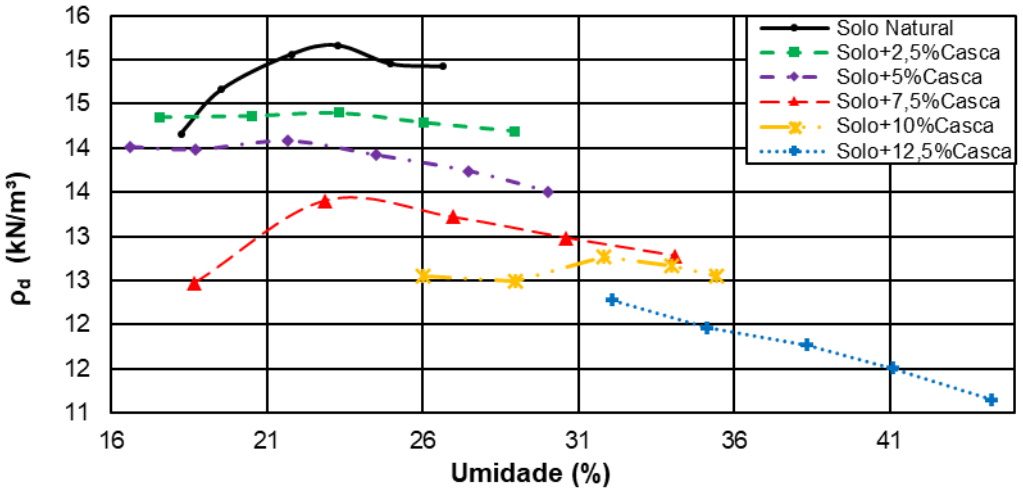
A Figura 35 apresenta as curvas de compactação para o solo natural e de suas misturas com casca da amêndoa do cacau. A Tabela 11 mostra os valores da massa específica aparente seca máxima (ρ_d), umidade ótima (w_o) e suas variações obtidos pelo ensaio de compactação do solo natural e misturas. Há um aumento da umidade ótima e redução do peso específico seco máximo com a adição casca da amêndoa do cacau ao solo natural. A Figura 36 traz as curvas em uma só imagem.

Figura 35 – Curvas de compactação do solo e das misturas com a casca da amêndoa do cacau



Fonte: A Autora (2023)

Figura 36 – Comparativo entre as curvas de compactação do solo e das misturas com a casca da amêndoa do cacau



Fonte: A Autora (2023)

Tabela 11 – Resultados da massa específica aparente seca, umidade ótima e suas variações obtidos pelo ensaio de compactação do solo natural e misturas

Material	Parâmetros		Variação em relação a w_o do solo (%)	Variação em relação a ρ_d do solo (%)
	ρ_d (kN/m³)	w_o (%)		
Solo Natural	15,12	22,10	-	-
Solo+2,5%Casca	14,32	22,86	3,44	-5,29
Solo+5%Casca	14,04	22,34	1,09	-7,14
Solo+7,5%Casca	13,38	23,96	8,42	-11,51
Solo+10%Casca	12,78	32,34	46,34	-15,48
Solo+12,5%Casca	11,75	38,53	74,34	-22,29

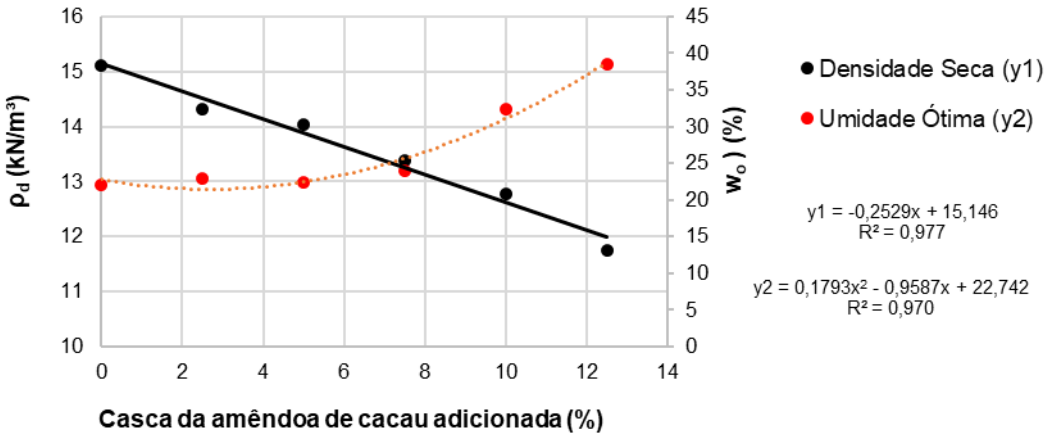
Fonte: A Autora (2023)

As curvas para o solo natural e para a mistura solo+7,5%Casca (Figura 35 (a) e (d)) apresentam uma curva no formato de sino. A mistura de solo+10%Casca (Figura 35 (e)) apresenta um formato de curva de um pico e meio e as demais misturas (Figura 35 (b), (c) e (f)) apresentam um formato mais semelhante à curva assimétrica. No momento da compactação o primeiro ponto da mistura de solo+12,5%Casca se encontrava bastante seco, de forma que o ponto de umidade ótima é a pequena elevação apresentada na Figura 35 (f).

Pode-se afirmar que até 5% a casca não gera influência expressiva na umidade ótima, apesar de diminuir a massa específica aparente seca máxima em até aproximadamente 7%. As misturas com 10% e 12,5%casca proporcionam maiores alterações nos valores de umidade ótima, com acréscimos de até 74,34% no valor obtido para o solo natural. Realizando uma regressão dos dados obtidos

para visualizar essa variação, as equações que definem o comportamento dos materiais são obtidas e apresentadas na Figura 37.

Figura 37 – Relação estabelecida entre a massa específica aparente seca e umidade ótima com o teor adicionado da casca da amêndoa do cacau



Fonte: A Autora (2023)

Na Tabela 12, realiza-se uma comparação dos resultados de caracterização física obtidos por Paiva (2016) do solo de Paulista e suas misturas com cal. Os valores obtidos para o solo natural são semelhantes. Percebe-se que a cal tem menor influência nos resultados da massa específica aparente seca, massa específica real dos grãos e na umidade ótima de compactação do que a casca da amêndoa do cacau.

Tabela 12 – Comparação entre os resultados da caracterização física do solo de Paulista-PE com adição de cal e casca da amêndoa

Caracterização Física	**Teor adicionado de cal (PAIVA, 2016)**				**Teor adicionado de casca da amêndoa**					
	0%	3%	5%	7%	0%	2,5%	5%	7,5%	10%	12,5%
Pedregulho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Areia	18	16	16	14	22	22	18	28	26	25
Silte	32	27	28	28	24	26	26	22	26	23
Argila	50	57	56	58	54	52	56	50	48	52
LL (%)	61,00	55,00	54,00	58,00	66,25	62,05	58,10	76,10	59,01	76,25
LP (%)	31,00	36,00	42,00	41,00	26,03	32,50	33,93	39,58	34,48	46,65
IP (%)	30,00	18,00	12,00	17,00	40,22	29,55	24,17	36,52	24,53	29,60
ρ_d (kN/m³)	15,00	15,49	15,65	15,65	15,12	14,32	14,04	13,38	12,78	11,75
w_o (%)	21,00	22,88	20,78	23,78	22,10	22,86	22,34	23,96	32,34	38,53
ρ_s (kN/m³)	26,12	26,48	26,64	26,48	26,22	25,09	23,51	23,79	22,95	22,86

Fonte: A Autora (2023)

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A caracterização química do solo, da casca da amêndoa do cacau e das misturas analisadas podem ser encontradas na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados das análises químicas do solo, casca da amêndoa de cacau e das misturas

Determinação	Unidade	Solo Natural	Casca da amêndoa	Solo+ 2,5% Casca	Solo+5% Casca	Solo+ 7,5% Casca	Solo+ 10% Casca
pH em água	-	6,16	5,11	3,91	3,6	3,8	3,68
pH em KCl	-	3,01	4,74	2,83	2,80	2,90	2,91
pH em $CaCl_2$	-	3,47	5,17	3,36	3,17	3,37	3,63
Carbono Orgânico	g/Kg	5,73	58,04	23,50	36,33	37,04	38,68
Matéria Orgânica	%	9,86	99,99	40,52	45,39	46,62	66,68
Alumínio Extraível (Al^{+++})	$cmol_c$/Kg	3,20	665,00	495,00	532,00	545,00	628,00
Ca^{++} + Mg^{++} trocável	$cmol_c$/Kg	35,40	365,00	79,00	87,00	96,40	96,80
Ca^{++} trocável	$cmol_c$/Kg	2,60	0,00	20,00	19,00	36,00	64,00
Mg^{++} trocável	$cmol_c$/Kg	32,80	0,00	59,00	68,40	91,10	32,00
Na^{+} trocável	$cmol_c$/Kg	30,25	80,82	32,35	17,60	28,14	38,68
K^{+} trocável	$cmol_c$/Kg	21,34	3470,29	140,20	238,25	333,11	430,54
% saturação de Sódio	%	27,35	2,25	11,54	4,62	5,60	6,64
H^{+}+Al^{+++} extraível	$cmol_c$/Kg	23,60	38,70	28,80	37,80	14,00	16,90
Soma de cátions (S)	$cmol_c$/Kg	86,99	3551,11	251,55	343,25	488,35	565,22
Hidrogênio extraível (H^{+})	$cmol_c$/Kg	20,40	-626,30	-466,20	-494,20	-531,00	-611,10
Capacidade de Troca de Cátions (T ou CTC)	$cmol_c$/Kg	110,59	3589,81	280,35	381,05	502,35	582,12
Saturação de Base (V)	%	78,66	98,92	89,73	90,08	97,21	97,10
%Sat. de Alumínio	%	3,55	15,77	66,31	60,78	52,74	52,63
% água no extrato saturação	%	74,20	284,00	72,20	73,80	72,60	72,00
Cond. Elétrica no ext. sat.	µS/cm/25 °C	109,50	7540,00	431,50	581,60	713,20	954,80

Fonte: A Autora (2023)

Considerando o critério de Guimarães (2002) para classificação do pH, o solo de Paulista se apresenta levemente ácido. Araújo (2020), analisando o pH da camada I deste solo também obteve pH de 6,5 (levemente ácido), enquanto Bastos (1994), Justino da Silva (2001), Paiva (2016) e Constantino (2018) encontraram

valores de 4,55 (ácido), 3,9 (extremamente ácido), 5,22 (ácido) e 5,04 (ácido) respectivamente.

Para o pH em KCl e $CaCl_2$ o solo é classificado como extremamente ácido (3,01 e 3,47 respectivamente), assim como o obtido por Paiva (2016) de 3,17 e 3,61 e Araújo (2020) de 3,3 e 3,6 para KCl e $CaCl_2$. Pela mesma classificação, a casca da amêndoa de cacau pode ser classificada como ácida para o pH obtido em água, KCl e $CaCl_2$. Todas as misturas, por sua vez, podem ser classificadas como extremamente ácidas.

O solo natural apresenta uma CTC de 110,59 $cmol_c$/Kg que, segundo Santos *et al*. (2013) indica uma alta atividade. Para o mesmo solo, Bastos (1994), Justino da Silva (2001), Paiva (2016), Constantino (2018) e Araújo (2020) obtiveram valores de CTC de 18,18 $cmol_c$/Kg, 33,00 $cmol_c$/Kg, 46,00 $cmol_c$/Kg, 144,91 $cmol_c$/Kg e 38,80 $cmol_c$/Kg respectivamente. Assim, nota-se que em comparação com os resultados obtidos anteriormente, o valor de 110,59 $cmol_c$/Kg não é tão elevado quanto o de Constantino (2018), mas também não é próximo dos de Justino da Silva (2001), Paiva (2016) e Araújo (2020). De acordo com Buol *et al*. (1997), solos com valores de CTC acima de 20 $cmol_c$/Kg, indicam estrutura com significante teor de montmorilonita, o tornando expansivo.

Com relação a matéria orgânica, segundo Santos *et al*. (2013) um solo só é rico em matéria orgânica quando apresenta valores superiores a 5%. Para o solo natural, a matéria orgânica encontrada é de 9,86%, ou seja, o solo de Paulista já é rico em matéria orgânica. Bastos (1994), Justino da Silva (2001), Paiva (2016), Constantino (2018) e Araújo (2020) encontraram valores inferiores a 5% no mesmo solo. A casca da amêndoa do cacau também é um material com bastante matéria orgânica (entre 92,76% e 99,99%, obtidos por métodos diferentes), de forma que com o aumento do teor das cascas nas misturas, o resultado de matéria orgânica também aumenta. Solo+2,5%, 5%, 7,5% e 10% casca apresentam valores de 40,52%, 45,39%, 46,62% e 66,68%.

Como o teor de matéria orgânica regula a capacidade de troca catiônica do material, controlando a permeabilidade do solo e sua estabilização pelo aquecimento. O valor da CTC na casca da amêndoa do cacau foi bastante elevada de 3589,81 $cmol_c$/Kg, aproximadamente 30 vezes maior que o do solo natural.

Desse modo, há a tendência de aumento na CTC conforme o aumento do teor de casca. Isso pode ser visto com os resultados de 280,35 $cmol_c$/Kg, 381,05 $cmol_c$/Kg, 502,35 $cmol_c$/Kg e 582,12 $cmol_c$/Kg das CTC nas misturas com solo +2,5%, 5%, 7,5% e 10%casca, respectivamente.

O valor de saturação por base para o solo é de 78,66% que, de acordo com Santos *et al*. (2013), é classificado como eutrófico por ser maior que 50%. Paiva (2016), Constantino (2018) e Araújo (2020) na camada I e III também obtiveram para o mesmo solo valores acima de 50%, classificando-o como eutrófico. Além disso, Araújo (2020) classificou a camada II e IV como distrófico por apresentarem valores de 43,3% e 37,8% de saturação por base, respectivamente. Sendo o valor de V da casca da amêndoa do cacau de 98,92%, maior que o do solo, a medida que se aumenta o teor das cascas, a saturação por base também aumenta.

A saturação por sódio encontrada para solo é de 30,25%, enquanto a da casca da amêndoa de cacau é de 2,25%. As misturas de solo + 2,5%, 5%, 7,5% e 10% casca apresentam valores de 11,54%, 4,62%, 5,60% e 6,64%, numa clara redução devido ao aumento do teor de casca. Segundo Santos *et al*. (2013), valores de saturação por sódio menores que 15% indicam o caráter salino do solo. Paiva (2016), Constantino (2018) e as camadas III e IV de Araújo (2020) apresentaram saturação por sódio acima de 15%, evidenciando o caráter sódico do solo.

Assim, a casca da amêndoa tendo uma saturação por sódio bem menor que 15%, deduz-se o caráter salino do material. Isso pode ser visto também, por meio da condutividade elétrica, que a do solo é de 109,50 µS/cm/25°C e a da casca é de 7540,00 µS/cm/25°C, ou seja, apresentam uma quantidade elevada de sais solúveis que se ionizam. De acordo com a classificação de Feitosa e Diniz (2011), valores de condutividade elétrica de até 500 µS/cm/25°C podem ser comparados a classificação de água doce, de 1000 a 2500 µS/cm/25°C à água salobra e acima de 2500 µS/cm/25°C é o equivalente a uma água salgada.

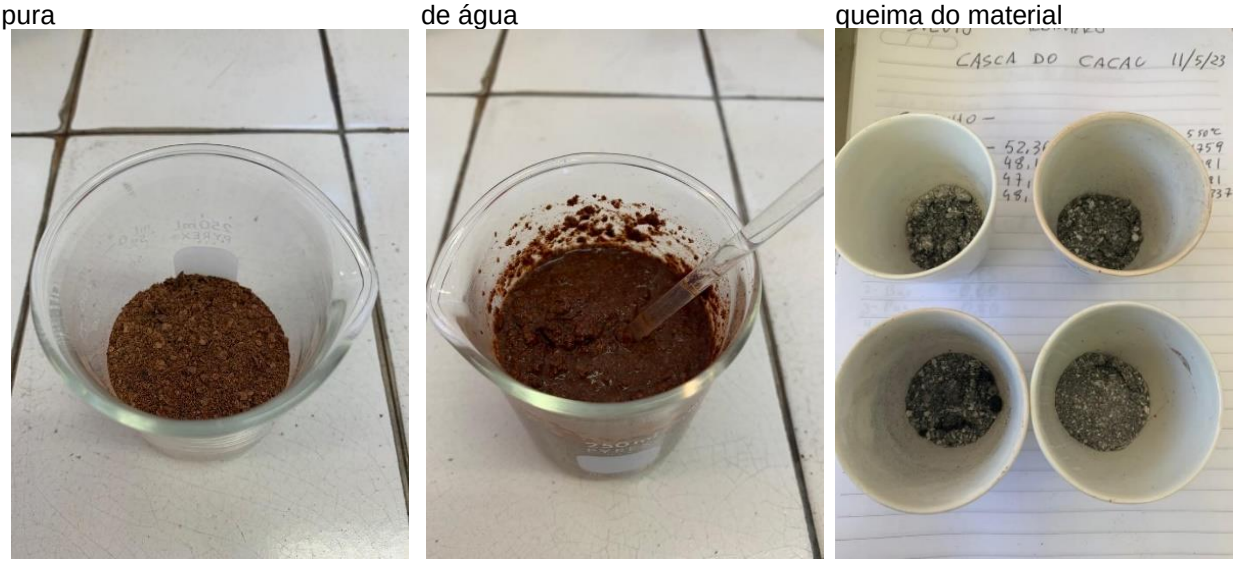
Nota-se então que o valor da condutividade elétrica da casca da amêndoa do cacau seria equivalente à de uma água salgada. Isso faz com que, o aumento gradativo do teor das cascas nas misturas eleve o valor da condutividade elétrica, para valores de 431,50, 581,60, 713,20 e 954,80 µS/cm/25°C, ou seja, transformam o caráter sódico do solo em um caráter salino.

Importante ressaltar que o ensaio para determinação da condutividade elétrica da casca da amêndoa do cacau foi refeito a fim de confirmar esse valor elevado. Além disso, devido à alta absorção de água, a casca da amêndoa do cacau forma uma pasta, como visto na Figura 38 (b), que dificulta um pouco a realização do ensaio.

A alta condutividade indica também a presença de compostos inorgânicos. Assim, para os quantificar foi feita a queima do material à 1000 °C e o resultado é de 7,24% de resíduos inorgânicos (Figura 38 (c)). Ou seja, 92,76% de matéria orgânica foi queimada, num resultado próximo ao já obtido. Os resíduos inorgânicos, quando hidratados apresentam uma condutividade elétrica de 10180,00 µS/cm/25°C, o que prova a existência de compostos inorgânicos e que, quando hidratados, produzem bases de cátions bivalentes, podendo ser sódio, potássio, cálcio ou magnésio. Esses cátions estão sendo inseridos nos argilominerais, tornando o solo menos expansivo.

Figura 38 – Preparação para o ensaio de condutividade elétrica na casca da amêndoa do cacau

(a) Casca da amêndoa do cacau pura (b) Pasta formada pela adição de água (c) Sólidos obtidos após a queima do material



Fonte: A Autora (2023)

Importante ressaltar que a casca da amêndoa do cacau foi analisada de acordo com os parâmetros de um solo, quando em realidade é um resíduo alimentício. Assim, pode haver divergências quando analisadas por métodos específicos para este ramo.

4.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

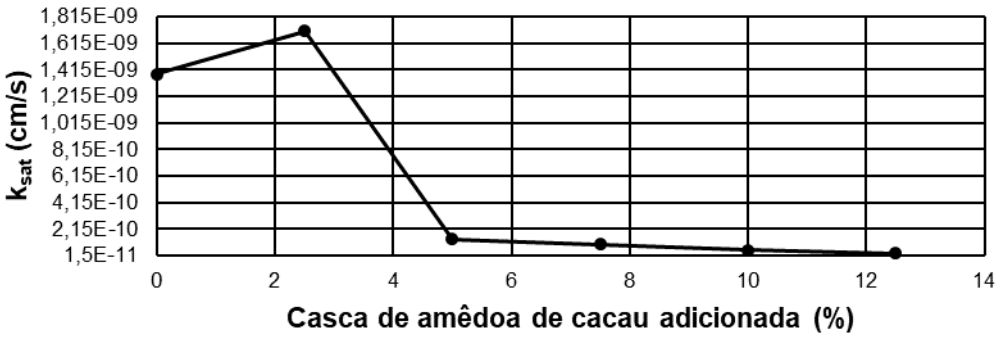
Os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica para cada material estudado se encontram na Tabela 14 O solo apresenta um coeficiente de permeabilidade (k_{sat}) de 1,38 x 10^{-9} cm/s. Realizando o mesmo ensaio, Faustino (2022) obteve um resultado de 2,64 x 10^{-8} cm/s para o solo, um resultado mais elevado do que o obtido nesta pesquisa. Na Figura 39 se encontra a variação dos resultados do coeficiente de permeabilidade saturada com a adição gradual da casca, que reduz da ordem de 10^{-9} cm/s no solo para 10^{-11} cm/s nas misturas.

Tabela 14 – Resultados obtidos para cálculo da condutividade hidráulica

Dados	Solo Puro	Solo+2,5% Casca	Solo+5% Casca	Solo+7,5% Casca	Solo+10% Casca	Solo+12,5% Casca
h (cm)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
d (cm)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
t (s)	5760	4680	11400	8100	14400	18600
Δp (cm)	1000	1000	1000	2000	2000	2500
A_b (cm²)	79,17	79,17	79,17	79,17	79,17	79,17
k_{sat} (cm/s)	1,38x10^{-9}	1,70x10^{-9}	1,40x10^{-10}	9,84x10^{-11}	5,53x10^{-11}	3,43x10^{-11}

Fonte: A Autora (2023)

Figura 39 – Condutividade hidráulica do solo e das misturas com a casca da amêndoa do cacau



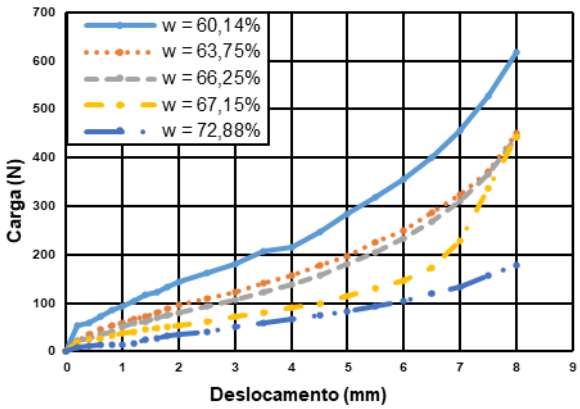
Fonte: A Autora (2023)

4.4 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

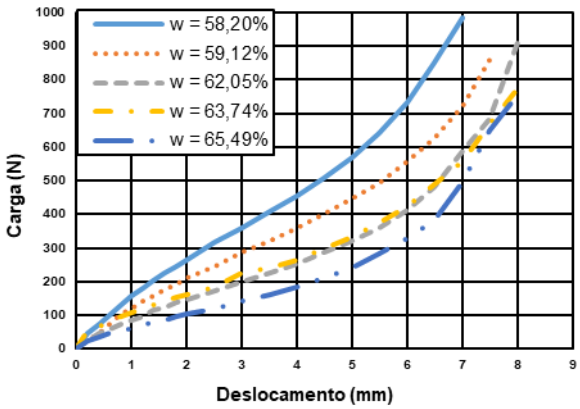
A Figura 40 apresenta as curvas carga x deslocamento obtidas por meio do ensaio squeeze-flow, nas umidades utilizadas para a determinação do LL e na própria umidade do LL.

Figura 40 – Resultados dos ensaios de squeeze-flow para as amostras de solo e misturas com a casca da amêndoa do cacau, nas umidades próximas da reta do LL

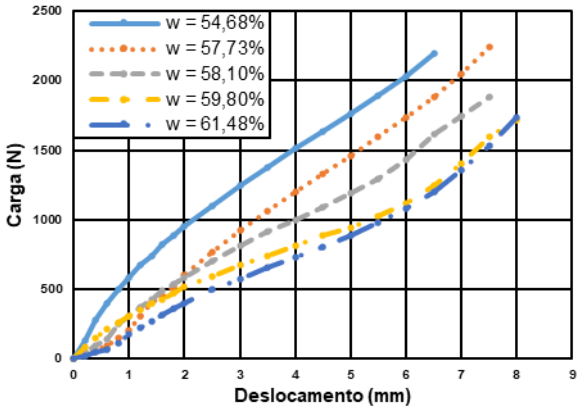
(a) Solo Natural (LL = 66,25%)



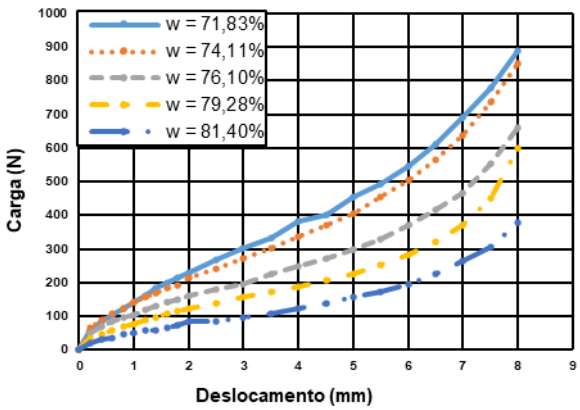
(b) Solo+2,5%casca (LL = 62,05%)



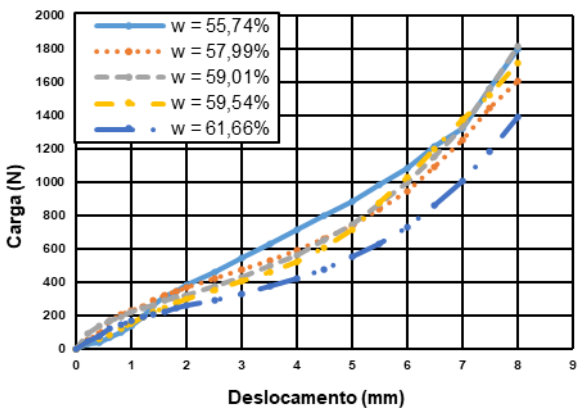
(c) Solo+5%casca (LL=58,10%)



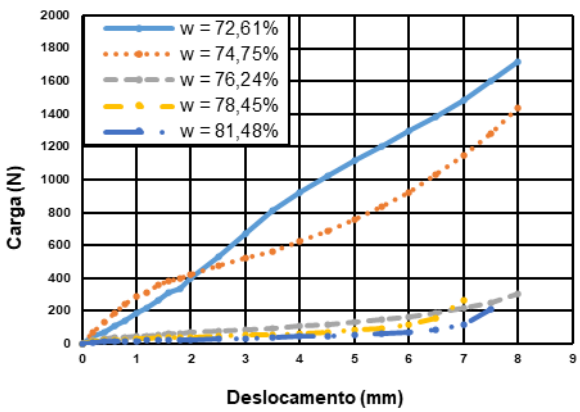
(d) Solo+7,5%casca (LL=76,10%)



(e) Solo+10%casca (LL=59,01)



(f) Solo+12,5%casca (LL=76,24)



Fonte: A Autora (2023)

As curvas carga x deslocamento do solo e das misturam fluem de forma contínua, não apresentando pontos de parada. Isso mostra a homogeneidade das amostras, dos mecanismos internos de deformação e do fluido do material, além da redução do atrito entre a placa (punção) dos materiais. Também não é verificado uma alteração de carga. Os parâmetros de carga e deslocamento de escoamento (Q_{esc} e D_{esc}) e a carga e deslocamento de enrijecimento (Q_{enrij} e D_{enrij}), determinados pelo fim do Estágio II e início do Estágio III se encontram na Tabela 15.

Tabela 15 – Índices e dados do comportamento reológico do solo e das misturas com a casca de amêndoa do cacau

Material	Índices e dados do comportamento reológico									
	W (%)	Q_{esc} (N)	σ_{esc} (kPa)	D_{esc} (mm)	ε_{esc} (%)	Q_{enrij} (N)	σ_{enrij} (kPa)	D_{enrij} (mm)	ε_{enrij} (%)	Q_{Final} (N)
Solo Natural	60,14	125	16,56	1,65	16,11	310	41,06	6,05	59,08	618
	63,75	60	7,95	0,8	7,81	210	27,82	5,85	57,13	450
	66,25	50	6,62	1,0	9,77	190	25,17	5,8	56,64	444
	67,15	35	4,64	0,9	8,79	135	17,88	6,5	63,48	444
	72,88	10	1,32	0,5	4,88	100	13,25	6,0	58,59	177,6
Solo + 2,5% casca	58,20	160	21,19	1,0	9,77	600	79,48	5,5	53,71	984
	59,12	140	18,55	1,1	10,74	525	69,54	6,2	60,55	858
	62,05	100	13,25	1,1	10,74	360	47,69	5,9	57,62	912
	63,74	110	14,57	0,8	7,81	375	49,67	6,0	58,59	774
	65,49	50	6,62	0,6	5,86	250	33,12	5,95	58,11	756
Solo + 5% casca	54,68	550	72,86	1,1	10,74	2100	278,18	6,0	58,59	2196
	57,73	510	67,56	1,8	17,58	2100	278,18	7,0	68,36	2244
	58,10	520	68,88	2,0	19,53	1300	172,21	5,6	54,69	1884
	59,80	495	65,57	1,7	16,60	1150	152,34	6,2	60,55	1716
	61,48	490	64,91	2,0	19,53	1000	132,47	5,9	57,62	1740
Solo + 7,5% casca	71,83	190	25,17	1,4	13,67	520	68,88	6,2	60,55	888
	74,11	175	23,18	1,3	12,70	490	64,91	6,4	62,50	852
	76,10	150	19,87	1,4	13,67	375	49,67	6,6	64,45	660
	79,28	80	10,60	0,8	7,81	300	39,74	6,9	67,38	600
	81,40	60	7,95	1,1	10,74	160	21,19	5,95	58,11	378
Solo + 10% casca	55,74	320	42,39	1,8	17,58	1180	156,31	6,6	64,45	1800
	57,99	210	27,82	0,8	7,81	750	99,35	6,4	62,50	1608
	59,01	200	26,49	0,7	6,84	790	104,65	5,8	56,64	1812
	59,54	210	27,82	1,2	11,72	590	78,15	4,6	44,92	1716
	61,66	200	26,49	1,0	9,77	580	76,83	5,8	56,64	1392
Solo + 12,5% casca	72,61	400	52,99	2,1	20,51	1025	135,78	4,2	41,02	1718,4
	74,75	390	51,66	1,4	13,67	795	105,31	5,6	54,69	1440
	76,24	70	9,27	1,8	17,58	160	21,19	6,6	64,45	306
	78,45	40	5,30	1,0	9,77	100	13,25	6,1	59,57	264
	81,48	30	3,97	1,0	9,77	70	9,27	6,7	65,43	210

Fonte: A Autora (2023)

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

Com a escala utilizada na Figura 40, não é possível identificar os três estágios em todas as curvas, já que algumas são mais suaves que outras. Entretanto, analisando-as separadamente, é viável a determinação dos três estágios do perfil reológico.

No Estágio I, o material apresenta uma deformação elástica linear, relacionada à tensão de escoamento do solo e das misturas. Nota-se a ocorrência de pequenos deslocamentos, que variam de 0,5 a 2,1 mm. Além disso, percebe-se que, as três primeiras umidades analisadas de cada mistura apresentam deslocamentos elásticos maiores do que as duas últimas umidades, com exceção da mistura de solo+5%casca, cujo deslocamento do conjunto varia pouco (de 1,7 a 2 mm). A maior tensão de escoamento (72,86 kPa) ocorre na mistura de solo+5%casca, justamente a que apresenta menor umidade inicial.

O Estágio II, por sua vez, é marcado pela ocorrência de deslocamentos intermediários, com a compressão resultando da deformação radial de cisalhamento superando as forças que mantem o comportamento elástico do material. Esse comportamento é descrito como plástico ou viscoso. Assim, no solo natural e em suas misturas com a casca da amêndoa do cacau, o fim do estágio II varia de 4,20 a 6,90 mm, com o menor valor correspondente à mistura solo + 12,5%casca e o maior valor à mistura de solo + 7,5%casca.

O solo natural e as misturas de solo + 2,5%, 7,5%, 10% e 12,5% casca em geral apresentam deslocamentos sem um aumento expressivo na carga. Isso não ocorre na mistura de solo+5%casca, cuja tensão de escoamento já é elevada e a de enrijecimento é o valor mais alto obtido para este conjunto de ensaios.

Bezerra (2020) identificou para o solo de Paulista e suas misturas com areia, cal e cinzas da casca de arroz um deslocamento elástico que variou de 0,30 a 2,80 mm, num valor semelhante ao obtido para as misturas com a casca da amêndoa do cacau. Já para o deslocamento de enrijecimento, Bezerra (2020) encontrou valores entre 4,20 e 6,60 mm, também num intervalo semelhante ao obtido para o presente trabalho.

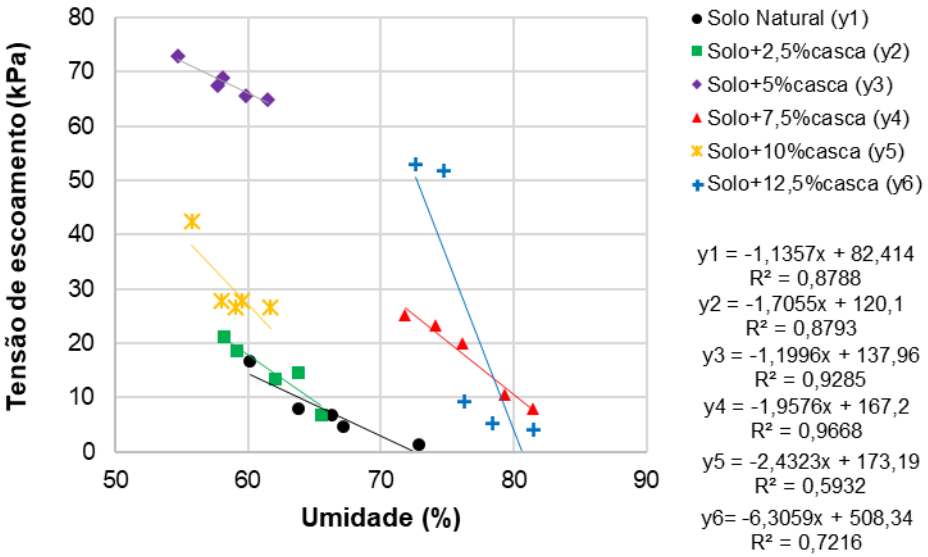
Porém, enquanto as tensões de enrijecimento deste trabalho se assemelham aos resultados obtidos para o solo de Paulista apresentadas por Bezerra (2020), as tensões de enrijecimento para as misturas do solo com a casca da amêndoa do

cacau são significativamente maiores que as obtidas para as misturas com a cinza da casca de arroz, cal e areia.

No Estágio III (deslocamentos superiores 4,20 e 6,90 mm), nota-se um aumento significativo de carga necessária para que o deslocamento continue ocorrendo. Esse aumento advém da aproximação das partículas e dos outros componentes do sistema, que geram uma força resistiva de atrito. A maior carga para o deslocamento máximo de 8 mm ocorre novamente na mistura solo+5%casca (2244 N), enquanto as demais de solo, solo+2,5%, 7,5%, 10% e 12,5%casca tem valores de carga final de 618N, 984N, 888N, 1812N e 1718,4N respectivamente.

A variação da tensão de escoamento para cada material analisado pode ser vista na Figura 41, onde se confirma o obtido por Melo (2014), Bezerra (2020) e Faustino (2022), em que a tensão de escoamento no solo deve variar segundo a umidade e coesão da amostra. Em diferentes proporções de variação, o solo natural e as misturas demonstram a tendência de diminuir a tensão de escoamento a medida que se aumenta a umidade. Por meio das equações lineares do solo, mistura solo + 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5% casca, as umidades que anulam a tensão de escoamento foram de 72,57%, 70,42%, 115,00%, 85,41%, 71,20% e 80,61% respectivamente.

Figura 41 – Variação da tensão de escoamento com a umidade

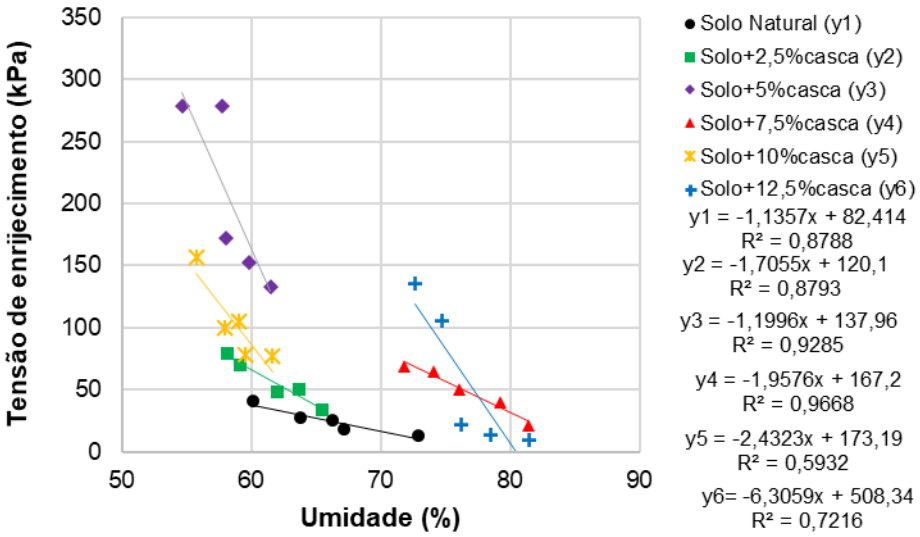


Fonte: A Autora (2023)

A Figura 42 traz a relação entre a tensão de enrijecimento e umidade, que também demonstram a tendência de diminuir conforme o acréscimo de água. A relação entre a tensão de enrijecimento e a tensão de escoamento dos ensaios é em média de 3,37 vezes, valor semelhante ao obtido por Bezerra (2020) de 3,3 vezes.

Pode ser verificada uma correlação com o limite de liquidez. A mistura de solo + 2,5%casca apresenta um LL (62,05%) semelhante ao solo natural (66,25%), assim, as tensões de escoamento e enrijecimento dos dois materiais são semelhantes. As misturas de solo +5%, e 10% casca que apresentam LL (58,10% e 59,01% respectivamente) menor que o do solo, tem as tensões maiores e umidades menores. Por fim, as misturas de solo +7,5% e 12,5%casca com limites semelhantes (76,10% e 76,24%) apresentam tensões de escoamento e enrijecimento maiores que a do solo e em uma umidade maior.

Figura 42 – Variação da tensão de enrijecimento com a umidade



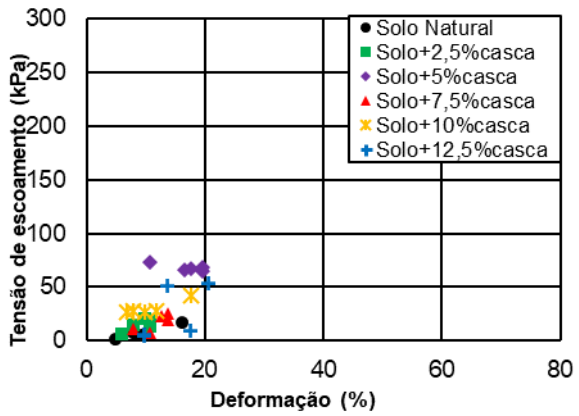
Fonte: A Autora (2023)

A Figura 43 traz as variações da tensão de escoamento e enrijecimento conforme a deformação, onde se percebe que a mistura de solo + 5% e 10%casca apresentam as maiores tensões de escoamento (média de 67,95 kPa e 30,20 kPa respectivamente) e enrijecimento (média de 202,67 kPa e 103,06 kPa respectivamente) para uma deformação semelhante à dos demais materiais (média de 12% para a deformação de escoamento e 58,89% para a deformação de

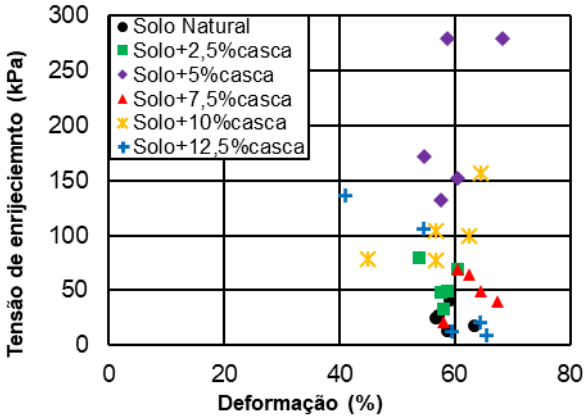
enrijecimento), que tem uma tendência a se concentrar, com valores semelhantes de tensão (média de 16,06 kPa para a tensão de escoamento e 46,70 kPa para a tensão de enrijecimento).

Figura 43 – Variação da tensão de escoamento e enrijecimento com a deformação

(a) Tensão de escoamento x deformação



(b) Tensão de enrijecimento x deformação



Fonte: A Autora (2023)

Na Tabela 16 são apresentados os valores das umidades antes e após a realização de cada ensaio, sendo que a umidade final foi determinada tanto no centro da amostra quanto nas bordas, periferia da amostra. Nota-se que a umidade das bordas é maior que a umidade do centro, devido à expulsão da água do centro para a periferia conforme a aplicação da carga. O maior valor médio de migração ocorre na mistura de solo+10%casca (5,60%) e o menor é na mistura de solo+7,5%casca (2,42%). Nota-se também a perda de água em relação à umidade inicial devido à evaporação que ocorre entre o início e o término do ensaio.

Tabela 16 – Valores das umidades iniciais e finais no centro e na periferia das amostras, dos ensaios de squeeze-flow para solo e misturas com a casca da amêndoa do cacau

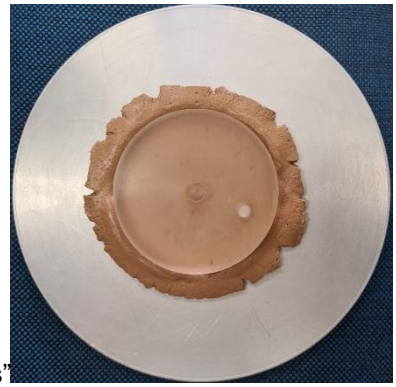
Material	W inicial (%)	W final no centro da amostra (%)	W final na periferia da amostra (%)
Solo Natural	60,14	56,66	58,69
	63,75	60,77	64,06
	66,25	58,91	65,64
	67,15	65,69	65,82
	72,88	67,19	70,03
Solo + 2,5% casca	58,20	57,14	58,46
	59,12	54,09	55,89
	62,05	58,05	60,30
	63,74	60,41	60,94
	65,49	61,65	65,96
Solo + 5% casca	54,68	55,12	54,54
	57,73	53,44	55,66
	58,10	56,33	58,74
	59,80	58,75	62,20
	61,48	58,97	62,28
Solo + 7,5% casca	71,83	71,13	72,67
	74,11	70,25	73,38
	76,10	72,83	71,95
	79,28	77,23	78,43
	81,40	75,59	79,50
Solo + 10% casca	55,74	52,23	53,46
	57,99	55,58	56,49
	59,01	52,55	58,29
	59,54	55,48	59,20
	61,66	57,63	61,35
Solo + 12,5% casca	72,61	71,49	78,21
	74,75	58,86	62,32
	76,24	76,00	77,13
	78,45	80,14	80,80
	81,48	81,29	83,61

Fonte: A Autora (2023)

A Figura 44 retrata as formas dos corpos de prova após o ensaio para as umidades correspondentes ao limite de liquidez do solo e das misturas. Suas formas se assemelham a flor *Zinnia Angustifolia* Profusion Orange (Figura 45), com número de pétalas variáveis. A mistura solo+5%casca foi a que apresentou mais “pétalas” (15), enquanto as misturas de solo+10% e 12,5% casca apresentaram o menor número de pétalas (7). De modo geral, o número de pétalas está associado a maior ou menor limite de liquidez, entretanto, a mistura de solo+10%casca apresenta o segundo menor LL (59,01%) e ainda assim apresenta a mesma quantidade de “pétalas” que a mistura de solo+12,5%, cujo LL é um dos maiores (76,24%).

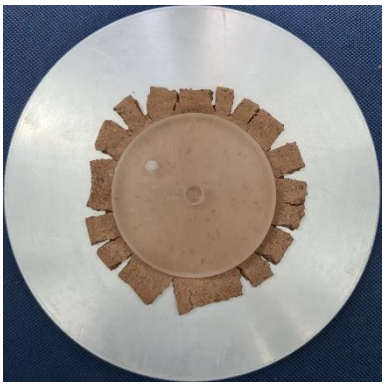
Figura 44 – Formas dos corpos de prova ao final do ensaio squeeze-flow para as amostras de solo e misturas com a casca da amêndoa do cacau

(a) Solo Natural – 12 “pétalas”

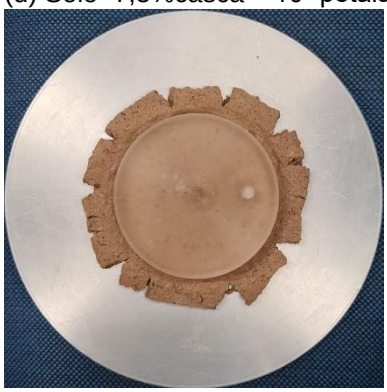


(b) Solo+2,5%casca– 12 “pétalas”

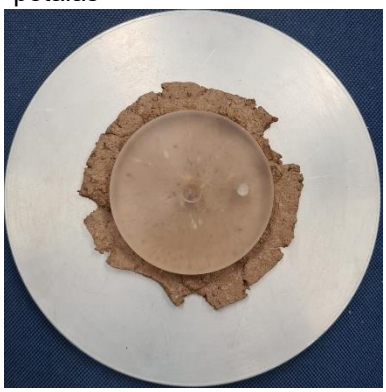
(c) Solo+5%casca – 14 “pétalas”



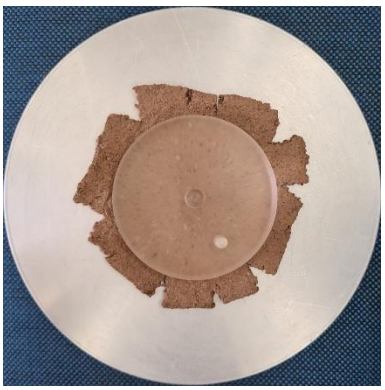
(d) Solo+7,5%casca – 10 “pétalas”



(e) Solo+10%casca – 7 “pétalas”



(f) Solo+12,5%casca– 7 “pétalas”



Fonte: A Autora (2023)

Figura 45 – Flor Zinnia Angustifolia Profusion Orange

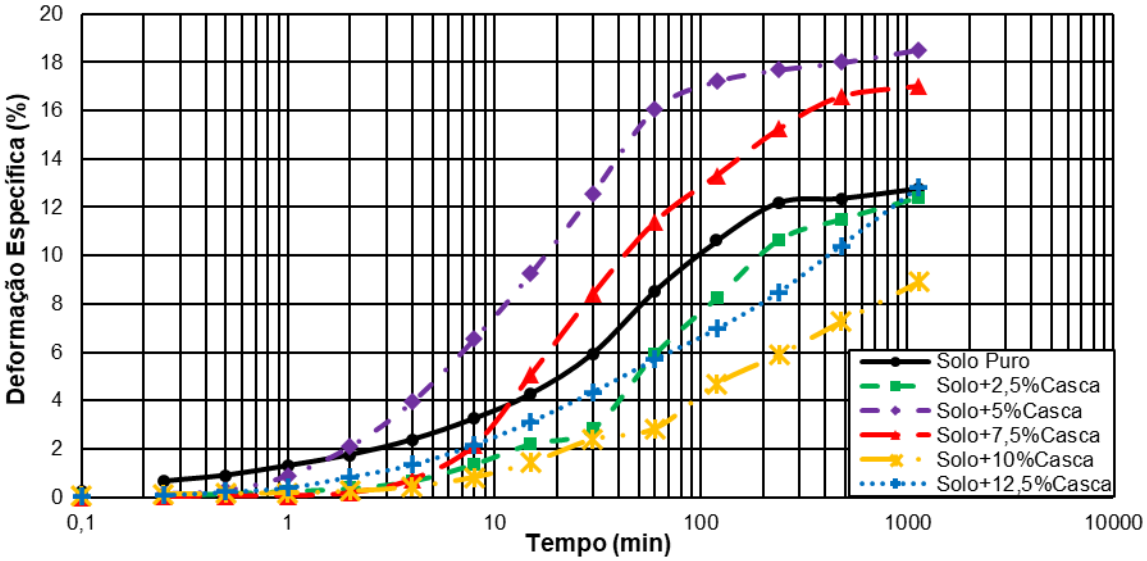
Fonte: Google (2023)

4.5 EXPANSIVIDADE

4.5.1 Expansão Livre

As curvas de deformação de expansão com o tempo do solo natural e das misturas para a sobrecarga de 1 kPa são apresentadas na Figura 46. Para o solo natural, a expansão é de 12,75%, enquanto para as misturas de solo+2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5% casca, os resultados são de 12,40%, 18,53%, 17,03%, 8,90% e 12,80% respectivamente. Para esse mesmo solo, e com a sobrecarga de 1 kPa, Bastos (1994), Paiva (2009), Morais (2017), Araújo (2020) e Faustino (2022) obtiveram expansões de 10,72%, 17%, 16,02%, 8% e 11,2% respectivamente. Com exceção do trabalho de Araújo (2020), o valor obtido de 12,50% é condizente com os demais trabalhos.

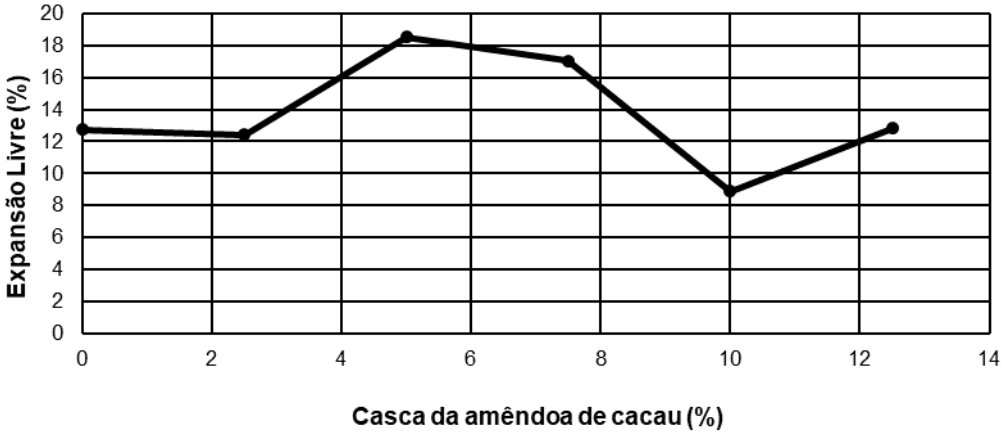
Figura 46 – Resultados obtidos por meio do ensaio de expansão livre



Fonte: A Autora (2023)

A adição de 2,5% da casca da amêndoa de cacau não influencia na expansão final do solo, enquanto teores de 5% e 7,5% elevam a expansividade das misturas. A partir de 5%, a tendência é de diminuir a expansividade até a adição de 10% da casca, sendo o teor de casca que apresenta uma maior redução na expansividade. O teor de 12,5% eleva novamente a expansão total, tendo um resultado semelhante ao do solo natural. Essa variação pode ser visualizada na Figura 47.

Figura 47 – Expansão Livre de acordo com a adição da casca da amêndoa do cacau



Fonte: A Autora (2023)

A mistura solo+5%casca que apresenta umidade ótima semelhante à do solo natural, estava visivelmente mais seca no momento da compactação, pois o aumento da fração orgânica na mistura absorve mais água que o próprio solo. Isso pode ser uma explicação para o aumento da expansividade, já que a fração de solo natural da mistura estava mais seca.

O mesmo ocorre com a mistura solo+7,5%casca. Entretanto, a umidade ótima dessa mistura (23,96%) é um pouco mais alta que a do solo natural (22,10%), de forma que, a expansividade é maior que a do solo natural, porém menor que a da mistura solo+5%Casca.

4.5.2 Tensão de Expansão

A tensão de expansão do solo natural e das misturas com a casca da amêndoa do cacau obtidas por meio do método do volume constante, são apresentadas na Tabela 17. O solo natural compactado na condição ótima apresenta uma tensão de 91,67 kPa. O acréscimo de casca da amêndoa do cacau ao solo reduz a tensão de expansão do solo.

Bastos (1994), Justino da Silva (2001), Paiva (2016), Morais (2017), Araújo (2020) e Faustino (2022) obtiveram tensões de 166, 255, 252, 289, 172 e 101,70 kPa respectivamente. A grande variação ocorrida de acordo com Araújo (2020) foi

devido à umidade inicial da amostra de cada autor. O valor obtido de 91,67 kPa foi semelhante ao obtido por Faustino (2022), para o solo natural compactado.

Tabela 17 – Tensão de expansão do solo e das misturas com a casca da amêndoa de cacau pelo método do volume constante

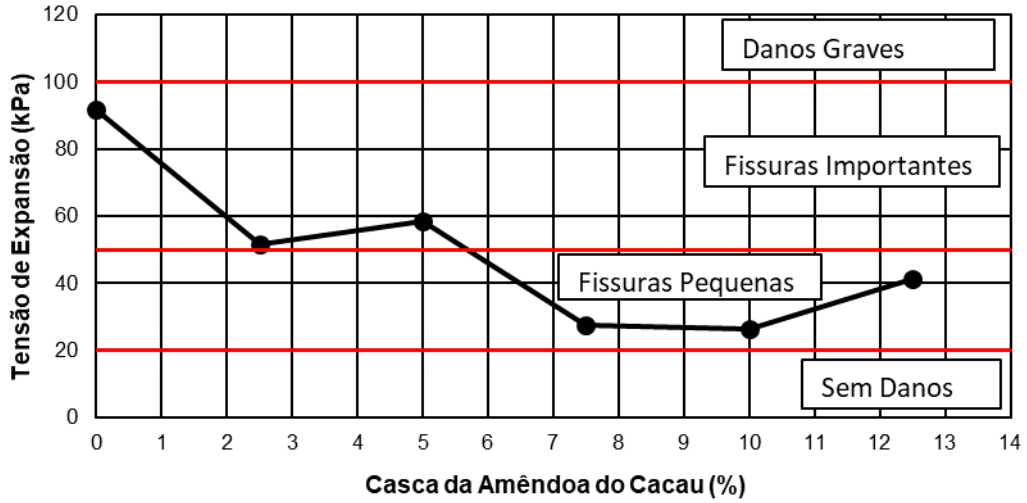
Material	Tensão de Expansão (kPa)	Redução em relação ao solo natural (%)
Solo Natural	91,67	-
Solo+2,5Casca	51,50	43,82
Solo+5%Casca	58,33	36,37
Solo+7,5%Casca	27,50	70,00
Solo+10%Casca	26,25	71,36
Solo+12,5%Casca	41,25	55,00

Fonte: A Autora (2023)

Percebe-se que essa redução não ocorre de forma gradual. Ela se dá basicamente em dois grupos. A adição de 2,5% e 5% de casca apresentam valores de tensão de expansão similares, enquanto a adição de 7,5% e 10% de casca também apresentam valores semelhantes. Por fim, a mistura com 12,5% da casca da amêndoa apresenta um aumento da tensão de expansão se comparada a tendência de redução que era apresentada. Pode-se afirmar que a adição de 10% de casca apresenta maior redução da tensão de expansão.

De acordo com Jimenez Salar (1980), o solo de Paulista-PE estudado é classificado como um solo com a ocorrência de fissuras importantes, muito próximo de ser classificado como um solo que apresenta danos graves à estrutura. Entretanto, com a adição da casca da amêndoa do cacau essa classificação é reduzida para fissuras pequenas como é o caso das misturas solo+7,5%, 10% e 12,5%casca. Essa classificação pode ser vista na Figura 48.

Figura 48 – Tensão de expansão em função da adição da casca de amêndoa de cacau e classificação de acordo com Jimenez Salas (1980)



Fonte: A Autora (2023)

4.6 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

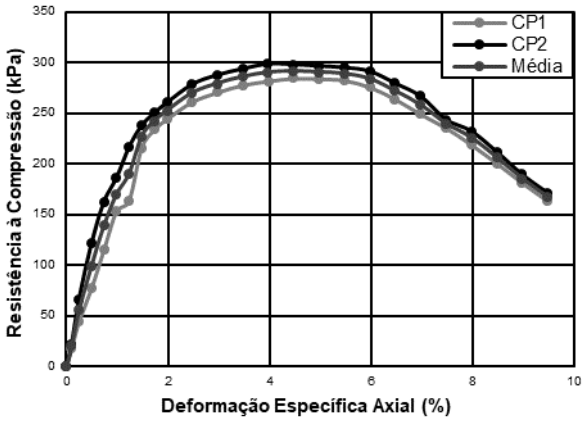
4.6.1 Compressão Simples

Os gráficos obtidos para cada corpo de prova e a média entre os dois ensaios se encontram na Figura 49. Os dados provenientes desses gráficos são descritos na Tabela 18.

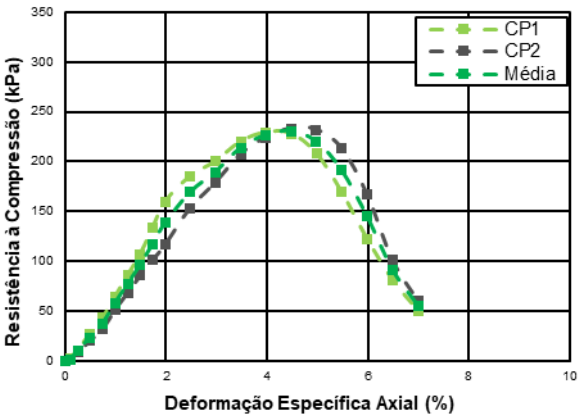
Neles, percebe-se que há uma redução da resistência à compressão simples à medida que o teor da casca da amêndoa do cacau aumenta. Isso pode ser mais bem percebido ao agrupar os gráficos da média dos corpos de prova em uma só imagem (Figura 50) e por meios dos dados da Tabela 18.

Figura 49 – Resistência à compressão simples do solo e misturas com a casca da amêndoa de cacau

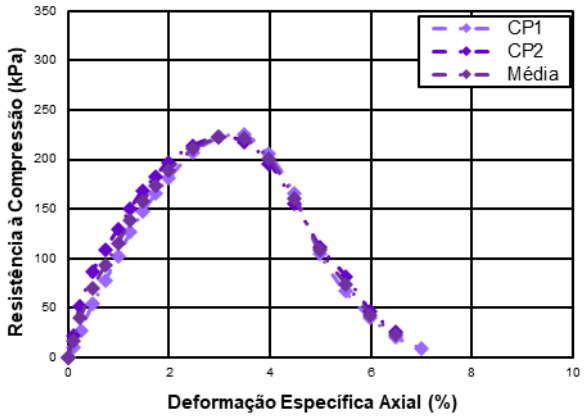
(a) Solo Natural



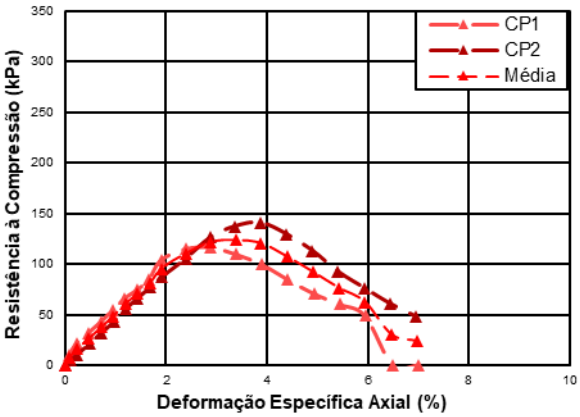
(b) Solo+2,5%casca



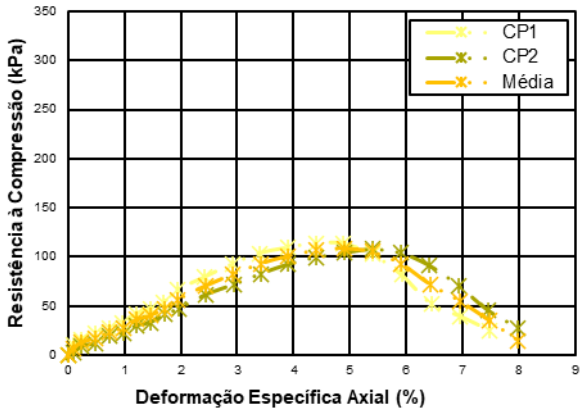
(c) Solo+5%casca



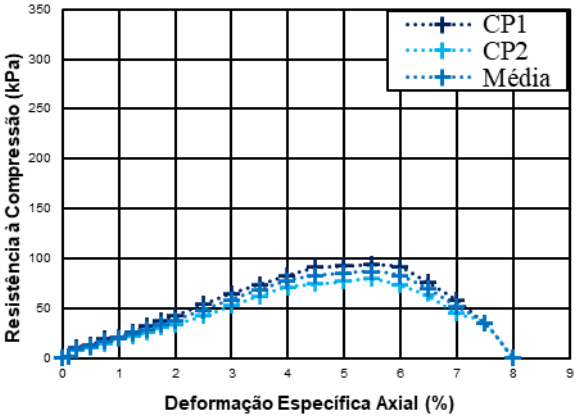
(d) Solo+7,5%casca



(e) Solo+10%casca

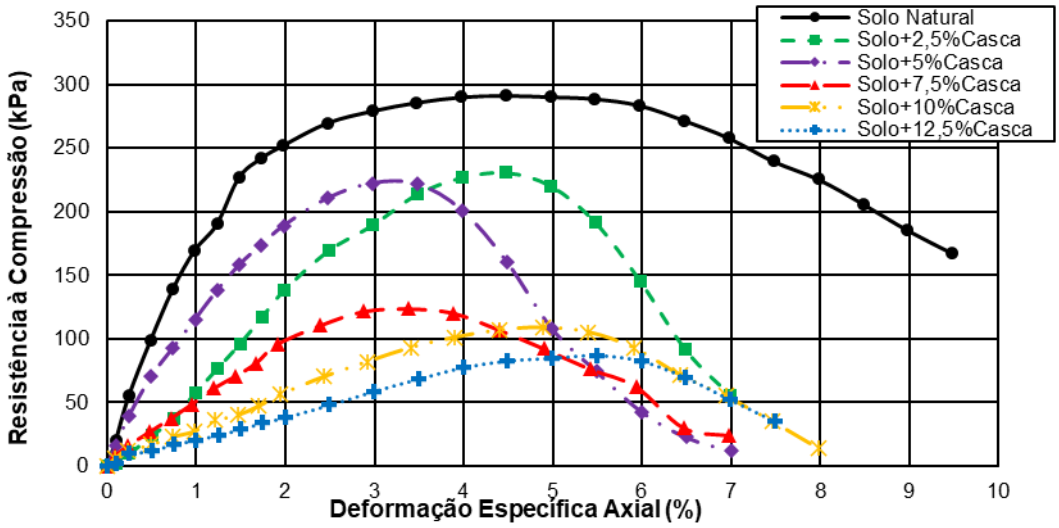


(f) Solo+12,5%casca



Fonte: A Autora (2023)

Figura 50 - Resistência média à compressão simples do solo e das misturas



Fonte: A Autora (2023)

Tabela 4.18 – Valores da resistência à compressão no ensaio de Compressão Simples

		Solo Natural	Solo+2,5 % casca	Solo+5% casca	Solo+7,5 % casca	Solo+10 %casca	Solo+12,5 %casca
Resistência à compressão (kPa)	CP1	284,39	229,27	228,18	116,99	114,14	94,37
	CP2	298,13	233,26	225,22	137,38	107,81	80,00
	Média	291,26	230,67	222,18	123,74	108,90	87,18
Deformação Axial de Ruptura (%)	CP1	4,47	3,98	2,98	2,89	4,39	5,49
	CP2	4,47	4,48	3,48	3,37	5,40	5,49
	Média	4,47	4,23	3,23	3,13	4,89	5,49
Modulo de Elasticidade (GPa)	CP1	17,69	4,33	10,84	12,04	12,04	2,17
	CP2	22,11	4,10	21,68	5,42	3,61	2,17
	Média	19,9	4,21	16,26	8,73	7,83	21,7

Fonte: A Autora (2023)

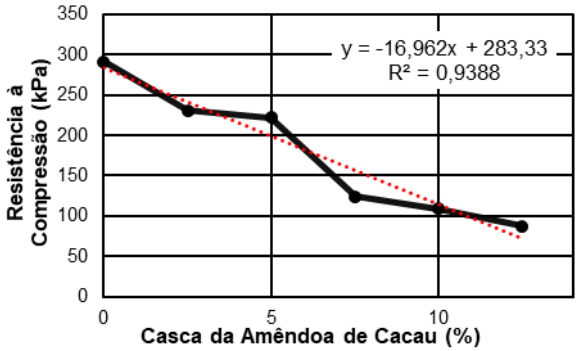
A resistência à compressão do material diminui com a adição das cascas. Os valores das deformações para as tensões máximas, tendem a diminuir até a mistura de solo+7,5%casca e aumentar nas misturas de solo+10%casca e solo+12,5%casca, provavelmente devido a maior umidade de moldagem. A relação entre a tensão cisalhante máxima, deformação axial de ruptura e o teor adicionado de casca de amêndoa de cacau pode ser observado na Figura 51.

O solo apresenta um comportamento plástico, com presença de amolecimento, enquanto as misturas com a casca apresentam um comportamento de pico seguido de um enfraquecimento, se assemelhando ao comportamento de material dúctil, principalmente as misturas de solo+2,5% e 5%casca, onde esse

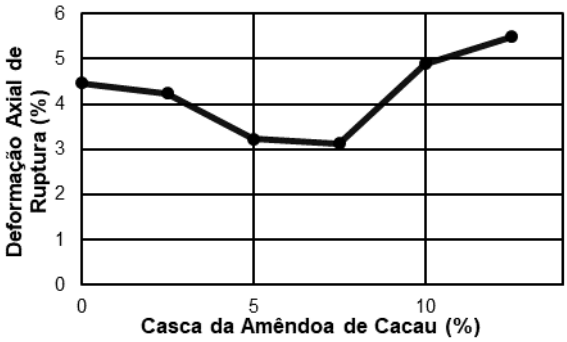
fenômeno ocorre de maneira mais acentuada. É observado também que o módulo de elasticidade diminui de 21% (solo+2,5%casca) até 90% (solo+12,5%casca) com o acréscimo das cascas de amêndoa do cacau.

Figura 51 – Correlação entre Resistência à compressão e Deformação axial com o teor adicionado de casca da amêndoa do cacau

(a) Resistência à Compressão



(b) Deformação Axial



Fonte: A Autora (2023)

Pela Figura 51 nota-se a redução da resistência à compressão simples com a adição das cascas. A mistura de solo+2,5% e 5%casca apresentam uma redução de 20,80% e 23,72% em relação ao solo natural. E as misturas de solo+7,5%, 10% e 12,5%casca apresentam reduções de 57,52%, 62,61% e 70,07% respectivamente.

Ao se comparar os resultados obtidos para a casca da amêndoa de cacau com a os valores de Paiva (2016) para o solo de Paulista-PE estabilizado com a cal, percebe-se que a adição de cal aumenta a resistência à compressão, enquanto a casca da amêndoa do cacau tende a diminuí-la (Tabela 19).

Tabela 19 – Valores das tensões cisalhantes no ensaio de compressão simples da cal e casca da amêndoa do cacau

	Teor adicionado de cal (PAIVA, 2016)				**Teor adicionado de casca de amêndoa de cacau**					
	0%	3%	5%	7%	0%	2,5%	5%	7,5%	10%	12,5%
Resistência à Compressão (kPa)	200	342	788	1194	291,26	230,67	222,18	123,74	108,90	87,18
Deformação Axial de Ruptura (%)	2,3	2,74	4,57	6,35	4,47	4,23	3,23	3,13	4,89	5,49

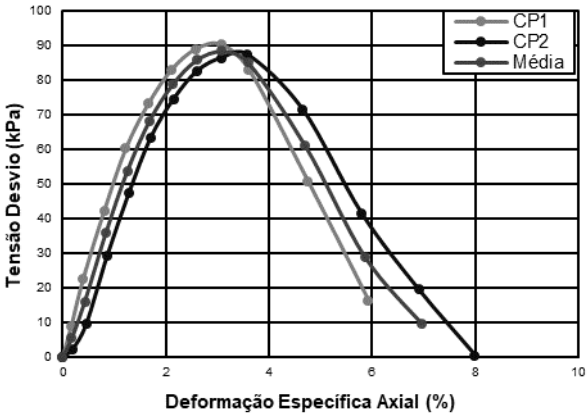
Fonte: A Autora (2023)

4.6.2 Compressão Diametral

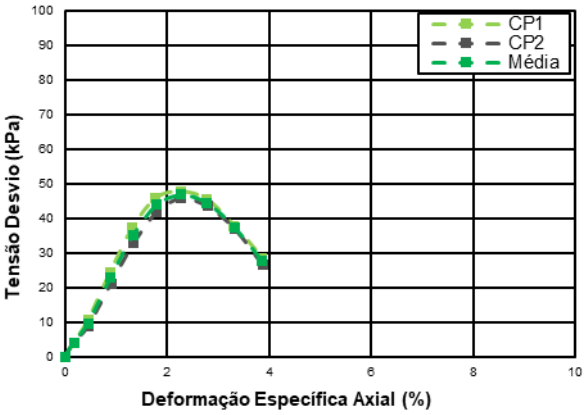
Na Tabela 20 são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de compressão diametral das amostras de solo e das misturas de solo+2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5% casca. As curvas de resistência à tração x deformação específica de cada amostra se encontram na Figura 52.

Figura 52 - Resistência à compressão diametral do solo e misturas casca de amêndoa do cacau

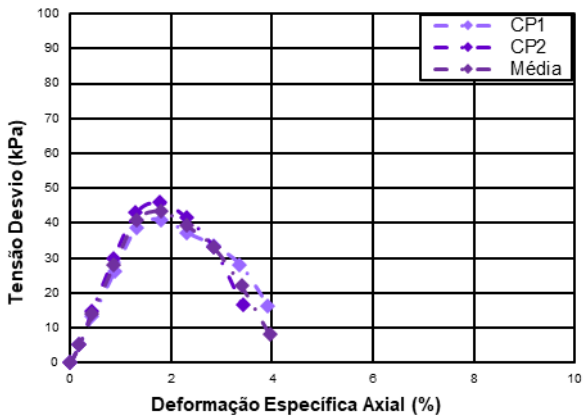
(a) Solo Natural



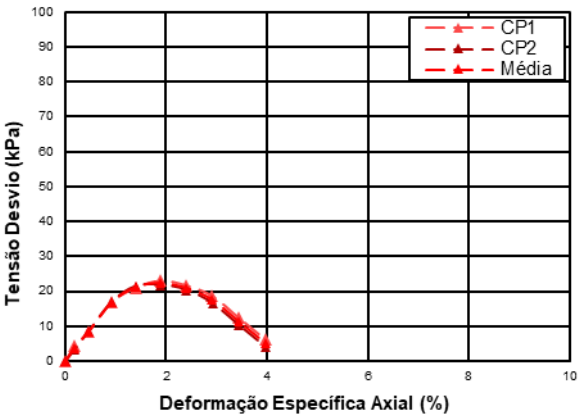
(b) Solo+2,5%casca



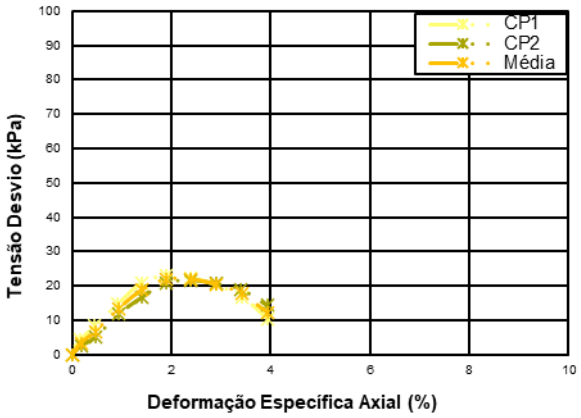
(c) Solo+5%casca



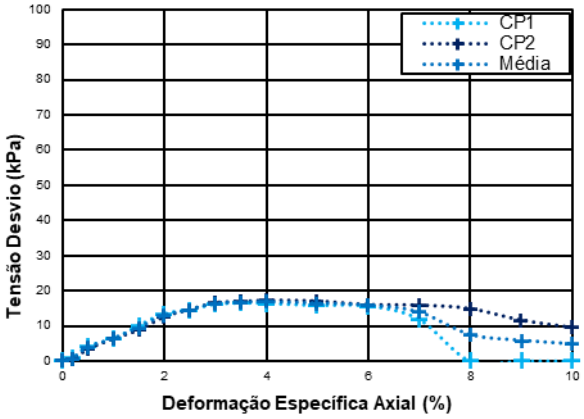
(d) Solo+7,5%casca



(e) Solo+10%casca



(f) Solo+12,5%casca



Fonte: A Autora (2023)

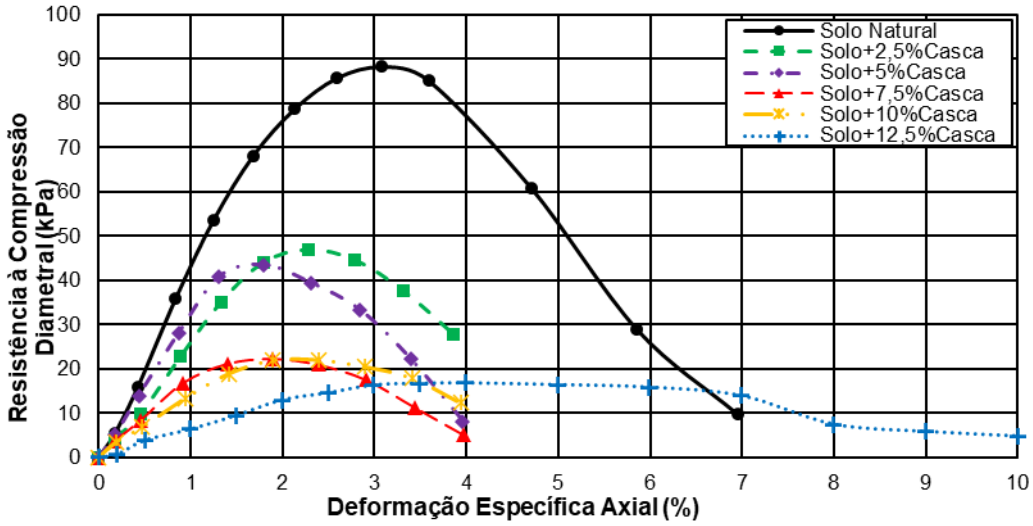
Tabela 20 – Valores das tensões cisalhantes no ensaio de compressão diametral

		Solo Natural	Solo+2,5 % casca	Solo+5% casca	Solo+7,5 % casca	Solo+10 %casca	Solo+12,5 %casca
Tensão Cisalhante Máxima (kPa)	CP1	90,15	47,90	41,01	23,00	23,00	16,45
	CP2	87,16	45,81	46,05	21,74	21,63	17,19
	Média	88,24	46,86	43,53	22,37	22,05	16,78
Deformação Axial de Ruptura (%)	CP1	3,07	2,27	1,80	1,89	1,89	3,49
	CP2	3,58	2,28	1,78	1,90	2,40	3,99
	Média	3,32	2,28	1,79	1,89	2,14	3,74
Modulo de Elasticidade (GPa)	CP1	8,68	4,25	5,11	4,25	4,25	4,24
	CP2	9,52	4,25	5,11	3,40	5,09	3,39
	Média	9,10	4,25	5,11	3,82	4,67	3,82

Fonte: A Autora (2023)

Agrupando-se os gráficos das médias dos resultados em uma só imagem (Figura 53) e analisando a Tabela 21, é possível verificar a redução da resistência à compressão diametral à medida que o teor da casca da amêndoa do cacau aumenta.

Figura 53 – Resistência média à compressão diametral do solo e misturas



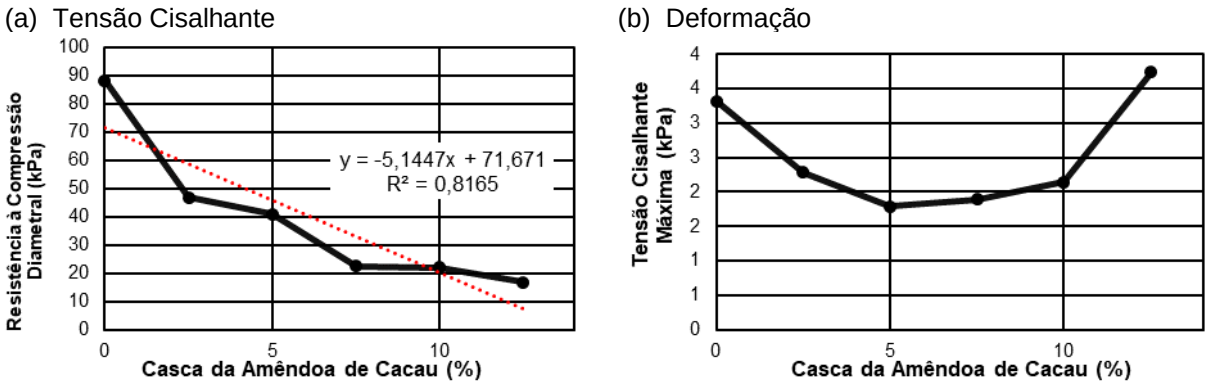
Fonte: A Autora (2023)

Observa-se que, tanto o solo quanto as misturas apresentam um comportamento de pico seguido de um enfraquecimento, em um comportamento que se assemelha mais aos materiais dúcteis. A resistência à tração por compressão diametral diminui com a inserção das cascas, sendo a diminuição em relação ao

solo natural igual 46,89%, 50,67%, 74,65%, 75,01% e 80,98% para as misturas de solo+2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5%casca. Assim, as cascas diminuem a tenacidade do solo, diminuindo a sua resistência máxima.

A deformação axial para a tensão máxima, por sua vez, diminui até o acréscimo de 5% de casca e, a partir desse ponto, apresenta crescimento (Figura 54). Percebe-se o comportamento menos regular da tensão cisalhante máxima que o comportamento da resistência à compressão simples.

Figura 54 - Correlação entre a resistência à compressão diametral e a deformação com o teor de adição da Casca da amêndoa de cacau



Fonte: A Autora (2023)

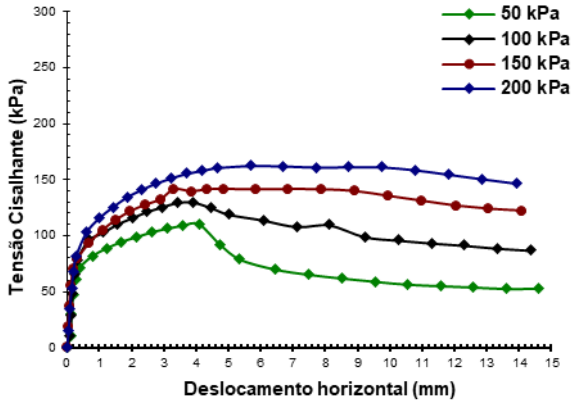
4.6.2 Cisalhamento Direto

As curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal para as tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa se encontram na Figura 55. Nota-se que todas as adições de casca de amêndoa do cacau nas tensões normais de 50 e 100 kPa apresentam comportamento de pico, com o deslocamento variando de 2,5 mm a 4,5 mm. Nas tensões de 150 kPa, o solo natural e as misturas de solo+2,5% e 5%casca apresentam um comportamento plástico (Figura 55 (a), (b) e (c)).

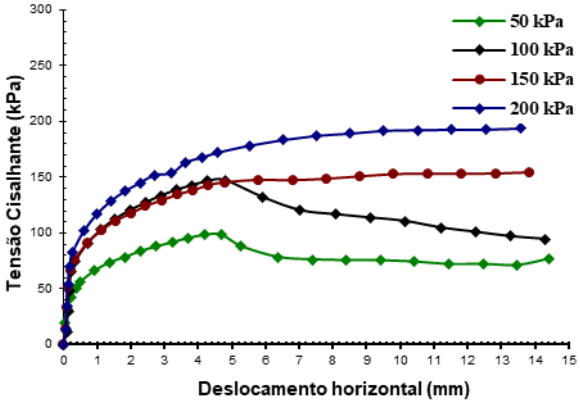
Com o acréscimo no teor da casca da amêndoa, solo+7,5%, 10% e 12,5% a tendência é que o comportamento apresentado seja de pico, como pode ser visto na Figura 55 (d), (e) e (f). Essa mudança no comportamento também ocorre para a tensão normal de 200 kPa, a partir da mistura de solo+10%casca (Figura 55 (e)).

Figura 55 – Curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal

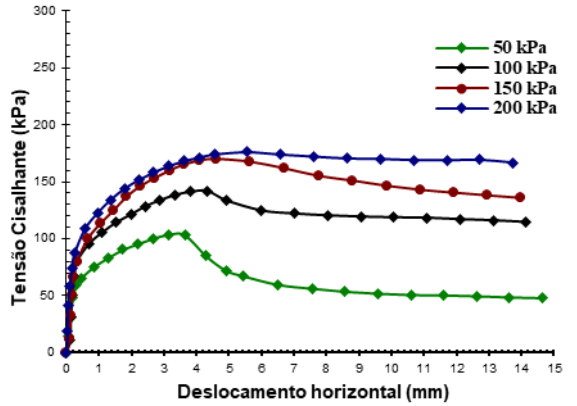
(a) Solo Natural



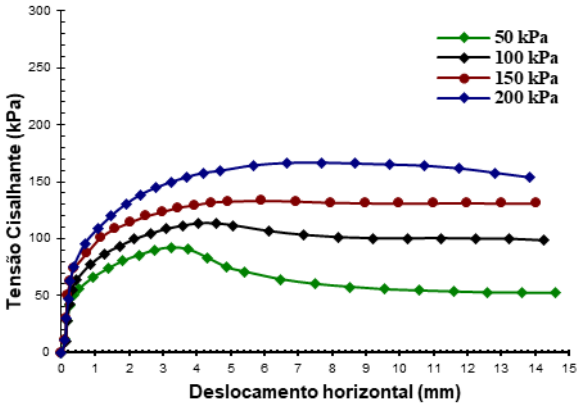
(b) Solo+2,5%Casca



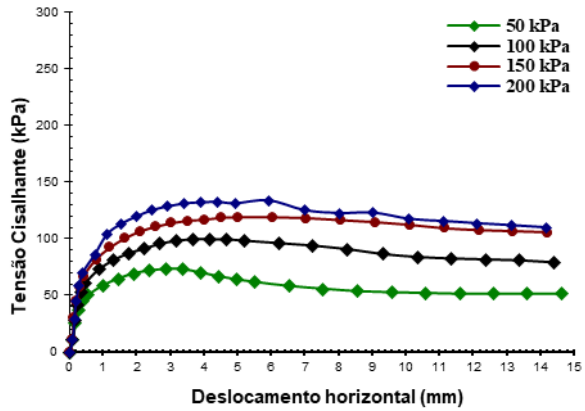
(c) Solo+5%Casca



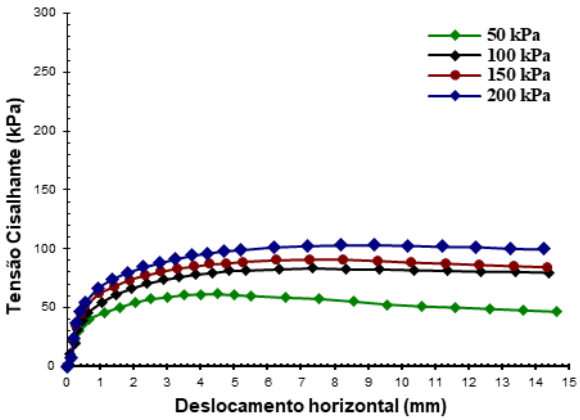
(d) Solo+7,5%Casca



(e) Solo+10%Casca



(f) Solo+12,5%Casca



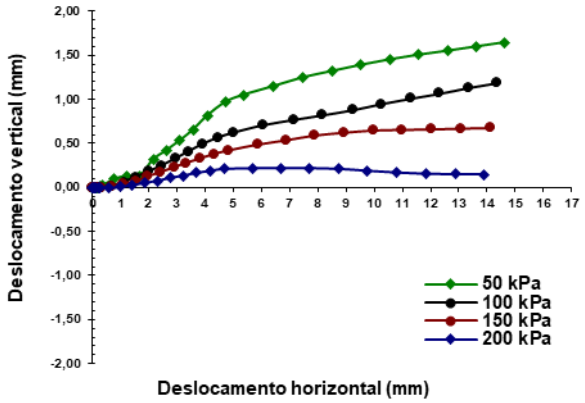
Fonte: A Autora (2023)

Com relação às curvas de deslocamento vertical x deslocamento horizontal da Figura 56, pode-se inferir que há uma pequena compressão até 1 mm de deslocamento horizontal e logo em seguida ocorre a dilatação. Esse comportamento pode ser observado em todos os gráficos, exceto na Figura 56 (f), solo+12,5%casca, onde nas tensões de 150 e 200 kPa ocorre somente compressão. Assim, percebe-

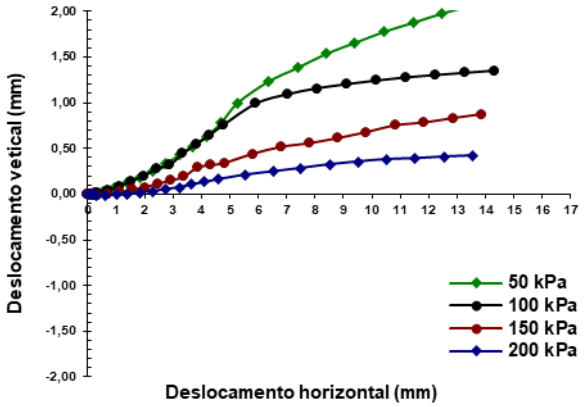
se que a dilatação é reduzida com o aumento da tensão normal aplicada. Isso ocorre, pois, com uma maior tensão normal de consolidação, a estrutura do solo está mais compacta e a força de dilatação resultante não é suficiente para sobrepor a força normal aplicada.

Figura 56 – Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal do solo e das misturas

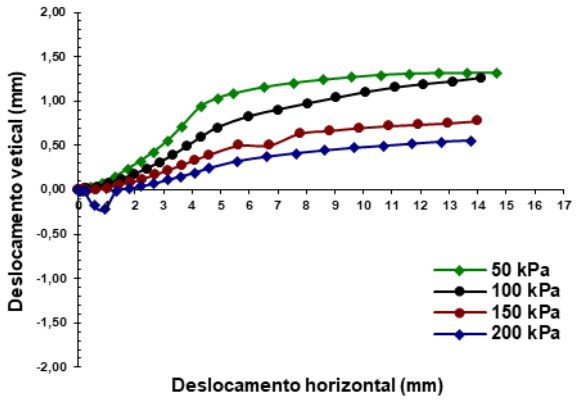
(a) Solo Natural



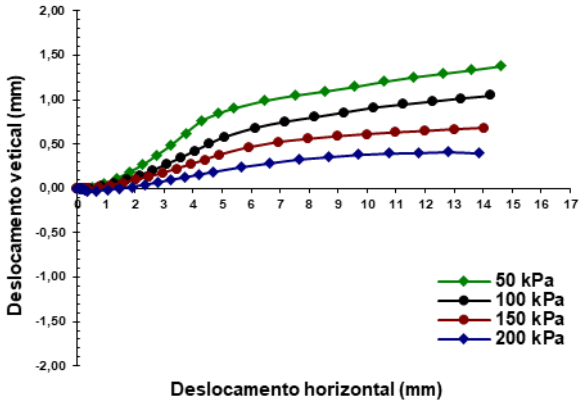
(b) Solo+2,5%Casca



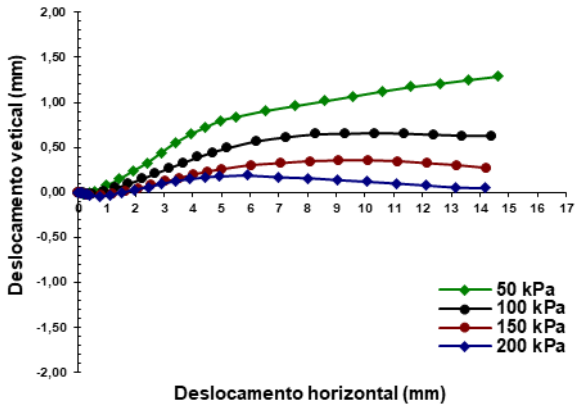
(c) Solo+5%Casca



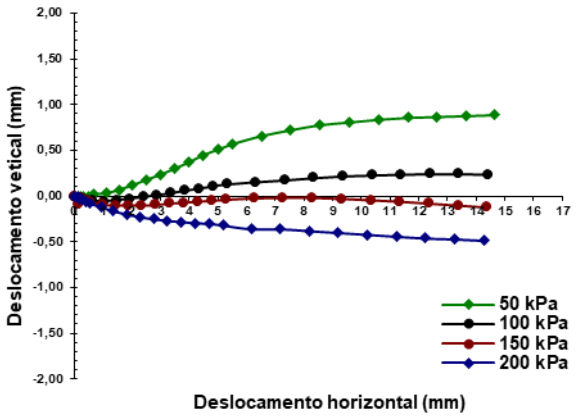
(d) Solo+7,5%Casca



(e) Solo+10%Casca



(f) Solo+12,5%Casca

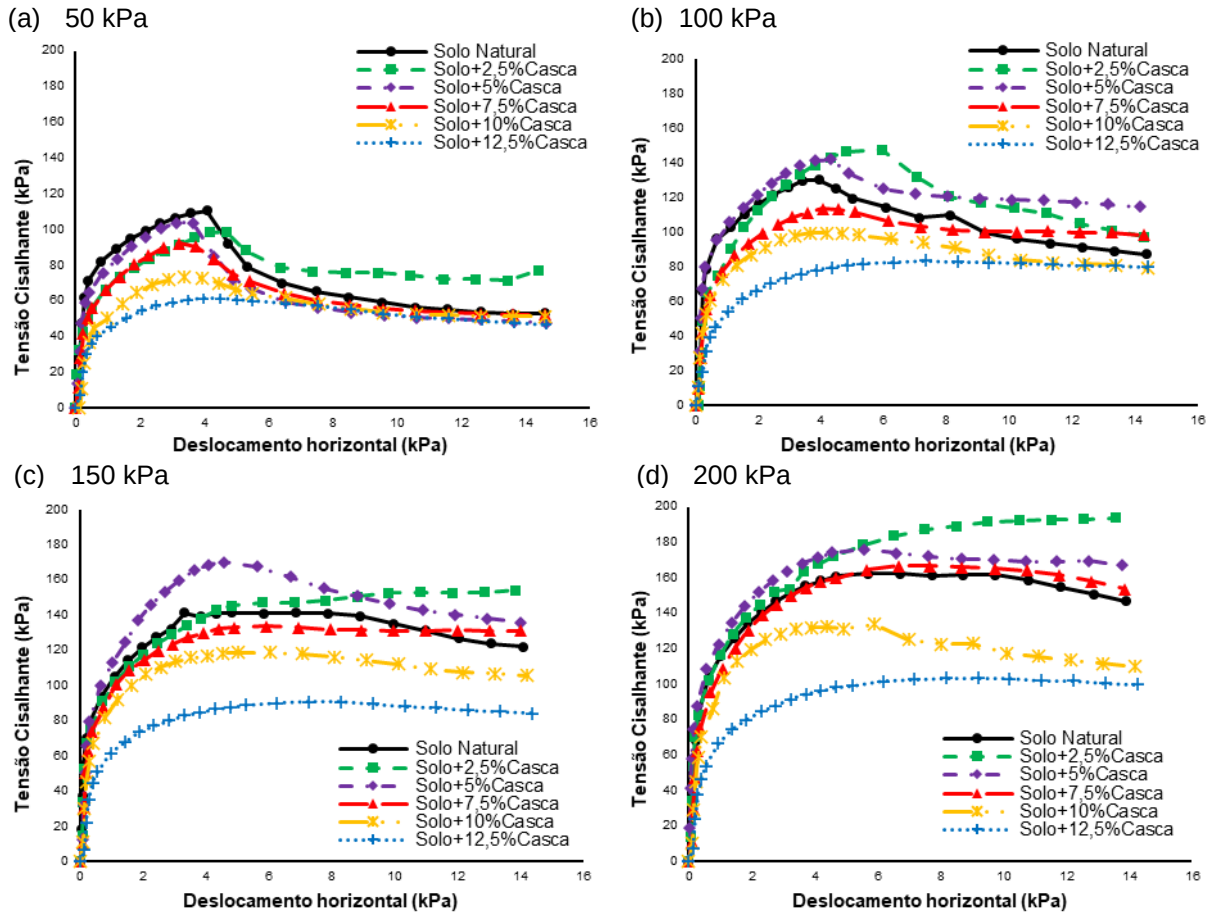


Fonte: A Autora (2023)

Na Figura 57 são apresentadas as curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal agrupadas conforme a tensão aplicada. Nela, nota-se que as misturas solo+2,5% e 5%casca apresentam uma resistência maior que a do solo natural, exceto na tensão de 50 kPa. A diminuição da resistência ao cisalhamento é notada em todas as misturas de solo+10% e 12,5%casca. Isso pode ser explicado pelo aumento, ainda que pequeno, na fração arenosa da mistura, que reduz o entrosamento das partículas argilosas do solo.

Quando comparados ao ensaio de compressão simples e diametral, observa-se que os ensaios de cisalhamento direto apresentam uma semelhança. Para a compressão simples e diametral, o acréscimo no teor das cascas de amêndoa do cacau nas misturas levou a uma queda na resistência. No cisalhamento direto, as misturas também apresentam uma redução na resistência, apesar das misturas solo+2,5% e 5%Casca apresentam um pequeno aumento.

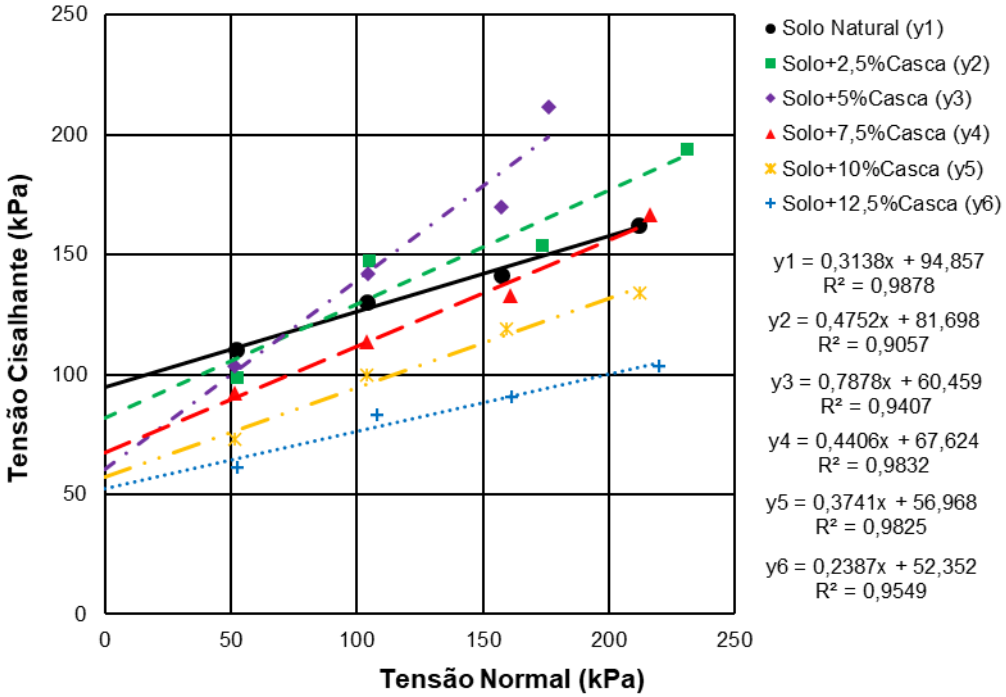
Figura 57 – Curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal nas tensões de 50, 100, 150 e 200 kPa para o solo e misturas



Fonte: A Autora (2023)

Na Figura 58 tem-se as envoltórias de Mohr-Coulomb para tensões cisalhantes máximas, de onde é possível estimar a coesão e o ângulo de atrito. Pela Figura 58, verifica-se que a adição da casca reduz a coesão do material, e de modo geral, aumenta o ângulo de atrito, com exceção da mistura solo+12,5%casca.

Figura 58 – Envoltória de Mohr-Coulomb do solo e das misturas com a casca da amêndoa do cacau



Fonte: A Autora (2023)

A Tabela 21 apresenta os valores das tensões cisalhantes máximas obtidas pela Figura 57, o ângulo de atrito e a coesão, obtidos pela Figura 58.

Tabela 21 – Valores das Tensões Cisalhantes para o solo e as misturas

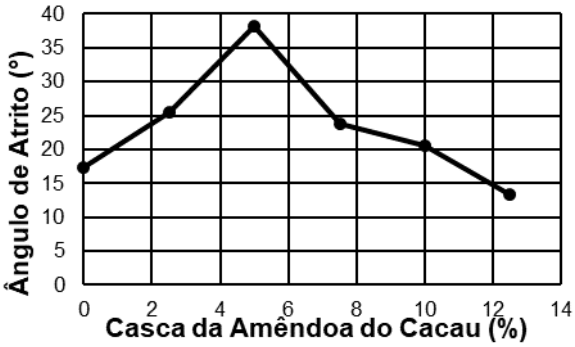
Material	**Tensão Máxima Cisalhante σ (kPa)**				**Ângulo de Atrito (Φ)**	**Coesão c (kPa)**
	50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa		
Solo Natural	110,44	130,11	141,35	162,42	17,42°	90,86
Solo+2,5%Casca	98,60	147,56	153,99	193,65	25,42°	81,70
Sollo+5%Casca	103,76	141,89	169,93	211,60	38,23	60,46
Solo+7,5%Casca	92,33	113,46	132,88	166,74	23,78°	67,62
Solo+10%Casca	72,99	99,51	118,78	133,75	20,51°	56,97
Solo+12,5%Casca	61,42	83,32	90,66	103,27	13,42°	52,35

Fonte: A Autora (2023)

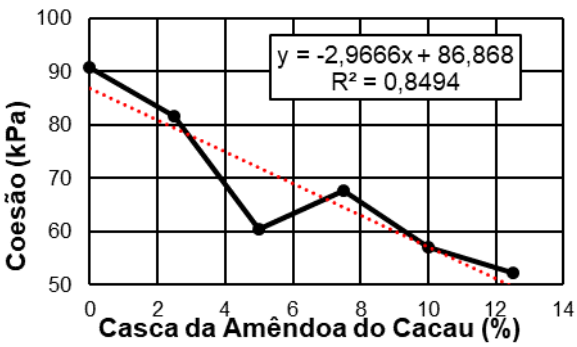
Como pode ser visto na Figura 59, o ângulo de atrito aumenta até a adição de 5% casca, decrescendo gradualmente à medida que esse teor aumenta. Para a redução da coesão, percebe-se que o acréscimo de 5% de casca é o que mais destoa do conjunto, apresentando uma redução na coesão semelhante à mistura com 10% de casca.

Figura 59 – Correlação entre o ângulo de atrito e coesão com os teores adicionados de casca da amêndoa do cacau

(a) Ângulo de Atrito



(b) Coesão



Fonte: A Autora (2023)

4.7 ANÁLISE DA FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FISSURAS

Esse item traz a discussão sobre as análises realizadas com as imagens obtidas no ensaio para avaliar o processo de formação e propagação de fissuras. Serão analisados o tempo de surgimento das primeiras fissuras, e os índices geométricos como: CIF, largura e comprimento das fissuras, número de segmentos e a área fissuradas. Essa análise será realizada para as amostras de solo natural, e suas misturas com a casca da amêndoa do cacau

4.7.1 Análise do início do processo de fissuração

Como o aparecimento das primeiras fissuras depende de diversos fatores, como a umidade inicial, umidade do ar, a Tabela 22 traz os valores da umidade inicial das amostras, limite de liquidez, tempo de aparecimento da primeira fissura e a umidade em que isso ocorreu. Como alguns limites de liquidez do solo e das

misturas apresentam valores distantes, a umidade inicial do ensaio, de 1,4 vezes o LL, também varia bastante. A umidade inicial não é padronizada para que a proporcionalidade de 1,4 x LL pudesse ser mantida, entretanto, no momento de preparação da amostra e adição da água, nota-se que algumas relações obtidas são maiores. Desse modo, na Tabela 22, as misturas de solo+7,5% e 12,5%casca são as que apresentam as maiores umidades iniciais (123,99% e 101,70% respectivamente), enquanto as demais variam de 80 a 90% aproximadamente.

Tabela 22 – Umidade das amostras de solo e misturas no início da fissuração

Material	LL (%)	W_i (%)	Tempo (h)	W_{fi} (%)	$(W_i - W_{fi})/W_i$ (%)
Solo Natural	66,25	89,61	17	60,93	32,01
Solo+2,5%casca	62,05	87,77	16,50	62,60	28,68
Solo+5%casca	58,10	89,94	14,75	65,95	26,67
Solo+7,5%casca	76,10	123,99	9,50	110,77	10,66
Solo+10%casca	59,01	83,12	4,00	77,79	6,41
Solo+12,5%casca	76,25	101,70	10,75	85,98	15,46

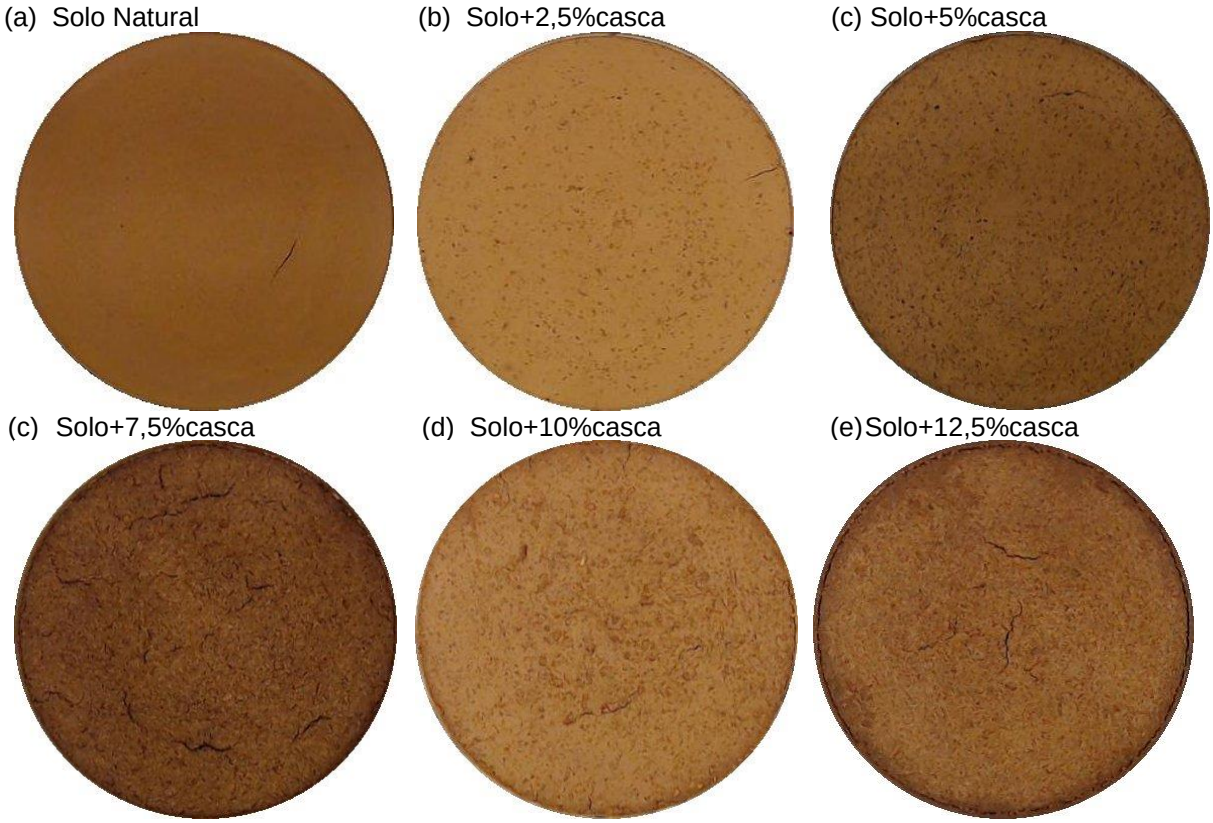
Fonte: A Autora (2023)

A amostra de solo natural é a que leva mais tempo para apresentar a primeira fissura (17h), mesmo que essa amostra não tenha a maior umidade inicial, Tabela 22. Observa-se que o tempo para o aparecimento da primeira fissura diminui com o aumento do teor de casca na mistura (exceto para a mistura de solo+12,5%, que é semelhante à mistura de solo+7,5%casca). Assim, o solo natural é a amostra que mais perde umidade antes de apresentar a primeira fissura (32,01%) e a mistura de solo+10%casca é a que menos perde umidade antes do aparecimento da primeira fissura (6,41%). Importante ressaltar que essa é a mistura com menor umidade inicial.

As demais misturas, solo+2,5%, 5%, 7,5% e 12,5%casca, perdem 28,68%, 26,67%, 10,66% e 15,46%, respectivamente. Desse modo, até a adição de 5% de casca da amêndoa a perda de água é relativamente próxima à do solo, principalmente quando comparada com a perda das misturas de solo+7,5% e 12,5%casca.

A Figura 60 mostra o estado dos corpos de prova no momento de aparição das primeiras fissuras. Pode-se notar que o solo natural e as misturas de solo+2,5% e 5% casca apresentam um único segmento de fissuração inicialmente. Já as misturas de solo+7,5%, 10% e 12,5% casca apresentam vários pequenos segmentos de fissuração ao mesmo tempo. Assim, pelos dados e pelo número de segmentos que aparecem no momento inicial, pode-se afirmar que adição da casca da amêndoa do cacau favorece o aparecimento de fissuras com a perda de umidade em um tempo menor que o solo natural.

Figura 60 – Primeiras fissuras nas amostras ensaiadas de solo e misturas



Fonte: A Autora (2023)

4.7.2 Análise da propagação de fissuras

4.7.2.1 Solo Natural

A sequência de imagens apresentada na Figura 61 mostra o aparecimento e a evolução das fissuras ao longo do ensaio, que teve duração de 48 horas. É observado inicialmente a contração do solo nas bordas da placa e posteriormente o surgimento das primeiras fissuras do centro para as bordas.

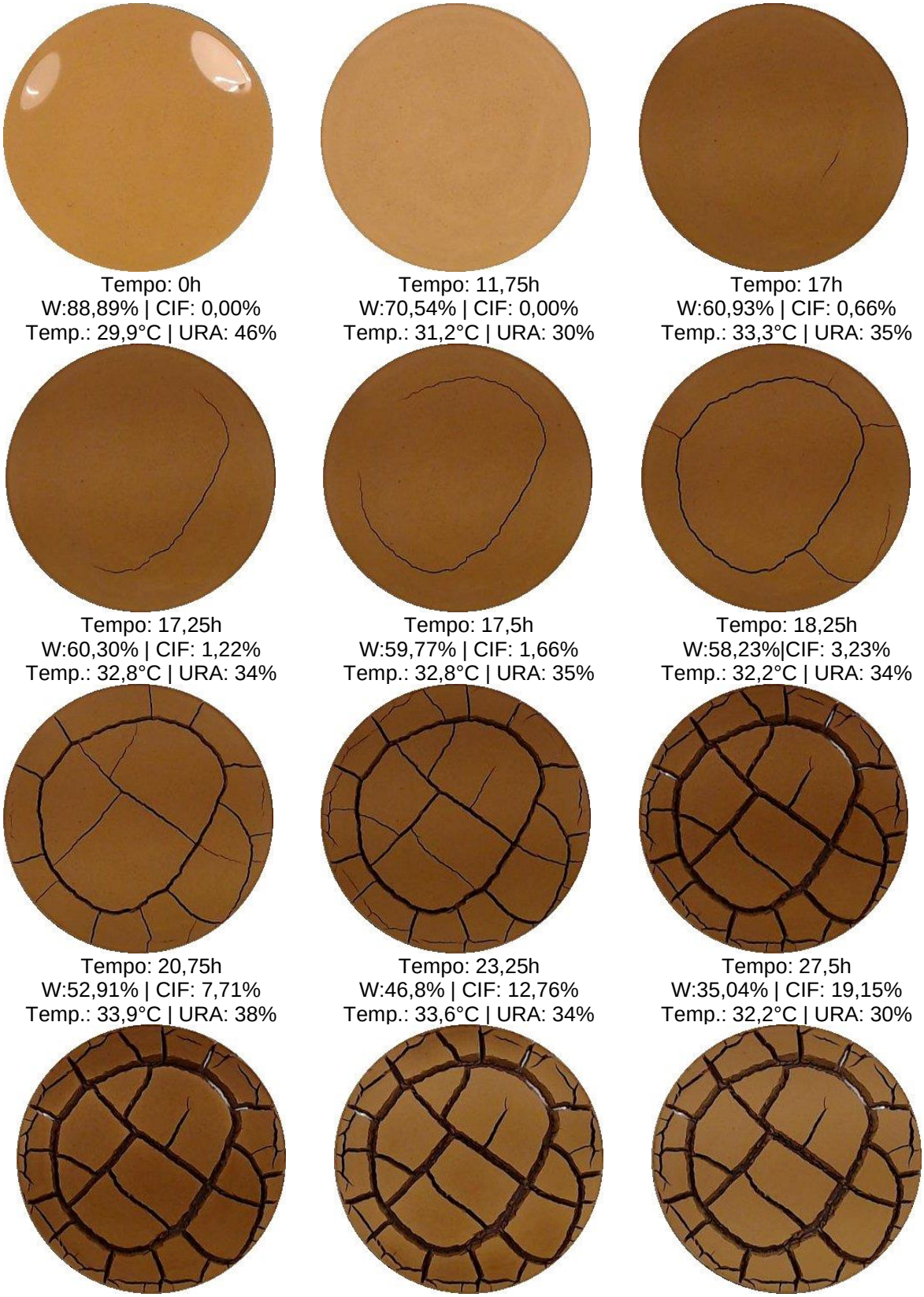
Considerando o início da fissuração às 17 horas do início do ensaio, e que em 27,5 horas não se observa mais o desenvolvimento de fissuras, pode-se afirmar que o processo de fissuração por ressecamento da amostra de solo natural tem duração de 10,5 horas, um tempo semelhante ao encontrado por Faustino (2021) de 9,3 horas e Bezerra (2020) de 8,3 horas. Conforme a umidade da amostra reduz, ocorre a formação e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo, principalmente nas regiões próximas à borda da placa petri. A temperatura média do ensaio é 31,52 °C e a média da umidade relativa do ar (URA) é de 34%.

A Figura 62 traz a relação entre a umidade da amostra e o tempo decorrido de ensaio em escala aritmética. Consegue-se dividir a curva em três trechos principais de perda de umidade. O primeiro e segundo trecho apresentam uma perda de umidade de 1,76%/h e 2,61%/h respectivamente. O terceiro trecho apresenta uma perda de umidade na taxa de 0,5%/h. Assim, pode-se afirmar que a perda de água não ocorre de forma linear com o tempo e tende à estabilização em aproximadamente 3,03% de umidade. A umidade de estabilização corresponde à umidade residual.

Na Figura 63 é apresentada a variação do CIF conforme a redução da umidade. Nesta curva pode-se observar que o CIF aumenta de forma não linear conforme a perda de umidade e após a umidade de 10,47% tende à estabilização.

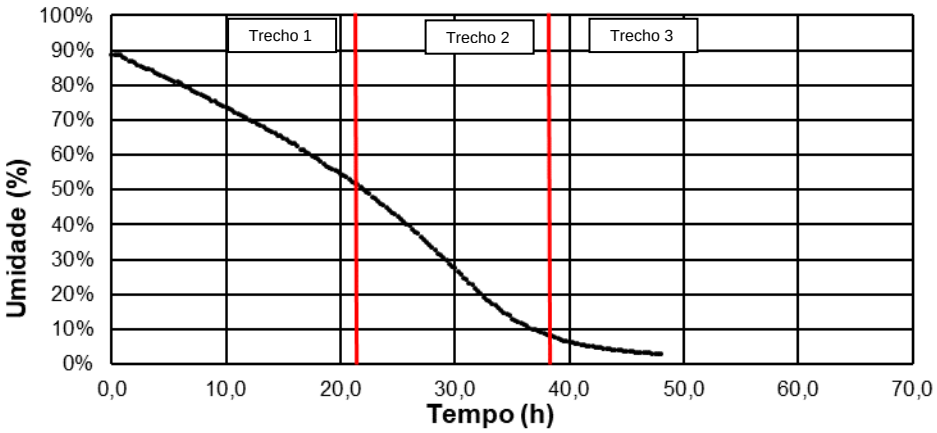
Na Figura 64 é mostrada a variação dos índices geométricos (CIF, comprimento total, largura média, número de segmentos de fissuras e área fissurada) segundo a perda de água. Nessas curvas percebe-se a tendência a uniformização dos índices após determinados pontos de umidade. O comportamento do solo é semelhante ao encontrado por Bezerra (2020) e Araújo (2020), autores que também estudaram o solo de Paulista-PE.

Figura 61 – Evolução das fissuras no ensaio da amostra de solo natural



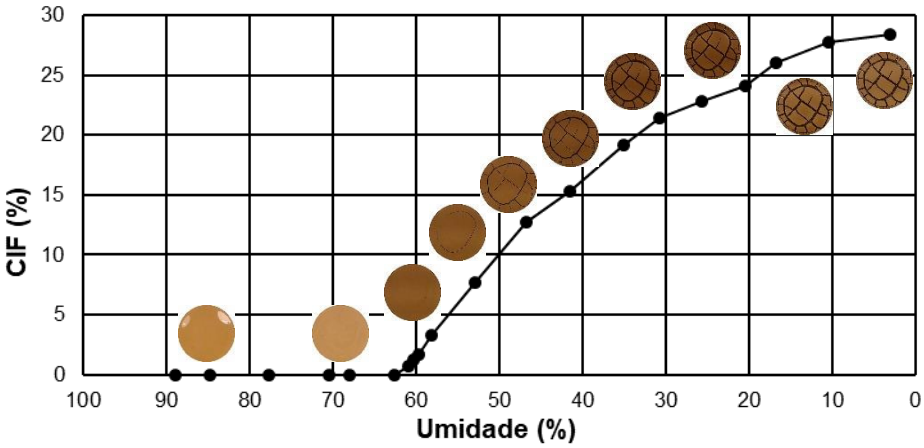
Fonte: A Autora (2023)

Figura 62 – Relação entre umidade e tempo para a amostra de solo natural



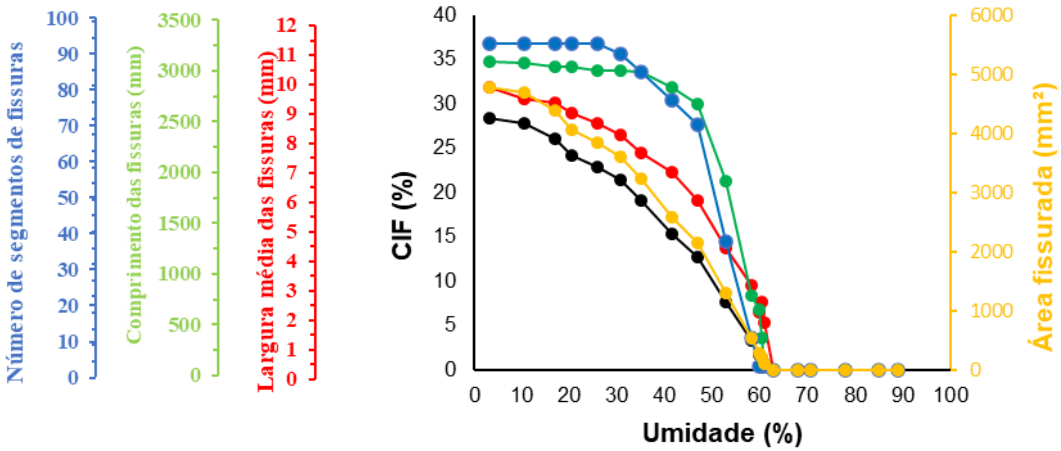
Fonte: A Autora (2023)

Figura 63 – Relação entre CIF e umidade da amostra de solo natural



Fonte: A Autora (2023)

Figura 64 – Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração para o solo natural



Fonte: A Autora (2023)

4.7.2.2 Solo + 2,5% casca

A sequência de imagens apresentada na Figura 65 mostra o aparecimento e a evolução das fissuras ao longo do ensaio, que teve duração de 46,05 horas. É observado inicialmente a contração do solo nas bordas da placa e posteriormente o surgimento das primeiras fissuras do centro para as bordas.

Considerando o início da fissuração às 16,5 horas do início do ensaio, e que em 28,5 horas não se observa mais o desenvolvimento de fissuras, pode-se afirmar que o processo de fissuração por ressecamento da amostra de solo+2,5%casca tem duração de 12 horas, um tempo pouco maior que o da amostra de solo natural. Conforme a umidade da amostra reduz, ocorre a formação e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo, principalmente nas regiões próximas à borda da placa petri. A temperatura média do ensaio é de 32,31 °C e a média da URA é de 33,25%, médias próximas às obtidas para o solo natural.

Na Figura 66 tem-se a relação entre a umidade da amostra e o tempo decorrido de ensaio em escala aritmética. Consegue-se dividir a curva em três trechos principais de perda de umidade. O primeiro e segundo trecho apresentam uma perda de umidade de 1,67%/h e 2,50%/h respectivamente. O terceiro trecho apresenta uma perda de umidade na taxa de 1%/h. Assim, pode-se afirmar que a perda de água não ocorre de forma linear com o tempo, e tende à estabilização em aproximadamente 2,95% de umidade. A umidade de estabilização corresponde à umidade residual.

Na Figura 67 é apresentada a variação do CIF conforme a redução da umidade. Nesta curva pode-se observar que o CIF aumenta de forma não linear conforme a perda de umidade e após a umidade de 16,76% tende à estabilização.

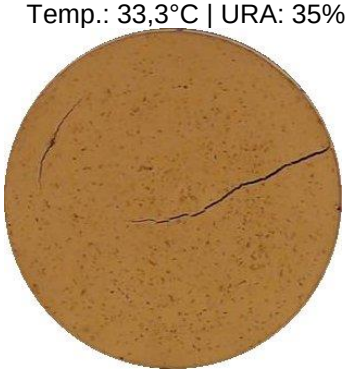
Nas curvas de variação dos índices geométricos (CIF, comprimento total, largura média, número de segmentos de fissuras e área fissurada) segundo a perda de água percebe-se a tendência a uniformização do número de segmentos e do comprimento das fissuras, enquanto os demais índices passam por uma estabilização e sofrem um aumento no último ponto (Figura 68).

Figura 65 – Evolução das fissuras no ensaio da mistura de solo+2,5%casca

Tempo: 2,25h
W:84,79% | CIF: 0,00%
Temp.: 33,3°C | URA: 35%

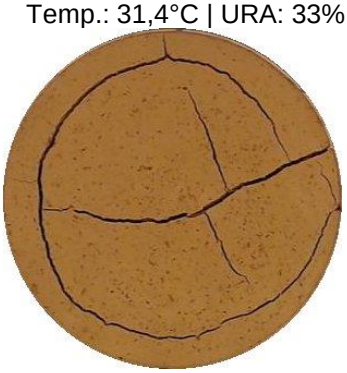
Tempo: 11,75h
W:70,44% | CIF: 0,00%
Temp.: 31,2°C | URA: 31%

Tempo: 16,5h
W:62,60% | CIF: 0,10%
Temp.: 31,4°C | URA: 33%



Tempo: 17,5h
W:60,99% | CIF: 0,57%
Temp.: 32,8°C | URA: 36%

Tempo: 19h
W:58,1% | CIF: 2,27%
Temp.: 33,0°C | URA: 37%



Tempo: 19,75h
W:56,48%|CIF: 3,26%
Temp.: 32,5°C | URA: 33%

Tempo: 21,5h
W:52,95% | CIF: 8,76%
Temp.: 32,5°C | URA: 34%

Tempo: 22,25h
W:51,39% | CIF: 9,67%
Temp.: 33,3°C | URA: 34%

Tempo: 24,25h
W:46,55% | CIF: 13,94%
Temp.: 32,2°C | URA: 33%

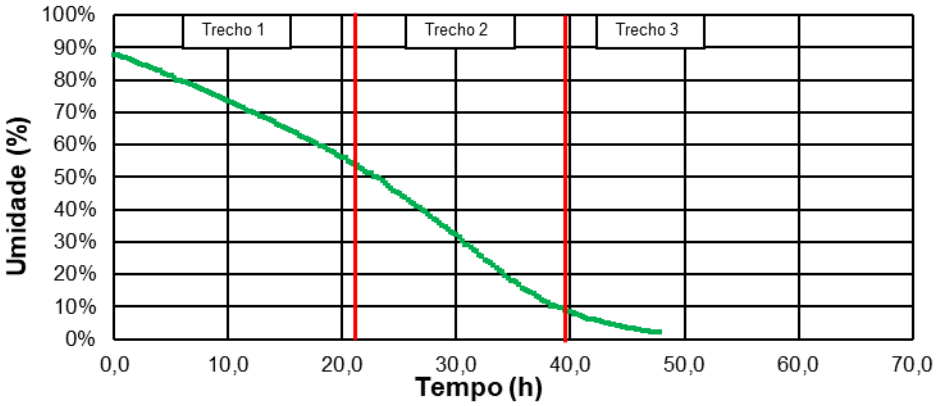
Tempo: 28,5h
W:35,74% | CIF: 20,11%
Temp.: 32,0°C | URA: 32%

Tempo: 35,5h
W:16,76% | CIF: 25,76%
Temp.: 30,5°C | URA: 28%

Tempo: 46,05h
W:2,95% | CIF: 28,90%
Temp.: 33,0°C | URA: 33%

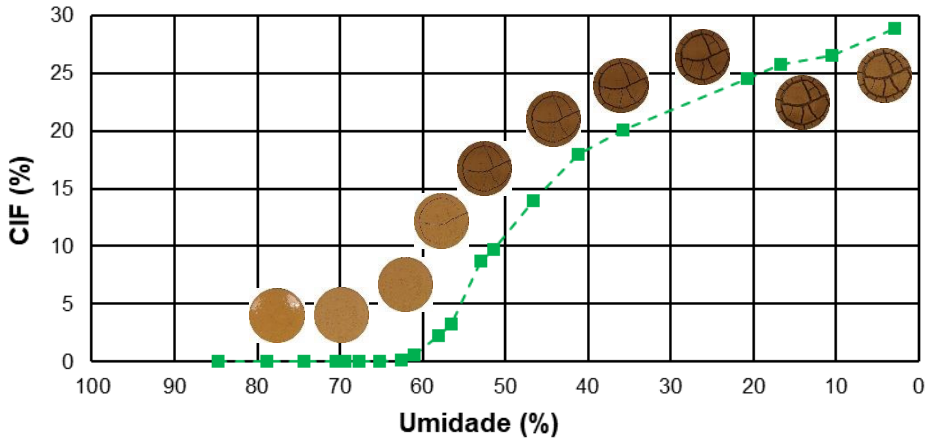
Fonte: A Autora (2023)

Figura 66 – Relação entre umidade e tempo para a amostra de solo+2,5%casca



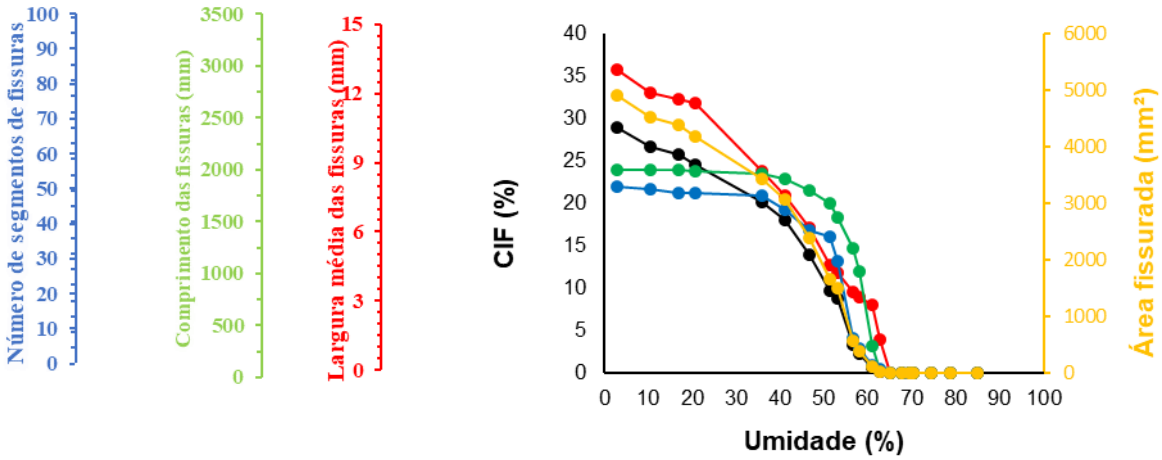
Fonte: A Autora (2023)

Figura 67 – Relação entre CIF e a umidade para a mistura de solo+2,5%casca



Fonte: A Autora (2023)

Figura 68 – Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração da mistura de solo+2,5%casca



Fonte: A Autora (2023)

4.7.2.3 Solo + 5% casca

A sequência de imagens apresentada na Figura 69 mostra o aparecimento e a evolução das fissuras ao longo do ensaio, que teve duração de 47,25 horas. É observado inicialmente a contração do solo nas bordas da placa e posteriormente o surgimento das primeiras fissuras do centro para as bordas.

Considerando o início da fissuração às 14,75 horas do início do ensaio, e que em 32,75 horas não se observa mais o desenvolvimento de fissuras, pode-se afirmar que o processo de fissuração por ressecamento da amostra de solo+5%casca tem duração de 18 horas. Conforme a umidade da amostra reduz, ocorre a formação e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo, principalmente nas regiões próximas à borda da placa petri. A temperatura média do ensaio é de 33,48 °C e a média da URA é de 36%, médias um pouco mais elevadas que o solo natural e a mistura de solo+2,5%casca.

Na Figura 70 tem-se a relação entre a umidade da amostra e o tempo decorrido de ensaio em escala aritmética. Consegue-se dividir a curva em três trechos principais de perda de umidade. O primeiro e segundo trecho apresentam uma perda de umidade de 1,67%/h e 2,19%/h respectivamente. O terceiro trecho apresenta uma perda de umidade na taxa de 1,62%/h. Assim, pode-se afirmar que a perda de água não ocorre de forma linear com o tempo, e tende à estabilização em aproximadamente 3,26% de umidade. A umidade de estabilização corresponde à umidade residual.

Na Figura 71 é apresentada a variação do CIF conforme a redução da umidade. Nesta curva pode-se observar que o CIF aumenta de forma não linear conforme a perda de umidade e após a umidade de 29,74% começa o processo de estabilização, tendo um aumento significativo no último ponto analisado.

Nas curvas de variação dos índices geométricos (CIF, comprimento total, largura média, número de segmentos de fissuras e área fissurada) segundo a perda de água percebe-se a tendência a uniformização do número de segmentos e do comprimento das fissuras, enquanto os demais índices passam por uma estabilização e sofrem um aumento no último ponto (Figura 72).

Figura 69 – Evolução das fissuras no ensaio da mistura de solo+5%casca

Tempo: 3,75h
W:84,70% | CIF: 0,00%
Temp.: 36,1°C | URA: 36%

Tempo: 10,50h
W:73,23% | CIF: 0,00%
Temp.: 34,8°C | URA: 34%

Tempo: 14,75h
W:65,95% | CIF: 0,32%
Temp.: 32,2°C | URA: 38%

Tempo: 15,75h
W:64,51% | CIF: 1,60%
Temp.: 32,3°C | URA: 39%

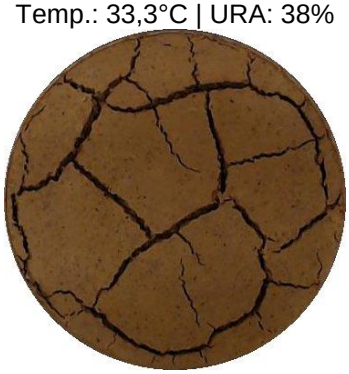
Tempo: 16,75h
W:62,83% | CIF: 3,94%
Temp.: 32,0°C | URA: 38%

Tempo: 17,75h
W:61,19%|CIF: 5,23%
Temp.: 31,8°C | URA: 38%

Tempo: 19,5h
W:58,29% | CIF: 5,70%
Temp.: 33,3°C | URA: 38%

Tempo: 20,5h
W:56,38% | CIF: 7,08%
Temp.: 33,5°C | URA: 38%

Tempo: 22,5h
W:52,43% | CIF: 9,25%
Temp.: 34,2°C | URA: 38%



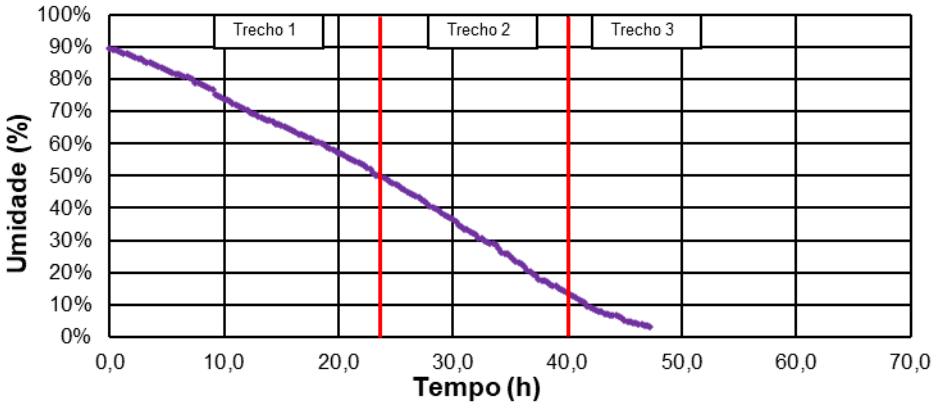
Tempo: 26,5h
W:44,09% | CIF: 12,38%
Temp.: 32,0°C | URA: 32%

Tempo: 32,75h
W:29,74% | CIF: 17,20%
Temp.: 30,9°C | URA: 32%

Tempo: 47,25h
W:3,26% | CIF: 25,19%
Temp.: 38,7°C | URA: 31%

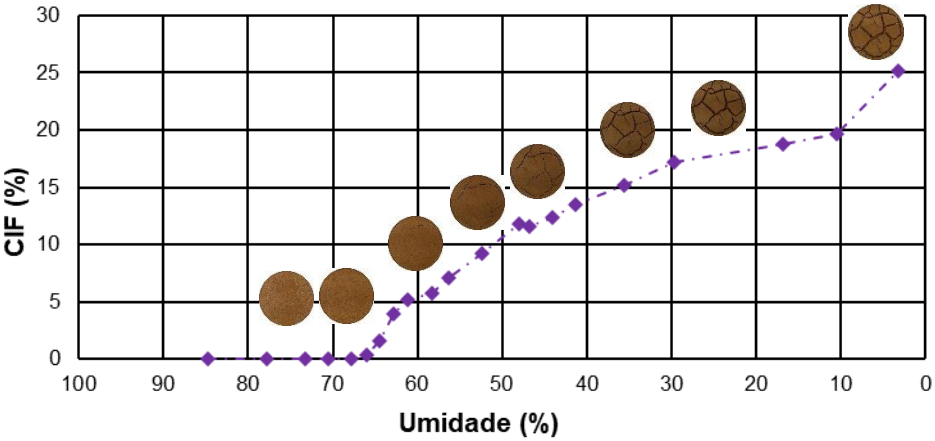
Fonte: A Autora (2023)

Figura 70 – Relação da umidade com tempo para a mistura de solo+5%casca



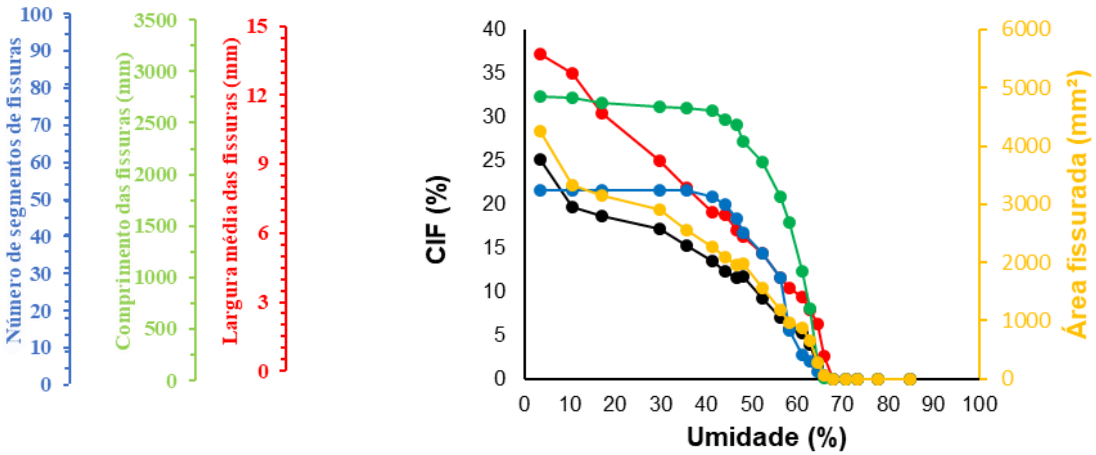
Fonte: A Autora (2023)

Figura 71 – Relação do CIF com a umidade para a mistura de solo+5%casca



Fonte: A autora (2023)

Figura 72 – Evolução quantitativa dos índices geométricos para a mistura de solo+5%casca



Fonte: A Autora (2023)

4.7.2.4 Solo + 7,5% casca

A sequência de imagens apresentada na Figura 73 mostra o aparecimento e a evolução das fissuras ao longo do ensaio, que teve duração de 54,25 horas. É observado inicialmente a contração do solo nas bordas da placa e posteriormente o surgimento das primeiras fissuras do centro para as bordas. Diferentemente das demais apresentadas, essa mistura apresenta diversos pontos de fissuração simultaneamente, enquanto as outras até então apresentam um único ponto isolado.

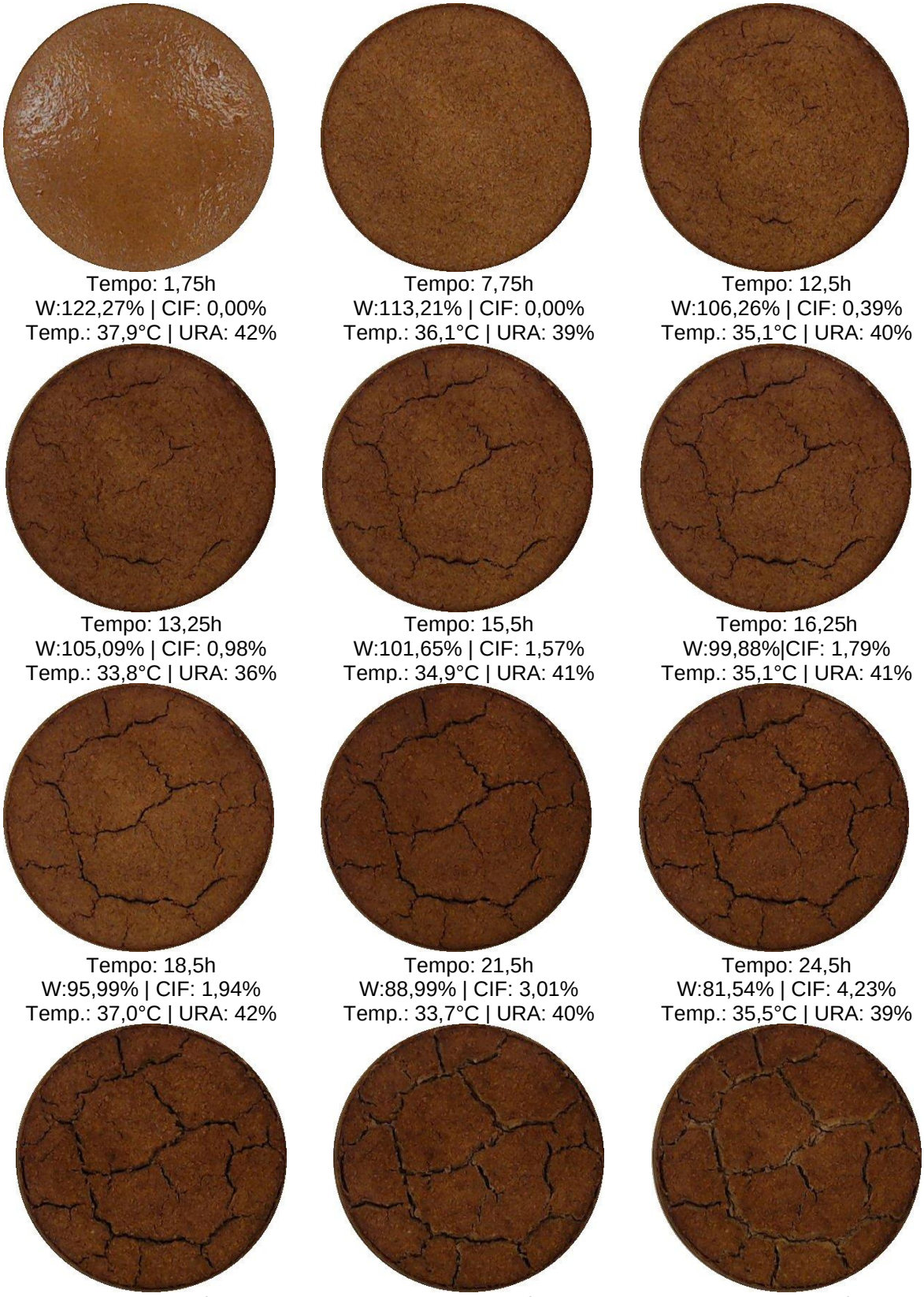
Considerando o início da fissuração às 12,50 horas do início do ensaio, e que em 21,50 horas não se observa mais o desenvolvimento de fissuras, pode-se afirmar que o processo de fissuração por ressecamento da amostra de solo+7,5%casca tem duração de 9 horas. Conforme a umidade da amostra reduz, ocorre a formação e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo, principalmente nas regiões próximas à borda da placa petri. A temperatura média do ensaio é de 35,67 °C e a média da URA é de 37,08%, médias um pouco mais elevadas que as demais já apresentadas.

Na Figura 74 tem-se a relação entre a umidade da amostra e o tempo decorrido de ensaio em escala aritmética. Consegue-se dividir a curva em três trechos principais de perda de umidade. O primeiro e segundo trecho apresentam uma perda de umidade de 1,60%/h e 3,03%/h respectivamente. O terceiro trecho apresenta uma perda de umidade na taxa de 0,29%/h. Assim, pode-se afirmar que a perda de água não ocorre de forma linear com o tempo, e tende à estabilização em aproximadamente 3,16% de umidade. A umidade de estabilização corresponde à umidade residual.

Na Figura 75 é apresentada a variação do CIF conforme a redução da umidade. Nesta curva pode-se observar que o CIF aumenta de forma não linear conforme a perda de umidade e após a umidade de 73,22% começa o processo de estabilização, tendo um aumento significativo no último ponto analisado.

Nas curvas de variação dos índices geométricos (CIF, comprimento total, largura média, número de segmentos de fissuras e área fissurada) segundo a perda de água (Figura 76) percebe-se a tendência a uniformização do número de segmentos e do comprimento das fissuras, enquanto os demais índices passam por uma estabilização e sofrem um aumento no último ponto.

Figura 73 – Evolução das fissuras no ensaio da mistura de solo+7,5%casca



Tempo: 1,75h
W:122,27% | CIF: 0,00%
Temp.: 37,9°C | URA: 42%

Tempo: 7,75h
W:113,21% | CIF: 0,00%
Temp.: 36,1°C | URA: 39%

Tempo: 12,5h
W:106,26% | CIF: 0,39%
Temp.: 35,1°C | URA: 40%

Tempo: 13,25h
W:105,09% | CIF: 0,98%
Temp.: 33,8°C | URA: 36%

Tempo: 15,5h
W:101,65% | CIF: 1,57%
Temp.: 34,9°C | URA: 41%

Tempo: 16,25h
W:99,88%|CIF: 1,79%
Temp.: 35,1°C | URA: 41%

Tempo: 18,5h
W:95,99% | CIF: 1,94%
Temp.: 37,0°C | URA: 42%

Tempo: 21,5h
W:88,99% | CIF: 3,01%
Temp.: 33,7°C | URA: 40%

Tempo: 24,5h
W:81,54% | CIF: 4,23%
Temp.: 35,5°C | URA: 39%

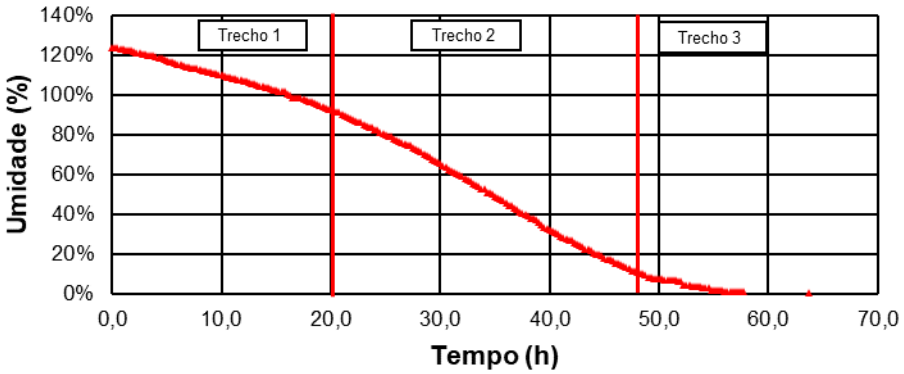
Tempo: 29,5h
W:67,12% | CIF: 5,63%
Temp.: 37,5°C | URA: 32%

Tempo: 39,25h
W:35,04% | CIF: 6,53%
Temp.: 36,0°C | URA: 28%

Tempo: 54,25h
W:3,16% | CIF: 7,55%
Temp.: 35,4°C | URA: 25%

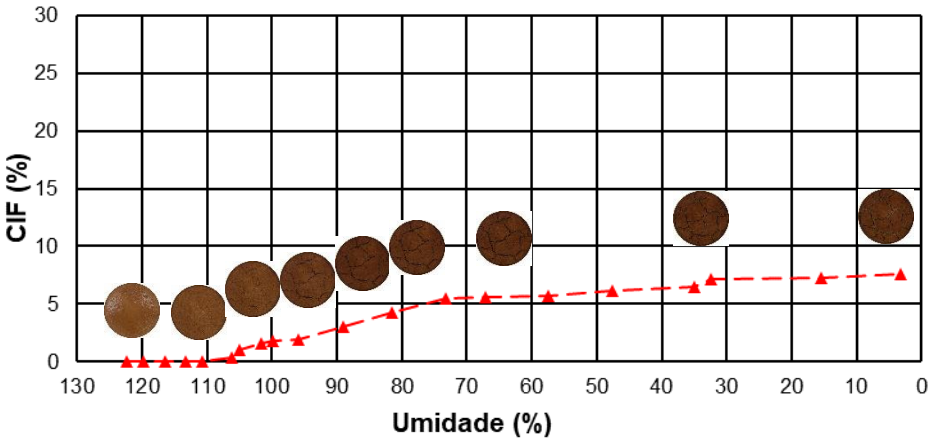
Fonte: A Autora (2023)

Figura 74 – Relação entre umidade e tempo para amostra de solo+7,5%casca



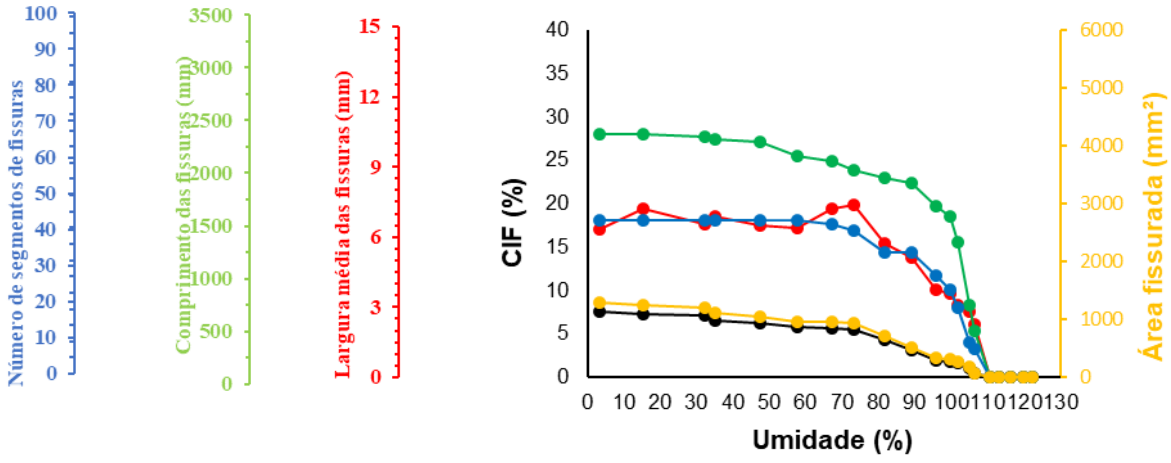
Fonte: A Autora (2023)

Figura 75 – Relação entre o CIF e a umidade para a amostra de solo+7,5%casca



Fonte: A Autora (2023)

Figura 76 – Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração da mistura de solo+7,5%casca



Fonte: A Autora (2023)

4.7.2.5 Solo + 10% casca

A sequência de imagens apresentada na Figura 77 mostra o aparecimento e a evolução das fissuras ao longo do ensaio, que teve duração de 36,5 horas. É observado inicialmente a contração do solo nas bordas da placa e posteriormente o surgimento das primeiras fissuras do centro para as bordas. Assim como a mistura de solo+7,5%casca, essa mistura apresentou diversos pontos de fissuração simultaneamente.

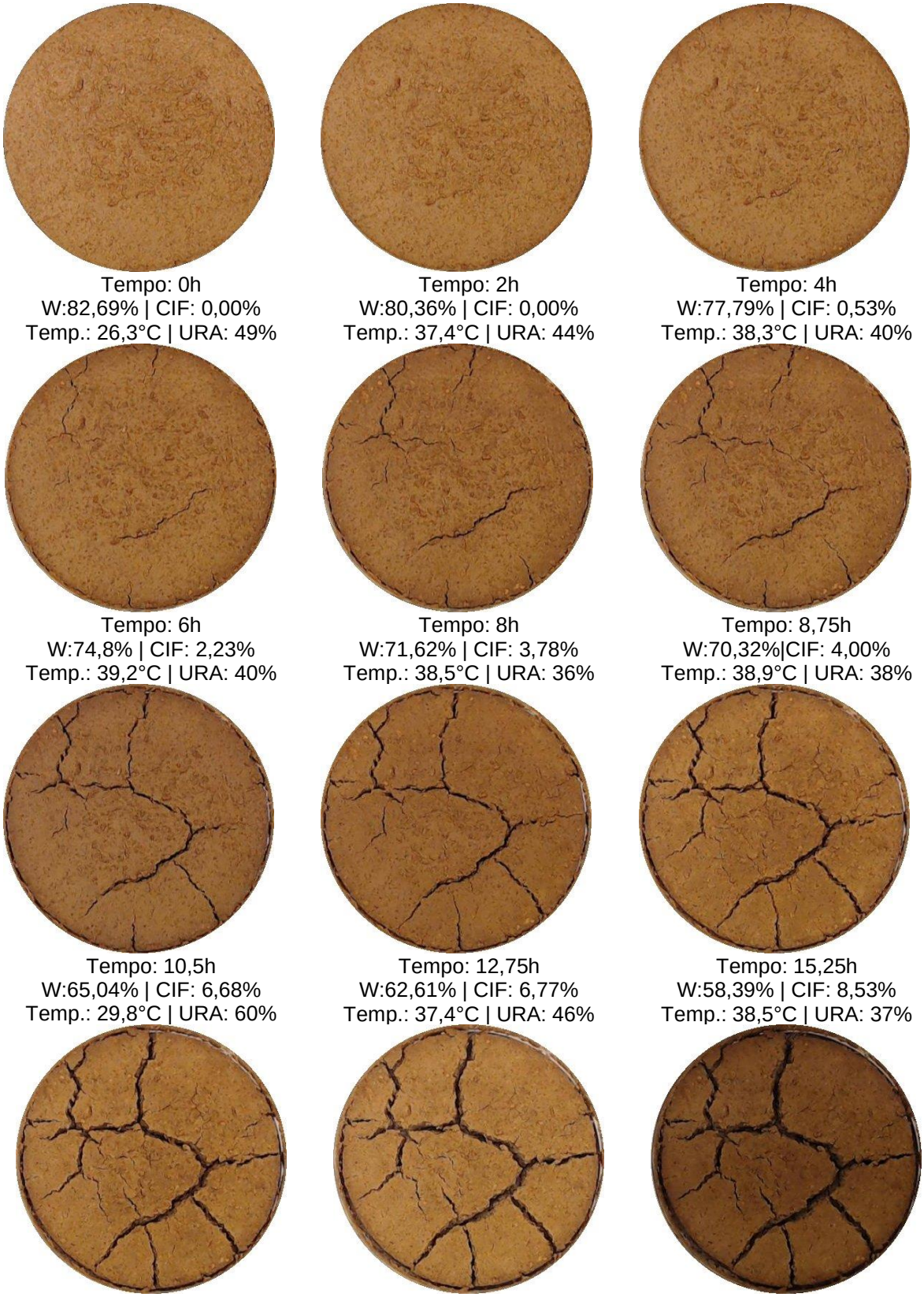
Considerando o início da fissuração às 4 horas do início do ensaio, e que em 15,25 horas se observa mais o desenvolvimento de fissuras, pode-se afirmar que o processo de fissuração por ressecamento da amostra de solo+10%casca tem duração de 11,25 horas. Conforme a umidade da amostra reduz, ocorre a formação e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo. A temperatura média do ensaio é de 36,18 °C e a média da URA é de 39,67%, médias ainda mais elevadas que as já apresentadas.

Na Figura 78 tem-se a relação entre a umidade da amostra e o tempo decorrido de ensaio em escala aritmética. Consegue-se dividir a curva em dois trechos principais de perda de umidade. O primeiro trecho apresenta uma perda de umidade de 1,82%/h e o terceiro trecho apresenta uma perda de umidade na taxa de 1,48%/h. Assim, pode-se afirmar que a perda de água não ocorre de forma linear com o tempo, e tende à estabilização em aproximadamente 19,76% de umidade. A umidade de estabilização corresponde à umidade residual.

Cabe ressaltar que durante a realização deste ensaio houve queda de energia, motivo pelo qual não houve leituras em determinados pontos e provavelmente o motivo pelo qual a umidade residual desta amostra tenha sido mais elevada que as demais.

Na curva de variação do CIF conforme a redução da umidade pode-se observar que o CIF aumenta de forma não linear conforme a perda de umidade e após a umidade de 50,55% começa o processo de estabilização (Figura 79). Por sua vez, as curvas que mostram a variação dos índices geométricos (CIF, comprimento total, largura média, número de segmentos de fissuras e área fissurada) segundo a perda de água, percebe-se a tendência a uniformização dos índices geométricos (Figura 80).

Figura 77 – Evolução das fissuras no ensaio da mistura de solo+10%casca



Tempo: 0h
W:82,69% | CIF: 0,00%
Temp.: 26,3°C | URA: 49%

Tempo: 2h
W:80,36% | CIF: 0,00%
Temp.: 37,4°C | URA: 44%

Tempo: 4h
W:77,79% | CIF: 0,53%
Temp.: 38,3°C | URA: 40%

Tempo: 6h
W:74,8% | CIF: 2,23%
Temp.: 39,2°C | URA: 40%

Tempo: 8h
W:71,62% | CIF: 3,78%
Temp.: 38,5°C | URA: 36%

Tempo: 8,75h
W:70,32%|CIF: 4,00%
Temp.: 38,9°C | URA: 38%

Tempo: 10,5h
W:65,04% | CIF: 6,68%
Temp.: 29,8°C | URA: 60%

Tempo: 12,75h
W:62,61% | CIF: 6,77%
Temp.: 37,4°C | URA: 46%

Tempo: 15,25h
W:58,39% | CIF: 8,53%
Temp.: 38,5°C | URA: 37%

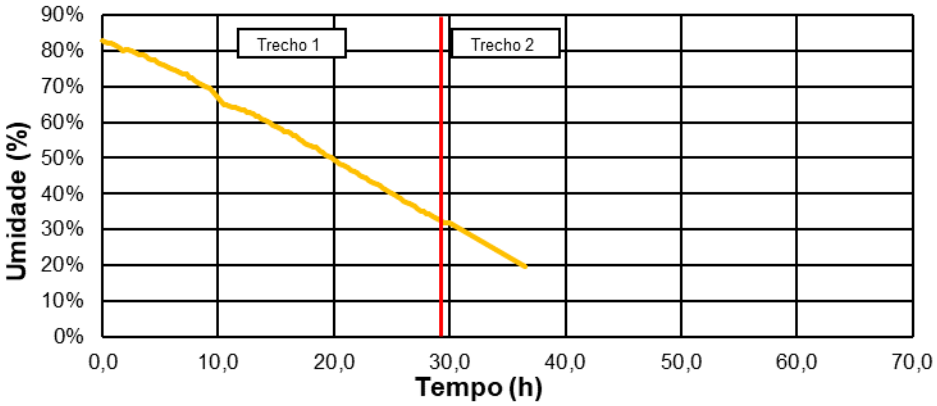
Tempo: 19,5h
W:50,55% | CIF: 13,21%
Temp.: 39,4°C | URA: 34%

Tempo: 30,25h
W:31,4% | CIF: 14,53%
Temp.: 36,1°C | URA: 27%

Tempo: 36,5h
W:19,76% | CIF: 15,28%
Temp.: 34,4°C | URA: 25%

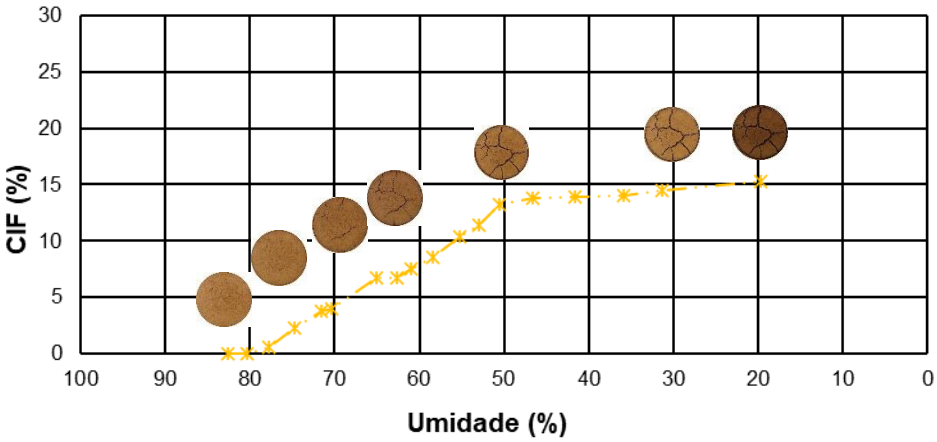
Fonte: A Autora (2023)

Figura 78 – Relação entre umidade e tempo para a mistura de solo+10%casca



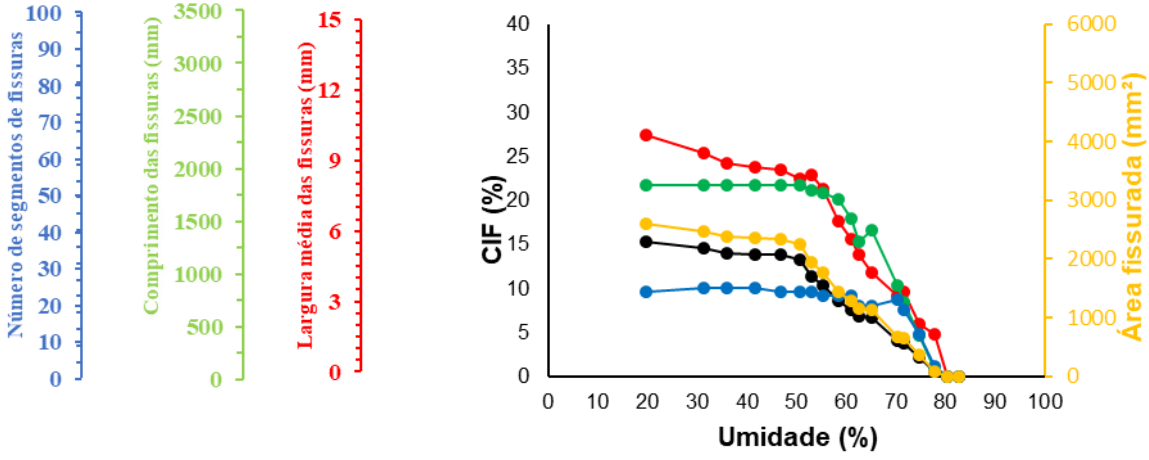
Fonte: A Autora (2023)

Figura 79 – Relação entre CIF e umidade para a amostra de solo+10%casca



Fonte: A Autora (2023)

Figura 80 – Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração para a mistura de solo+10%casca



Fonte: A Autora (2023)

4.7.2.6 Solo + 12,5% casca

A sequência de imagens apresentada na Figura 81 mostra o aparecimento e a evolução das fissuras ao longo do ensaio, que teve duração de 51,25 horas. É observado inicialmente a contração do solo nas bordas da placa e posteriormente o surgimento das primeiras fissuras do centro para as bordas. Assim como as misturas de solo+7,5% e 10% casca, a mistura com 12,5%casca apresenta vários segmentos de fissuras no momento inicial da fissuração.

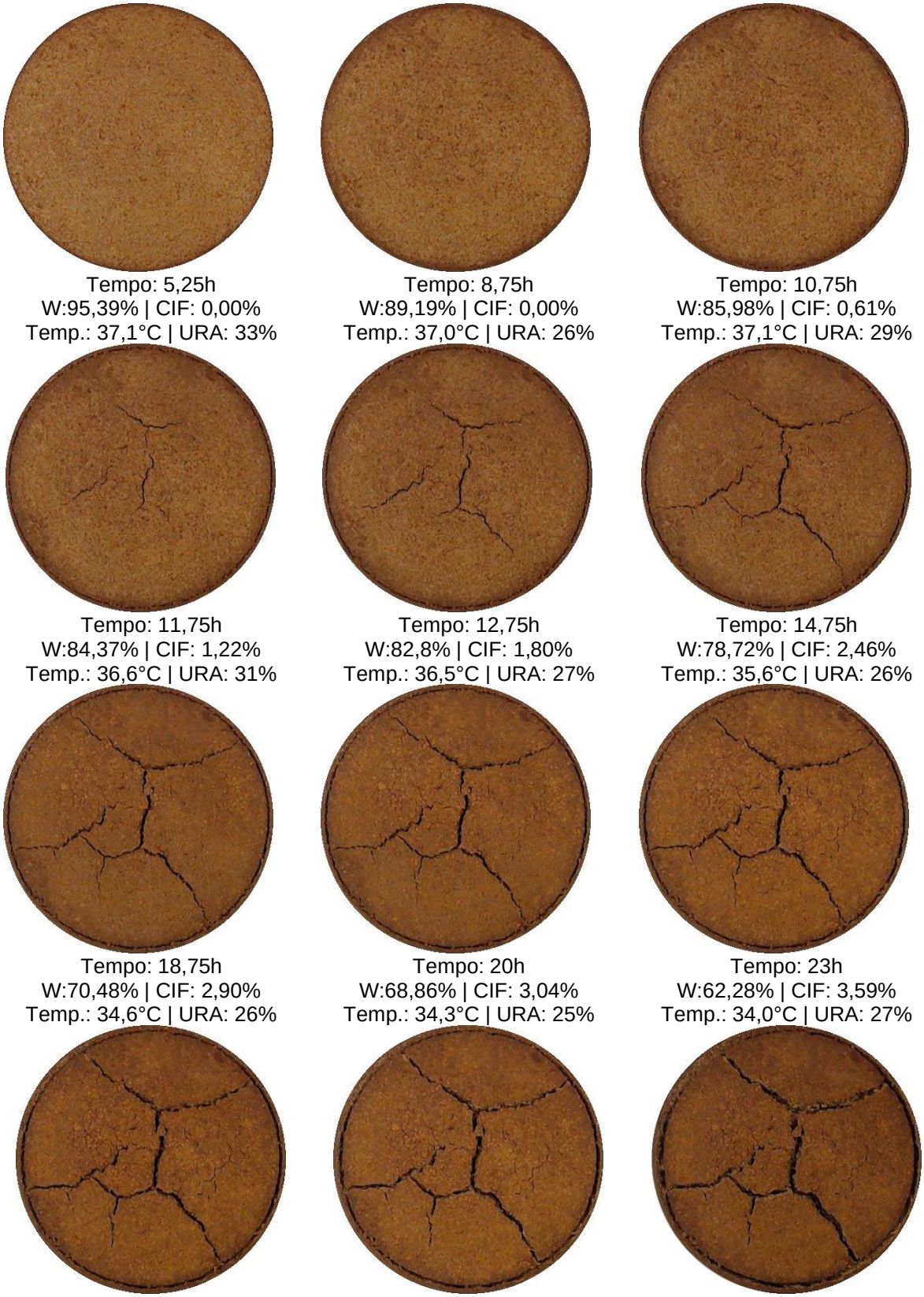
Considerando o início da fissuração às 10,75 horas do início do ensaio, e que em 20 horas se observa mais o desenvolvimento de fissuras, pode-se afirmar que o processo de fissuração por ressecamento da amostra de solo+12,5%casca tem duração de 9,25 horas. Conforme a umidade da amostra reduz, ocorre a formação e propagação de fissuras secundárias principalmente na região central da amostra. A temperatura média do ensaio é de 35,72 °C e a média da umidade relativa do ar é de 27,5%. A média da temperatura é semelhante aos demais ensaios, enquanto a média da URA é a mais baixa obtida nos ensaios.

Na Figura 82 tem-se a relação entre a umidade da amostra e o tempo decorrido de ensaio em escala aritmética. Consegue-se dividir a curva em três trechos principais de perda de umidade. O primeiro e segundo trecho apresentam uma perda de umidade de 1%/h e 1,91%/h respectivamente. O terceiro trecho apresenta uma perda de umidade na taxa de 0,63%/h. Assim, pode-se afirmar que a perda de água não ocorre de forma linear com o tempo, e tende à estabilização em aproximadamente 6,84% de umidade, a umidade residual

Na Figura 83 é apresentada a curva da variação do CIF conforme a redução da umidade. Pode-se observar que o CIF aumenta de forma não linear conforme a perda de umidade e após a umidade de 78,72% começou o processo de estabilização. Com a perda de umidade o CIF aumenta de forma mais lenta e se estabiliza novamente na umidade de 50,96%.

Nas curvas de variação dos índices geométricos (CIF, comprimento total, largura média, número de segmentos de fissuras e área fissurada) segundo a perda de água percebe-se a tendência a uniformização índices geométricos, sendo que a largura das fissuras estabiliza e apresenta um aumento no último ponto (Figura 84).

Figura 81 – Evolução das fissuras no ensaio da mistura de solo+12,5%casca



Tempo: 5,25h
W:95,39% | CIF: 0,00%
Temp.: 37,1°C | URA: 33%

Tempo: 8,75h
W:89,19% | CIF: 0,00%
Temp.: 37,0°C | URA: 26%

Tempo: 10,75h
W:85,98% | CIF: 0,61%
Temp.: 37,1°C | URA: 29%

Tempo: 11,75h
W:84,37% | CIF: 1,22%
Temp.: 36,6°C | URA: 31%

Tempo: 12,75h
W:82,8% | CIF: 1,80%
Temp.: 36,5°C | URA: 27%

Tempo: 14,75h
W:78,72% | CIF: 2,46%
Temp.: 35,6°C | URA: 26%

Tempo: 18,75h
W:70,48% | CIF: 2,90%
Temp.: 34,6°C | URA: 26%

Tempo: 20h
W:68,86% | CIF: 3,04%
Temp.: 34,3°C | URA: 25%

Tempo: 23h
W:62,28% | CIF: 3,59%
Temp.: 34,0°C | URA: 27%

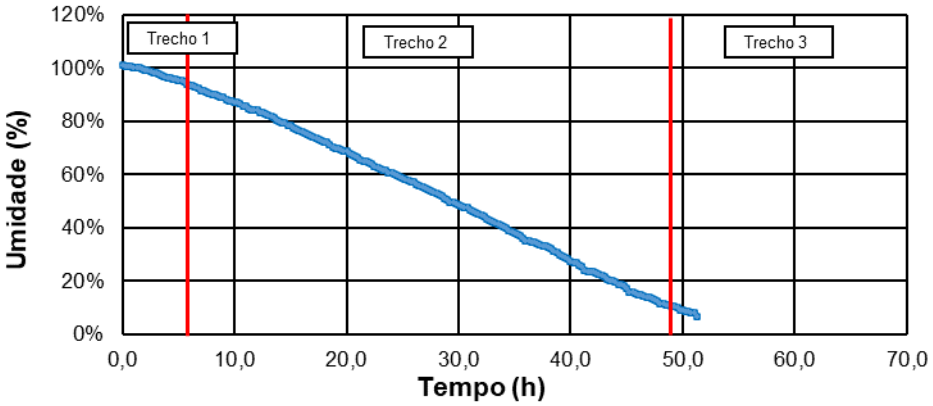
Tempo: 28,75h
W:50,96% | CIF: 4,57%
Temp.: 35,2°C | URA: 25%

Tempo: 33,5h
W:41,41% | CIF: 4,91%
Temp.: 37,1°C | URA: 29%

Tempo: 51,25h
W:6,84% | CIF: 5,62%
Temp.: 33,5°C | URA: 26%

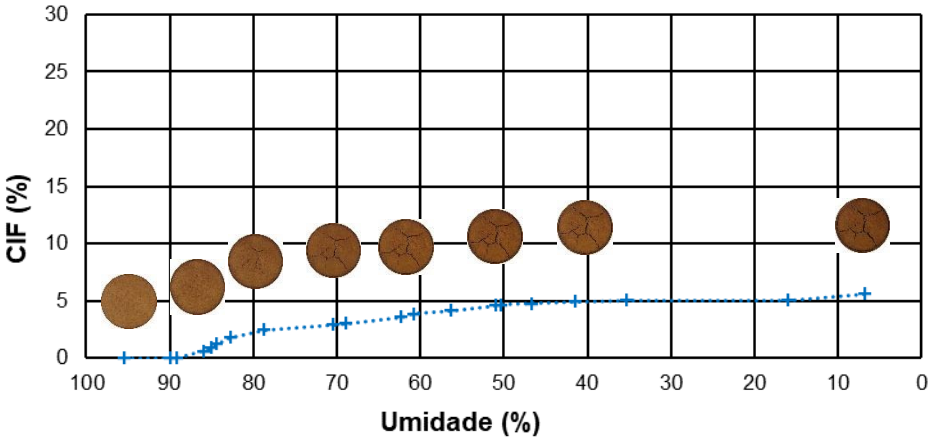
Fonte: A Autora (2023)

Figura 82 – Relação entre umidade e tempo para a mistura de solo+12,5%casca



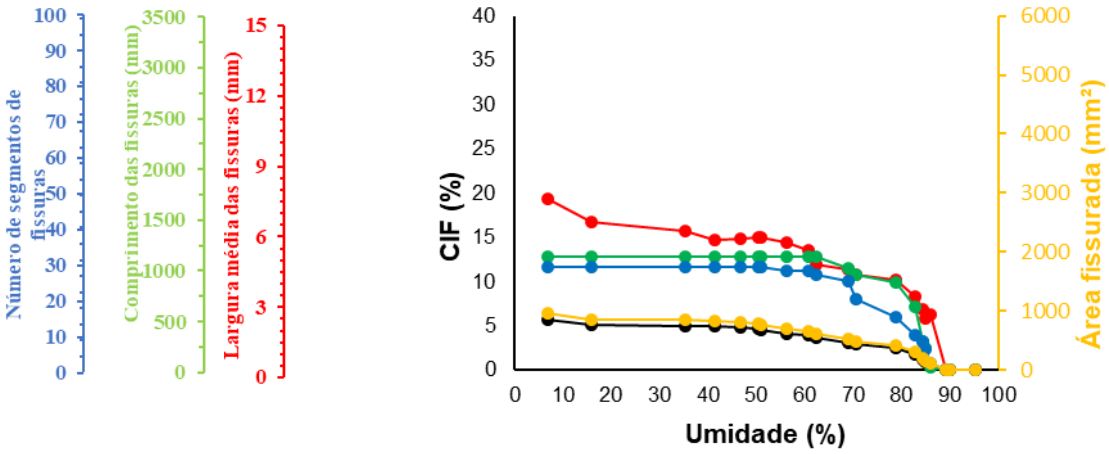
Fonte: A Autora (2023)

Figura 83 – Relação entre CIF e umidade para a mistura de solo+12,5%casca



Fonte: A Autora (2023)

Figura 84 – Evolução dos índices geométricos de fissuração para a mistura de solo+12,5%casca



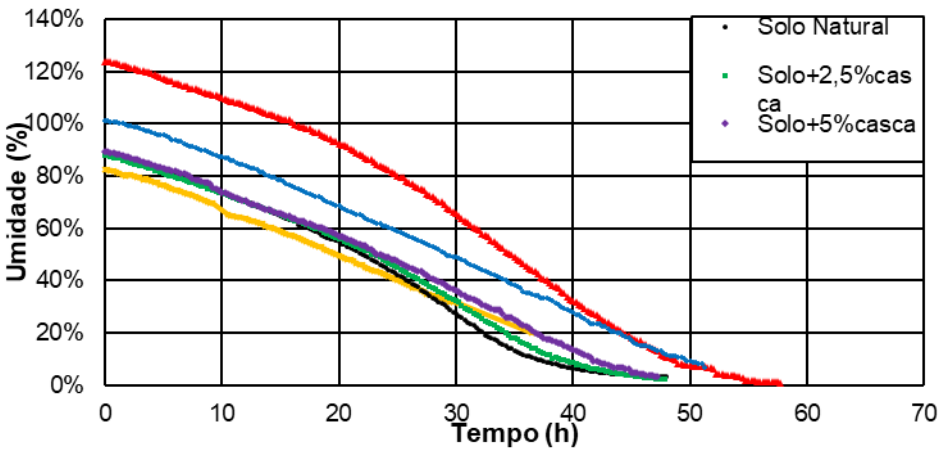
Fonte: A Autora (2023)

4.7.2.7 Considerações sobre o processo de propagação de fissuras no solo natural e misturas com a casca da amêndoa do cacau

Se comparados o tempo de fissuração de cada ensaio, a amostra de solo natural e as misturas de solo+7,5% e 12,5%casca são as que apresentam menor duração. Já a mistura de solo+5%casca é a que apresenta maior tempo de fissuração (18h), mesmo não sendo a mistura com maior umidade inicial, como pode ser visto na Figura 85. Ainda por essa figura, nota-se que as umidades residuais das misturas são semelhantes, com a exceção da mistura solo+10%casca, muito provavelmente devido à queda de energia, que diminuiu o tempo de exposição da amostra às lâmpadas.

Os menores tempo de fissuração das misturas de 7,5% e 12,5%casca podem ser justificados por serem as misturas que apresentaram primeiro a estabilização da fissuração, conforme Figura 86 (a). Percebe-se também que a adição da casca da amêndoa do cacau propicia o surgimento das fissuras antes do que o solo. Entretanto, todas as misturas, com a exceção da mistura de solo+2,5%casca, que apresentou valores semelhante ao solo natural, apresentam uma redução no CIF. A mistura de solo+7,5% e 12,5% casca foram as misturas que mais reduzem a fissuração, numa redução de 73,87% e 80,55% respectivamente.

Figura 85 – Comparativo dos resultados de tempo e umidade dos ensaios realizados no solo e misturas com a casca da amêndoa de cacau

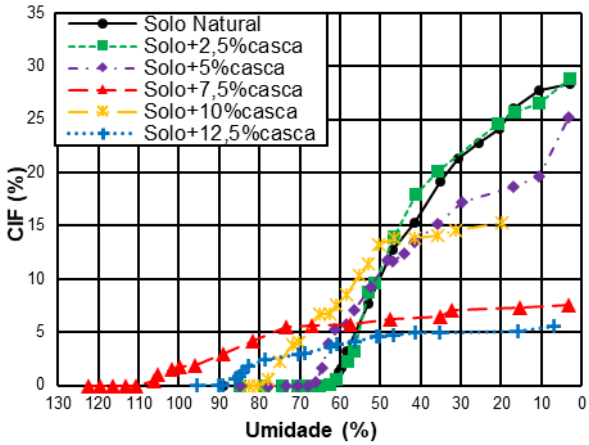


Fonte: A Autora (2023)

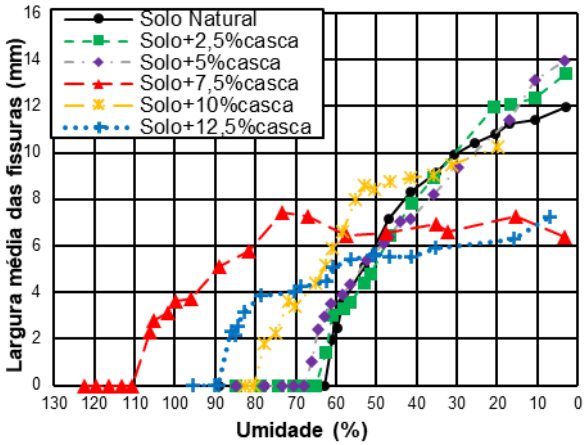
Na Figura 86 (b), percebe-se que a largura das fissuras das misturas de solo+7,5% e 12,5% casca são reduzidas em 46,69% e 39,36% respectivamente, enquanto as demais misturas apresentam resultados semelhantes aos do solo natural. Na Figura 86 (c) a mistura de solo+12,5%casca é, novamente a que apresenta melhor resultado, reduzindo o comprimento das fissuras do solo natural para mais da metade do valor obtido para o solo natural, numa redução de 63,22%. As demais misturas diminuem o comprimento das fissuras gradativamente.

Figura 86 – Comparativo dos índices geométricos de fissuração nas amostras de solo e misturas com a casca da amêndoa de cacau

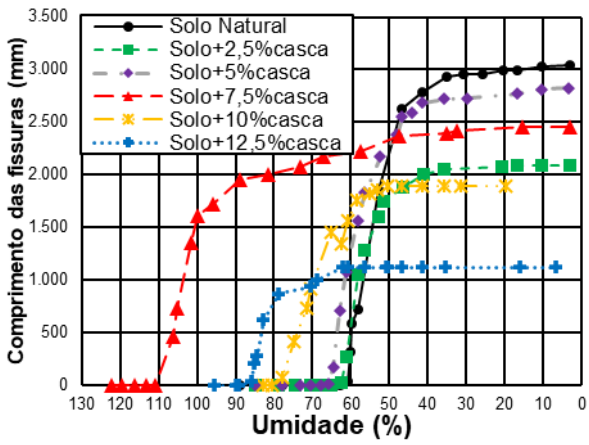
(a) CIF x Umidade



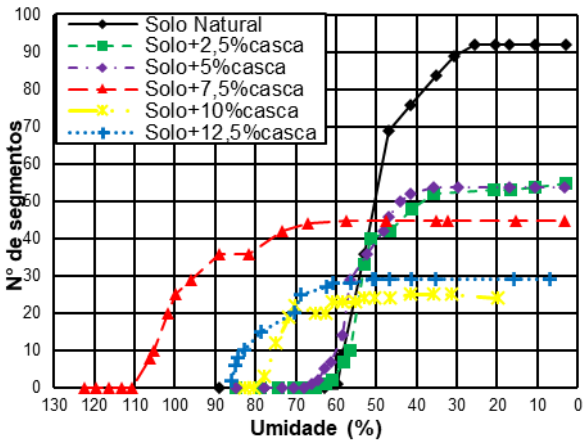
(b) Largura das fissuras x umidade



(c) Comprimento das fissuras x umidade



(d) N° de segmentos x umidade



Fonte: A Autora (2023)

Na Figura 86 (c), é possível observar que o solo natural apresenta o maior número de segmentos. As misturas de solo+2,5% e 5%casca apresentam as

menores taxas de redução, 40,21% e 41,30% respectivamente, enquanto a mistura de solo+7,5%casca apresenta redução intermediária de 51,09%. As misturas de solo+10% e 12,5% casca apresentam valores de 73,91% e 68,48% respectivamente, reduzindo mais da metade o número de segmentos do solo.

Na Figura 87 estão os QR codes de cada ensaio, onde os vídeos de propagação das fissuras podem ser assistidos.

Figura 87 – Vídeos da propagação de fissuras nas amostras de solo e misturas com a casca da amêndoa de cacau

Fonte: A Autora (2023)

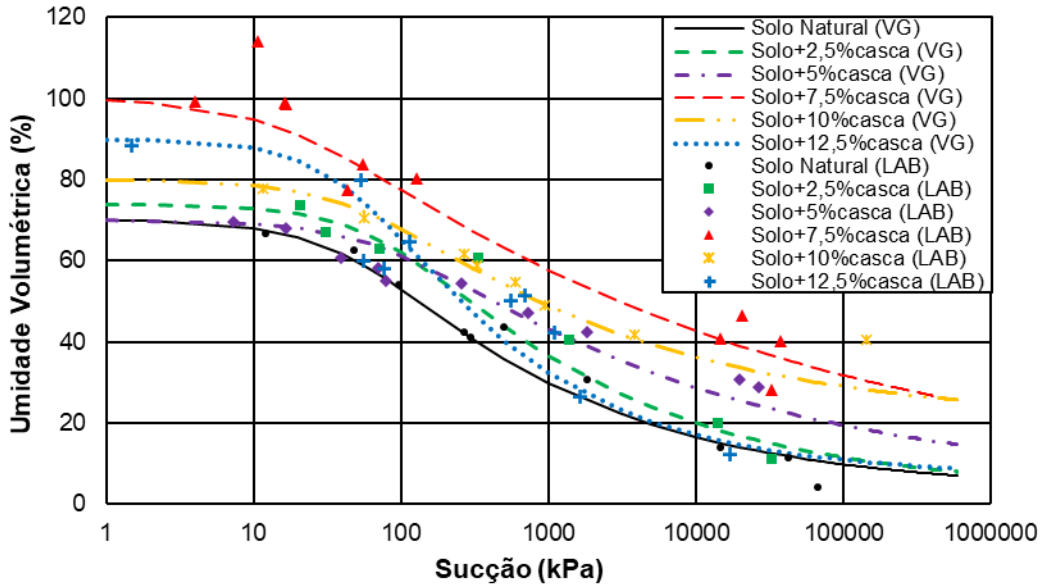
4.8 CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DO SOLO E MISTURAS

Na Figura 88 são mostrados os dados obtidos por meios do ensaio do papel filtro para a determinação das curvas de retenção de água. Através dos pontos obtidos em laboratório (LAB) é possível obter a curva de Van Genuchten (VG), cujos parâmetros de ajuste estão presentes na Tabela 23. Nota-se que todas as curvas das misturas se apresentam ao lado direito da curva da amostra de solo natural, de

forma que se pode afirmar que a adição da casca da amêndoa do cacau proporcionou uma maior retenção de água.

Dentre as misturas, a de solo+7,5%casca é a que apresenta a maior retenção de água. As curvas de solo+5% e 10% casca apresentam comportamento semelhantes entre si, mesmo que a de 10%casca apresente uma maior retenção de água.

Figura 88 – Curvas características de sucção matricial para as amostras de solo e misturas com a casca da amêndoa de cacau



Fonte: A Autora (2023)

Tabela 23 – Valores de ajuste da equação de Van Genuchten para sucção matricial

Material	$\psi_{entrada\ de\ ar}$ (kPa)	$\theta_{residual}$ (%)	$\theta_{saturação}$ (%)	n	m	α
Solo Natural	48,22	3,03	70	1,30	0,231	0,021
Solo+2,5%casca	85,62	2,95	74	1,30	0,231	0,012
Solo+5%casca	78,65	3,26	70	1,20	0,167	0,013
Solo+7,5%casca	54,71	3,16	100	1,14	0,123	0,018
Solo+10%casca	55,95	19,76	80	1,25	0,200	0,018
Solo+12,5%casca	53,03	6,84	90	1,40	0,286	0,019

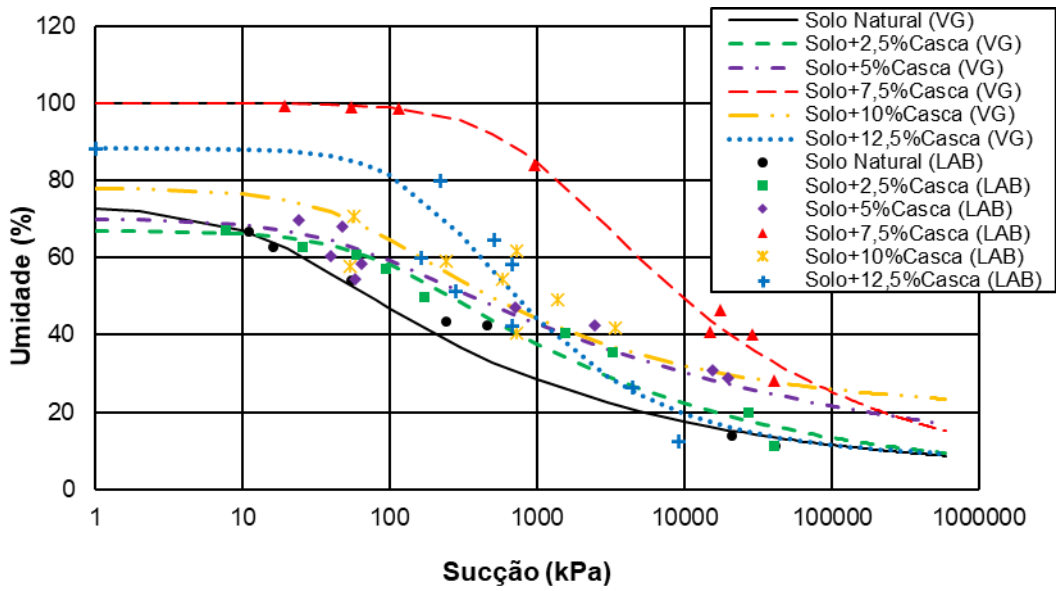
Fonte: A Autora (2023)

Pela Tabela 23, nota-se que a sucção de entrada de ar aumenta para todas as misturas, sendo as maiores nas misturas de solo+2,5% e 5%casca, com valores

de 85,62 kPa e 78,65 kPa, respectivamente. As demais misturas, solo+7,5%, 10% e 12,5%casca apresentam valores semelhantes de 54,71 kPa, 55,95 kPa e 53,03 kPa, respectivamente. A umidade volumétrica de saturação para o solo natural e as misturas com 2,5% e 5% casca são similares, com valores de 70, 74 e 70% respectivamente. As misturas de solo+7,5%, 10% e 12,5%casca apresentam valores mais elevados de 100, 80 e 90%, respectivamente.

Na Figura 89 são mostradas as curvas de sucção total. Através dos pontos obtidos em laboratório (LAB) é possível obter a curva de Van Genuchten (VG), cujos parâmetros de ajuste estão presentes na Tabela 24. Novamente, todas as curvas das misturas estão ao lado direito da curva da amostra de solo natural, mostrando uma maior retenção de água.

Figura 89 – Curvas características de sucção total para as amostras de solo e misturas com a casca da amêndoa de cacau



Fonte: A Autora (2023)

Tabela 24 – Valores de ajuste da equação de Van Genuchten para sucção total

Material	$\Psi_{entrada\ de\ ar}$ (kPa)	$\theta_{residual}$ (%)	$\theta_{saturação}$ (%)	n	m	α
Solo Natural	16,11	3,70	73	1,25	0,200	0,062
Solo+2,5%casca	93,53	2,06	67	1,25	0,200	0,011
Solo+5%casca	47,24	3,55	70	1,17	0,145	0,021
Solo+7,5%casca	957,16	0,72	100	1,30	0,231	0,001
Solo+10%casca	56,54	19,76	80	1,30	0,231	0,018
Solo+12,5%casca	218,20	7,77	88	1,50	0,333	0,004

Fonte: A Autora (2023)

Pela Tabela 24, percebe-se que, novamente, a sucção de entrada de ar aumenta para todas as misturas, sendo as maiores nas misturas de solo+7,5% e 12,5%casca, com valores de 957,16 kPa e 218,20 kPa, respectivamente. As demais misturas, solo+2,5%, 5% e 10%casca apresentam valores de 93,53 kPa, 47,24 kPa e 56,54, respectivamente. A umidade volumétrica de saturação para o solo natural e as misturas com 2,5% e 5% casca são similares, com valores de 73, 67 e 70% respectivamente. As misturas de solo+7,5%, 10% e 12,5%casca apresentam valores mais elevados de 100, 80 e 88%, respectivamente.

Conforme já explicado, a umidade residual da mistura de solo+10%Casca é mais elevada que as outras na sução matricial e total devido às falhas ocorridas durante a execução do ensaio. Por fim, a umidade de saturação, tanto na sucção matricial quanto na sucção total, tende a aumentar a partir de adição de 5% da casca da amêndoa do cacau, porém não uniformemente.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, cujo objetivo foi avaliar a influência da casca da amêndoa de cacau no comportamento hidromecânico de um solo expansivo. Ao final do capítulo serão feitas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros acerca do tema.

5.1 CONCLUSÕES

Ensaios de laboratório foram conduzidos para analisar o potencial de expansão, comportamento mecânico, comportamento hidráulico e o potencial de fissuração do solo expansivo de Paulista/PE natural e combinado com a casca da amêndoa do cacau em diferentes proporções.

A inserção da casca no solo diminuiu a massa específica dos grãos quase que uniformemente, devido à massa específica dos grãos da casca ser quase duas vezes menor que a do solo. Através das curvas granulométricas, percebeu-se também que as cascas tiveram pequena influência na distribuição granulométrica das misturas.

Os limites de Atterberg não apresentaram um comportamento uniforme para o acréscimo gradual das cascas da amêndoa, porém a adição das cascas diminuiu o índice de plasticidade.

Com relação à compactação, a adição da casca até 5% não gerou influência significativa na umidade ótima, porém diminuiu a massa específica aparente seca. As demais misturas apresentaram uma umidade ótima de compactação superior, com acréscimos de até 74,34% no valor obtido para o solo natural.

O coeficiente de permeabilidade diminuiu com o acréscimo da casca da amêndoa do cacau, com exceção da mistura de solo+2,5%casca. O solo apresentou um coeficiente da ordem de 10^{-9} cm/s, assim como a mistura solo+2,5%casca. As demais misturas tiveram esse coeficiente reduzido para a ordem de 10^{-10} cm/s para a mistura de solo+5%casca e de 10^{-11} cm/s para solo+7,5%, 10% e 12,5%casca.

De modo geral, para a caracterização reológica, a adição da casca aumentou a tensão de escoamento e de enrijecimento das misturas em relação ao solo natural, em maior ou menor proporção a depender do teor adicionado. Também não foi verificado pontos de parada, de forma que se pode afirmar que tanto o solo natural quanto as misturas são homogêneas.

O acréscimo das cascas no solo natural e nas misturas de solo+2,5% e 12,5%casca apresentaram valores semelhantes e respectivos de 12,75%, 12,40% e 12,80%. Já as misturas de solo+5% e 7,5% casca aumentaram essa expansão para 18,53% e 17,03%. A mistura de solo+10%casca foi a mistura que apresentou significativamente uma redução na expansão, atingido 8,90% de expansão.

Ou seja, a adição de 10% de casca da amêndoa do cacau foi o teor ideal para redução da expansão livre. Mesmo com essa redução, o valor de expansão final da mistura ainda é considerado um alto.

A tensão de expansão decresce com o acréscimo da casca a mistura solo+10%casca reduziu 71,36% da tensão de expansão do solo natural compactado. Juntamente com a mistura solo+7,5%casca, foram as que mais reduziram a tensão de expansão, permitindo a classificação do material como uma tensão de expansão que não causa danos a estrutura.

Com relação à resistência mecânica, tanto para a compressão simples, quanto para a tração por compressão diametral, as amostras de solo natural foram as que apresentaram melhores resultados. Em relação ao cisalhamento direto o ângulo de atrito aumenta e em seguida, diminui. Já a coesão diminuiu. A adição da casca da amêndoa do cacau causou uma redução significativa na resistência mecânica, com redução de até aproximadamente 81%.

Quanto ao processo de fissuração, percebeu-se que a adição da casca da amêndoa gerou uma fissuração mais rápida das misturas do que o solo natural. Ou seja, o solo natural perdeu mais umidade antes de apresentar a primeira fissura do que as misturas. Entretanto, a área fissurada diminuiu consideravelmente, principalmente para as misturas de solo+7,5% e 12,5% casca, sendo a máxima redução do CIF, de 80,55%, no teor adicionado de 12,5%. A adição da casca tendeu a diminuir a largura das fissuras em até no máximo 46,69% para a mistura de solo+7,5%casca.

A adição da casca no solo proporcionou um aumento na sucção de entrada do ar e da umidade de saturação. Isso, juntamente com os dados obtidos para a condutividade hidráulica e para a fissuração, permite afirmar que este pode ser um material a ser considerado para o uso em camadas de cobertura de aterro sanitário. Tal fato é um ponto positivo, dado a implantação recente de alguns aterros sanitários na região.

Assim, por meio dos resultados citados, a casca da amêndoa do cacau pode ser utilizada para reduzir a tensão de expansão de um solo expansivo, assim como pode ser utilizada para coberturas de aterros municipais de resíduos sólidos. O seu uso também pode reduzir um passivo ambiental gerado pela agroindústria.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

São descritos a seguir algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Análise físico-química dos resíduos inorgânicos da casca do cacau;
- Verificar se o uso da casca da amêndoa do cacau permite a melhoria de solos anteriormente não adequados para camadas de cobertura de aterro sanitários;
- Analisar a durabilidade da melhoria proporcionada pela casca da amêndoa de cacau, por ser uma matéria orgânica e estar sujeita a decomposição;
- Estudar a adição da casca da amêndoa do cacau com outros tipos de solos expansivos;
- Realizar o ensaio de adensamento do solo com adição das cascas;
- Realizar novos ensaios com variações de porcentagens menores, entre 7,5% e 12,5% de adição da casca.
- Avaliar a influência da casca do fruto do cacau no solo;

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. A. **Avaliação da resistência de um solo do município de Paulista-PE estabilizado com cimento Portland e resíduo do polimento de rochas ornamentais.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

ALTMEYER, W. T. **Discussion of engineering properties of expansive clays.** In: Proc. Am. Soc. Civil Eng. 81, 1955. p. 17-19.

ALVARENGA, P; AMAROLI, P.; CÁCERES, J.; EGUIZÁBAL, C.; FERNÁNDEZ, J. A.; FOWLER, W.; LAURIA, A.; FUENTES, H. L.; MELHADO, O. E.; PANAMENO e WALTER, K. **História de El Salvador**. San Salvador: Ministério da Educação, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, D4829: **Standard test method for expansion index of soils**. Philadelphia, PA, 4p, 2021

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 2004

Andersland O. B.; Khattak A. S. Shear strength of kaolinite/ fiber soil mixtures. In: **Proceedings of international conference on soil reinforcement**, Paris, v. 1. p.11–16, 1979.

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

ARAÚJO, H.J.T. Influência do uso de fibras de pneu no comportamento hidromecânico e na mitigação de propagação de fissuras em solo expansivo. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 12770. Solo – **Resistência à compressão simples**. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7181 (2016). **Solo – análise granulométrica**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7182 (2016). **Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro.

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 14545 - (2021). **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 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, NBR15839 (2010) - **Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow.** Rio de Janeiro.

ATAÍDE, S. O. F. de. **Análise do comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia.** 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

AYALA, R. J. L.; CARVALHO, J. C.; MARTINEZ HERNÁNDEZ, A. L. Melhoria de Solos com Fibras Naturais – Penas de Frango. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. 2016.

AYALA, R. J. L.; CARVALHO, J. C.; MARTINEZ HERNÁNDEZ, A. L. Melhoria de Solos com Fibras Naturais – Penas de Frango. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2016.

BARAZARTE, H.; SANGRONIS, E.; UNAI, E. La cáscara de cacao (Theobroma cacao L.): uma posible fuente comercial de pectinas. **Archives Latinoamericanos de Nutrición**, v.58, p.64-70, 2008.

BARBOSA, F. A. S. **Análise do comportamento hidromecânico e da dinâmica de fissuração de um solo expansivo.** 2019. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

BARBOSA, V. H. R.; MARQUES, M. E. S.; GUIMARÃES, A. C. R.; SILVEIRA, V. L. Estudo de dois solos do Acre para a produção de agregados de argila calcinada e misturas para bases em pavimentação. **Instituto Militar de Engenharia**, 2018.

BARBOSA, V. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

BASTOS, E. G. **Variação Volumétrica de uma Argila Expansiva do Litoral Norte de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal da Paraíba, CCT, Campina Grande. Paraíba, 1994.

BATISTA, V. de S. **Potencial do uso de resíduo de mineração de rocha calcária para estabilização de solos expansivos.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. Modern Concrete Technology Series, Aron Bentur and Sidney Mindess, Eds., Taylor & Francis, 2 ed., United Kingdom, 2007.

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

BRAINER, M. S. C. P. Produção do cacau: crescer é preciso! In: **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza: BNB, Ano 6, n. 199, dezembro de 2021, 20p. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1042/1/2021_CDS_199.pdf. Acesso em: 15 mai. 2022.

BUDINSKI, k. G. **Engineering Materiais:** properties and selection. New Jersey: Prentice Hal1 Intemational., Sed, 1996. 653p.

BUOL, S.W.; HOLE, F.D.; McCRACKEN, R.J. & SOUTHARD, R.J. **Soil Genesis and Classification**. 4.ed. Iowa, WileyBlackwell, 1997. 527p

CAGLAR, B. Structural characterization of kaolinite-nicotinamide intercalation composite. **Journal of Molecular Structure**, v. 1020, p. 48-55, 2012.

CALLISTER Jr, W. D. C. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª Edição. 2012. 590 p.

CAMPOS, L. E. P.; MIRANDA, S. B.; JESUS, A. C.; BURGOS, P. C. Aplicação de geoprocessamento na avaliação de movimento de massa em Salvador-Ba. In: **IV COBRAE-Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Anais… Salvador: ABMS, UFBA**. 2005.

CARVALHO, R.; FANGUEIRO, R.; NEVES, J. Durabilidade de fibras naturais para geotecnia. **Materiais de Construção**, p. 237, 2014.

CAVALCANTI, L. C**. Estabilização granulométrica de uma argila expansiva de Paulista-PE**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2017.

CHAGAS, G. da S.; MOURA, A. S.; CARNEIRO, A. de A. Utilização da compactação para redução do potencial de colapso/expansão de um solo silto argiloso de Massapê da cidade de Icó-CE. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1, p. 64-75, 2017.

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

CHEN, F. H. The use of piers to preventing the uplifting of lightly structured founded on expansive soils. In: **Proceedings of the Engineering Effects of Moisture Changes in Soils, International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, College Station, Tex**. 1965. p. 108-119.

Chen, F.H. **Foundations on Expansive Soils**. New York: Elsevier Science Publishing Company Inc., 1988

CHEPOTE, R. E.; SODRÉ, G. A.; REIS, E. L.; PACHECO, R. G.; MARROCOS, P. C. L.; SEÓRIDIO, M. H. C. F.; VALLE, R. R. **Recomendações de corretivos e fertilizantes na cultura do cacaueiro no sul da Bahia – 2ª aproximação.** Ilhéus: CEPLAC/CEPEC, 36p., 2005.

COELHO, A. C. V.; SANTOS, P. de S.; SANTOS, H. de S. Argilas especiais: argilas quimicamente modificadas-uma revisão. **Química Nova**, v. 30, p. 1282-1294, 2007.

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

CORRÊA, J. F. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

COSTA NUNES, A. J.; VASCONCELOS, E. M. e PANDOLFI, R. L. M. (1982). Ocorrência de propriedades de Engenharia de Solos Expansivos na Área do Grande Recife. CBMSEF. 7, Recife/Olinda, Vol. V. 193-209.

COSTA, R. de C.; ALMEIRDA, A. S. de.; OLIVEIRA, C. H. A. de.; SILVA, L. M. da.; ARAÚJO, E. A. de. Avaliação de métodos de determinação da densidade em solos de diferentes atividades da fração argila (TA e TB) do município de Rio Branco, Estado do Acre. In: **I Seminário de Iniciação científica da Embrapa Acre.** 2013.

CUENCA, M. A. G. e NAZÁRIO, CC. **Importância econômica e evolução da cultura do cacau no Brasil e na região dos tabuleiros costeiros da Bahia entre 1990 e 2002**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2004.

CUNHA, C. E. A. **Adição de agregado reciclado de resíduo da construção civil para estabilização de um solo expansivo.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.

DAKSHANAMURTHY, V.; RAMAN, V. A simple method of identifying an expansive soil. **Soils and foundations**, v. 13, n. 1, p. 97-104, 1973.

DOBRESCU, C. F.; CALARASU, E. A. Overview of expansive soils behavior based on quantitative geotechnical index achieved from laboratory testing. **International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM**, v. 2, p. 495, 2015.

EL-SHEKEIL, Y. A.; SAPUAN, S. M.; ALGRAFI, M. W. Effect of fiber loading on mechanical and morphological properties of cocoa pod husk fibers reinforced

thermoplastic polyurethane composites. **Materials & Design**, v. 64, p. 330-333, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2011.

Endo, T.; Tsuruta, T. **The Effect of Tree Roots Upon the Shearing Strength of Soil**. Annual Report No. 18 of the Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experiment Station, Tokio, Japan, pp. 168-179, 1969.

ESTABRAGH, A. R.; NAMDAR, P.; JAVADI, A. A. Behavior of cement-stabilized clay reinforced with nylon fiber. **Geosynthetics International**, v. 19, n. 1, p. 85-92, 2012.

FABRIS, I. L. **Processamento químico do minério talco-silicato de magnésio visando redução dos compósitos de ferro.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Data Production and Trade**. Disponível em: http://www.fao.org/faostat/en/#data/. Acesso em: 15 mai. 2022.

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

FEITOSA, F. A. C.; DINIZ, J. A. O. Água subterrânea no cristalino da região semiárida brasileira. In: **II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo,** 2011. Recuperado de https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28026

FERREIRA, S. R. M. (2008), Solos colapsíveis e expansivos: Uma visão panorâmica no Brasil In: **VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, Salvador. EDUFBA. v.2. p.593 – 619.

FERREIRA, S. R. de M.; FERREIRA, M. da G. de V. X. Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um vertissolo no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 779-791, 2009.

FERREIRA, S. R. de M.; PAIVA, S. C. D.; MORAIS, J. J. O.; VIANA, R. B. Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. **Revista Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2017.

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

FERREIRA, S. R. M.; AMORIM, S. F.; VAREJAO-SILVA, M. A. Tecnologia da geoinformação aplicada aos estudos dos solos expansivos e colapsíveis do estado de Pernambuco. **Simpósio Brasileiro de Ciência Geodésicas e Tecnologias de Geoinformação**, v. 2, p. 91-99, 2008.

FERREIRA, S. R. M; ARAÚJO, A.G. D; BARBOSA, F. A. S.; SILVA, T. C. R.; BEZERRA, I. M. L. Analysis of volume change and crack propagation in swellig soil due to water content change. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2019.

FRIES, A.; SILVA, K.; PUCHA-COFREP, F.; OÑATE-VALDIVIESO, F.; OCHOA-CUEVA, P. Water balance and soil moisture deficit of different vegetation units under semiarid conditions in the andes of southern Ecuador. **Climate**, v. 8, n. 2, p. 30, 2020.

GONZALES, A. D. F.; VITAL, A. V. D.; LIMA, J. M.; RODRIGUES, M. B. S. et al. Desenvolvimento sustentável para o resgate da cultura do cacau baseado no aproveitamento de resíduos. **Interfaces Científicas-Saúde e Ambiente**, v. 1, n. 2, p. 41-52, 2013.

Gray, D. H.; Oashi, H. Mechanics of Fiber Reinforcement Sands. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 109, n. 3, p. 335-353, 1983.

GUEDES, J. P. C.; TENÓRIO, E. A. G.; BRAZ, R. I. F. Previsão da resistência à compressão simples de um solo expansivo estabilizado com cimento através do índice porosidade/teor volumétrico de cimento. **Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 59, n. 2, p. 547–561-547–561, 2022.

GUERRERO, G. E.; SUÁREZ, D. L.; OROZCO, D. M. Implementation of a method of extraction conditions of pectin obtained from agroindustrial by-product cocoa husks. **Revista Temas Agrarios**, v. 22, n. 1, p. 85-90, 2017.

GURGEL, J. G. B.; JÚNIOR, O. F. dos S. Avaliação do Potencial Expansivo de Sedimentos da Bacia do Jatobá Localizados no Município de Floresta/PE. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. 2016.

GUSMÃO, L. R. C. de. **Influência de ciclos secagem-molhagem no comportamento hidráulico-mecânico de misturas compactas de solo argiloso com fibras de coco verde.** 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

HAOMA. Uma experiência exclusiva e inigualável de degustação, 2022. Disponível em: <https://www.amohaoma.pt/chocolate-de-origem>. Acesso em: 16 mai. 2022.

HERNÁNDEZ, E. H. O.; MONCAYO, E. H. O.; SÁNCHEZ, L. K. M.; CALDERERO, R. P. de. Behavior of clayey soil existing in the portoviejo canton and its neutralization characteristics. **International research journal of engineering, IT & scientific research**, v. 3, n. 6, p. 1-10, 2017.

HOLANDA, M. J. de O.; FERREIRA, S. R. de M.; AMORIM, S. F.; BORGES, J. J. S.; SILVA, L. F. da. Identificação de solos expansivos e colapsíveis no Nordeste brasileiro a partir de Redes Neurais Artificiais geradas em Pernambuco. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e110101522541-e110101522541, 2021.

HOOVER, J. M.; MOELLER, D. T.; PITT, J. M.; SMITH, S. G.; WAINAINA, N. W. Performance of randomly oriented fiber reinforced roadway soils. **Lowa DOT Project-HR-211, Department of Transportation, Highway Division, Lowa State University**, 1982.

IKEAGWUANI, C. C.; NWONU, D. C. Emerging trends in expansive soil stabilization: A review. **Journal of rock mechanics and geotechnical engineering**, v. 11, n. 2, p. 423-440, 2019.

IKEAGWUANI, C. C.; NWONU, D. C.; UGWU, C. K.; AGU, C. C. Process parameters optimization for eco-friendly high strength sandcrete block using Taguchi method. **Heliyon**, v. 6, n. 6, p. e04276, 2020.

IOZZI, M.; MARTINS, G. S.; MARTINS, M. A.; FERREIRA, F. C.; JOB, A. E.; MATTOSO, L. H. Estudo da influência de tratamentos químicos da fibra de sisal nas propriedades de compósitos com borracha nitrílica. **Polímeros**, v. 20, p. 25-32, 2010.

ISHOLA, K.; OLAWUYI, O. A.; BELLO, A. A.; ETIM, R. K.; YOHANNA, P.; SANI, J. E. Review of agricultural waste utilization as improvement additives for residual tropical soils. **Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment**, v. 15, n. 3, p. 733-749, 2019.

JONES, L. D.; JEFFERSON, I. Expansive Soil. In: **Burland J, editor. ICE manual of geotechnical engineering**, v. 1: geotechnical engineering principles, problematic soils, and site investigation. Lodon, UK: ICE Publishing, 2012.

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.

JUNCIONI, L. G. **Utilização de resíduos de cacau em compósitos poliméricos à base de poliolefinas**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

JUSTINO DA SILVA, J. M. V**ariação 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, 2001.

KAWAHASHI, J.; JUNIOR, R. B. T.; TATSUTA, E. K.; BALBO, J. T.; BALZAN, D. C. Estabilização de solos siltosos expansivos de São Paulo com ligantes com elevado teor de escória para pavimentação. **TRANSPORTES**, v. 18, n. 2, 2010.

KREIBICH, H. H. **Qualidade e segurança das amêndoas de cacau (***Theobroma cacao L.***) e seus produtos com relação aos contaminantes biológicos e a descontaminação de fungos toxigênicos com ozônio gasoso.** Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

LACERDA, L. S. S. do N. de. **Análise do comportamento geotécnico de solos de Cabrobó, potencialmente expansivos, estabilizados com cinza de casca de**

arroz. 2019. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

LOBO, M. S.; SANTOS, B. S. S.; LAVENÈRE-WANDERLEY, A. A. de O. Análise Estatística Anual e Mensal das Ondas Atuantes na Costa de Ilhéus (Bahia) Baseada na Reanálise de Série Temporal de 31 Anos do Modelo de Ondas WAVEWATCH III. **Revista do Departamento de Geografia**, p. 67-74, 2017.

LU, F.; RODRIGUEZ-GARCIA, J.; DAMME, I. V.; WESTWOOD, N.; SHAW, L.; ROBINSON, J. S.; WARREN, G.; CHATZIFRAGKOU, A.; MASON, S. M.; GOMEZ, L.; FAAS, L.; BALCOMBE, K.; SRINIVASAN, C.; PICCHIONI, F.; HADLEY, P.; CHARALAMPOPOULOS, D. Valorisation strategies for cocoa pod husk and its fractions. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry,** 2018.

MAHLER, R. L.; MCDOLE, R. E. **Liming materials**. University of Idaho, Cooperative Extension Service, Agricultural Experiment Station, College of Agriculture, 1994.

MAJUNDAR, A. J. Prospects of fiber reinforcements in civil engineering materials. In: **Proceedings of the conference at Shirley Institute of Fibers in Civil Engineering, Manchester, England**. 1975.

MARINHO, R. P. **Melhoramento de solo colapsível e expansivo de Santa Maria da Boa Vista – PE.** 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, A. L.; VELASCO-SANTOS, C.. Keratin fibers from chicken feathers: structure and advances in polymer composites. **Keratin: structure, properties and applications**, v. 1, p. 49-211, 2012.

MIGUEL, G. D. **Desempenho e comportamento mecânico de um solo dispersivo e sulfatado com uma pozolana artificial, cal de carbureto e reforçado com fibras de vidro.** 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

Ministério do Turismo. **MAPA DO TURISMO 2019 – 2021**. Disponível em: < http://www.mapa.turismo.gov.br/mapa/ init.html#/home>. Acesso em: 15 mai. 2022.

MORAIS, C. de J. **Tentativa de estabilização de um solo expansivo com adição de polímero industrial**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.

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

MORORÓ, R. C. Aproveitamento dos Derivados do cacau, Subprodutos e Resíduos do Cacau. **Raul René Valle. (Org.). Ciencia, Tecnologia e Manejo do Cacaueiro**. 1ed.Itabuna, 2006, v. 1, p. 204-260

MOURA, G. de J. **Estabilização granulométrica de solo argiloso com inclusão de PET micronizado.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju, Aracaju, 2020.

NAKASHIMA, C. H.; SAITO, L. A.; HELLA, M. **Análise da estabilização de solo expansivo em plataforma ferroviária**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Produção Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

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

OLIVEIRA, A. G. S. de; JESUS, A. C.; MIRANDA, S. B. Estudo geológico geotécnico dos solos expansivos da região do Recôncavo Baiano. **II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos-II Geojovem**, 2006.

OLIVEIRA, A. I. de. **Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco.** 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

Oliveira, E. S. de; REIS, F. A. da S.; SANTANA, E. M. de.; PROFICE, C. C.; AMADO, F. D. R.; MOREAU, A. M. S. dos S. Índice de desenvolvimento sustentável municipal: aplicação na região Costa do Cacau – BA. **Gaia Scientia**, v. 14, n. 3, p. 1981-1268, 2020.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CACAU. (2016). **Production of cocoa beans**. ICCO Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, XLII.

PAIVA, S. C. D.; LIMA, M. A. D. A.; FERREIRA, M. D. G. D. V. X.; FERREIRA, S. R. D. M. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Revista Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, p. 437-449, 2016.

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

PAIVA, W. de. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

PETRY, T. M.; LITTLE, D. N. Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures—history, practice, and future. **Journal of materials in civil engineering**, v. 14, n. 6, p. 447-460, 2002.

PINHEIRO, I. R.; SILVA, R. O. Reaproveitamento dos Resíduos Sólidos da Indústria Cacaueira. **Blucher Chem. Eng. Proc**, v. 4, n. 1, p. 95-99, 2017.

PIRES, A. J. V.; JÚNIOR, J. N. de C.; SILVA, F. F. da; VELOSO, C. M.; SOUZA, A. L. de; OLIVEIRA, T. N. de; SANTOS, C. L. dos; CARVALHO, G. G. P. de; BERNADINO, F. S.; Farelo de cacau na alimentação de ovinos. **Revista Ceres,** v. 51, n. 293, p. 33-43, 2004.

Presa,E.P. Parâmetros Convenientes para projetos de rodovias em Solo Expansivo. In: **II Seminário Regional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações – NRBA/ABMS-Salvador-Ba**, 1980

RAMALHO, L. A. M. **Melhoramento de solo expansive com cimento e politereftalo de etileno (PET) micronizado.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

RIBEIRO JÚNIOR, I.; CONCIANI, W. Controle da expansão do solo saprolítico de filito com cal hidratada cálcica para construções populares. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. 2005.

RIBEIRO, K. F. A.; RIBEIRO JÚNIOR, I. Influência da expansão do solo na obtenção dos parâmetros geotécnicos obtidos com ensaios de laboratório. **Anais do COBRAMSEG**, 2009.

RIBEIRO, K. F. A.; VALIN JR, M. de O.; RIBEIRO JÚNIOR, I. Principais Métodos Estudados para a Estabilização da Expansão dos Solos Saprolíticos de Filitos da Baixada Cuiabana. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. 2014.

RIBEIRO, V. H. **Estudo de caso de solução para fundação em solo expansível em Sousa-PB.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

SANTOS, A. M. de C.; POSSARI, D. C.; PACHECO, T. M. Estabilização de solo com agregado miúdo reciclado de concreto: estado da arte. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. 2020.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. revista e ampliada Brasília, DF: EMBRAPA, 2013.

SANTOS, L. C. DOS. **Estudo da estabilização de um solo expansivo através da incorporação de areia verde de fundição residual. 2015**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

SANTOS, S. B. **Diagnóstico e proposta de solução para obra de canal assente em solo expansivo da região de Propiá/SE. 2021.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2021

SEED, H. B.; WOODWARD JR, R. J.; LUNDGREN, R. Prediction of swelling potential for compacted clays. **Journal of the soil mechanics and foundations division**, v. 88, n. 3, p. 53-87, 1962.

SILVA, D. T. da.; RAMOS, H. de O.; BRAZ, L. R. Z., SANTOS, L. D. T. dos; JUNIOR, I. R. Estudo de um solo residual expansivo como matéria prima na fabricação de tijolos de solo-cal utilizando cura acelerada. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. 2012.

SILVA, J. A.; BELLO, M. I. M. da C. V.; FERREIRA, S. R. de M. Comportamento geotécnico de um solo expansivo estabilizado com cinza de casca de arroz e cal hidratada. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 2, p. 232-256, 2020.

SILVA, R. B.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L.; GOMES, O. D. F. M.; LIMA, L. G. L. M.; MOURA, R. C. D. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. **Ambiente construído**, v. 15, p. 321-334, 2015.

SILVA, R. D. O. **Utilização dos Resíduos Sólidos da Indústria Cacaueira para a Produção de Etanol**. 2018. Dissertação (Mestrado em Materiais, Bioprocessos e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Espírito Santo.

SILVA, T. C. **Avaliação do comportamento hidromecânico e do processo de propagação de fissuras de solo expansivo do município de Bonito/PE**. 2019. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

SIMÕES, P. R. M. (1987). **Aspectos relevantes sobre a implantação de obras de engenharia em solos e rochas expansivas**. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento – Informe Técnico, nº 26, junho de 1987. Camaçari – BA.

SOARES, J. M. D.; PIRES, G. M.; CONTERATO, T. M. Solos Expansivos: Estudo de Caso em Santa Maria/RS. **Seminário de engenharia geotécnica do Rio Grande do Sul, VII**, 2013.

SODRÉ, G. A. Resíduos regionais usados como substratos na região sul da Bahia. **Encontro nacional sobre substratos para plantas**, v. 6, 2008.

SOUZA, L. D. de. **Análise do comportamento mecânico de um solo expansivo da província petrolífera de Urucu-AM para fins de pavimentação.** 2009. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

SHUKLA, S. K. (2017). **Fundamentals of fibre-reinforced soil engineering**. Springer Singapore.

TENÓRIO, E. A. G. **Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

TIWARI, N.; SATYAM, N.; PUPPALA, A. J. Strength and durability assessment of expansive soil stabilized with recycled ash and natural fibers. **Transportation Geotechnics**, v. 29, p. 100556, 2021.

TIZA, M.; IORVER, V. T. A Review of Literature on Effect of Agricultural Solid Wastes on Stabilization of Expansive Soil. **International journal for innovative research in multidisciplinary field**, v. 2, n. 7, p. 121-132, 2016.

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

VELOSO, M. C. R. D. A.; VILLELA, L. S.; MESQUITA JÚNIOR, L.; VALLE, M. L. A.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Produção e caracterização de compósitos à base de gesso reforçado com partículas de resíduo da agroindústria do cacau. **Revista Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, 2021.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais.** 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VILAR, O. M.; FERREIRA, S. R. de M. Solos colapsíveis e expansivos. **Solos não saturados no contexto geotécnico**, v. 1, p. 415-436, 2015.

WANG, Y. X.; GUO, P.P; REN, W. X.; YUAN, B. X.; YUAN, H. P.; ZHAO, Y. L.; SHAN, S. B.; CAO, P. Laboratory investigation on strength characteristics of expansive soil treated with jute fiber reinforcement. **International Journal of Geomechanics**, v. 17, n. 11, p. 04017101, 2017.

YAW, M. I.; EMMANUEL, A.; PK, Y. P.; SENYO, D. K. Feasibility of using cocoa pod husk ash (CPHA) as a stabilizer in the production of compressed earth bricks. **Intl J Eng Res Gen Sci**, v. 3, p. 514-524, 2015.