



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DEYVID DE SOUZA ELIAS

**USO COMBINADO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO E CINZA LEVE DE
CARVÃO MINERAL PARA CONTROLE DE RETRAÇÃO E FLUXO DE GÁS EM
CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS**

FORTALEZA

2026

DEYVID DE SOUZA ELIAS

USO COMBINADO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO E CINZA LEVE DE CARVÃO
MINERAL PARA CONTROLE DE RETRAÇÃO E FLUXO DE GÁS EM CAMADAS DE
COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de Concentração: Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares

FORTALEZA

2026

DEYVID DE SOUZA ELIAS

USO COMBINADO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO E CINZA LEVE DE CARVÃO
MINERAL PARA CONTROLE DE RETRAÇÃO E FLUXO DE GÁS EM CAMADAS DE
COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de Concentração: Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares

Aprovada em 22/07/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Carlos Alves Barroso Junior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fernando Feitosa Monteiro
Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Prof. Dr. Jardel Andrade de Oliveira
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Dedico este trabalho aos meus pais, Francisco Elias Junior e Nilsa de Souza Elias, por todo o apoio, cumplicidade, amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria, ao final desta importante etapa da minha trajetória acadêmica e pessoal, expressar minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Esta conquista não é resultado de um esforço isolado, mas de uma caminhada construída com apoio, compreensão, amizade, orientação e colaboração de muitas pessoas e instituições.

Agradeço primeiramente a Deus, por me conduzir ao longo desta jornada, concedendo-me força, sabedoria e perseverança para enfrentar os desafios, superar as dificuldades e chegar até este momento tão significativo da minha vida.

Aos meus pais, Francisco Elias Junior e Nilsa de Souza Elias, minha eterna gratidão pelo amor, pelo cuidado, pelo incentivo e por serem minha base em todos os momentos. A presença, os ensinamentos e o apoio de vocês foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente, mesmo diante das adversidades.

À minha filha, Laura Freitas de Souza Elias, minha maior motivação, agradeço por dar ainda mais sentido a esta caminhada. Sua existência é fonte de força, inspiração e amor, e foi também por você que encontrei ânimo para seguir, mesmo nos momentos mais difíceis.

À Jocelma Freitas de Souza e a Pedro Henrique de Freitas, agradeço pela parceria, pela cumplicidade e pelo afeto construídos ao longo de tantos anos. Onde quer que eu esteja, levarei vocês sempre comigo, com amor, carinho e gratidão.

À minha família, agradeço pelo carinho, pela torcida e pelo apoio ao longo desta caminhada. De modo especial, agradeço ao meu tio Valgena Jorge Cardoso de Oliveira, pelo afeto, pela parceria e pela presença constante em minha vida. Alguém cuja generosidade, cuidado e amizade levarei comigo para sempre.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares, registro um agradecimento especial e profundo. Mais do que orientador, foi, ao longo de aproximadamente doze anos de convivência acadêmica, um mentor, um amigo e uma referência profissional. Agradeço pela confiança, pela compreensão, pela parceria, pela postura justa e pelo compromisso permanente com a qualidade do trabalho. Sua competência técnica, sua disponibilidade e sua forma humana de orientar foram essenciais não apenas para o desenvolvimento desta tese, mas também para a minha formação como pesquisador, professor e engenheiro. Levo comigo seus ensinamentos, seu exemplo de seriedade acadêmica e a gratidão por ter contado com sua orientação em uma etapa tão importante da minha vida.

Ao Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral, agradeço de forma especial pela amizade, pelos ensinamentos e pela inspiração ao longo da minha formação. Professor, engenheiro, mentor e amigo, representa uma referência de competência, humanidade e compromisso com a engenharia.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura, Prof. Dr. José Carlos Alves Barroso Junior, Prof. Dr. Fernando Feitosa Monteiro e Prof. Dr. Jardel Andrade de Oliveira, agradeço pela disponibilidade, pela leitura atenta, pelas contribuições técnicas e pelas valiosas considerações apresentadas para o aprimoramento deste trabalho.

Aos professores da Universidade Federal do Ceará, especialmente aos docentes do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, agradeço pelos ensinamentos, pela convivência acadêmica e pelas contribuições fundamentais à minha formação. Estendo também meus agradecimentos aos servidores e colaboradores da instituição, pelo apoio prestado ao longo dessa trajetória.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço à CAPES, pela bolsa concedida e pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa, contribuindo diretamente para a formação científica e acadêmica no Brasil.

A toda a equipe do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação, do Laboratório de Microscopia Eletrônica, do Laboratório de Raios-X, do Laboratório de Análise de Águas, do Laboratório de Saneamento Ambiental e do Laboratório de Materiais de Construção Civil — LMCC, da Universidade Federal do Ceará, agradeço pela infraestrutura, pelo suporte técnico e pela colaboração indispensável à realização dos ensaios e análises que compõem esta pesquisa.

Ao Geólogo Joel Pedrosa Sousa, agradeço de maneira especial. Foi um amigo presente nos momentos mais desafiadores desta jornada, contribuindo com dedicação, disponibilidade e companheirismo para a realização deste trabalho.

Aos técnicos e engenheiros Thiago Duque, Breno Magalhães e Vinícius Moreira de Oliveira Araújo, agradeço pela parceria, pela colaboração e pelas importantes contribuições ao longo desta caminhada experimental e acadêmica.

Ao meu amigo-irmão Anaksmano Magalhães da Silva, deixo um agradecimento especial. Mais do que um amigo, tornou-se um irmão, alguém cuja presença, lealdade e apoio foram fundamentais em diferentes momentos desta trajetória.

Ao amigo Ícaro José Fernandes Santos Bastos, agradeço pela parceria de tantas horas, pela amizade verdadeira e pela presença constante. Sua amizade é uma daquelas que ultrapassam os limites desta etapa e seguem para a vida.

Aos amigos Henrique Petisco de Souza e Cleidson Bastos da Silva agradeço pela amizade, pelo apoio e pela colaboração ao longo desta jornada. A presença de vocês em momentos importantes contribuiu de forma significativa para que este trabalho pudesse ser concluído.

A Vitória Quézia e Sarah Denise Vasconcelos Bastos, agradeço por toda ajuda, pela amizade, pela disponibilidade e pela presença ao longo desta jornada.

À CREDE 8 e à Secretaria de Educação do Estado do Ceará — SEDUC-CE, registro um agradecimento especial. A conclusão deste trabalho somente foi possível graças à compreensão, à sensibilidade e à humanidade daqueles que entenderam a importância desta etapa e permitiram que eu chegasse até este momento. Agradeço, em especial, ao professor Afonso Jampierry Silveira de Almeida, à professora Cintia Raquel Mendonça Vieira Almeida e a José Alves da Silva, bem como a toda a equipe de trabalho com quem compartilhei os últimos dois anos. A parceria, o apoio e a convivência profissional foram fundamentais nesse período.

Aos professores Diógenes Luz, Albani e Anderson, da Escola Zélia de Matos Brito, em Guaramiranga, agradeço pela compreensão, pela ajuda e pelo apoio durante esta caminhada, especialmente nos momentos em que conciliar as responsabilidades profissionais e acadêmicas exigiu esforço, diálogo e colaboração.

Aos amigos Anderson Vieira, Francisco Walderlano, Helano Wilson, Manoel e Paulo Vitor, sempre presentes e disponíveis, agradeço pela amizade sincera, pelo apoio e pela parceria de todas as horas. São amigos que levarei comigo para o resto da vida.

A todos os colegas que estiveram ao meu lado, compartilhando ideias, experiências, desafios, aprendizados e momentos de descontração, meu sincero agradecimento. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada contribuição, direta ou indireta, fizeram parte desta conquista.

A todos, meu muito obrigado.

RESUMO

A disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários impõe desafios, especialmente no controle das emissões de biogás. As camadas de cobertura final atuam como barreiras à infiltração de água e à migração de gases, mas seu desempenho pode ser comprometido pela retração e fissuração de solos compactados. Esta tese avaliou o comportamento hidromecânico e ambiental de misturas constituídas por solo de cobertura, cinza leve de carvão mineral e fibras de polipropileno, visando sua aplicação em aterros sanitários. O programa experimental compreendeu 24 formulações, incluindo materiais de referência, misturas solo-fibra com fibras de 6 e 12 mm, misturas solo-cinza com 10%, 20% e 30% de resíduo e composições ternárias. Foram realizadas caracterizações físico-químicas, mineralógicas, microestruturais, ambientais e geotécnicas, além de ensaios de compactação, consistência, contração, condutividade hidráulica, permeabilidade intrínseca ao ar, compressão simples, tração por compressão diametral, secagem monitorada por imagens e modelagem numérica no software Vadose/W. A cinza reduziu a plasticidade e as retrações volumétrica e linear, sobretudo nos maiores teores; porém, diminuiu a densificação e aumentou o transporte de água e ar. Nos ensaios ambientais, o extrato lixiviado não indicou periculosidade, enquanto o extrato solubilizado caracterizou a cinza como material não inerte, condicionando seu uso ao controle da dosagem, do confinamento e do contato hídrico. As fibras de 12 mm aumentaram a resistência, a deformabilidade e a energia absorvida, mas teores mais elevados favoreceram aglomeração, perda de homogeneidade e maior conectividade de vazios. Entre as misturas ternárias, a matriz com 20% de cinza apresentou a interação mecânica mais favorável com as fibras, embora tenha permanecido menos vantajosa quanto às propriedades de transporte. A avaliação multicritério identificou S0.75F12, composta por solo e 0,75% de fibras de 12 mm, como a formulação de melhor desempenho global. A mistura alcançou 544 kPa na compressão simples e 56,23 kPa na tração indireta, reduziu a retração volumétrica para 32,9% e apresentou condutividade hidráulica de $1,86 \times 10^{-7}$ cm/s. A modelagem indicou respostas próximas para o solo, S0.50F12 e S0.75F12. Conclui-se que cinza e fibras produzem efeitos complementares, mas não necessariamente sinérgicos. A S0.75F12 é a principal candidata à validação em escala ampliada, enquanto as misturas com cinza apresentam potencial para soluções dosadas ou multicamadas.

Palavras-chave: Fibras; Cinza; Fissuras; Retração; Ductilidade.

ABSTRACT

The final disposal of municipal solid waste (MSW) in sanitary landfills poses challenges, particularly regarding the control of biogas emissions. Final cover layers act as barriers to water infiltration and gas migration; however, their performance may be compromised by the shrinkage and cracking of compacted soils. This thesis evaluated the hydromechanical and environmental behavior of mixtures composed of cover soil, coal fly ash, and polypropylene fibers for application in sanitary landfills. The experimental program comprised 24 formulations, including reference materials, soil–fiber mixtures with 6 and 12 mm fibers, soil–ash mixtures containing 10%, 20%, and 30% residue, and ternary compositions. Physicochemical, mineralogical, microstructural, environmental, and geotechnical characterizations were performed, along with compaction, consistency, shrinkage, hydraulic conductivity, intrinsic air permeability, unconfined compression, indirect tensile strength by diametral compression, image-monitored drying, and numerical modeling using the Vadose/W software. The ash reduced plasticity and volumetric and linear shrinkage, particularly at higher contents; however, it decreased densification and increased water and air transport. In the environmental tests, the leaching extract did not indicate hazardous characteristics, whereas the solubilized extract classified the ash as a non-inert material, making its use conditional upon control of dosage, confinement, and contact with water. The 12 mm fibers increased strength, deformability, and absorbed energy, but higher contents favored agglomeration, loss of homogeneity, and greater pore connectivity. Among the ternary mixtures, the matrix containing 20% ash showed the most favorable mechanical interaction with the fibers, although it remained less advantageous in terms of transport properties. The multicriteria assessment identified S0.75F12, composed of soil and 0.75% of 12 mm fibers, as the formulation with the best overall performance. The mixture reached 544 kPa in unconfined compression and 56.23 kPa in indirect tension, reduced volumetric shrinkage to 32.9%, and exhibited a hydraulic conductivity of 1.86×10^{-7} cm/s. The modeling indicated similar responses for the soil, S0.50F12, and S0.75F12. It is concluded that ash and fibers produce complementary, although not necessarily synergistic, effects. S0.75F12 is the main candidate for validation at a larger scale, whereas the ash-containing mixtures show potential for controlled-dosage or multilayer systems.

Keywords: Fibers; Ash; Cracks; Shrinkage; Ductility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases da decomposição anaeróbica da matéria orgânica em aterros sanitários.	32
Figura 2 - Esquema de um sistema de cobertura multicamadas em aterros sanitários.	37
Figura 3 - Curva característica de sucção do solo neutralizado.	41
Figura 4 - Zonas na curva característica de retração do solo.	47
Figura 5 - Esquema idealizado do desenvolvimento de esforços na fibra.	57
Figura 6 - Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra.	59
Figura 7 - Efeito de ponteamto das fibras no solo.	62
Figura 8 - Jazida do solo de cobertura e local de coleta do material da pesquisa.	78
Figura 9 - a) Fibras de polipropileno; b) fibra de 6 mm; c) fibra de 12 mm.	80
Figura 10 - Local de coleta da cinza leve no pátio das instalações da empresa Apodi.	80
Figura 11 - Fluxograma da pesquisa.	81
Figura 12 - Processo de preparação das amostras de solo e cinza. Etapa de quarteamento.	89
Figura 13 - Procedimentos de Mistura solo-fibra: (a) separação da quantidade de solo seco e fibra e homogeneização; (b) adição gradual de fibras; (c) adição de água e revolvimento; (d) armazenamento para uniformização do teor de umidade	92
Figura 14 – CPs para ensaios mecânicos.	93
Figura 15 - Microscópio eletrônico de varredura com detector de EDS.	99
Figura 16 - Etapas do ensaio de determinação do Limite de Contração (LC). (a) pesagem da amostra seca mais capsula; (b) pesagem da amostra seca parafinada; e (c) pesagem da amostra parafinada submersa.	102
Figura 17 - Realização do ensaio de compressão simples.	104
Figura 18 - Realização do ensaio de Tração por Compressão Diametral (TCD).	105
Figura 19 - Aparato experimental produzido para o ensaio de permeabilidade intrínseca ao ar.	108
Figura 20 - Diagrama da célula experimental utilizada no ensaio de permeabilidade intrínseca ao ar.	109
Figura 21 - Moldagem dos corpos-de-prova em cilindro metálico.	110
Figura 22 - Ensaio de papel filtro.	113
Figura 23 - Vista geral da câmara experimental, mostrando o sistema de iluminação, a câmera, a balança e o termo-higrômetro	114
Figura 24 - Análise da superfície da amostra através da rotina empregada.	117

Figura 25 - Geometria adotada na modelagem numérica.....	121
Figura 26 - Difratoograma obtido da análise DRX da amostra de solo.	132
Figura 27 - Difratoograma obtido da análise DRX da amostra de cinza leve.	132
Figura 28 - Micrografia do solo aumentada x1000.	137
Figura 29 - Micrografia da cinza aumentada x100.....	138
Figura 30 - Micrografia do compósito S0.75F12 aumentada x200 e detalhes da interface solo– fibra.....	139
Figura 31 - Micrografia da matriz 80S20C aumentada x100.	141
Figura 32 - Micrografia da matriz 80S20C0.75F12.	142
Figura 33 - Painéis de validação gerados pela rotina automatizada: S0.50F12 em t = 3,5 h.	213
Figura 34 - Superfície dos corpos de prova na moldagem e ao final do monitoramento contínuo: Solo (S), Cinza (C), 80S20C0.50F12 e 70S30C0.75F12.	214
Figura 35 - Verificação operacional e visual da detecção do contorno: primeiro e último quadro válido das séries S, C, S0.50F12, S0.75F12, 90S10C, 90S10C0.50F12 e 90S10C0.75F12	215
Figura 36 - Verificação operacional e visual da detecção do contorno: séries 80S20C, 80S20C0.50F12, 80S20C0.75F12, 70S30C, 70S30C0.50F12 e 70S30C0.75F12	216
Figura 37 - Parte dos corpos de prova e unidades moldadas durante a pesquisa.	232

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Dados climáticos para o ano de 2009.....	123
Gráfico 2 - Variação da massa específica das misturas com o incremento do teor de cinza. .	149
Gráfico 3 - Plotagem dos valores encontrados na Carta de Plasticidade de Casagrande.	150
Gráfico 4 - Curva granulométrica da amostra de solo puro.	159
Gráfico 5 - Curva granulométrica da amostra de cinza (<i>fly ash</i>).	160
Gráfico 6 - Curvas granulométricas do solo, da cinza e das misturas binárias solo-cinza.	161
Gráfico 7 - Curvas de compactação do solo e das misturas com fibras de 6,00 mm de comprimento.	165
Gráfico 8 - Curvas de compactação do solo e das misturas com fibras de 12,00 mm de comprimento.	165
Gráfico 9 - Variação da massa específica seca máxima com o teor de fibras.	166
Gráfico 10 - Variação da umidade ótima com o teor de fibras.	166
Gráfico 11 - Variação da permeabilidade com o teor de fibras.	172
Gráfico 12 - Curva tensão-deformação para os ensaios de RCS da amostra de solo (puro) e para as amostras com os diferentes teores da fibra F6.	186
Gráfico 13 - Curva tensão-deformação para os ensaios de RCS da amostra de solo (puro) e para as amostras com os diferentes teores da fibra F12.	187
Gráfico 14 - Curva tensão-deformação para os ensaios de RCS da amostra de solo (puro), cinza e misturas binárias solo-cinza.	192
Gráfico 15 - Curva tensão-deslocamento para os ensaios de TCD da amostra de solo (puro) e para as amostras com os diferentes teores da fibra F6.....	201
Gráfico 16 - Curva tensão-deslocamento para os ensaios de TCD da amostra de solo (puro) e para as amostras com os diferentes teores da fibra F12.....	201
Gráfico 17 - Curva tensão-deslocamento para os ensaios de TCD da amostra de solo, cinza, e misturas binárias solo-cinza.....	203
Gráfico 18 - Curva tensão-deslocamento dos ensaios de TCD da série de amostras da matriz 90S10C.	204
Gráfico 19 - Curva tensão-deslocamento para os ensaios de TCD da série de amostras da matriz 80S20C.	204
Gráfico 20 - Curva tensão-deslocamento para os ensaios de TCD da série de amostras da matriz 70S30C.	205

Gráfico 21 - Deformação radial acumulada em 14,0 h, organizada por matriz e teor de fibra.	218
Gráfico 22 - Comparação entre retração linear e deformação radial em 14,0 h.	220
Gráfico 23 - Evolução do CIF durante o monitoramento contínuo, organizada por grupo de composição.	221
Gráfico 24 - Curvas de retenção.	225
Gráfico 25 - Curvas de condutividade hidráulica.	226
Gráfico 26 - Variação da saturação com a profundidade – solo (puro).	227
Gráfico 27 - Variação da saturação com a profundidade – S0.50F12.	227
Gráfico 28 - Variação da saturação com a profundidade – S0.75F12.	228

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características e especificações técnicas das fibras de polipropileno FibroMac® da empresa Maccaferri ©.	79
Quadro 2 - Composição percentual das misturas e nomenclatura utilizada. (Continua).....	84
Quadro 3 - Documentação técnica específica para realização dos ensaios.	87
Quadro 4 - Dados climáticos utilizados na análise transiente.	124
Quadro 5 - Parâmetros avaliados nos ensaios de compressão simples não confinada.	185
Quadro 6 - Classificação interpretativa do comportamento mecânico das misturas nos ensaios UCS. (Continua)	195
Quadro 7 - Síntese multicritério do desempenho das misturas nos ensaios UCS. (Continua)	197
Quadro 8 - Parâmetros avaliados nos ensaios de tração por compressão diametral.....	199
Quadro 9 - Classificação interpretativa do comportamento mecânico das misturas nos ensaios de tração por compressão diametral. (Continua)	208
Quadro 10 - Síntese multicritério do desempenho das misturas nos ensaios de tração por compressão diametral. (Continua)	209
Quadro 11 - Ficha técnica da composição de referência S0.75F12. (Continua)	233

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentuais ótimos por comprimento.	61
Tabela 2 - Propriedades dos materiais e condições iniciais empregadas na modelagem.	122
Tabela 3 - Propriedades físico-químicas dos materiais e das matrizes solo-cinza.	127
Tabela 4 - Composição química do solo e da cinza leve.	130
Tabela 5 - Fases minerais identificadas no solo e na cinza leve.	131
Tabela 6 - Superfície específica do solo e da cinza leve determinada pelo método EMEG. .	134
Tabela 7 - Concentrações dos parâmetros aniônicos nos extratos lixiviado e solubilizado da cinza.	144
Tabela 8 - Concentrações dos parâmetros catiônicos nos extratos lixiviado e solubilizado da cinza.	145
Tabela 9 - Resultados de Massa Específica dos Grãos.	147
Tabela 10 - Valores de Referência de solos da RMF.	148
Tabela 11 - Valores de massa específica real dos grãos encontrados em outras pesquisas. ...	148
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de determinação dos Limites de Consistência (LL e LP).	150
Tabela 13 - Resultado dos ensaios de determinação dos fatores de contração.	153
Tabela 14 - Variação dos fatores de contração das amostras com adição de fibra 12 mm em relação ao solo.	154
Tabela 15 - Variação dos fatores de contração das misturas solo-cinza em relação ao solo. .	155
Tabela 16 - Variação dos fatores de contração das misturas solo-cinza com adição de fibra 12 mm em relação à mesma matriz (mistura solo-cinza).	156
Tabela 17 - Frações granulométricas das amostras analisadas.	158
Tabela 18 - Índice de atividade do solo, da cinza e das matrizes solo-cinza.	162
Tabela 19 - Resultado dos ensaios de compactação (com energia proctor normal).	164
Tabela 20 - Resultado dos ensaios de compactação do solo, cinza e misturas binárias solo-cinza.	167
Tabela 21 - Resultado dos ensaios de compactação do solo, cinza e misturas ternárias solo-cinza-fibra.	169
Tabela 22 - Resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável. (Continua)	170
Tabela 23 - Variação dos valores da permeabilidade com adição de fibras de polipropileno na literatura.	174

Tabela 24 - Condutividade Hidráulica Típica de Cinzas Volantes (<i>Fly-Ash</i>).	175
Tabela 25 - Influência do teor de cinza sobre a condutividade hidráulica.	176
Tabela 26 - Condutividade hidráulica das misturas solo–cinza–fibra.	176
Tabela 27 - Permeabilidade intrínseca aparente ao ar dos materiais e compósitos. (Continua)	179
Tabela 28 - Efeito das fibras sobre a permeabilidade ao ar das matrizes solo–cinza.	182
Tabela 29 - Resultados consolidados dos ensaios de compressão não confinada.	188
Tabela 30 - Variação dos parâmetros mecânicos das misturas reforçadas com fibras de 12 mm em relação ao solo natural	190
Tabela 31 - Variação dos parâmetros mecânicos das misturas solo–cinza reforçadas com fibras de 12 mm em relação às respectivas matrizes sem reforço.	193
Tabela 32 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral. (Continua)	199
Tabela 33 - Misturas ternárias com maiores energias até o deslocamento de 4,5 mm.	206
Tabela 34 - Programa da campanha de retração e fissuração por análise digital de imagens.	212
Tabela 35 - Quantificação da retração pelo recuo do contorno: deformação radial acumulada, redução de área, vazão anelar e anisotropia ao fim da janela válida. (Continua)	216
Tabela 36 - Comparação entre limite de contração, retrações convencionais e deformação radial por imagem	219
Tabela 37 - CIF mediano das composições avaliadas.	222

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEV	<i>Air Entry Value</i> (Valor de Entrada de Ar)
AGCL	Ácidos Graxos de Cadeia Longa
AOV	Ácidos Orgânicos Voláteis
ASE	Área Superficial Específica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	<i>Attenuated Total Reflectance</i> (Refletância Total Atenuada)
BET	Brunauer, Emmett e Teller (Método de análise de superfície)
CBR	<i>California Bearing Ratio</i> (Índice de Suporte Califórnia)
CE	Condutividade Elétrica
CIF	<i>Crack Intensity Factor</i> (Fator de Intensidade de Fissuras)
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CLCM	Cinza Leve de Carvão Mineral
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
CP	Corpo de Prova
CRAS	Curva de Retenção de Água no Solo
CTA	Capacidade de Troca Aniônica
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DCD	Dupla Camada Difusa
DIA	Digital Image Analysis (Análise de Imagens Digitais)
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DRX	Difração de Raios X
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (Espectrometria de Energia Dispersiva)
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental dos EUA)
FRX	Fluorescência de Raios X
GCL	<i>Geosynthetic Clay Liner</i> (Geocomposto Argiloso para Revestimento)
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (Potencial de Aquecimento Global)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

IP	Índice de Plasticidade
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
LC	Limite de Contração (ou <i>Shrinkage Limit</i> - SL)
LandGEM	<i>Landfill Gas Emission Model</i>
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MOR	<i>Modulus of Rupture</i> (Módulo de Ruptura / Resistência à Flexão)
NBR	Norma Brasileira
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PET	Polietileno Tereftalato (Poliéster)
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Vinila
RCRA	<i>Resource Conservation and Recovery Act</i>
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
TCD	Tração por Compressão Diametral
UCS	Unconfined Compressive Strength (Resistência à Compressão Não Confinada / Simples)
U-S	Umedecimento e Secagem
UTE	Usina Termelétrica
WDXRF	<i>Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence</i> (Fluorescência de Raios X por Dispersão de Comprimento de Onda)

LISTA DE SÍMBOLOS

k	Condutividade hidráulica do meio poroso, em cm/s.
ψ_m	Sucção matricial, em kPa.
V_p	Volume total da amostra revestida com parafina, em cm ³ .
$M_{p,ar}$	Massa da amostra parafinada determinada ao ar, em g.
$M_{p,\acute{a}gua}$	Massa aparente da amostra parafinada imersa em água, em g.
γ_w	Massa específica da água adotada no cálculo, em g/cm ³ .
V_{par}	Volume da camada de parafina, em cm ³ .
γ_{par}	Massa específica da parafina, em g/cm ³ .
V_f	Volume final da amostra seca, em cm ³ .
M_s	Massa seca do solo ou da amostra, em g.
σ_t	Tensão ou resistência à tração, em kPa ou MPa.
P	Carga máxima de ruptura aplicada, em N.
D	Diâmetro do corpo de prova, em mm ou cm.
L	Comprimento ou altura do corpo de prova, em mm, cm ou m.
E_f	Módulo de elasticidade da fibra, em MPa ou GPa.
E_s	Módulo de elasticidade da matriz de solo, em MPa ou GPa.
l	Comprimento da fibra ou do corpo de prova, conforme a equação, em mm ou cm.
d	Diâmetro da fibra ou do corpo de prova, conforme a equação, em μm , mm ou cm.
R_a	Resistência de aderência ou de atrito mobilizada na interface fibra–matriz.
R_t	Resistência à tração da fibra, em MPa.
l_c	Comprimento crítico da fibra, em mm.
F_t	Força de tração mobilizada na fibra, em N.
F_a	Força de aderência mobilizada na interface fibra–matriz, em N.
c'	Intercepto coesivo efetivo, em kPa.
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo, em graus.
CIF	Fator de Intensidade de Fissuras (Crack Intensity Factor), em %.
$\gamma_{d,m\acute{a}x}$	Peso específico seco máximo, em kN/m ³ .
$\omega_{ot} (w_{ot})$	Umidade ótima de compactação, em %.
M_f	Massa de fibras incorporada à mistura, em g.

M_c	Massa de cinza incorporada à mistura, em g.
M_{matriz}	Massa seca total da matriz solo–cinza, em g.
MO	Teor de matéria orgânica; unidade conforme a apresentação (% ou g/kg).
M_r	Massa do resíduo mineral após a calcinação, em g.
S_t	Superfície específica total, em m ² /g.
a	Massa de EMEG retida pela amostra, em g.
b	Massa da amostra seca em estufa, em g.
2θ	Ângulo de difração de raios X, em graus.
$R_{t,cd}$	Resistência à tração por compressão diametral, em kPa.
h_1	Carga hidráulica inicial no ensaio a carga variável, em cm.
h_2	Carga hidráulica final no ensaio a carga variável, em cm.
Δt	Intervalo de tempo decorrido entre as leituras, em s.
i	Gradiente hidráulico, adimensional.
k_{ai}	Permeabilidade intrínseca aparente ao ar, em m ² .
μ	Viscosidade dinâmica do ar, em Pa·s.
P_S	Pressão absoluta de saída do ar, em Pa.
P_E	Pressão absoluta de entrada do ar, em Pa.
Q_S	Vazão de saída do ar, em m ³ /s.
A	Área da seção transversal do corpo de prova, em m ² .
A_t	Área superficial projetada da amostra no instante t, em mm ² .
$D_{eq,t}$	Diâmetro equivalente da amostra no instante t, em mm.
$D_{eq,0}$	Diâmetro equivalente inicial da amostra, em mm.
$\varepsilon_r(t)$	Deformação radial acumulada no instante t, em %.
A_0	Área superficial inicial da amostra, em mm ² .
$\Delta A/A_0(t)$	Redução relativa da área superficial no instante t, em %.
$v_a(t)$	Largura média do vazio anelar no instante t, em mm.
A_f	Área identificada como fissura, na unidade de área adotada no processamento.
A_a	Área útil analisada da superfície do corpo de prova, na unidade de área adotada no processamento.
t	Tempo de monitoramento, em h.
ρ_s	Massa específica dos grãos ou sólidos, em g/cm ³ .
G_s	Densidade relativa dos grãos, adimensional.
R^2	Coefficiente de determinação, adimensional.

LL	Limite de liquidez, em %.
LP	Limite de plasticidade, em %.
IP	Índice de plasticidade, em %.
w_i	Teor de umidade inicial, em %.
LC	Limite de contração, em %.
R	Razão de contração, adimensional.
$VS(w_i)$	Retração volumétrica referida à umidade inicial, em %.
$LS(w_i)$	Retração linear equivalente referida à umidade inicial, em %.
Δw_c	Intervalo de umidade no qual ocorre a contração, em pontos percentuais.
IA	Índice de atividade de Skempton, adimensional.
ρ_d	Massa específica seca, em g/cm ³ .
$\rho_{d,máx}$	Massa específica seca máxima, em g/cm ³ .
γ_d	Peso específico seco, em kN/m ³ .
k_{20}	Condutividade hidráulica corrigida para 20 °C, em cm/s.
r	Coeficiente de correlação linear, adimensional.
q_u	Resistência à compressão não confinada, em kPa.
$\sigma_{c,máx}$	Tensão máxima de compressão, em kPa.
$\varepsilon_p / \varepsilon_{pico}$	Deformação axial correspondente ao pico de resistência, em %.
T_p / T_{pico}	Tenacidade até o pico de resistência, em kJ/m ³ .
s_u	Resistência ao cisalhamento não drenada, em kPa.
E_{50}	Módulo secante a 50% da tensão máxima, em kPa ou MPa.
n	Número de corpos de prova ou de observações, adimensional.
δ_p	Deslocamento vertical correspondente ao pico de resistência, em mm.
E_p	Energia absorvida até o pico de resistência, em J.
$E_{0,75}$	Energia absorvida até o deslocamento de 0,75 mm, em J.
$E_{4,5}$	Energia absorvida até o deslocamento de 4,5 mm, em J.
S_r	Grau de saturação, em %.
θ	Teor de umidade volumétrica, em m ³ /m ³ ou %.
z	Profundidade, em m.
ψ	Sucção, em kPa.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Justificativa	27
1.2	Objetivos.....	28
1.2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	28
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	29
1.3	Estrutura do Trabalho	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1	Aterros Sanitários e Emissões de Biogás.....	31
2.1.1	<i>Geração e Composição do Biogás.....</i>	31
2.1.2	<i>Impactos Ambientais e Energéticos do Biogás.....</i>	35
2.1.3	<i>Sistemas de Cobertura (Cover Liners) em Aterros Sanitários.....</i>	37
2.2	Retração de Solos Argilosos Compactados	40
2.2.1	<i>Efeito da Retração na Permeabilidade ao Gás e à Água.....</i>	43
2.2.2	<i>Métodos para Medição da Retração e Caracterização da Fissuração</i>	44
2.2.2.1	Determinação do Limite de Contração (LC/SL):	44
2.2.2.2	Medição Contínua da Retração (Curva de Retração).....	47
2.2.2.3	Caracterização da Fissuração	49
2.2.2.4	Medição da Resistência à Tração/Flexão	50
2.3	Reforço de Solos com Fibras	52
2.3.1	<i>Reforço de Solos com Fibras - Conceitos Fundamentais e Contexto Histórico.....</i>	52
2.3.2	<i>Classificação e Propriedades das Fibras.....</i>	54
2.3.3	<i>Mecanismos de Interação Solo-Fibra.....</i>	56
2.3.4	<i>Efeitos do Reforço com Fibras nas Propriedades do Solo.....</i>	60
2.3.5	<i>Estudos Específicos com Adição de Fibras em Solos Argilosos e Finos</i>	63
2.3.6	<i>Considerações de Projeto e Aplicação</i>	66
2.4	Uso de Cinza Leve de Carvão Mineral (CLCM) em Solos	68
2.4.1	<i>Caracterização da CLCM.....</i>	69
2.4.2	<i>Mecanismos de Estabilização de Solos com Cinzas.....</i>	71
2.4.3	<i>Efeitos nas Propriedades do Solo.....</i>	74
2.4.4	<i>Considerações Ambientais e de Aplicação</i>	75
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	77

3.1	Materiais – Seleção, Coleta e Preparação	77
3.1.1	<i>Solo (S).....</i>	77
3.1.2	<i>Fibras de Polipropileno (PP)</i>	79
3.1.3	<i>Cinza Leve de Carvão Mineral (C)</i>	80
3.1.4	<i>Água.....</i>	81
3.2	Sequência da Pesquisa e Delineamento Experimental.....	81
3.2.1	<i>Sequência da Pesquisa.....</i>	81
3.2.2	<i>Misturas Investigadas.....</i>	84
3.3	Métodos e Procedimentos de Ensaios	86
3.4	Preparação das Amostras	88
3.4.1	<i>Preparação Preliminar.....</i>	88
3.4.2	<i>Dosagem dos Materiais</i>	90
3.4.3	<i>Procedimento de Mistura</i>	91
3.4.4	<i>Compactação e Cura dos Corpos de Prova</i>	92
3.5	Caracterização físico-química, mineralógica e ambiental.....	93
3.5.1	<i>Determinação do pH e da Condutividade Elétrica (CE).....</i>	94
3.5.2	<i>Complexo Sortivo, Capacidade de Troca Catiônica (CTC)</i>	94
3.5.3	<i>Teor de matéria orgânica.....</i>	96
3.5.4	<i>Determinação de Superfície Específica.....</i>	97
3.5.5	<i>Análise por Fluorescência de Raios X (FRX).....</i>	97
3.5.6	<i>Difração de Raios X (DRX).....</i>	98
3.5.7	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	98
3.5.8	<i>Ensaio de Lixiviação</i>	99
3.5.9	<i>Ensaio de Solubilização</i>	100
3.6	Caracterização geotécnica, ensaios mecânicos e hidráulicos.....	101
3.6.1	<i>Caracterização Geotécnica.....</i>	101
3.6.2	<i>Caracterização Geomecânica.....</i>	103
3.6.2.1	<i>Ensaio de resistência à compressão simples.....</i>	103
3.6.2.2	<i>Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....</i>	104
3.6.3	<i>Caracterização Hidráulica</i>	106
3.6.3.1	<i>Ensaio de permeabilidade a carga variável</i>	106
3.6.3.2	<i>Ensaio de permeabilidade intrínseca ao ar</i>	107
3.6.3.3	<i>Ensaio de sucção com papel-filtro.....</i>	112

3.6.4	<i>Análise de retração e fissuração por ressecamento por análise digital de imagens</i>	113
3.7	Modelagem Numérica – Vadose®	120
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	126
4.1	Caracterização físico-química, mineralógica e microestrutural	126
4.1.1	<i>Propriedades físico-químicas (pH, CE, CTC e MO)</i>	126
4.1.2	<i>Composição química e mineralógica</i>	129
4.1.2.1	Fluorescência de Raios-X	129
4.1.2.2	Difração de Raios-X	131
4.1.3	<i>Superfície específica e estrutura porosa</i>	134
4.1.4	<i>Morfologia e microestrutura (Microscopia Eletrônica de Varredura- MEV)</i>	136
4.2	Análise Ambiental	143
4.3	Caracterização Geotécnica	146
4.3.1	<i>Massa Específica dos Grãos</i>	147
4.3.2	<i>Limites de Consistência (LL, LP e LC)</i>	149
4.3.2.1	Limites de Liquidez e Plasticidade	149
4.3.2.2	Fatores de contração e retração volumétrica e linear	152
4.3.3	<i>Análise Granulométrica</i>	158
4.4	Ensaio de Compactação	163
4.5	Condutividade Hidráulica	170
4.6	Permeabilidade intrínseca aparente ao ar	178
4.7	Resistência à compressão não confinada	184
4.8	Resistência à tração por compressão diametral	198
4.9	Retração e fissuração por ressecamento (análise digital de imagens)	211
4.9.1	<i>Confiabilidade e limitações da análise digital</i>	212
4.9.2	<i>Comportamento geral das amostras durante a secagem</i>	213
4.9.3	<i>Quantificação da retração</i>	215
4.9.4	<i>Relação com o limite de contração e as retrações volumétrica e linear</i>	219
4.9.5	<i>Evolução temporal da fissuração superficial</i>	221
4.10	Modelagem numérica (Vadose®)	224
4.10.1	<i>Curvas de retenção e de condutividade hidráulica não saturada</i>	224
4.10.2	<i>Evolução do grau de saturação da camada de cobertura</i>	226
4.11	Síntese integrada dos resultados e definição da composição de referência	230

5	CONCLUSÕES	237
5.1	Considerações finais	237
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	239
	REFERÊNCIAS	242
	APÊNDICE A - FOTOS DA CÉLULA ADAPTADA PARA O ENSAIO DE PERMEABILIDADE INTRÍNSECA AO AR.....	265
	APÊNDICE B - TRECHOS REPRESENTATIVOS DO CÓDIGO-FONTE DA ROTINA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE FISSURAÇÃO.....	267
	APÊNDICE C - FOTOS DA CÂMARA PARA AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO POR ANÁLISE DE IMAGEM DIGITAL	273
	APÊNDICE D – CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO QUALITATIVA DOS RESULTADOS DE COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	275

1 INTRODUÇÃO

A intensificação da urbanização, o crescimento populacional e os padrões contemporâneos de produção e consumo têm ampliado a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e imposto novos desafios à engenharia ambiental e sanitária. Estimativas indicam que a geração mundial de RSU poderá passar de aproximadamente 2,1 bilhões de toneladas em 2023 para 3,8 bilhões de toneladas em 2050, caso não sejam adotadas estratégias mais efetivas de prevenção, recuperação e tratamento dos resíduos (UNEP, 2024). Nesse cenário, a disposição final ambientalmente adequada permanece como etapa essencial dos sistemas de gestão de RSU, especialmente em regiões nas quais a recuperação material e energética ainda não é suficiente para reduzir de forma expressiva a fração destinada a aterros sanitários.

Os aterros sanitários modernos são obras de engenharia projetadas para reduzir os impactos da disposição final de resíduos, por meio de sistemas de impermeabilização, drenagem e tratamento de lixiviados, coleta e controle de biogás, monitoramento ambiental e cobertura operacional ou final. Apesar desses avanços, a decomposição anaeróbia da fração orgânica dos RSU gera biogás, constituído majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de gases traço associados a odores, corrosividade e riscos à saúde. O metano (CH_4) apresenta elevado potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential* – GWP), sendo significativamente mais impactante que o dióxido de carbono (CO_2) em escalas de tempo relevantes para a mitigação climática.

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021; 2023), o GWP do metano é aproximadamente 84 vezes maior que o do CO_2 em um horizonte de 20 anos e cerca de 28 a 34 vezes maior em um horizonte de 100 anos. Assim, o controle das emissões fugitivas em aterros sanitários constitui uma questão simultaneamente ambiental, sanitária, operacional e energética, especialmente considerando o aproveitamento do biogás como fonte renovável de energia.

O funcionamento seguro de um aterro sanitário reside na sua capacidade de contenção. Sistemas de revestimento na base e nas laterais do aterro e sistemas de cobertura na parte superior são projetados para impedir a migração de lixiviados para o solo e o lençol freático, e a emissão de biogás para a atmosfera (Rowe, 2005). A eficiência de uma cobertura na captura e no controle do biogás depende de sua integridade hidráulica e de sua baixa permeabilidade ao gás. No entanto, a exposição às intempéries (variações de temperatura, ciclos de umedecimento e secagem, radiação UV) e o recalque diferencial do maciço de resíduos

podem comprometer a integridade da camada de cobertura ao longo do tempo (Sharma; Reddy, 2004).

Em sistemas convencionais, solos argilosos compactados são amplamente empregados como barreiras de baixa permeabilidade, devido à sua disponibilidade, ao custo relativamente reduzido e à capacidade de limitar o transporte de água e gás quando adequadamente compactados (Albrecht; Benson, 2001). Entretanto, a eficiência dessas barreiras pode ser comprometida ao longo do tempo pela retração volumétrica e pela fissuração por dessecação.

Em regiões sujeitas a ciclos sazonais de umedecimento e secagem, a perda de umidade aumenta a sucção matricial e pode induzir tensões de tração superiores à resistência do solo, favorecendo a formação de trincas. Essas descontinuidades criam caminhos preferenciais de fluxo, elevando a permeabilidade efetiva da camada e reduzindo sua capacidade de contenção (Bouazza, 2002). Estudos recentes demonstram que fissuras por dessecação em camadas argilas compactadas deterioram significativamente o desempenho hidráulico de coberturas de aterros e podem intensificar tanto a infiltração de água quanto a emissão de gases (Rayhani; Yanful; Fakher, 2007; Julina; Thyagaraj, 2020).

A mitigação da fissuração em solos argilosos compactados tem motivado o desenvolvimento de materiais compósitos e soluções de estabilização capazes de preservar a baixa permeabilidade e, simultaneamente, aumentar a resistência à tração, a ductilidade e a integridade pós-fissuração. Entre as alternativas para aprimorar o desempenho de solos argilosos em camadas de cobertura, o reforço com fibras tem se destacado como uma técnica promissora. A adição de fibras discretas e aleatoriamente distribuídas ao solo cria um material compósito com propriedades mecânicas e hidráulicas superiores às do solo não reforçado (Evangelou *et al.*, 2023).

As fibras atuam por mecanismos de ponteamto, transferência de tensões e aumento da resistência pós-pico, contribuindo para um comportamento menos frágil da matriz solo-fibra. Pesquisas recentes com solos argilosos reforçados indicam que a adição de fibras pode reduzir a intensidade de fissuração por dessecação e melhorar o desempenho mecânico sob variações de umidade (Mirzababaei *et al.*, 2017; Evangelou *et al.*, 2023).

As fibras de polipropileno destacam-se em aplicações geotécnicas por suas propriedades vantajosas. Possuem alta resistência à tração, baixo peso específico, inércia química e durabilidade (resistindo à degradação química e biológica em aterros). Estudos têm demonstrado que a adição de fibras de polipropileno a solos argilosos pode reduzir significativamente a retração, a formação de trincas e a permeabilidade (Consoli *et al.*, 2002;

Tang *et al.*, 2010). Além disso, as fibras de polipropileno podem melhorar a resistência à compressão, a resistência ao cisalhamento e a ductilidade do solo (Festugato *et al.*, 2017).

Paralelamente ao uso de reforços como as fibras, busca-se também alternativas sustentáveis através do aproveitamento de subprodutos industriais. Nesse sentido, a utilização de cinza leve (*fly ash*) de carvão mineral apresenta uma abordagem potencialmente benéfica para a melhoria de solos argilosos. A cinza pode apresentar propriedades pozolânicas, ou seja, a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio que pode estar presente no solo, formando compostos cimentantes semelhantes aos do cimento Portland (Mehta, 1987). Além do efeito pozolânico, em misturas com solos argilosos ou bentoníticos, a cinza pode promover alterações significativas na plasticidade, na estrutura de poros, na resistência mecânica e na condutividade hidráulica do material. Esses efeitos decorrem tanto de reações químicas quanto de modificações físicas na matriz do solo, justificando sua avaliação criteriosa para aplicação em barreiras ambientais (Ahmaruzzaman, 2010; Kumar, 2019).

Embora os efeitos isolados do reforço com fibras e da incorporação de cinzas em solos tenham sido objeto de estudos recentes, ainda são necessários avanços quanto ao entendimento do comportamento integrado de misturas solo-cinza-fibra aplicadas a camadas de cobertura de aterros sanitários. Essa lacuna é particularmente relevante quando se consideram materiais regionais, condições climáticas locais e propriedades críticas para o desempenho de longo prazo, como retração, fissuração, condutividade hidráulica, fluxo de gás, resistência mecânica e compatibilidade ambiental. Dessa forma, a presente tese investiga o uso combinado de fibras de polipropileno e cinza leve de carvão mineral na melhoria de um solo argiloso compactado, visando ao desenvolvimento de uma solução tecnicamente viável e ambientalmente sustentável para camadas de cobertura final de aterros sanitários.

1.1 Justificativa

A disposição final de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários é uma necessidade global, porém acarreta desafios ambientais significativos, como a geração de lixiviados e a emissão de biogás. As camadas de cobertura final são elementos cruciais para o controle desses subprodutos, usualmente construídas com solos argilosos compactados devido à sua baixa permeabilidade inicial. Contudo, a eficácia dessas barreiras convencionais é frequentemente comprometida a longo prazo pela fissuração intrínseca decorrente da retração por dessecação, fenômeno exacerbado por ciclos climáticos de umedecimento e secagem. Essas

fissuras criam caminhos preferenciais que aumentam a permeabilidade ao gás (permitindo emissões fugitivas de metano) e à água (aumentando a geração de lixiviado).

Diante da necessidade de soluções alternativas as já existentes, esta pesquisa investiga a combinação de dois aditivos, as fibras de polipropileno, conhecidas por conferir ductilidade e controle mecânico da fissuração, e cinza leve de carvão mineral, que além de um passivo ambiental que carece de uma destinação mais adequada, é também um subproduto industrial abundante com potencial pozolânico para estabilizar a matriz do solo, reduzir a retração e diminuir a permeabilidade intrínseca. Embora os efeitos isolados desses materiais sejam relativamente estudados, existe uma lacuna significativa no conhecimento sobre os efeitos sinérgicos e o comportamento hidromecânico e ambiental da combinação ternária solo-fibra-cinzas, especialmente utilizando materiais regionais e focando nas propriedades críticas para o desempenho de camadas de cobertura (retração, fissuração, permeabilidade ao gás e à água, estabilidade mecânica e compatibilidade ambiental).

Este estudo se justifica, portanto, pela relevância ambiental de buscar reduzir as emissões de metano de aterros sanitários, pela necessidade de desenvolver alternativas potencialmente mais duráveis e economicamente viáveis para camadas de cobertura utilizando materiais locais (solo da região e resíduo industrial), e pela contribuição científica original ao investigar as interações complexas e o desempenho integrado do sistema solo-cinza-fibra, fornecendo dados e modelos essenciais para o avanço da geotecnia ambiental e da engenharia de aterros no contexto brasileiro, particularmente na região Nordeste.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar experimental, analítica e numericamente o comportamento hidromecânico e ambiental de misturas compostas por solo argiloso, cinza leve de carvão mineral e fibras de polipropileno, visando verificar sua viabilidade técnica e ambiental como camada de cobertura final de aterros sanitários, com foco no controle da retração, da fissuração e dos fluxos de água e gás.

1.2.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar física, química, mineralógica e geotecnicamente os materiais utilizados na presente pesquisa - solo argiloso, cinza leve de carvão mineral e as fibras de polipropileno;
- b) Avaliar a influência isolada da adição de fibras de polipropileno e de cinza leve nas propriedades de compactação, resistência mecânica, condutividade hidráulica, retração e fissuração do solo argiloso;
- c) Investigar os efeitos combinados da adição de teores selecionados de cinza e fibras de polipropileno sobre as propriedades hidromecânicas, de retração/fissuração, microestruturais e ambientais do solo argiloso, comparando com as misturas binárias e o solo puro;
- d) Integrar os resultados experimentais para definir uma composição de referência, complementando a análise com uma avaliação numérica preliminar da sucção matricial e do grau de saturação do solo e das misturas selecionadas..

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, organizados de modo a apresentar, de forma sequencial, a fundamentação da pesquisa, os procedimentos metodológicos adotados, os resultados obtidos e as principais conclusões.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do estudo, contextualizando os desafios associados ao desempenho das camadas de cobertura de aterros sanitários. Também são expostas a justificativa da pesquisa, sua relevância científica e técnica, a hipótese investigada e os objetivos geral e específicos.

O Capítulo 2 reúne a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento do trabalho. São abordados aspectos relacionados aos aterros sanitários, às funções das camadas de cobertura, ao comportamento dos solos compactados e ao uso de cinzas e fibras como materiais de melhoria das propriedades geotécnicas.

O Capítulo 3 descreve os materiais empregados, as formulações avaliadas e os procedimentos metodológicos utilizados no programa experimental. São apresentados os

métodos de preparação das amostras, os ensaios de caracterização e desempenho e os procedimentos adotados nas análises experimentais, analíticas e numéricas.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos ao longo da pesquisa. As análises contemplam as propriedades físicas, químicas, mineralógicas, microestruturais, mecânicas, hidráulicas e ambientais dos materiais, além da avaliação integrada do efeito da incorporação de cinza e fibras ao solo.

Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões e considerações finais decorrentes dos resultados alcançados. Nesse capítulo, são destacadas as principais contribuições da pesquisa, a aplicabilidade das misturas estudadas em camadas de cobertura e as sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os temas centrais relacionados à presente pesquisa, que investiga o uso de fibras de polipropileno e cinza leve de carvão mineral para a melhoria das propriedades de um solo argiloso compactado, visando sua aplicação em sistemas de cobertura de aterros sanitários.

2.1 Aterros Sanitários e Emissões de Biogás

Nesta seção será abordado o contexto mais amplo dos aterros sanitários e das emissões de biogás detalhando o processo de geração do biogás, seus impactos ambientais e energéticos, e a função das camadas de cobertura no controle dessas emissões.

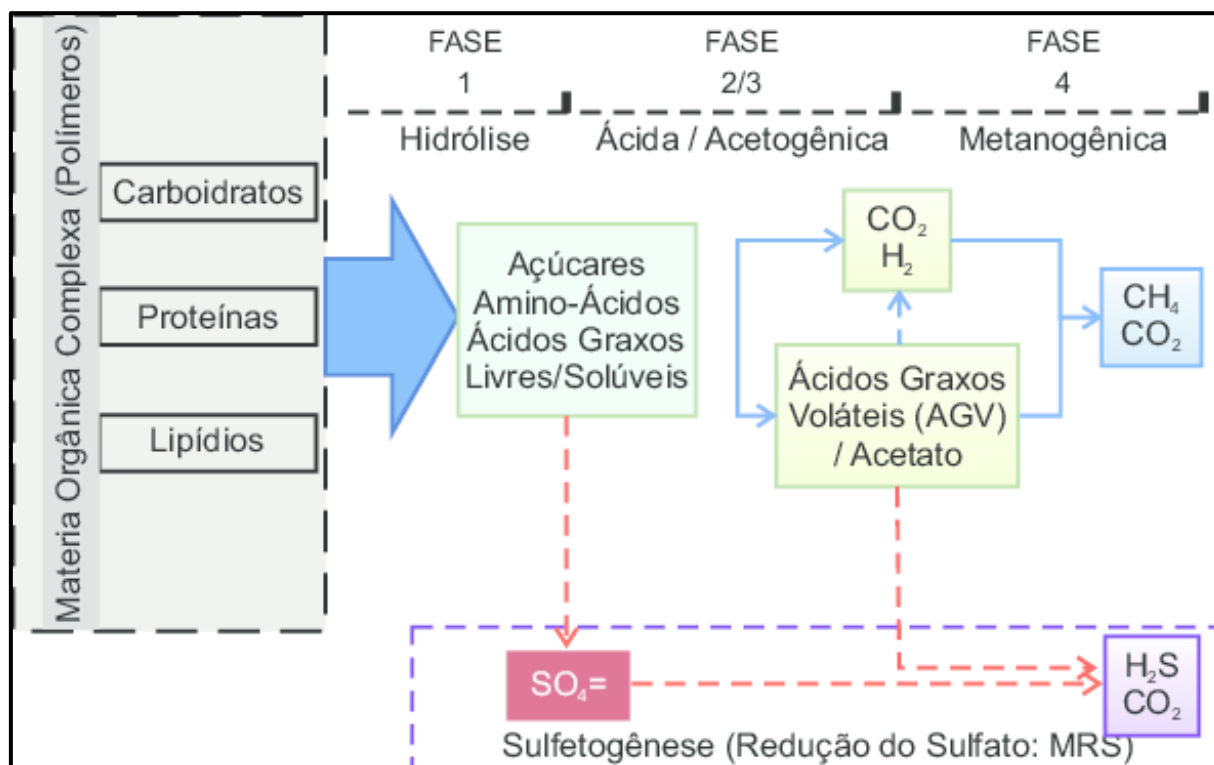
2.1.1 Geração e Composição do Biogás

Aterros sanitários, embora representem uma evolução em relação aos lixões a céu aberto, no que tange à disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU), não eliminam completamente os impactos ambientais associados a essa prática. Uma das principais preocupações ambientais relacionadas aos aterros sanitários é a geração de *biogás*, um subproduto inevitável da decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos. Compreender o processo de formação do biogás, sua composição e os fatores que o influenciam é fundamental para desenvolver estratégias eficazes de mitigação de seus impactos e de aproveitamento de seu potencial energético.

O biogás é resultado da decomposição anaeróbica da fração orgânica biodegradável dos RSU, ou seja, da degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio livre. Esse processo é complexo e envolve uma série de reações bioquímicas em cadeia, catalisadas por uma comunidade diversificada de microrganismos, que atuam de forma sequencial e interdependente. Esses microrganismos, em sua maioria bactérias arqueobactérias (arqueias), transformam os compostos orgânicos complexos presentes nos resíduos em compostos mais simples, até a formação dos produtos finais, metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), que são os principais constituintes do biogás (Kjeldsen *et al.*, 2002; Tchobanoglous e Kreith, 2002; Wangyao *et al.*, 2010; Christensen, 2011).

O processo de biodegradação anaeróbia pode ser didaticamente subdividido em quatro fases principais, cada uma caracterizada pela predominância de determinados grupos microbianos e pela ocorrência de reações bioquímicas específicas (Figura 1) (De Gioannis *et al.*, 2009; Cassini *et al.*, 2014).

Figura 1 - Fases da decomposição anaeróbica da matéria orgânica em aterros sanitários.



Fonte: Cassini *et al.* (2014).

Na etapa de hidrólise, macromoléculas orgânicas insolúveis, como polissacarídeos, proteínas e lipídios, são convertidas em compostos solúveis de menor peso molecular, incluindo açúcares simples, aminoácidos e ácidos graxos. Esse processo é mediado por enzimas extracelulares produzidas por bactérias hidrolíticas e, em muitos casos, constitui a etapa limitante da digestão anaeróbia, especialmente em substratos lignocelulósicos (Meegoda *et al.*, 2018).

A acidogênese corresponde à fermentação dos produtos da hidrólise por bactérias acidogênicas. Os produtos da hidrólise (açúcares, aminoácidos e AGCL) são fermentados por um grupo diverso de bactérias acidogênicas, em sua maioria anaeróbias facultativas. Esses microrganismos convertem esses compostos em uma variedade de ácidos orgânicos voláteis (AOV) – principalmente ácido acético, ácido propiônico, ácido butírico, ácido valérico e ácido lático –, além de álcoois (etanol, metanol), hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2). Essa

fase é caracterizada por elevada diversidade metabólica e pela redução do pH do meio, sendo fundamental para a geração de intermediários para as etapas subsequentes (Kim *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2014).

Na acetogênese, os compostos intermediários, especialmente ácidos graxos de cadeia mais longa e álcoois, são convertidos em ácido acético, H_2 e CO_2 por bactérias estritamente anaeróbias. Esse processo ocorre em associação sintrófica com microrganismos consumidores de hidrogênio, sendo a manutenção de baixas pressões parciais de H_2 essencial para a viabilidade termodinâmica das reações envolvidas (Stams; Plugge, 2009).

Por fim, a metanogênese constitui a etapa terminal da digestão anaeróbia, sendo realizada exclusivamente por arqueias metanogênicas. O metano é produzido principalmente por duas vias metabólicas: a acetoclástica, a partir da conversão do ácido acético em CH_4 e CO_2 , e a hidrogenotrófica, baseada na redução do CO_2 com H_2 . A predominância dessas rotas depende das condições operacionais e da composição do substrato, sendo a via acetoclástica geralmente dominante em sistemas de tratamento de resíduos orgânicos (Zhang *et al.*, 2014; Meegoda *et al.*, 2018).

A geração de biogás em aterros sanitários varia ao longo do tempo e depende da composição dos resíduos, especialmente do teor de matéria orgânica biodegradável, além de condições internas como umidade, temperatura e pH. Esses fatores controlam a atividade microbiana, a velocidade das reações anaeróbias e, conseqüentemente, a quantidade e a composição do gás produzido (Meegoda *et al.*, 2018; Rodrigo-Illarri; Rodrigo-Clavero, 2020). A umidade favorece o transporte de substratos e nutrientes, enquanto o pH próximo da neutralidade é essencial para a estabilidade da metanogênese.

A composição típica do biogás gerado em aterros sanitários, expressa em porcentagem volumétrica, é a seguinte (Tchobanoglous e Kreith, 2002; IPCC, 2006):

- a) Metano (CH_4): 45-60% (principal componente, responsável pelo potencial energético do biogás);
- b) Dióxido de Carbono (CO_2): 40-55% (segundo principal componente);
- c) Outros Gases Traço (< 5%): Nitrogênio (N_2): 2-5%; Oxigênio (O_2): 0-2%; Sulfeto de Hidrogênio (H_2S): 0-1%; Amônia (NH_3): 0-1%; Compostos Orgânicos Voláteis (COVs): < 1%; Vapor d'água (H_2O): Variável (depende da temperatura e da umidade dos resíduos, e da saturação do biogás).

Para estimar a produção de biogás em aterros sanitários, tanto para fins de projeto e operação de sistemas de captação e aproveitamento quanto para a avaliação de emissões de gases de efeito estufa (GEE), diversos modelos matemáticos têm sido desenvolvidos. Esses modelos variam em complexidade, desde modelos simples de primeira ordem, que consideram apenas a quantidade de resíduos e uma taxa de decaimento constante, até modelos mais sofisticados, baseados em processos, que levam em conta os múltiplos fatores que influenciam a geração de biogás (Amini *et al.*, 2012). Alguns dos modelos mais utilizados incluem:

- a) Modelos de Primeira Ordem que assumem que a produção de biogás segue uma cinética de primeira ordem, ou seja, a taxa de produção é proporcional à quantidade de matéria orgânica remanescente. Exemplos: Modelo LandGEM (*Landfill Gas Emission Model*), Modelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*);
- b) Modelos Multicomponentes que consideram diferentes frações da matéria orgânica, com diferentes taxas de decomposição. Exemplo: Modelo TNO (*Netherlands Organisation for Applied Scientific Research*);
- c) Modelos Baseados em Processos que simulam os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no aterro, de forma mais detalhada. Exemplo: Modelo MODUELO (*Model for Underground Anaerobic Digestion and Landfill*).

Modelos baseados em processos (mecanicistas) são os mais detalhados, pois simulam, de forma integrada, os fenômenos físicos, químicos e biológicos no interior do aterro, incluindo transporte de massa, transferência de calor, reações bioquímicas da digestão anaeróbia e dinâmica microbiana. Apesar do maior potencial de representação do sistema, sua aplicação é limitada pela elevada demanda de dados de entrada — frequentemente de difícil obtenção — e pelo maior custo computacional.

A escolha do modelo mais apropriado para estimar a produção de biogás em um determinado aterro sanitário depende dos objetivos da modelagem, da disponibilidade de dados (sobre a composição dos resíduos, as condições do aterro, etc.), da precisão requerida e dos recursos computacionais disponíveis. Modelos mais simples, como os de primeira ordem, podem ser suficientes para estimativas preliminares da produção total de biogás ou para inventários de emissões de GEE em larga escala, enquanto modelos mais complexos, como os baseados em processos, podem ser necessários para estudos mais detalhados, que busquem otimizar o projeto e a operação de sistemas de captação de biogás ou investigar o efeito de diferentes variáveis no processo de decomposição.

2.1.2 Impactos Ambientais e Energéticos do Biogás

O biogás, apesar de ser um subproduto natural do processo de decomposição anaeróbica da matéria orgânica em aterros sanitários, apresenta uma dualidade em relação aos seus efeitos. Quando liberado para a atmosfera sem controle, torna-se um problema ambiental significativo, já quando captado e gerenciado de forma correta, revela-se um recurso energético valioso. Isso exige uma análise cuidadosa tanto de seus impactos ambientais negativos quanto de seu potencial energético.

Os impactos ambientais do biogás estão intrinsecamente ligados à sua composição, que é dominada pela presença do metano (CH_4) e, em menor proporção, do dióxido de carbono (CO_2), além de outros gases traço. O metano, em particular, é um gás de efeito estufa (GEE) de alta potência, com um potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential*) muito superior ao do CO_2 . O GWP é uma métrica padronizada que compara a capacidade de um GEE de reter calor na atmosfera em relação ao CO_2 , em um determinado horizonte temporal. Embora o CO_2 seja o GEE mais abundante na atmosfera, o metano, devido à sua estrutura molecular, absorve radiação infravermelha de forma muito mais eficiente. Segundo o Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007), o metano apresenta um GWP de 25 em um horizonte de 100 anos, o que significa que uma tonelada de metano emitida causa um aquecimento 25 vezes maior do que uma tonelada de CO_2 no decorrer de um século. Já o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2021) atribui ao metano um GWP de 84 em um horizonte de 20 anos. Essa diferença significativa ressalta a importância de ações imediatas para controlar as emissões de metano, a fim de mitigar os efeitos das mudanças climáticas em um futuro próximo.

O dióxido de carbono presente no biogás, apesar de também ser um GEE, é considerado de origem biogênica, ou seja, faz parte do ciclo natural do carbono. As plantas, através da fotossíntese, absorvem o CO_2 da atmosfera, incorporando-o em sua biomassa. Quando essa biomassa se decompõe (em um aterro sanitário, por exemplo), o carbono retorna à atmosfera na forma de CO_2 e CH_4 . O problema reside no metano, pois ele representa a adição de um carbono que estava sequestrado em uma forma mais estável (na matéria orgânica em decomposição).

As emissões de biogás provenientes de aterros sanitários contribuem de forma expressiva para as emissões antropogênicas globais de metano. O IPCC (2006) estimou que o

setor de resíduos, que engloba aterros sanitários e o tratamento de águas residuais, foi responsável por aproximadamente 18% das emissões globais de metano em 2005. Dados mais recentes (IPCC, 2022) mostram que o setor contribui com 11% das emissões de metano. Este valor mostra a importância de uma boa gestão dos aterros, porém ainda assim, o valor continua significativo, ressaltando a necessidade contínua de implementar medidas de mitigação, como a captação e o aproveitamento energético do biogás.

A emissão não controlada de biogás em aterros sanitários pode provocar impactos relevantes à qualidade do ar e à saúde humana. Além de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), o biogás contém gases traço potencialmente nocivos, como sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3) e compostos orgânicos voláteis (COVs). O H_2S , mesmo em baixas concentrações, está associado a odores intensos e irritação das vias respiratórias, enquanto concentrações elevadas podem apresentar toxicidade significativa. Os COVs incluem substâncias potencialmente tóxicas e atuam como precursores do ozônio troposférico, contribuindo para a formação de poluentes secundários (Moustakas *et al.*, 2012; Manheim; Yesiller; Hanson, 2021).

Adicionalmente, o metano representa um risco operacional importante, uma vez que pode formar misturas explosivas no ar em concentrações entre 5% e 15% em volume, sobretudo em ambientes confinados, elevando o risco de incêndios e explosões (IPCC, 2019).

Por outro lado, o biogás apresenta elevado potencial energético, sendo o metano seu principal componente combustível. Sua captação e aproveitamento permitem substituir combustíveis fósseis e reduzir emissões de gases de efeito estufa. As principais rotas de aproveitamento incluem a geração de eletricidade, a produção de calor, a cogeração e a purificação para biometano. Neste último caso, o biogás é tratado para remoção de CO_2 , H_2S e outros contaminantes, resultando em um gás com alto teor de metano, apto para uso como combustível veicular ou injeção na rede de gás natural (International Energy Agency, 2020; Ardolino *et al.*, 2021).

A cogeração destaca-se como alternativa eficiente, ao permitir o aproveitamento simultâneo de energia elétrica e térmica. Nesse contexto, o manejo adequado do biogás contribui não apenas para a mitigação de impactos ambientais e riscos operacionais, mas também para a geração de energia e promoção de sistemas mais sustentáveis (Manheim; Yesiller; Hanson, 2021).

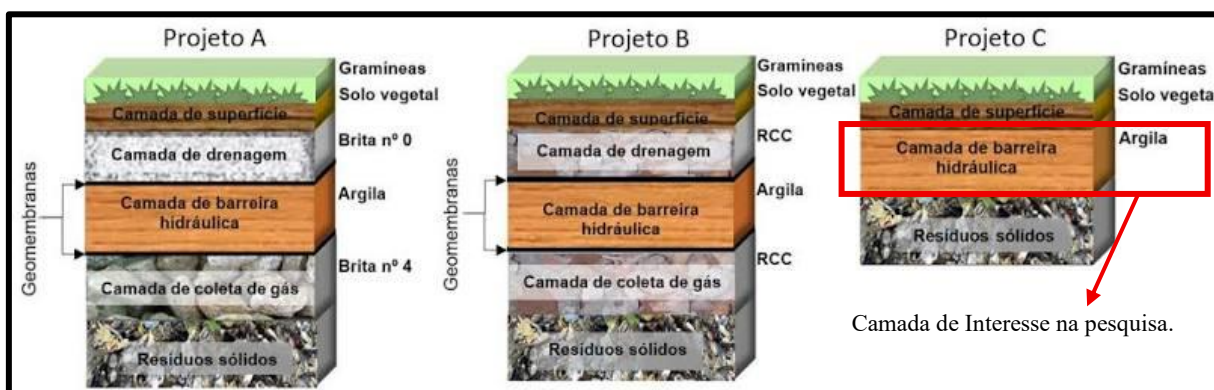
2.1.3 Sistemas de Cobertura (Cover Liners) em Aterros Sanitários

Ao término da vida útil de um aterro sanitário, ou quando células específicas são completamente preenchidas, torna-se necessária a implantação de um sistema de cobertura final, cuja função é isolar a massa de resíduos do meio ambiente e mitigar os impactos associados à disposição final. Esse sistema desempenha papel fundamental na redução da infiltração de água, limitando a geração de lixiviado e o risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas, além de atuar no controle das emissões de biogás (Koerner; Daniel, 2012; Rowe, 2012).

Além dessas funções primárias, a cobertura final deve assegurar o adequado escoamento superficial, minimizando processos erosivos que possam comprometer sua integridade. Também exerce funções complementares importantes, como a restrição ao acesso de vetores, o suporte ao desenvolvimento de vegetação para estabilização da superfície e a contribuição para a estabilidade global do maciço de resíduos. Em suma, a camada de cobertura tem como objetivo isolar os resíduos do meio ambiente, garantindo que o aterro sanitário, mesmo após o encerramento de suas atividades, não represente uma ameaça à saúde pública e ao meio ambiente.

Embora a configuração exata e os materiais utilizados possam variar consideravelmente dependendo das características do aterro (tipo de resíduo, capacidade, etc.), do clima da região (precipitação, temperatura, evapotranspiração), da disponibilidade de materiais na região e das normas técnicas aplicáveis, um sistema de cobertura convencional geralmente é um sistema multicamadas, em que cada camada desempenha uma função específica (Figura 2).

Figura 2 - Esquema de um sistema de cobertura multicamadas em aterros sanitários.



Fonte: Adaptado de Oliveira e Braga (2017).

Imediatamente sobre a massa de resíduos, dispõe-se a camada de regularização, usualmente constituída por solo compactado, com a função de nivelar a superfície e proporcionar uma base estável para as camadas subsequentes. Em seguida, é instalada a camada de drenagem de gases, responsável pela coleta e condução do biogás gerado no interior do aterro. Essa camada é geralmente formada por materiais granulares de alta permeabilidade ou geossintéticos drenantes, que asseguram eficiência na captação e no fluxo dos gases (Koerner; Daniel, 2012).

A camada de baixa permeabilidade, também conhecida como barreira hidráulica, ou barreira impermeável, é o componente mais crítico de um sistema de cobertura, do ponto de vista do controle da infiltração de água e da emissão de biogás. Seu objetivo é criar uma barreira que impeça, ou reduza, a passagem de líquidos e gases. O material mais utilizado para essa camada é o solo argiloso compactado. A argila, quando compactada em condições adequadas de umidade e massa específica aparente seca, apresenta uma baixa condutividade hidráulica saturada (k), geralmente inferior a 1×10^{-7} cm/s (ou 1×10^{-9} m/s), que é o valor máximo tipicamente exigido pelas normas técnicas. A espessura da camada de argila compactada varia, em geral, entre 0,60 m e 1,0 m (Koerner; Daniel, 2012).

Alternativamente, ou em combinação com o solo argiloso compactado, podem ser utilizadas geomembranas, que são mantas sintéticas impermeáveis, geralmente fabricadas em polietileno de alta densidade (PEAD) ou policloreto de vinila (PVC). As geomembranas apresentam uma permeabilidade muito inferior à do solo argiloso ($k < 1 \times 10^{-12}$ cm/s), mas são mais suscetíveis a danos mecânicos (perfurações, rasgos) durante a instalação e a operação do aterro. Outra opção são os geocompostos argilosos (GCLs), que consistem em uma fina camada de bentonita sódica (um tipo de argila com alta capacidade de expansão) encapsulada entre dois geotêxteis ou aderida a uma geomembrana. Os GCLs combinam a baixa permeabilidade da bentonita com a resistência e a facilidade de instalação dos geossintéticos (Koerner; Daniel, 2012; Rowe, 2012).

Acima da barreira impermeável, dispõe-se uma camada de drenagem, responsável por coletar e conduzir a água infiltrada, evitando a saturação do solo sobrejacente e o aumento de pressões sobre a barreira. Essa camada pode ser constituída por materiais granulares de alta permeabilidade ou por geossintéticos drenantes. Sobre ela, é instalada uma camada de proteção, geralmente composta por solo, destinada a reduzir danos mecânicos e biológicos aos componentes inferiores. Na superfície, a camada de solo vegetal permite o desenvolvimento de

vegetação, contribuindo para o controle da erosão, aumento da evapotranspiração e redução da infiltração (Albright; Benson, 2004).

A construção e a operação de aterros sanitários, incluindo o projeto e a implementação dos sistemas de cobertura, são regidas por normas técnicas em níveis nacional e internacional. Essas normas estabelecem requisitos mínimos para garantir a proteção do meio ambiente e da saúde pública. No Brasil, as principais normas técnicas relacionadas a aterros sanitários incluem a NBR 13896/1997 (Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação), que, embora desatualizada, ainda é frequentemente referenciada, a NBR 15849/2010 (Resíduos sólidos urbanos - Aterros sanitários de pequeno porte - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento) e a Resolução CONAMA 404/2008, que trata do licenciamento ambiental de aterros sanitários de pequeno porte. A Resolução CONAMA 307/2002 e a ABNT NBR 8419/1992, são outras normas relacionadas.

Nos Estados Unidos, a principal regulamentação federal é o *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA), Subtitle D, que estabelece os requisitos para aterros de resíduos sólidos municipais, e a Agência de Proteção Ambiental (EPA) publica documentos técnicos com orientações detalhadas sobre o projeto e a operação de aterros. Na Europa, a Diretiva 1999/31/EC (*Landfill Directive*) da União Europeia estabelece os requisitos para aterros de resíduos, e as normas EN fornecem especificações técnicas detalhadas.

Apesar dos avanços nas técnicas de projeto e execução de aterros sanitários e do rigor das normas técnicas, os sistemas de cobertura ainda enfrentam desafios significativos que podem comprometer sua eficiência e durabilidade a longo prazo. Um dos principais problemas é a fissuração por retração dos solos argilosos compactados. A formação de fissuras pode aumentar consideravelmente a permeabilidade do solo, permitindo a infiltração de água e a emissão descontrolada de biogás.

Diante desses desafios, a pesquisa por novas soluções e tecnologias para aprimorar o desempenho dos sistemas de cobertura de aterros sanitários é fundamental. Isso evidencia a importância de buscar alternativas para aumentar a resistência à retração, reduzir a permeabilidade e, conseqüentemente, minimizar as emissões de biogás e a infiltração de água em camadas de cobertura de aterros sanitários.

2.2 Retração de Solos Argilosos Compactados

A aplicação de solos argilosos compactados como barreiras de baixa permeabilidade, especialmente em sistemas de cobertura de aterros sanitários, é uma prática consagrada na engenharia geotécnica e ambiental. A eficácia dessas barreiras depende fundamentalmente da manutenção de sua integridade estrutural e de sua baixa condutividade hidráulica ao longo do tempo (Daniel, 1993). Contudo, um dos maiores desafios para garantir essa performance reside na suscetibilidade inerente dos solos argilosos à retração volumétrica quando submetidos a processos de secagem. Este fenômeno, se não controlado, pode levar à formação de fissuras, comprometendo a função de barreira do solo.

A retração é definida como a redução no volume total do solo resultante da perda de água. Em solos argilosos, esse fenômeno é particularmente acentuado devido às características intrínsecas desses materiais como o tamanho diminuto de suas partículas ($< 0,002$ mm), a elevada Área Superficial Específica (ASE) e a presença de cargas elétricas superficiais, que promovem uma forte interação com as moléculas de água (Mitchell e Soga, 2005). A ASE, que pode ser determinada por métodos de adsorção é um indicador importante da atividade do solo e de seu potencial para reter água e sofrer retração. Solos com alta ASE, geralmente associados a minerais de argila do tipo 2:1 como as esmectitas, tendem a apresentar maior potencial de retração em comparação com solos dominados por minerais 1:1 como a caulinita, que possuem menor ASE (Azevedo, 2025).

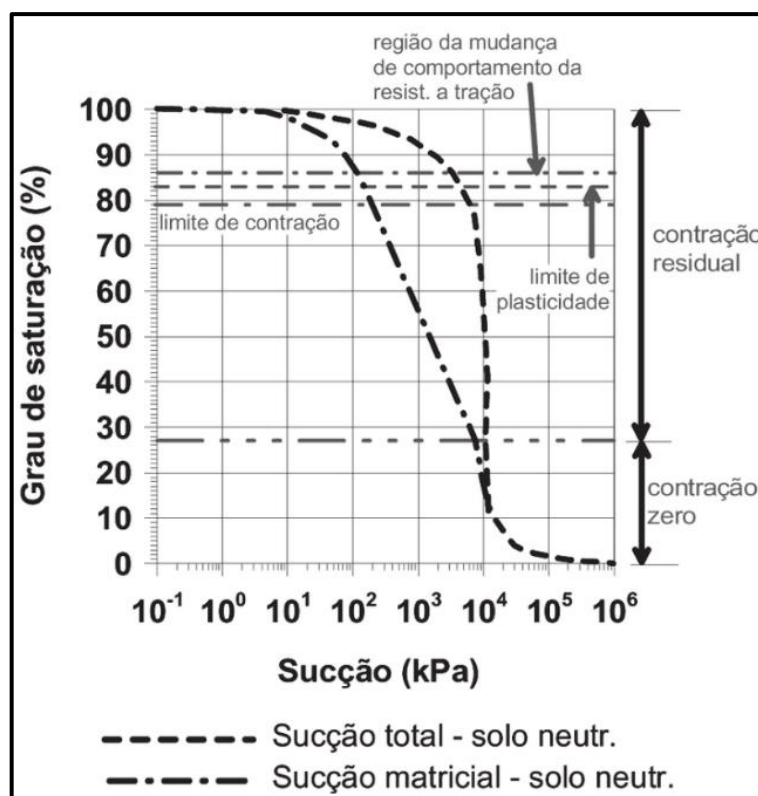
O processo de retração é desencadeado pela secagem, ou seja, pela evaporação da água contida nos poros do solo para a atmosfera circundante, quando esta possui uma umidade relativa inferior à do equilíbrio com a água nos poros do solo. À medida que a água evapora, inicialmente a partir dos poros maiores na superfície, a interface ar-água penetra para o interior da rede porosa, formando meniscos curvos nas entradas dos poros menores. A curvatura desses meniscos, governada pela tensão superficial da água e pelo raio de curvatura do menisco (descrito pela equação de *Young-Laplace*), gera uma pressão negativa na fase aquosa em relação à pressão atmosférica. Essa pressão negativa é denominada sucção matricial (Ψ_m) e representa a força com que a água é retida pela matriz do solo (Lu; Likos, 2004).

A sucção matricial é o principal mecanismo responsável pela retração dos solos não saturados. Durante a secagem, o aumento da sucção — associado à redução da pressão da água nos poros — eleva a tensão efetiva atuante no esqueleto do solo, intensificando as tensões interparticulares e promovendo a aproximação entre as partículas (Bishop, 1959; Lu; Likos,

2004). Como consequência, ocorre a redução do índice de vazios e do volume total do material, resultando na retração macroscópica do solo. Nesse contexto, a Curva de Retenção de Água no Solo (CRAS) desempenha papel fundamental na descrição da relação entre teor de umidade e sucção matricial, sendo frequentemente representada por modelos matemáticos como o de van Genuchten (1980).

O processo de retração ocorre em diferentes fases associadas à evolução da sucção e da perda de água (Peng; Horn, 2005). Inicialmente, na fase de retração normal, a redução volumétrica é aproximadamente proporcional ao volume de água perdido. Com o aumento da sucção e a entrada de ar nos poros maiores, o solo passa à fase de retração residual, na qual a perda de água ocorre com menor variação volumétrica. Por fim, atinge-se o limite de retração, correspondente ao teor de umidade abaixo do qual a continuidade da secagem não produz reduções significativas de volume (Figura 3).

Figura 3 - Curva característica de sucção do solo neutralizado.



Fonte: Vilar *et al.* (2007).

Entretanto, a transição entre essas fases e o próprio processo de retração sob condições reais raramente ocorrem de forma homogênea. A secagem geralmente se inicia na

superfície exposta e progride para o interior, criando gradientes de umidade e, consequentemente, gradientes de sucção e gradientes de retração dentro da massa de solo. A camada superficial tende a secar e retrair mais rapidamente do que as camadas inferiores, que ainda estão mais úmidas e menos retraídas. Essa retração diferencial induz o desenvolvimento de tensões de tração na camada superficial que está secando, pois sua tendência de encolher é restringida pela camada subjacente, menos deformada (Lakshmikanta *et al.*, 2012; Costa; Kodikara; Shannon, 2013).

A retração e a fissuração dos solos são influenciadas por diversos fatores atuando de forma interdependente. A consistência do solo, avaliada pelos limites de Atterberg -Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP) - está diretamente relacionada à capacidade de deformação do material e ao desenvolvimento de fissuras. Solos com maior IP tendem a apresentar maior potencial de retração devido à maior atividade da fração argilosa. A granulometria também exerce influência significativa, uma vez que a fração argila é a principal responsável pela retração, enquanto silte e areia atuam como estrutura de restrição à deformação. Além disso, a presença de matéria orgânica pode alterar a estrutura do solo e sua capacidade de retenção de água, sendo frequentemente incorporada em coberturas de aterros para favorecer o desenvolvimento vegetal.

A principal consequência da formação de fissuras em barreiras de solo compactado é o aumento da permeabilidade à água e aos gases, pois as fissuras passam a atuar como caminhos preferenciais de fluxo (Albrecht; Benson, 2001; Rayhani *et al.*, 2007). Em coberturas de aterros sanitários, esse fenômeno compromete o controle da emissão de biogás, facilitando a migração de metano e reduzindo a eficiência dos sistemas de coleta (Bouazza; Vangpaisal, 2003; Collin, 2004).

Compreender os mecanismos de retração, os fatores que a influenciam e seus efeitos na permeabilidade, bem como dispor de métodos para sua quantificação, torna-se importante na avaliação de barreiras de solo compactado. Este conhecimento colabora para o desenvolvimento e a investigação de técnicas de melhoria, como a incorporação de fibras e cinzas, que visam mitigar os efeitos da retração e garantir o desempenho satisfatório das camadas de cobertura em aterros sanitários, conforme será explorado nas seções subsequentes.

2.2.1 Efeito da Retração na Permeabilidade ao Gás e à Água

A integridade estrutural de uma barreira de solo argiloso compactado (como uma camada de cobertura de aterro sanitário), é a premissa fundamental para seu funcionamento eficaz. O processo de retração por secagem, inerente a esses materiais, pode levar à formação de uma rede de fissuras, quebrando a continuidade da matriz do solo. Essa fissuração não é um mero defeito superficial. Ela representa uma alteração profunda nas propriedades de transporte de massa do solo, comprometendo sua capacidade de controlar tanto o fluxo ascendente de gases quanto o fluxo descendente de líquidos (Albrecht; Benson, 2001). O impacto dessa alteração se manifesta principalmente através de um aumento expressivo na permeabilidade do meio, tanto à água (condutividade hidráulica) quanto aos gases.

O solo argiloso é amplamente utilizado em barreiras impermeabilizantes devido à sua baixa permeabilidade quando adequadamente compactado, formando uma matriz de poros reduzidos e caminhos de fluxo tortuosos. Entretanto, fissuras induzidas pela retração criam caminhos preferenciais que aumentam significativamente a permeabilidade efetiva do material (Albrecht; Benson, 2001). Estudos de laboratório e de campo têm demonstrado que a condutividade hidráulica de solos argilosos compactados pode aumentar significativamente (de 100 a 1.000.000 de vezes) devido à presença de fissuras induzidas por secagem, ciclos de umedecimento-secagem ou ciclos de congelamento-descongelamento (Albrecht; Benson, 2001; Rayhani *et al.*, 2007; Krisnanto *et al.*, 2016). Essa magnitude do aumento depende da geometria da rede de fissuras, como sua densidade, abertura, profundidade, conectividade e tortuosidade (Lima; Marinho, 2007).

Destaca-se que camadas mais fissuradas propiciam a percolação de volumes maiores de lixiviado, o que implica em maiores custos associados à sua coleta, armazenamento, tratamento e disposição final, representando um ônus econômico e ambiental significativo para a operação do aterro. Além disso, a infiltração excessiva de água pode aumentar as poropressões dentro da massa de resíduos e ao longo de interfaces críticas (como entre o resíduo e o sistema de base ou ao longo de taludes internos), o que pode comprometer a estabilidade geotécnica do aterro, aumentando o risco de deslizamentos ou rupturas (Dixon; Jones, 2005; Merry *et al.*, 2006).

Paralelamente ao aumento da permeabilidade à água, o efeito da fissuração sobre a permeabilidade ao gás é igualmente relevante. Os gases possuem menor viscosidade que a água e fluem preferencialmente através dos poros e fissuras preenchidos por ar. Em coberturas, que

frequentemente operam em condições não saturadas devido à evaporação na superfície, as fissuras criam caminhos aéreos contínuos e de baixa resistência, facilitando enormemente o transporte de gases através da barreira. Estudos que mediram a permeabilidade ao ar ou a outros gases em solos argilosos fissurados confirmam que ela pode ser de várias ordens de magnitude superior à condutividade hidráulica saturada do mesmo material, indicando que as fissuras são ainda mais impactantes para o fluxo de gás do que para o fluxo de água (Touze-Foltz *et al.*, 2001; Devis *et al.*, 2019).

Destaca-se ainda que a rede de fissuras pode facilitar a intrusão de oxigênio do ar atmosférico para dentro das camadas superiores da massa de resíduos. A presença de oxigênio é deletéria para o processo de decomposição anaeróbica, inibindo a atividade das arqueias metanogênicas, que são estritamente anaeróbias. Isso pode levar a uma redução na produção de metano nas zonas afetadas e, potencialmente, ao estabelecimento de condições aeróbias localizadas, que geram calor e podem alterar a composição dos produtos de degradação. Mais preocupante ainda é o risco de formação de misturas explosivas de metano e oxigênio dentro da massa de resíduos, o que pode levar a incêndios subsuperficiais de difícil controle e com potencial para liberar grandes quantidades de poluentes atmosféricos (Yeşiller *et al.*, 2005; Jafari *et al.*, 2017).

2.2.2 Métodos para Medição da Retração e Caracterização da Fissuração

A avaliação quantitativa da retração do solo é um passo indispensável para compreender seu comportamento sob condições de secagem e para verificar a eficácia de quaisquer técnicas empregadas para esse fenômeno. A medição pode focar em determinar um índice que represente o potencial de retração total, como o Limite de Contração, ou em acompanhar a cinética da redução de volume ao longo de todo o processo de secagem, gerando uma curva de retração.

2.2.2.1 Determinação do Limite de Contração (LC/SL):

O Limite de Contração (LC ou w_c), ou *Shrinkage Limit* (SL) na terminologia internacional, é um dos limites de consistência de Atterberg e representa um parâmetro clássico para caracterizar o potencial de retração de solos finos. Ele é definido como o teor de umidade, expresso em porcentagem, abaixo do qual qualquer perda adicional de água não resulta em

diminuição do volume da massa de solo (ASTM D4943, 2018). Fisicamente, corresponde ao ponto em que o ar começa a entrar nos poros do solo em quantidade suficiente para que a redução de volume cesse, mesmo que a água continue a evaporar dos poros menores. Solos com baixo LC tendem a sofrer maior variação de volume ao secar a partir de um estado úmido.

Historicamente, o método padrão para determinar o LC, e para medir o volume da amostra de solo no estado seco (V_f), era o método de deslocamento de mercúrio metálico. Este procedimento está descrito na norma brasileira MB-55 (ABNT, 1948), com sua última atualização registrada pela ABNT NBR7183 DE 09/2014, e na norma internacional ASTM D427 (todas canceladas). O princípio consiste em saturar uma pequena pastilha de solo, determinar seu volume inicial (V_o , geralmente igual ao volume do molde) e sua massa úmida, secá-la completamente em estufa (para obter a massa seca, M_s), e então determinar seu volume seco final (V_f) medindo o volume de mercúrio deslocado quando a pastilha seca é cuidadosamente imersa em um recipiente calibrado contendo mercúrio. A alta tensão superficial e o ângulo de contato do mercúrio impedem sua penetração nos poros do solo, permitindo uma medição precisa do volume externo da pastilha. Apesar de sua longa história de uso e aceitação pela precisão na medição de volume, o método do mercúrio enfrenta hoje restrições devido à extrema toxicidade do mercúrio e aos graves riscos que ele representa para a saúde humana e para o meio ambiente. Como resultado direto, órgãos de normalização em todo o mundo, incluindo a ABNT no Brasil e a ASTM internacionalmente, estão retirando, revisando ou substituindo as normas que prescrevem o uso de mercúrio.

Uma das alternativas mais estabelecidas e práticas ao mercúrio para determinar o volume de amostras de solo seco ou agregados de forma irregular é o método do revestimento com parafina (ou cera) conforme descrito por Aita *et al.* (2016). O procedimento básico consiste em secar completamente a amostra de solo (geralmente a pastilha usada para determinar o LC), pesá-la (M_s), e então recobri-la totalmente com uma fina camada impermeável de parafina, por imersão repetida em parafina derretida a uma temperatura controlada (de aproximadamente 60°C). A amostra parafinada é então pesada ao ar ($M_{p,ar}$) e, em seguida é pesada enquanto imersa em água destilada ($M_{p,água}$), utilizando uma balança hidrostática. O volume total da amostra parafinada (V_p) pode ser calculado usando a equação 1.

$$V_p = \frac{(M_{p,ar} - M_{p,água})}{\gamma_w} \quad (1)$$

Para obter o volume do solo seco (V_f), é necessário subtrair o volume ocupado pela parafina (V_{par}) (Equação 2). Este pode ser calculado a partir da massa de parafina utilizada ($M_{p,ar} - M_s$) e da densidade da parafina (γ_{par}), que deve ser determinada separadamente ou obtida do fabricante:

$$V_{par} = \frac{(M_{p,ar} - M_s)}{\gamma_{par}} \quad (2)$$

O volume do solo seco pode ser então calculado pela equação 3:

$$V_f = V_p - V_{par} = \frac{(M_{p,ar} - M_{p,\acute{a}gua})}{\gamma_w} - \frac{(M_{p,ar} - M_s)}{\gamma_{par}} \quad (3)$$

Este valor de V_f pode então ser utilizado na fórmula de Stancati *et al.* (1981) para calcular o Limite de Contração (LC). As principais vantagens deste método são a segurança (eliminação do mercúrio), o baixo custo e a relativa simplicidade de execução. No entanto, é preciso ter cuidado para garantir um revestimento completo e uniforme da amostra, evitar a formação de bolhas de ar e utilizar um valor preciso para a densidade da parafina. Outra dificuldade está em obter uma camada suficientemente fina e uniforme em amostras muito irregulares.

A comparação entre os métodos do mercúrio e da parafina é importante para validar a alternativa. O estudo realizado por Aita *et al.* (2016), fornece dados nesse sentido. Os resultados indicaram que, para os solos avaliados, não houve diferença estatisticamente significativa entre os valores de LC obtidos pelos dois métodos quando se utiliza um nível de significância baixa (para um valor-p de 0,20). No entanto, ao adotar um nível de significância mais convencional (a partir de 0,10), as médias diferiram, com o método do mercúrio apresentando valores de LC ligeiramente mais elevados. Ambos os métodos mostraram boa precisão (baixos desvios-padrão). A conclusão do estudo sugere que a parafina é uma substituta eficiente e viável para o mercúrio, embora possa haver pequenas diferenças sistemáticas nos resultados.

Além do revestimento com parafina, outras alternativas para medir o volume seco incluem o método do "balão de borracha" (usado para medir densidade in situ, mas adaptável para laboratório), o uso de líquidos não molhantes, como o querosene (que também apresentam riscos de inflamabilidade e toxicidade, além de potencial penetração nos poros), ou métodos

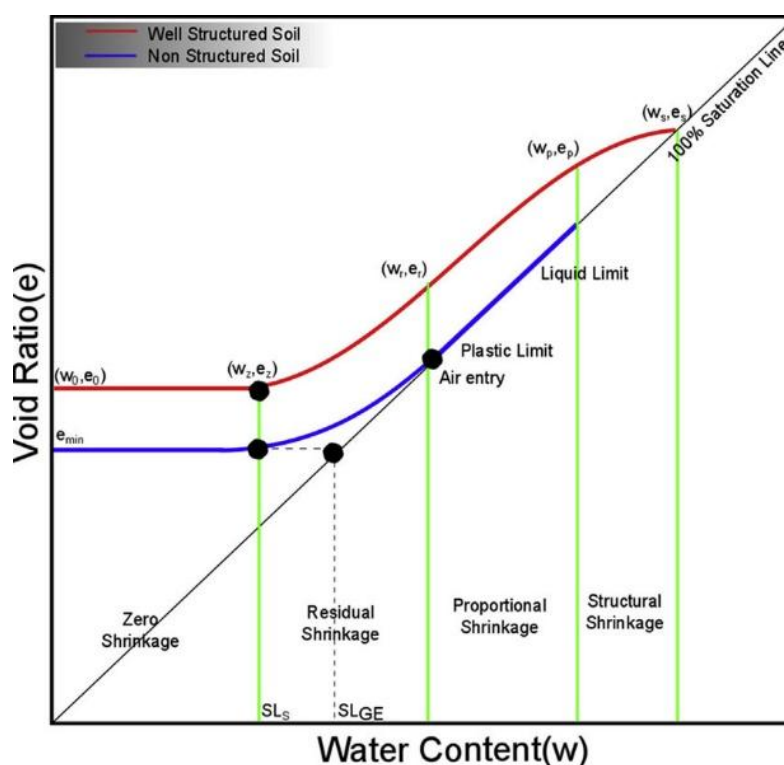
baseados em varredura a laser 3D ou fotogrametria, que, embora mais sofisticados e caros, oferecem medições de volume não invasivas e de alta precisão.

2.2.2.2 Medição Contínua da Retração (Curva de Retração)

Embora o Limite de Contração (LC/SL) forneça um índice útil do potencial de retração total de um solo, ele representa apenas um ponto específico no final do processo de secagem. Para uma compreensão mais completa do comportamento de retração, é fundamental acompanhar a cinética da redução de volume, ou seja, como o volume do solo varia continuamente à medida que o teor de umidade diminui ou a sucção matricial aumenta. O resultado desse acompanhamento é a Curva de Retração do solo, que geralmente plota a variação de volume (ou o índice de vazios) em função do teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) ou da sucção matricial (Tariq; Miller, 2009).

A Curva de Retração (Figura 4) fornece mais informações do que o simples valor do LC. Ela revela as diferentes fases do processo de retração, que estão intimamente ligadas às mudanças na distribuição de água e ar nos poros e às deformações da estrutura do solo (Peng; Horn, 2005).

Figura 4 - Zonas na curva característica de retração do solo.



Fonte: Adaptada de Cornelis *et al.* (2006).

Tipicamente, podem ser identificadas as seguintes fases:

- a) Retração Estrutural – Pequena redução inicial de volume associada à perda de água dos macroporos, comum em solos agregados ou compactados no lado seco do ótimo;
- b) Retração Normal – Fase principal, na qual a redução volumétrica é aproximadamente igual ao volume de água perdido, enquanto o solo permanece próximo à saturação;
- c) Retração Residual – Ocorre após o Valor de Entrada de Ar (AEV), quando a taxa de retração diminui devido à entrada de ar nos poros e ao aumento da rigidez da estrutura do solo;
- d) Retração Zero – Abaixo do limite de contração, a perda adicional de água não provoca redução significativa do volume do solo.

A forma da Curva de Retração e os pontos de transição entre essas fases são fortemente influenciados pelas propriedades intrínsecas do solo (mineralogia, granulometria, plasticidade, estrutura inicial) e pelas condições de contorno e de secagem. A determinação experimental da Curva de Retração, frequentemente em conjunto com a Curva de Retenção de Água no Solo (CRAS), é essencial para calibrar modelos constitutivos que descrevem o comportamento hidromecânico de solos não saturados (Salager *et al.*, 2008).

Diversos métodos podem ser empregados para medir a variação de volume ou dimensão do solo durante o processo de secagem e construir a Curva de Retração:

- a) Medição Dimensional Direta – Método tradicional de laboratório em que corpos de prova submetidos à secagem controlada têm suas dimensões monitoradas por paquímetros, micrômetros ou sensores de deslocamento. A partir dessas medidas, determina-se a variação volumétrica do solo em função do teor de umidade ou da sucção (Cornelis; Gabriels, 2003).
- b) Método do Preenchimento com Areia – Consiste na determinação do volume retraído em diferentes níveis de sucção por meio do preenchimento dos vazios com areia. O método permite correlacionar diretamente a Curva de Retração com a Curva de Retenção de Água no Solo (CRAS) (Silva *et al.*, 2017).
- c) Varredura a Laser 3D – Técnica óptica que utiliza feixes de laser para reconstruir a geometria tridimensional da amostra durante a secagem, permitindo calcular o volume com elevada precisão e baixo manuseio da amostra (Pires *et al.*, 2009).

- d) Correlação de Imagens Digitais (DIC) – Método baseado em imagens sequenciais da superfície do solo para monitorar deslocamentos e deformações ao longo da secagem. A técnica permite identificar concentrações de deformação e o surgimento de fissuras (Bezerra, 2020).

A escolha do método para determinar a Curva de Retração depende dos objetivos específicos do estudo, do nível de detalhe necessário, dos recursos disponíveis e da natureza do material a ser testado. Métodos dimensionais diretos são mais simples e acessíveis, enquanto métodos ópticos como *laser scanning* e DIC oferecem maior precisão e informações espaciais mais detalhadas, sendo particularmente úteis para estudos focados no desenvolvimento da deformação e das fissuras. A combinação da Curva de Retração com a Curva de Retenção de Água (CRAS), obtidas sob condições controladas, fornece uma caracterização hidromecânica robusta do comportamento do solo durante a secagem, essencial para a modelagem e previsão de seu desempenho em campo.

2.2.2.3 Caracterização da Fissuração

Embora a retração volumétrica quantifique a redução global de volume do solo durante a secagem, ela não descreve diretamente a formação e a geometria das fissuras associadas ao processo. Essas fissuras atuam como caminhos preferenciais para o fluxo de água e gases, comprometendo a função de barreira do solo argiloso compactado. Dessa forma, a caracterização da rede de fissuras — incluindo intensidade, geometria e conectividade — é essencial para compreender os efeitos da dessecação sobre a integridade estrutural e as propriedades de transporte do material. Para isso, são utilizadas desde observações visuais até técnicas avançadas de imagem e análise não destrutiva.

Os métodos mais diretos e acessíveis focam na análise das fissuras que se manifestam na superfície da amostra de solo, dos quais podemos destacar: observação visual e medição manual; Análise de Imagens Digitais (DIA - Digital Image Analysis); e análise morfométrica e quantificação. A análise de imagens digitais pode ser realizada utilizando *softwares* de acesso livre e amplamente difundidos, como o ImageJ, ou plataformas de programação com bibliotecas de processamento de imagem, como o MATLAB. A aplicação da DIA a sequências de imagens capturadas em diferentes tempos durante o processo de secagem permite estudar a cinética da fissuração: o momento de iniciação das primeiras fissuras, a

velocidade de propagação, as mudanças na largura e no comprimento, e a evolução da conectividade da rede (Tang *et al.*, 2011).

A análise de fissuras superficiais fornece informações valiosas, mas não revela a estrutura tridimensional completa da rede de fissuras, que se estende para o interior do solo e governa o fluxo de fluidos em volume. Para investigar a estrutura interna são necessárias a utilização de técnicas não destrutivas.

A Tomografia Computadorizada de Raios-X (TC Raios-X), por exemplo, pode ser empregada para a visualização e quantificação 3D da estrutura de poros e fissuras em solos e outros materiais porosos (Costa, 2017). O princípio baseia-se na atenuação diferencial de um feixe de raios-X ao atravessar materiais com diferentes densidades e composições atômicas. A principal vantagem da TC é fornecer informações verdadeiramente tridimensionais e não destrutivas sobre a estrutura interna. Alguns dos obstáculos para utilização dessa técnica residem no alto custo do equipamento e na necessidade de expertise em processamento de imagens 3D.

A combinação de diferentes métodos oferece, frequentemente, a caracterização mais completa. Por exemplo, a análise de imagens superficiais pode fornecer informações detalhadas sobre a cinética da fissuração na superfície, enquanto a Raio-X pode revelar a estrutura interna final ou em estágios específicos. A correlação dos parâmetros geométricos da rede de fissuras (obtidos por DIA ou TC) com as medições de permeabilidade (à água e ao gás) é essencial para estabelecer relações quantitativas entre a estrutura danificada e as propriedades de transporte da barreira de solo.

2.2.2.4 Medição da Resistência à Tração/Flexão

A fissuração por retração ocorre quando as tensões de tração geradas pela secagem superam a resistência à tração do solo (σ_t). Assim, a determinação dessa propriedade mecânica é fundamental para compreender os mecanismos de iniciação de fissuras e avaliar os efeitos de fatores como umidade, densidade, adição de fibras e estabilizantes na mitigação da fissuração. Entretanto, a medição direta da resistência à tração em solos apresenta dificuldades experimentais significativas devido à natureza particulada e frágil do material, especialmente em condições não saturadas. Kim e Borysenko (2000) afirmam que problemas relacionados à fixação adequada das amostras e ao alinhamento do carregamento dificultam a execução de ensaios de tração direta. Embora existam estudos utilizando geometrias especiais e sistemas

avançados de fixação (Tang; Graham, 2000; LU *et al.*, 2007), esses métodos ainda possuem aplicação limitada na prática geotécnica.

Diante dessas limitações, métodos indiretos são frequentemente empregados para estimar a resistência à tração dos solos. Entre eles, destaca-se o ensaio de tração por compressão diametral, amplamente utilizado em solos compactados, estabilizados e materiais geotécnicos em geral. Nesse ensaio, a aplicação de uma carga compressiva ao longo do eixo de um corpo de prova cilíndrico induz tensões de tração perpendiculares à direção do carregamento, promovendo a ruptura do material (DNER 181/84; ASTM D3967/23). Assumindo que o material se comporta de forma homogênea, isotrópica e linearmente elástica até a ruptura por tração, a resistência à tração por compressão diametral ($R_{t,cd}$) pode ser calculada a partir da carga de ruptura (P), do diâmetro (D) e do comprimento/espessura (L) do cilindro, usando a equação 4:

$$R_{t,cd} = \frac{2 \times P}{\pi \times D \times L} \quad (4)$$

A simplicidade do ensaio de compressão diametral e a possibilidade de utilizar equipamentos convencionais de compressão constituem vantagens importantes. Entretanto, a aplicação da teoria elástica a solos particulados representa uma aproximação, uma vez que esses materiais apresentam comportamento não linear e, em muitos casos, anisotrópico. Além disso, podem ocorrer concentrações de tensão próximas aos pontos de aplicação da carga, bem como mecanismos de ruptura associados ao cisalhamento ou esmagamento local (Li; Wong, 2013). Dessa forma, o valor obtido deve ser interpretado como uma estimativa da resistência à tração, útil principalmente para análises comparativas entre materiais e condições distintas.

Outra forma indireta de avaliar o comportamento à tração consiste nos ensaios de flexão em corpos de prova prismáticos submetidos a carregamentos em três ou quatro pontos. Esses ensaios são utilizados em materiais cimentados, como concretos, cerâmicas e rochas, sendo também aplicados em solos estabilizados ou reforçados (Consoli *et al.*, 2007; Consoli *et al.*, 2010). Nessa configuração, a ruptura ocorre devido às tensões de tração induzidas na face inferior da amostra, permitindo determinar o Módulo de Ruptura (MOR). Embora sua aplicação em solos puramente particulados seja limitada, os ensaios de flexão apresentam grande relevância para solos tratados com cimento, cal, cinzas ou fibras (Consoli *et al.*, 2007; Estabragh *et al.*, 2011).

Tanto a resistência à tração quanto o MOR são influenciados por fatores como teor de umidade, sucção matricial, densidade de compactação, granulometria e presença de agentes cimentantes ou reforços. Tang *et al.* (2007) afirmam que a incorporação de fibras, por exemplo, contribui para o aumento da resistência e da capacidade de absorção de energia do material, reduzindo a propagação de fissuras, enquanto estabilizantes cimentícios promovem aumento da coesão e da resistência mecânica da matriz do solo.

2.3 Reforço de Solos com Fibras

A busca por técnicas que aprimorem as propriedades dos solos é uma constante na geotecnia. Quando os solos naturais disponíveis não atendem aos requisitos de projeto em termos de resistência, deformabilidade ou permeabilidade, diversas metodologias de melhoramento podem ser empregadas. Dentre elas, o reforço de solos se destaca como uma abordagem eficaz para aumentar a capacidade do solo de resistir a esforços de tração e cisalhamento, conferindo-lhe maior ductilidade e controlando deformações (Mitchell; Katti, 1981). Enquanto técnicas como a "Terra Armada" (Vidal, 1969) utilizam reforços contínuos e orientados (tiras metálicas ou geossintéticas), uma outra vertente importante é o reforço com elementos de reforço discretos e aleatoriamente distribuídos dentro da massa de solo, notadamente as fibras.

2.3.1 Reforço de Solos com Fibras - Conceitos Fundamentais e Contexto Histórico

A engenharia geotécnica frequentemente se depara com a necessidade de utilizar solos que não apresentam as características mecânicas adequadas para as solicitações de um determinado projeto. Solos geralmente exibem boa resistência à compressão, mas são inerentemente fracos quando submetidos a esforços de tração, além de poderem apresentar comportamento frágil e baixa ductilidade, especialmente quando compactados ou em estados não saturados. Para superar essas limitações, diversas técnicas de melhoramento de solos foram desenvolvidas ao longo do tempo, sendo o reforço de solos uma das abordagens mais eficazes e versáteis (Mitchell; Katti, 1981). O princípio fundamental do reforço consiste na introdução de elementos com alta resistência à tração no interior da massa de solo, capazes de interagir com a matriz e conferir ao conjunto um comportamento mecânico superior.

Historicamente, a ideia de incorporar elementos fibrosos para melhorar a resistência e a coesão de materiais terrosos é uma prática intuitiva e antiga. Evidências mostram o uso de palha em tijolos de adobe, fibras vegetais em argamassas e até mesmo lã ou outras fibras animais em estruturas rudimentares, demonstrando um conhecimento empírico sobre os benefícios dessa combinação (Palmeira, 1992). A observação da natureza também forneceu inspiração, com estudos pioneiros investigando como as raízes das plantas atuam como reforços naturais, aumentando a resistência ao cisalhamento do solo e contribuindo para a estabilidade de taludes (Gray; Ohashi, 1983; Wu *et al.*, 1988). Esses estudos ajudaram a elucidar os mecanismos pelos quais elementos flexíveis e resistentes à tração podem interagir com a matriz de solo.

O desenvolvimento da engenharia geotécnica moderna viu o surgimento de técnicas de reforço mais sistematizadas e com materiais manufaturados. Um marco importante foi a patente da "Terra Armada" por Henri Vidal na década de 1960, que utiliza elementos de reforço contínuos e planares (inicialmente tiras metálicas, posteriormente geossintéticos como geogrelhas) dispostos em camadas horizontais e conectados a um paramento frontal, criando maciços de solo reforçado com alta capacidade de suporte (Vidal, 1969). Essa técnica, juntamente com o uso de geotêxteis e geogrelhas em aplicações como reforço de bases de pavimentos e aterros sobre solos moles, representa o reforço com inclusões contínuas ou planares.

Em contraste, e mais diretamente relevante para o presente estudo, existe a técnica de reforço com inclusões discretas e aleatoriamente distribuídas, onde elementos de reforço individuais, tipicamente na forma de fibras, são misturados diretamente à massa de solo antes da compactação. Essa abordagem difere fundamentalmente do reforço planar, pois as fibras não são dispostas em direções preferenciais, mas sim dispersas tridimensionalmente no interior da matriz de solo (Maher; Gray, 1990). A intenção é criar um material compósito mais homogêneo e potencialmente isotrópico em suas propriedades melhoradas.

O solo reforçado com fibras pode ser compreendido como um material compósito, no qual o solo atua como matriz e as fibras como elemento de reforço (Tang *et al.*, 2007; Hejazi *et al.*, 2012). Nesse sistema, as fibras absorvem tensões de tração transferidas pela interface solo-fibra por meio de atrito e embricamento mecânico, contribuindo para reduzir a propagação de fissuras e aumentar a ductilidade do material. Como resultado, conforme destacam Zornberg (2002) e Consoli *et al.*, (2007), o compósito apresenta melhoria significativa da resistência à tração e do comportamento pós-fissuração quando comparado ao solo sem reforço.

Diferentemente da estabilização química com cimento, cal ou materiais pozolânicos, que altera a matriz do solo por meio da formação de ligações cimentícias, o reforço com fibras atua predominantemente de forma mecânica. Enquanto estabilizantes aumentam rigidez e resistência, geralmente elevando a fragilidade do material, as fibras contribuem para maior ductilidade e controle da fissuração. A combinação entre estabilização química e reforço fibroso tem apresentado resultados promissores, especialmente pela melhoria simultânea da resistência mecânica e do desempenho pós-fissuração (Consoli *et al.*, 2007; Hejazi *et al.*, 2012).

2.3.2 Classificação e Propriedades das Fibras

A eficácia do reforço de solos com fibras depende crucialmente das propriedades das fibras utilizadas e de sua compatibilidade com a matriz de solo e com o ambiente de aplicação. Uma vasta gama de materiais fibrosos tem sido investigada, classificadas geralmente em quatro categorias principais: naturais, minerais, metálicas e poliméricas (sintéticas) (Hejazi *et al.*, 2012).

As fibras naturais foram as pioneiras no reforço de materiais terrosos. Fibras vegetais como sisal, coco, juta, cânhamo, bambu, curauá e palha, ou fibras animais como lã, foram historicamente utilizadas. Algumas delas, como o sisal e o bambu, apresentam resistência à tração inicial considerável. A fibra de coco, por exemplo, possui alto teor de lignina, o que lhe confere durabilidade ligeiramente superior à de outras fibras vegetais em ambientes úmidos (Mohanty *et al.*, 2005). As vantagens das fibras naturais residem em seu caráter renovável, biodegradabilidade (que pode ser vantajosa em aplicações temporárias ou ambientais específicas), baixo custo e ampla disponibilidade em muitas regiões. No entanto, a biodegradabilidade e a baixa durabilidade nas condições típicas do solo, envolvendo umidade, ataque microbiano e variações de pH, representam as principais limitações para seu uso em estruturas geotécnicas permanentes ou de longa vida útil, como as camadas de cobertura de aterros sanitários (Bouhicha *et al.*, 2005; Silveira; Casagrande, 2021). Estudos com fibras de sisal e curauá submetidas ao envelhecimento natural demonstraram que a exposição aos agentes ambientais altera as propriedades das fibras e reduz progressivamente o desempenho mecânico dos compósitos. Embora tratamentos superficiais possam amenizar esse processo, permanece necessária a avaliação da durabilidade em função das condições ambientais e do período de exposição (Silveira; Casagrande, 2021; Silveira; Ferreira; Casagrande, 2022). Assim, a degradação pode comprometer progressivamente a função de reforço ao longo do tempo.

As fibras minerais, como amianto, vidro e carbono, oferecem alta resistência e rigidez. O amianto, contudo, não é mais empregado devido aos seus riscos à saúde. Fibras de vidro convencionais (E-glass) são susceptíveis à degradação em ambientes alcalinos, como os encontrados em solos estabilizados com cimento ou cal, exigindo o uso de fibras de vidro especiais resistentes a álcalis (AR-glass), que são mais caras.

O grupo mais versátil e amplamente utilizado, atualmente, para o reforço de solos na geotecnia é o das fibras poliméricas ou sintéticas. Produzidas a partir de polímeros derivados principalmente da indústria petroquímica, essas fibras podem ser projetadas para apresentar uma ampla gama de propriedades mecânicas e, crucialmente, oferecem excelente durabilidade na maioria dos ambientes de solo. Sua resistência à degradação química e biológica, combinada com um custo geralmente competitivo, as torna ideais para aplicações geotécnicas de longo prazo. Os principais polímeros utilizados incluem o polipropileno (PP), o poliéster (PET), o polietileno (PE) e as poliamidas (Nylon).

O polipropileno (Pp), pertencente à família das poliolefinas, é uma das fibras sintéticas mais utilizadas no reforço de solos devido à sua elevada resistência química e à biodegradação, mesmo em ambientes agressivos, como aterros sanitários (Brandl, 2001; Hejazi *et al.*, 2012). Além disso, apresenta baixa densidade, reduzida absorção de água e boa estabilidade mecânica em condições úmidas (Liu *et al.*, 2021). As fibras de PP possuem resistência à tração relativamente elevada e alto alongamento na ruptura, conferindo maior ductilidade e capacidade de absorção de energia ao compósito solo-fibra (Tang *et al.*, 2007). Em aplicações geotécnicas, podem ser utilizadas na forma de monofilamentos ou fibras fibriladas, favorecendo a interação mecânica com a matriz do solo. Outra vantagem importante é o baixo custo, embora o material apresente sensibilidade à radiação ultravioleta, exigindo cuidados durante armazenamento e exposição prolongada ao sol.

Comparativamente, o Poliéster (PET) oferece maior rigidez (módulo) e, frequentemente, maior resistência à tração que o PP. É também considerado durável, embora possa sofrer hidrólise em ambientes fortemente alcalinos ($\text{pH} > 10$) a longo prazo (Koerner, 2012). O Polietileno (PE), especialmente o de alta densidade (PEAD), possui excelente resistência química, mas geralmente apresenta módulo e resistência inferiores aos do PP. As Poliamidas (Nylon) têm boa resistência à abrasão, mas sua absorção de umidade pode afetar as propriedades mecânicas. Fibras de aramida (Kevlar®), uma poliamida aromática, possuem propriedades excepcionais, mas custo proibitivo para reforço de solos em geral.

A escolha do Polipropileno (PP) para adição ao solo se justifica, portanto, pela sua combinação favorável de durabilidade química e biológica (essencial para o ambiente de aterro), boa resistência à tração acoplada a alta ductilidade (importante para o controle de fissuração e absorção de energia), hidrofobicidade, facilidade de manuseio e custo-benefício. Embora seu módulo de elasticidade seja inferior ao de outras fibras como o PET, sua capacidade de se deformar juntamente com o solo antes de romper e sua comprovada durabilidade em ambientes agressivos demonstram seu potencial para o reforço de camadas de cobertura visando o controle da retração a longo prazo.

2.3.3 Mecanismos de Interação Solo-Fibra

A eficácia do reforço de solos com fibras discretas depende fundamentalmente da capacidade de transferir tensões da matriz de solo para os elementos de reforço através da interface entre eles. Este processo de interação interfacial é o cerne do mecanismo de reforço e é governado por uma interação complexa de fatores relacionados às propriedades da fibra, do solo, da mistura e do ambiente de tensões (Zornberg, 2002). Quando o compósito solo-fibra se deforma sob solicitação externa ou interna (como a retração), a resistência ao cisalhamento mobilizada ao longo da superfície da fibra permite que esta seja tracionada, absorvendo parte da energia de deformação e resistindo à propagação de descontinuidades na matriz.

A resistência ao cisalhamento na interface solo-fibra é composta, primariamente, por atrito e adesão/embricamento. O atrito depende da tensão normal efetiva atuante na interface e das características de rugosidade de ambos os materiais. A adesão, mais relevante em solos coesivos ou cimentados, refere-se às ligações físico-químicas. O embricamento mecânico surge da interação geométrica entre as irregularidades da fibra e as partículas/agregados do solo (Hausmann, 1990).

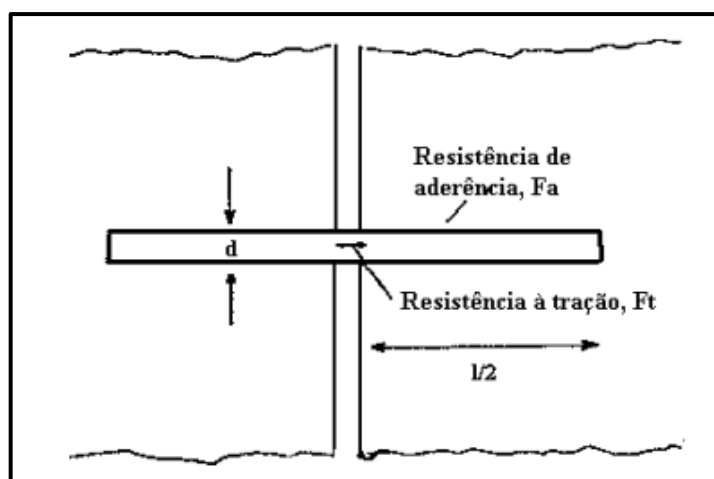
A natureza dessa interação é significativamente influenciada pela rigidez relativa entre a fibra (E_f) e a matriz de solo (E_s). Fibras de polipropileno (PP), possuem um módulo de elasticidade relativamente baixo (3-8 GPa) em comparação com a maioria dos solos compactados ou solos estabilizados, classificando-as como reforços "extensíveis" (Taylor, 1994). Isso significa que elas tendem a se deformar juntamente com a matriz de solo, sendo mais eficazes em conferir ductilidade e resistência pós-pico ou pós-fissuração. Conforme apontado por Magalhães (2005) e Domone e Illston (2010), o maior potencial do reforço de matrizes (sejam solos ou materiais cimentícios) reside justamente no estado pós-fissuração.

Elas atuam como "pontes" ou "costuras" que atravessam as fissuras, restringindo sua abertura e propagação e permitindo que o compósito continue a suportar carga e a absorver energia mesmo após a falha inicial da matriz. Essa capacidade de "amarrar" as fissuras é fundamental para o aumento da ductilidade e tenacidade observado em materiais reforçados com fibras.

Para que a fibra contribua efetivamente antes da fissuração macroscópica da matriz (aumento da resistência pré-fissuração), seria necessária uma fibra com rigidez (módulo E_f) superior à da matriz e uma aderência muito forte, capaz de impedir qualquer deslizamento relativo inicial. A aderência (ou ligação) entre a fibra e a matriz é, portanto, um parâmetro crítico que governa o desempenho do compósito. Uma boa aderência é essencial para garantir a transferência eficiente de tensões e para controlar o tamanho e a distribuição das fissuras. Em matrizes cimentadas, a formação de produtos de hidratação na interface pode melhorar significativamente a ligação fibra-matriz, aumentando a eficiência do reforço (Consoli *et al.*, 2007). A qualidade dessa ligação influencia se a falha do reforço ocorrerá por arrancamento da fibra ou por ruptura da própria fibra.

A geometria da fibra tem um papel importante no seu desempenho e possível falha por arrancamento ou ruptura. O comprimento da fibra (l) precisa ser suficiente para fornecer uma área de ancoragem adequada. Para uma dada resistência de aderência (R_a) e resistência à tração da fibra (R_t), existe um comprimento crítico (l_c). Se o comprimento “embutido” for menor que l_c , a fibra será arrancada, se for maior, ela poderá romper (Taylor, 1994). Nota-se, portanto, que os mecanismos que governam o comportamento têm uma relação direta com as características geométricas da fibra (comprimento e diâmetro) (Figura 5).

Figura 5 - Esquema idealizado do desenvolvimento de esforços na fibra.



Fonte: Taylor (1994).

Para calcular o comprimento crítico, parte-se do equilíbrio crítico (*Força de Aderência = Força de Ruptura*). Rearranjando a equação 5, obtém-se a equação 6 que evidencia a relação entre geometria e comportamento mecânico dado pelo fator de forma, através da qual pode-se também calcular o comprimento crítico.

$$\frac{\pi d^2}{4} \times R_t = \pi d \times \frac{l}{2} \times R_a \quad (5)$$

$$\frac{l}{d} = \frac{F_t}{2F_a} \quad (6)$$

Onde:

- a) d é o diâmetro da fibra;
- b) l é o comprimento da fibra;
- c) R_a é a resistência de atrito mobilizada ao longo da fibra
- d) R_t é a resistência a tração da fibra.

Isso demonstra que fibras com maior resistência à tração (F_t) exigem um maior fator de forma (l/d) ou uma maior resistência de aderência (F_a) para que sua resistência seja totalmente mobilizada antes do arrancamento. A forma da fibra (crimpada, fibrilada) também influencia a aderência e o imbricamento, podendo aumentar a resistência ao arrancamento para um mesmo comprimento (CONSOLI *et al.*, 2011).

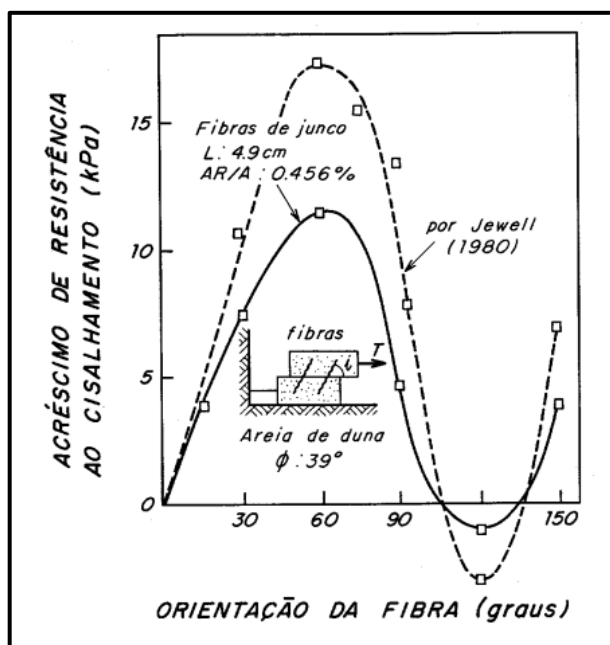
O teor de fibras na mistura é um parâmetro fundamental no desempenho do solo reforçado. Conforme Santoni *et al.* (2001), baixos teores podem resultar em interação insuficiente entre fibras e matriz, enquanto quantidades excessivas dificultam a homogeneização e a compactação do material. Além disso, teores elevados favorecem aglomerações, aumento do índice de vazios e da permeabilidade. Consoli *et al.* (2007) afirmam que existe um teor ótimo de incorporação, no qual se obtém melhoria do comportamento pós-fissuração e maior controle da propagação de trincas.

As propriedades da matriz de solo também influenciam diretamente a eficiência do reforço. Em solos argilosos, fatores como plasticidade, sucção e retração tornam a interação solo-fibra mais complexa. Para Tang *et al.* (2010), as fibras atuam restringindo deformações volumétricas e reduzindo a propagação de fissuras induzidas pela retração. Hejazi *et al.* (2012) destacam ainda que, em matrizes cimentadas, o aumento da rigidez e da fragilidade torna mais importante o papel das fibras na melhoria da ductilidade e da resistência pós-fissuração.

A orientação e distribuição espacial das fibras, também afetam a eficiência do reforço. Embora uma distribuição aleatória seja o objetivo para obter um compósito isotrópico, os processos de mistura e compactação podem induzir alguma anisotropia (Michalowski; Zhao, 1996). A eficácia máxima ocorre quando as fibras estão orientadas predominantemente na direção das tensões de tração principais (perpendiculares aos planos de fissura potenciais), como sugerido por Casagrande (2005) e pela Figura 6 (Gray e Ohashi, 1983). Uma distribuição espacial uniforme, sem aglomerações, é igualmente essencial para que o reforço seja efetivo em todo o volume do solo.

A introdução de fibras discretas na matriz de solo, atuando através dos mecanismos de interação interfacial descritos anteriormente, gera um espectro de alterações nas propriedades de engenharia do material compósito. Essas alterações não se limitam a um único parâmetro, mas abrangem o comportamento de resistência, a resposta tensão-deformação, a susceptibilidade à fissuração e as características de fluxo de fluidos. A compreensão desses efeitos é fundamental para projetos que contemplem misturas solo-fibra e para a avaliação de sua adequação a aplicações específicas, como coberturas de aterros sanitários.

Figura 6 - Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra.



Fonte: Gray e Ohashi (1983).

2.3.4 Efeitos do Reforço com Fibras nas Propriedades do Solo

A incorporação de fibras discretas e distribuídas aleatoriamente em uma matriz de solo, através dos complexos mecanismos de interação interfacial, resulta em um material compósito com um conjunto de propriedades de engenharia significativamente modificado em relação ao solo original não reforçado. Essas alterações abrangem desde a resistência ao cisalhamento e o comportamento tensão-deformação até a resposta à retração, fissuração e permeabilidade. A compreensão desses efeitos macroscópicos é fundamental para avaliar o potencial da técnica de reforço com fibras para diferentes aplicações geotécnicas, incluindo o uso em camadas de cobertura de aterros sanitários.

Uma das consequências mais estudadas e evidentes do reforço com fibras é a alteração da resistência ao cisalhamento do solo. De modo geral, a literatura aponta para um aumento da resistência com a adição de fibras, conforme evidenciado em investigações com diferentes tipos de solos e fibras (Zornberg, 2002; Consoli *et al.*, 2007). No entanto, a forma como os parâmetros de resistência de Mohr são afetados mostra considerável variabilidade. Muitos estudos, especialmente em solos granulares ou mesmo coesivos sob baixa tensão de confinamento, reportam um aumento significativo no intercepto coesivo (c'), mesmo que o solo original não possua coesão. Essa "coesão aparente" é atribuída à resistência ao arrancamento das fibras que cruzam o plano de cisalhamento (Leocádio, 2005; Júnior *et al.*, 2018). Casagrande (2001), por exemplo, em ensaios triaxiais com um solo residual areno-siltoso reforçado com fibras de polipropileno (PP), observou um aumento expressivo na coesão efetiva, enquanto o ângulo de atrito permaneceu praticamente inalterado em relação ao solo puro.

Por outro lado, o efeito das fibras sobre o ângulo de atrito efetivo (ϕ') ainda apresenta resultados variáveis na literatura. Estudos iniciais indicaram pouca alteração ou aumentos modestos em ϕ' (Heineck, 2002; Leocádio, 2005). Trabalhos mais recentes, entretanto, frequentemente relatam incrementos em ϕ' associados à incorporação de fibras de Pp. Conforme Merville (2024), aumentos progressivos de ϕ' foram observados em solo areno-argiloso reforçado com fibras de 6 mm e 12 mm, acompanhados por redução da coesão. Marçal (2019) verificou comportamento dependente do tipo de solo, com aumento simultâneo de ϕ' e c' em areia, mas aumento de ϕ' e redução de c' em solo argiloso. Resultados semelhantes foram observados por Bianchini (2013), que reportou aumentos de ϕ' e c' para a mistura considerada ótima, mas comportamento variável para outras combinações devido à dificuldade de homogeneização. De modo geral, os efeitos das fibras sobre os parâmetros de resistência

dependem do tipo de solo, da geometria e teor das fibras, da qualidade da mistura e do nível de tensão confinante.

A magnitude do ganho de resistência é também fortemente dependente do teor e do comprimento das fibras, com a existência de uma combinação ótima para cada sistema solo-fibra. Teores muito baixos podem ser ineficazes, enquanto teores excessivos levam a problemas de mistura e compactação, podendo reduzir a resistência (Taylor, 2000; Santoni *et al.*, 2001; Zaimoglu; Yetimoglu, 2011). Os teores ótimos reportados na literatura variam em percentual, em dimensões e de acordo com o tipo de solo. A Tabela 1 apresenta algum desses teores.

Tabela 1 - Percentuais ótimos por comprimento.

Autor(es)	Teor (%)	Comprimento (mm)	Solo
Kar e Pradhan (2011); Girija (2013)	0,4%	-	Argila
Bianchini (2013)	0,5%	12 mm	Areno-argiloso
Merville (2024)	0,75%	6 mm	
Tiwari e Satyam (2019); Malekzadeh e Bilsel (2014)	1,0%	-	Argila Siltosa

Fonte: Autor (2026).

O comprimento também influencia, com fibras muito curtas sendo facilmente arrancadas e fibras muito longas dificultando a mistura (Yazici; Keskin, 2024). A importância da homogeneidade da mistura é outro fator importante. Merville (2024) atribuiu resultados de resistência abaixo do esperado ou até inferiores ao solo natural à formação de "novelos" ou "grumos" devido à má dispersão das fibras de 6mm e 12mm.

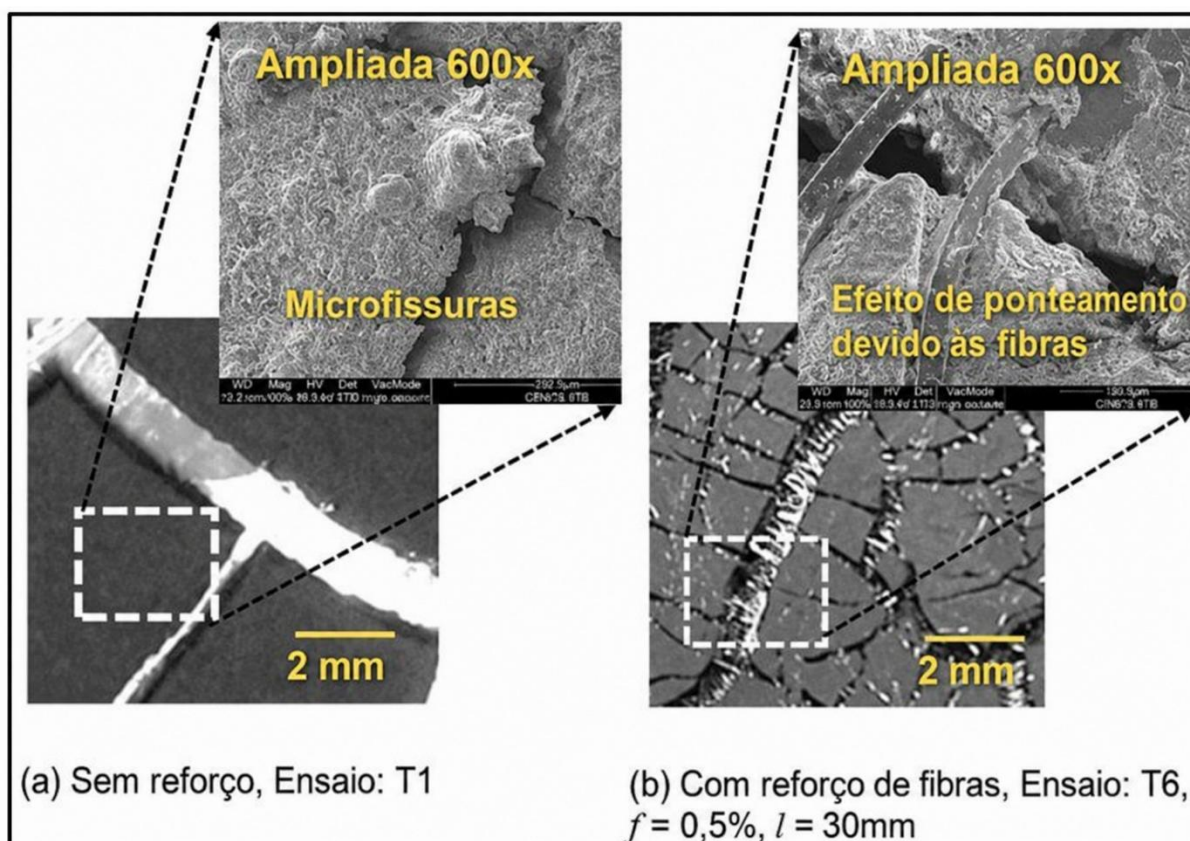
Independentemente da variabilidade no ganho de resistência de pico, um efeito consistentemente positivo e amplamente documentado é a melhoria da resistência pós-pico ou residual. As fibras atuam eficazmente em pontear as zonas de cisalhamento após a falha inicial da matriz, mitigando a queda de resistência e conferindo ao compósito uma capacidade de suportar carga em grandes deformações (Consoli *et al.*, 1999, 2002b; Festugato, 2008).

A adição de fibras promove uma mudança significativa no comportamento tensão-deformação do solo, que passa de frágil para predominantemente dúctil, aumentando a deformação na ruptura e a capacidade de absorção de energia (Feuerharmel, 2000). Conforme Casagrande (2001), solos reforçados com fibras de PP podem apresentar comportamento de encruamento contínuo em ensaios triaxiais, resultando em maior tenacidade do material (Li, 2005).

O efeito das fibras sobre a rigidez inicial do solo, entretanto, ainda é discutido na literatura. Alguns autores reportam redução da rigidez devido à maior dificuldade de compactação e ao aumento do índice de vazios da mistura solo-fibra (Estabragh *et al.*, 2011). Outros estudos observaram pouca alteração ou até aumento da rigidez, dependendo do tipo de solo, teor de fibras e condição de carregamento (Feuerharmel, 2000; Heineck, 2002; Dhar; Hussain, 2018).

No contexto de coberturas impermeabilizantes, destaca-se a capacidade das fibras de controlar a retração e a fissuração. Ao aumentar a resistência à tração e atuar como elementos de ponteamto (*crack bridging*) (Figura 7), as fibras restringem a abertura e propagação de fissuras, favorecendo a formação de trincas menores e menos conectadas (Tang *et al.*, 2010; Plé; Lê, 2012). Esse mecanismo contribui para preservar a integridade da barreira durante ciclos de secagem e umedecimento

Figura 7 - Efeito de ponteamto das fibras no solo.



Fonte: Sun *et al.* (2023).

A influência das fibras na permeabilidade é um tópico com resultados divergentes na literatura, mas fundamental para a aplicação em barreiras. O principal benefício é indireto,

ao limitar a macrofissuração, as fibras evitam o aumento drástico da permeabilidade (hidráulica e ao gás) que ocorreria no solo não reforçado fissurado (Estabragh *et al.*, 2011). Quanto ao efeito direto na permeabilidade da matriz, os resultados variam. Estudos em solos argilosos frequentemente reportam um aumento da permeabilidade hidráulica com a adição de fibras (Júnior *et al.*, 2020; Isaias, 2022), atribuído a caminhos preferenciais na interface ou maior índice de vazios. No entanto, Merville (2024) e Isaias (2022) observaram que, apesar do aumento, os valores de k ainda permaneciam baixos (na ordem de 10^{-6} a 10^{-7} cm/s), considerados aceitáveis para camadas de cobertura ($<10^{-5}$ cm/s). Em solos granulares, a adição de fibras pode até reduzir a permeabilidade (Bueno *et al.*, 1996), enquanto em outros casos, o comportamento pode variar ou não sofrer alterações significativas (Pinto e Machado, 2022). O efeito pode ser complexo e dependente da criação de novos caminhos versus o bloqueio de poros existentes. Para a função de barreira de cobertura, o controle da permeabilidade induzida por fissuras é o efeito dominante e mais benéfico das fibras.

Desse modo observa-se que o reforço com fibras de polipropileno induz um conjunto complexo de alterações nas propriedades dos solos. Os benefícios mais consistentes e relevantes para aplicações como camada de cobertura de aterros sanitários são o aumento da ductilidade, da tenacidade, da resistência pós-pico e, fundamentalmente, o controle da fissuração por retração, que ajuda a manter a baixa permeabilidade da barreira. Os efeitos sobre a resistência de pico, a rigidez inicial e a permeabilidade da matriz podem ser mais variáveis e dependem fortemente das características específicas do solo, da fibra, da qualidade da mistura e das condições de teste.

2.3.5 Estudos Específicos com Adição de Fibras em Solos Argilosos e Finos

A aplicação de fibras de polipropileno (PP) no reforço de solos finos tem sido amplamente investigada, especialmente em argilas e siltes empregados em barreiras hidráulicas e coberturas de aterros sanitários. De modo geral, os estudos apontam melhorias significativas na ductilidade, resistência pós-pico e controle da fissuração, embora os efeitos sobre permeabilidade, rigidez e parâmetros de resistência dependam do tipo de solo, teor de fibras e qualidade da mistura.

Maher e Ho (1994), em um estudo clássico com argila caulínica reforçada com fibras de PP, observaram aumento significativo da resistência à compressão, tração e flexão, além de maior ductilidade do material. Os autores verificaram que o ganho de resistência foi

mais pronunciado para amostras compactadas no lado seco do ótimo e que o aumento do comprimento das fibras elevou a capacidade de absorção de energia e o comportamento pós-pico. Em relação às propriedades hidráulicas, foi observado aumento da condutividade hidráulica da argila compactada, atingindo aproximadamente uma ordem de grandeza para misturas contendo 4% de fibras.

Resultados semelhantes foram obtidos por Al-Wahab e El-Kedrah (1995), que investigaram o uso de fibras curtas de PP para controle da retração e da fissuração em argilas compactadas submetidas a ciclos de secagem e umedecimento. Os autores demonstraram que teores relativamente baixos, entre 0,2% e 1%, foram suficientes para reduzir significativamente a propagação de fissuras e o potencial de expansão e contração volumétrica do solo. Em uma abordagem voltada especificamente para barreiras de aterros sanitários, Miller e Rifai (2004) utilizaram análise digital de imagens para avaliar a fissuração superficial de solos argilosos reforçados com fibras de PP. Os resultados mostraram que teores entre 0,5% e 1% reduziram o índice de intensidade de fissuração (CIF), produzindo fissuras menos extensas e menos conectadas.

Plé e Lê (2012), estudando um silte argiloso reforçado com fibras de PP nos teores de 0,3% e 0,6%, observaram aumento da resistência ao cisalhamento, melhoria da ductilidade e redução do índice de fragilidade do material. Embora a condutividade hidráulica tenha aumentado com a incorporação das fibras, os valores permaneceram compatíveis com aplicações em coberturas impermeabilizantes. Já Estabragh *et al.* (2011), avaliando uma argila CL reforçada com fibras sintéticas em teores de 10%, 20% e 30%, verificaram aumento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, principalmente para o teor de 30%, acompanhado por redução da rigidez durante a consolidação unidimensional.

Casagrande (2001), em ensaios triaxiais CID utilizando fibras de PP com comprimentos de 6, 12 e 24 mm e teores de 0,25%, 0,50% e 0,75%, observou transformação do comportamento do solo para um regime elasto-plástico com enrijecimento. A autora relatou aumento do intercepto coesivo efetivo de aproximadamente 10 kPa para 122 kPa a 20% de deformação, enquanto o ângulo de atrito efetivo permaneceu praticamente constante entre 32° e 33°. Além disso, verificou redução da rigidez inicial e aumento expressivo da tenacidade do compósito. Os ensaios de placa realizados em campo também indicaram aumento da capacidade de carga e redução significativa dos recalques da camada reforçada.

Feuerharmel (2000), comparando diferentes tipos de solo com e sem cimentação, demonstrou que os efeitos das fibras dependem fortemente da matriz do solo. Em argilas não

cimentadas reforçadas com fibras de PP de 12 mm e 36 mm, em teor de 0,5%, observou-se aumento da resistência e da ductilidade, acompanhado de elevação da permeabilidade, especialmente para as fibras mais longas. Em solos cimentados com 7% de cimento, as fibras reduziram a resistência de pico, porém aumentaram a resistência pós-pico e diminuíram a fragilidade do material, evidenciando a importância do reforço fibroso no controle da fissuração de matrizes cimentadas.

Pesquisas mais recentes reforçam esses resultados. Merville (2024), avaliando um solo areno-argiloso utilizado como cobertura de aterro sanitário no Ceará, reforçado com fibras FibroMac® de 6 mm e 12 mm em teores de até 1,25%, observou aumento do coeficiente de permeabilidade de $9,8 \times 10^{-8}$ cm/s no solo puro para $8,2 \times 10^{-6}$ cm/s nas misturas com fibras de 6 mm e $4,2 \times 10^{-6}$ cm/s para fibras de 12 mm. Apesar do aumento, os valores permaneceram inferiores ao limite geralmente aceito para barreiras hidráulicas ($< 1 \times 10^{-5}$ cm/s). O autor identificou ainda teores ótimos de 0,75% para fibras de 6 mm e 1,25% para fibras de 12 mm em relação ao ganho de resistência ao cisalhamento. Bianchini (2013), utilizando fibras de PP com comprimentos de 6 mm, 12 mm e 24 mm e teores de 0,25%, 0,50% e 0,75%, também verificou melhor desempenho para a combinação de 12 mm e 0,5%, destacando a importância da homogeneização da mistura para evitar formação de “novelos” e perda de desempenho mecânico.

Tang *et al.* (2007), estudando solos cimentados com 5% e 8% de cimento e fibras de PP em teores entre 0,05% e 0,25%, confirmaram aumento da resistência, melhoria da ductilidade e maior resistência residual com a incorporação das fibras. Em estudo posterior, Tang *et al.* (2010) demonstraram a importância da resistência interfacial solo-fibra para a eficiência do reforço. Em solos expansivos, Puppala e Musenda (2000) verificaram que fibras de PP em teores de até 1,5% reduziram significativamente o potencial e a pressão de expansão, além de aumentarem os valores de UCS e CBR. Resultados semelhantes foram observados por Malekzadeh e Bilsel (2014), que reportaram redução dos índices de compressão, inchamento e retração após dessecação em solos expansivos reforçados com 1% de fibras de PP.

De forma geral, a literatura demonstra que fibras de PP promovem melhorias importantes na ductilidade, tenacidade e controle da fissuração em solos finos. Entretanto, os efeitos sobre permeabilidade, rigidez e parâmetros de resistência dependem da interação entre tipo de solo, geometria e teor das fibras, presença de cimentação e qualidade da mistura, evidenciando a necessidade de estudos específicos para aplicações geotécnicas em barreiras hidráulicas e coberturas impermeabilizantes.

2.3.6 Considerações de Projeto e Aplicação

A transposição dos resultados promissores obtidos em estudos de laboratório sobre o reforço de solos com fibras de polipropileno (PP) para aplicações bem-sucedidas em campo requer uma atenção cuidadosa a uma série de considerações práticas de projeto, execução e controle de qualidade. Embora a técnica ofereça benefícios significativos em termos de melhoria das propriedades mecânicas e controle de fissuração, seu desempenho efetivo depende da seleção adequada dos materiais, da otimização da mistura, da implementação de procedimentos eficazes de mistura e compactação, e da garantia da durabilidade a longo prazo.

Uma das primeiras etapas no reforço de solos com fibras é a escolha adequada do material de base. Embora as fibras possam melhorar diferentes tipos de solos, as propriedades intrínsecas da matriz influenciam diretamente a interação solo-fibra e a dosagem ótima do reforço. Solos excessivamente plásticos ou com minerais muito ativos podem demandar maiores teores de fibras e apresentar dificuldades adicionais de mistura. Dessa forma, a caracterização geotécnica do solo constitui etapa fundamental do processo.

A seleção das fibras envolve a definição do tipo de polímero, comprimento, diâmetro e geometria. O polipropileno (PP) é frequentemente utilizado em aplicações geotécnicas devido à sua resistência química, durabilidade e baixo custo (BRANDL, 2001). Conforme observado por Casagrande (2001) e Merville (2024), o comprimento das fibras e o fator de forma (l/d) influenciam significativamente a resistência ao arrancamento e a eficiência do reforço, mas também afetam a trabalhabilidade da mistura. Além disso, a forma das fibras, como monofilamentos ou fibras fibriladas, pode alterar a aderência e a dispersão na matriz de solo (Consoli *et al.*, 2011).

Outro aspecto essencial é a determinação da dosagem ótima de fibras. Conforme demonstrado por Zaimoglu e Yetimoglu (2011) e Merville (2024), não existe uma dosagem universal aplicável a todos os solos. Teores reduzidos podem ser insuficientes para promover reforço efetivo, enquanto teores excessivos podem dificultar a homogeneização e compactação, além de elevar a permeabilidade e o custo do material. Em geral, os estudos indicam teores viáveis entre 0,25% e 1,5% em massa (Merville, 2024; Taha *et al.*, 2020). Assim, a definição do teor ótimo deve ser realizada experimentalmente, considerando resistência, deformabilidade, retração e permeabilidade do compósito.

Um dos principais desafios práticos do reforço fibroso consiste em garantir a dispersão homogênea das fibras na matriz de solo. A formação de “novelos” e aglomerados, relatada por Merville (2024) e Bianchini (2013), compromete significativamente o desempenho mecânico do material. A dificuldade de mistura tende a aumentar com maiores teores de fibras, maiores comprimentos, fibras muito finas e solos argilosos úmidos. Além disso, o método de mistura exerce influência importante na qualidade final do compósito.

Em laboratório, a mistura manual pode ser utilizada para pequenas quantidades, embora misturadores mecânicos normalmente proporcionem melhor dispersão das fibras. Em campo, podem ser empregados rotores agrícolas, centrais de mistura ou equipamentos de movimentação de solo, cada qual com diferentes níveis de eficiência e controle operacional (Hebib; Farrell, 2003). Técnicas como adição gradual das fibras, controle do teor de umidade e pré-abertura das fibras têm sido utilizadas para melhorar a homogeneização da mistura e reduzir a formação de aglomerados.

Outra etapa crítica que deve ser planejada ainda na fase de projeto é a compactação da mistura solo-fibra. A presença das fibras pode alterar os parâmetros ótimos de compactação (γ_{d_max} e w_{ot}) em relação ao solo puro, geralmente resultando em menor densidade e/ou maior umidade ótima para a mesma energia (Hoare, 1979; Merville, 2024). É fundamental, portanto, realizar ensaios de compactação na mistura solo-fibra específica que será utilizada no projeto para determinar seus parâmetros ótimos, em vez de simplesmente assumir os do solo puro.

Em campo, os métodos de compactação usuais (rolos pé-de-carneiro, lisos, vibratórios) podem ser empregados, mas a energia de compactação e o número de passadas podem precisar ser ajustados para atingir a densidade de projeto especificada para a mistura solo-fibra. O controle de densidade e umidade em campo é indispensável, embora se deva ter atenção à possível interferência das fibras na leitura de alguns equipamentos. A compactação também pode induzir uma orientação preferencial das fibras (geralmente horizontal), o que pode levar a propriedades anisotrópicas no material compactado (Sayeed; Shah, 2015). A dificuldade em replicar em campo a mesma qualidade de compactação e homogeneidade obtida em laboratório, como evidenciado pela comparação de Casagrande (2001), ressalta a importância de um controle de execução rigoroso.

Devido às especificidades do material, a implementação de um plano de Controle de Qualidade/Garantia de Qualidade (CQ/GQ) robusto é essencial para projetos com solo reforçado com fibras. Além dos controles usuais para obras de terraplenagem (controle de umidade, densidade, espessura de camada), devem ser incluídos:

- a) Verificação das especificações das fibras recebidas (tipo, dimensões, propriedades).
- b) Controle rigoroso da dosagem (pesagem ou volume) das fibras adicionadas ao solo.
- c) Monitoramento e inspeção visual da eficiência do processo de mistura para garantir a homogeneidade.
- d) Ajuste e controle dos parâmetros de compactação para a mistura solo-fibra.

Para aplicações como cobertura, a durabilidade das fibras é um requisito essencial. As fibras de polipropileno apresentam elevada resistência química e à biodegradação, sendo consideradas adequadas para uso em ambientes geotécnicos (Koerner, 1998; Brandl, 2001). Entretanto, a exposição prolongada à radiação UV durante a construção pode provocar degradação do material, exigindo cuidados de armazenamento ou uso de fibras estabilizadas. Além disso, efeitos de longo prazo, como a fluência (*creep*) das fibras sob tensão constante, ainda demandam investigações complementares (Casagrande, 2001).

A aplicação prática do reforço fibroso também deve considerar aspectos de custo-benefício. O custo adicional das fibras e dos procedimentos de mistura e compactação deve ser avaliado em conjunto com os benefícios esperados, como aumento da resistência, redução da fissuração e melhoria do desempenho hidráulico e mecânico da barreira.

Assim, embora o reforço com fibras de PP apresente elevado potencial técnico para controle da retração e melhoria do comportamento de solos finos, sua aplicação eficiente depende de um projeto adequado, definição experimental da mistura ótima e controle rigoroso dos procedimentos executivos.

2.4 Uso de Cinza Leve de Carvão Mineral (CLCM) em Solos

Paralelamente ao reforço mecânico proporcionado pelas fibras, outra abordagem amplamente investigada para a melhoria das propriedades de engenharia dos solos, particularmente os argilosos, é a estabilização físico-química através da adição de subprodutos industriais com propriedades cimentícias ou pozolânicas. Dentre esses materiais, a cinza leve de carvão mineral (CLCM), também chamada *fly ash*, tem recebido atenção devido ao seu potencial ofensivo ao meio ambiente (necessitando de um destino final adequado), grande disponibilidade, baixo custo e potencial para conferir melhorias em termos de resistência,

durabilidade e estabilidade volumétrica aos solos tratados (Ahmaruzzaman, 2010; Mohanty; Patra, 2015).

2.4.1 Caracterização da CLCM

A cinza leve (*fly ash*) é um resíduo pulverulento gerado em grandes volumes durante a combustão do carvão mineral em usinas termelétricas. Esse material é formado por partículas finas inorgânicas arrastadas pelos gases de combustão e posteriormente retidas por sistemas de controle ambiental, como precipitadores eletrostáticos e filtros de manga, antes da liberação dos gases na atmosfera. Diferencia-se da cinza pesada (*bottom ash*), composta por partículas mais densas que se depositam no fundo da caldeira (Sear, 2001; Fhwa, 2003). A elevada produção mundial de *fly ash*, da ordem de centenas de milhões de toneladas anuais, constitui um importante desafio ambiental relacionado à disposição final, incentivando pesquisas voltadas ao reaproveitamento desse resíduo em aplicações de engenharia, em consonância com os princípios da sustentabilidade e da economia circular (Ahmaruzzaman, 2010; Yao *et al.*, 2015).

A composição química e mineralógica das cinzas varia significativamente em função da natureza do carvão mineral utilizado e das condições de combustão empregadas na usina termelétrica, como temperatura e tipo de caldeira. Dessa forma, a caracterização específica da cinza proveniente de cada fonte torna-se essencial para avaliar sua adequabilidade em aplicações geotécnicas e cimentícias (Sear, 2001; Hemalatha; Ramaswamy, 2017). Em termos químicos, predominam os óxidos de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3), cuja soma frequentemente ultrapassa 70% em cinzas de baixo teor de cálcio. Outros constituintes presentes em menores proporções incluem CaO , MgO , Na_2O , K_2O e SO_3 , além de carbono residual não queimado, geralmente expresso pela perda ao fogo (KUMAR, 2002).

Mineralogicamente, a *fly ash* apresenta uma fração amorfa significativa composta principalmente por aluminossilicatos vítreos formados pelo rápido resfriamento das partículas fundidas. Essa fase amorfa é responsável pelas propriedades pozolânicas da cinza, permitindo reações com hidróxido de cálcio na presença de água e contribuindo para o desenvolvimento de compostos cimentantes (Mehta; Monteiro, 2014). Além da fase vítrea, são frequentemente identificadas fases cristalinas relativamente inertes, como quartzo e mulita, podendo ainda ocorrer hematita, magnetita, anidrita e cal livre, dependendo das características do carvão e do processo de combustão (Sear, 2001). A quantificação da fração amorfa por técnicas como

Difração de Raios X (DRX) é considerada importante para estimar o potencial pozolânico do material (Lopes, 2020).

Fisicamente, a cinza leve é constituída predominantemente por partículas de dimensão semelhante à do silte, com morfologia esférica e superfície lisa. Essas partículas podem ser maciças ou ocas, favorecendo o chamado “efeito rolamento”, capaz de melhorar a trabalhabilidade de misturas cimentícias e de solos estabilizados (Hemalatha; Ramaswamy, 2017). A massa específica dos grãos geralmente varia entre 2,0 e 2,8 g/cm³, valor inferior ao de muitos minerais de solo devido à presença de partículas vítreas e ocas. Além disso, a área superficial específica influencia diretamente a reatividade pozolânica e a capacidade de adsorção de água do material. Silva e Lopes (2022), por exemplo, obtiveram valores de área superficial específica (BET) de 23,04 e 35,6 m²/g para diferentes cinzas avaliadas.

Devido à grande variabilidade em sua composição química, especialmente no teor de óxido de cálcio (CaO), as cinzas volantes são comumente classificadas em duas categorias principais, conforme a norma ASTM C618 (ASTM C618, 2019), originalmente desenvolvida para o uso de cinzas em concreto, mas frequentemente adotada como referência em aplicações geotécnicas:

- a) Classe F: Cinzas com baixo teor de cálcio, geralmente provenientes da queima de carvões betuminosos ou antracíticos. Apresentam predominância de propriedades pozolânicas, necessitando de uma fonte externa de hidróxido de cálcio, como cimento ou cal, para formação de compostos cimentantes. Normalmente possuem soma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ superior a 70%.
- b) Classe C: Cinzas com elevado teor de cálcio, geralmente oriundas da queima de carvões ligníticos ou sub-betuminosos. Possuem comportamento tanto pozolânico quanto cimentante, devido à presença de compostos reativos de cálcio, permitindo reações de hidratação mesmo sem adição externa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Tikalisky *et al.*, 2000).

Embora o uso da cinza em solos seja ambientalmente vantajoso por consumir um resíduo industrial, é importante considerar potenciais preocupações ambientais associadas à sua composição. Cinzas de carvão podem conter traços de metais pesados (como arsênio, cádmio, chumbo, mercúrio, selênio) e outros elementos potencialmente tóxicos. A lixiviação desses elementos da mistura solo-cinza para o meio ambiente (águas subterrâneas ou superficiais) é uma preocupação que deve ser avaliada através de ensaios de lixiviação padronizados e análises

de risco específicas para cada aplicação e cenário ambiental (Praharaj *et al.*, 2002; Querol *et al.*, 2002). Em muitos casos, a incorporação da cinza em uma matriz de solo compactada ou estabilizada tende a imobilizar esses elementos, mas a avaliação é necessária para garantir a segurança ambiental da aplicação (BIN-Shafique *et al.*, 2010). Compreendida a origem e as características gerais da cinza leve de carvão mineral é importante compreender os mecanismos pelos quais ela interage com o solo para promover a estabilização e a melhoria de suas propriedades.

2.4.2 Mecanismos de Estabilização de Solos com Cinzas

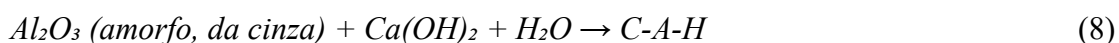
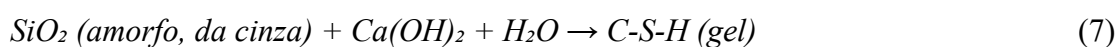
A capacidade da cinza leve de carvão mineral de melhorar propriedades dos solos, como resistência, rigidez, estabilidade volumétrica e permeabilidade, está associada a uma combinação de mecanismos físicos e químicos. A predominância e a eficiência desses mecanismos dependem diretamente do tipo de cinza utilizada, especialmente de sua classificação como Classe F ou Classe C, bem como das características do solo, incluindo granulometria, mineralogia e pH, além das condições ambientais de umidade e temperatura (Little; Nair, 2009; Mohanty; Patra, 2015).

As alterações químicas promovidas pela adição de cinza são as principais responsáveis pelos ganhos de resistência e durabilidade observados em solos estabilizados ao longo do tempo. Esses mecanismos envolvem principalmente reações pozolânicas e cimentícias. As reações pozolânicas estão associadas sobretudo às cinzas Classe F, que apresentam baixo teor de cálcio e elevada concentração de sílica e alumina na forma amorfa. Pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, isoladamente, possuem pouca atividade cimentante, mas que, na presença de água e hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, reagem formando compostos cimentantes estáveis (Mehta; Monteiro, 2014; ASTM C618, 2019).

Quando a cinza Classe F é misturada ao solo, torna-se necessária a presença de uma fonte de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para ativar as reações pozolânicas. Esse hidróxido pode ser fornecido externamente por meio da adição de cal hidratada, cal virgem ou cimento Portland, prática comum em estabilização de solos para pavimentação. Em alguns casos, solos naturalmente ricos em minerais cálcicos podem disponibilizar parte desse hidróxido, embora geralmente em quantidade insuficiente para promover reações pozolânicas expressivas apenas com a incorporação da cinza. Dessa forma, a eficiência da estabilização química depende da

disponibilidade de cálcio reativo e da presença da fase amorfa da cinza, responsável pela formação dos compostos cimentantes.

As reações pozolânicas principais (equações 7 e 8) envolvem a dissolução da sílica e alumina amorfas da cinza no ambiente alcalino criado pela presença do Ca(OH)_2 , seguida pela reação com os íons Ca^{2+} e água para formar produtos hidratados estáveis e de baixa solubilidade, principalmente Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) e, em menor grau, Aluminato de Cálcio Hidratado (C-A-H) e Aluminossilicato de Cálcio Hidratado (C-A-S-H) (Taylor, 1997; Little; Nair, 2009).



Os produtos hidratados formados nas reações pozolânicas são semelhantes aos gerados na hidratação do cimento *Portland*. Esses compostos precipitam nos vazios do solo e na superfície das partículas, atuando como agentes cimentantes responsáveis por interligar os grãos e promover a formação de uma microestrutura mais densa e rígida ao longo do tempo de cura. Como consequência, ocorre aumento da resistência mecânica, redução da compressibilidade e diminuição da permeabilidade das misturas solo-cinza estabilizadas (Kolias *et al.*, 2005; Edil *et al.*, 2006). As reações pozolânicas são dependentes do tempo e evoluem gradualmente ao longo de semanas ou meses, sendo influenciadas pela finura da cinza, teor de fase amorfa, disponibilidade de Ca(OH)_2 , temperatura e umidade.

As cinzas Classe C, por sua vez, apresentam comportamento distinto devido ao elevado teor de cálcio e à presença de compostos cimentícios reativos. Além das propriedades pozolânicas, essas cinzas possuem capacidade autocimentante, reagindo diretamente com a água sem necessidade de ativador de cálcio (Tikalsky *et al.*, 2000). Isso ocorre em função da presença de cal livre, silicatos e aluminatos de cálcio, que formam compostos hidratados cimentantes, como C-S-H e C-A-H, em reações semelhantes às observadas no cimento Portland (Parsons; Milburn, 2003). Como resultado, solos estabilizados com cinzas Classe C geralmente apresentam ganho de resistência mais rápido quando comparados às misturas contendo apenas cinza Classe F.

A magnitude dessas reações depende da composição química e mineralógica específica da cinza. Elias (2018), por exemplo, identificou na cinza proveniente do Complexo do Pecém um teor relativamente elevado de CaO ($\approx 17,5\%$), indicando comportamento

intermediário entre as Classes F e C, com potencial tanto para reações pozolânicas quanto para alguma autocimentação. A presença de coesão observada em ensaios de cisalhamento direto após maior tempo de contato com água pode estar associada ao desenvolvimento progressivo dessas reações.

Entretanto, cinzas ricas em cálcio e sulfato podem favorecer a formação de etringita, especialmente em misturas contendo elevados teores de SO_3 e CaO . A formação inicial desse mineral pode contribuir para o preenchimento de vazios e ganho de resistência, mas sua formação excessiva ou tardia pode provocar expansão volumétrica, fissuração e perda de desempenho mecânico da mistura estabilizada (Little; Nair, 2009; Petry; Little, 2002; Rollings *et al.*, 1999). Dessa forma, a avaliação do potencial expansivo associado aos sulfatos é importante em aplicações envolvendo cinzas de alto teor de cálcio.

Além dos mecanismos químicos, a cinza leve promove melhorias físicas imediatas nas misturas solo-cinza. As partículas finas e predominantemente esféricas da *fly ash* atuam preenchendo vazios entre os grãos do solo, reduzindo a porosidade e a permeabilidade da matriz (Kumar; Sharma, 2004). Esse efeito de preenchimento modifica a distribuição granulométrica da mistura, podendo reduzir a plasticidade em solos argilosos e melhorar o empacotamento em solos arenosos (Prabakar *et al.*, 2004).

A incorporação da cinza também altera o comportamento de compactação do solo. Em geral, observa-se redução da massa específica seca máxima e aumento da umidade ótima, devido à menor massa específica dos grãos da cinza e à maior demanda de água para lubrificação das partículas e ocorrência das reações químicas (Parsons; Milburn, 2003; Senol *et al.*, 2006). Contudo, esses efeitos dependem das características específicas da cinza e do solo utilizado.

De modo geral, os mecanismos químicos e físicos atuam de forma conjunta e complementar. Enquanto as reações pozolânicas e cimentícias são responsáveis pelo ganho de resistência e durabilidade a longo prazo, os mecanismos físicos contribuem para melhorias imediatas na densidade, trabalhabilidade e permeabilidade das misturas. A eficiência da estabilização com cinzas leves resulta, portanto, da interação entre esses processos, permitindo explicar as alterações observadas no comportamento geotécnico dos solos tratados.

2.4.3 Efeitos nas Propriedades do Solo

A incorporação de cinza leve de carvão mineral em solos promove modificações físicas e químicas que resultam em melhorias relevantes para aplicações geotécnicas, como pavimentação, aterros estruturais e barreiras hidráulicas. Essas melhorias decorrem da atuação conjunta de mecanismos pozolânicos, cimentícios e físicos, como preenchimento de vazios e alteração granulométrica, refletindo em mudanças nas características de compactação, resistência mecânica, estabilidade volumétrica e permeabilidade do material tratado.

A adição de *fly ash* geralmente altera a relação umidade-massa específica das misturas solo-cinza. Em muitos casos, observa-se redução da massa específica seca máxima (γ_{d_max}) e aumento da umidade ótima (w_{ot}), devido à menor massa específica dos grãos da cinza e à maior demanda de água para hidratação e lubrificação das partículas (Prabakar *et al.*, 2004; Senol *et al.*, 2006). Entretanto, esses efeitos dependem das características específicas dos materiais envolvidos. Elias (2018), por exemplo, verificou valores elevados de umidade ótima e baixa massa específica para a cinza pura do Pecém, enquanto as misturas apresentaram comportamento intermediário entre o solo e a cinza.

O aumento da resistência mecânica é um dos efeitos mais relevantes da estabilização com cinzas leves. Esse comportamento resulta da formação de compostos cimentantes hidratados, como C-S-H e C-A-H, capazes de interligar partículas do solo e da cinza, formando uma estrutura cimentada mais rígida e estável (Kolias *et al.*, 2005; Edil *et al.*, 2006). O ganho de resistência depende do tempo de cura e das condições de umidade e temperatura. Diversos estudos relatam aumentos significativos na resistência à compressão não confinada (UCS) e no Índice de Suporte Califórnia (CBR) de solos tratados com cinzas Classe C ou Classe F associadas à cal ou cimento (Bin-Shafique *et al.*, 2010; Turan *et al.*, 2012; Taha *et al.*, 2020). Além disso, as reações cimentícias tendem a elevar a coesão efetiva do solo, enquanto os efeitos sobre o ângulo de atrito podem variar conforme o material e o nível de cimentação (Edil *et al.*, 2006).

A formação dessa estrutura cimentada também promove aumento da rigidez e redução da compressibilidade do solo, resultando em menores deformações sob carregamento (Taha *et al.*, 2020). Em solos argilosos expansivos, a estabilização com cinzas leves pode ainda reduzir retração e expansão volumétrica, devido à modificação química das argilas, preenchimento de vazios e formação de uma matriz mais resistente às variações de umidade (Phanikumar; Sharma, 2004; Brooks, 2009). Esses efeitos são particularmente importantes em

camadas de cobertura de aterros, onde a integridade estrutural frente aos ciclos de secagem e umedecimento é fundamental.

Outro efeito frequentemente observado é a redução da condutividade hidráulica (k), especialmente em aplicações de barreiras hidráulicas. Essa redução ocorre tanto pelo preenchimento físico dos vazios pelas partículas finas da cinza quanto pela formação progressiva de produtos cimentantes que obstruem os poros da matriz (Sivapullaiah *et al.*, 2000; Nalbantoglu; Tuncer, 2001). Em condições adequadas de compactação e cura, valores de k compatíveis com *liners* podem ser obtidos, frequentemente entre 10^{-7} e 10^{-9} cm/s (Bellezza; Pasqualini, 1997; Kumar; Sharma, 2004).

Em solos altamente expansivos ricos em esmectitas, o efeito da cinza sobre a permeabilidade pode ser mais complexo. A presença de eletrólitos solúveis e cátions divalentes, como Ca^{2+} , liberados pela cinza, pode reduzir o inchamento osmótico das argilas, comprimindo a dupla camada difusa e limitando a expansão das lamelas argilosas (Mitchell; Soga, 2005). Embora isso possa melhorar a estabilidade volumétrica, também pode impedir que a argila atinja sua condição de máxima expansão e mínima permeabilidade, resultando em valores de k superiores aos observados na argila pura hidratada (Shackelford *et al.*, 2000). Esse fenômeno foi observado por Elias (2015) em misturas contendo bentonita sódica e *fly ash*, comportamento semelhante ao relatado em estudos sobre compatibilidade química de GCLs com lixiviados ricos em cátions multivalentes (Ruhl; Daniel, 1997; Jo *et al.*, 2001).

De forma geral, a estabilização com CLCM promove aumento da resistência, rigidez e durabilidade, além da redução da compressibilidade e do potencial de retração e expansão dos solos. Contudo, a magnitude desses efeitos depende das características da cinza, do tipo de solo, das condições de compactação, cura e interação química entre os materiais. Dessa forma, a avaliação específica de cada sistema solo-cinza é fundamental para garantir o desempenho geotécnico esperado.

2.4.4 Considerações Ambientais e de Aplicação

A utilização de cinza leve de carvão mineral (*fly ash*) em aplicações geotécnicas tem despertado interesse crescente devido aos benefícios técnicos, econômicos e ambientais associados ao reaproveitamento desse resíduo industrial. Sua aplicação em estabilização de solos, camadas de pavimentos e barreiras hidráulicas pode melhorar propriedades mecânicas e reduzir o consumo de materiais naturais. Entretanto, o uso em larga escala requer avaliação

criteriosa não apenas do desempenho geotécnico, mas também das implicações ambientais associadas ao material.

O interesse no aproveitamento da *fly ash* está fortemente relacionado aos aspectos de sustentabilidade. A geração de energia em usinas termelétricas a carvão produz grandes volumes de cinzas, cuja disposição em aterros ou bacias de rejeito representa elevado custo operacional e potencial passivo ambiental (Ahmaruzzaman, 2010; Yao *et al.*, 2015). O uso benéfico dessas cinzas em obras geotécnicas reduz a necessidade de áreas de disposição e promove a valorização de um subproduto industrial, em consonância com os princípios da economia circular e da simbiose industrial (Bhatt *et al.*, 2019).

Além disso, a utilização da cinza leve pode reduzir a exploração de recursos naturais virgens. Em diversas aplicações, a *fly ash* pode substituir parcialmente agregados, cal ou cimento *Portland*, reduzindo o consumo de materiais naturais e a emissão de CO₂ associada à produção cimentícia (Sear, 2001; Mehta; Monteiro, 2014). A substituição parcial do cimento *Portland* é particularmente relevante do ponto de vista ambiental, considerando o elevado consumo energético e as emissões de gases de efeito estufa inerentes ao processo de fabricação do cimento.

Apesar das vantagens, a utilização de cinzas exige avaliação ambiental rigorosa, principalmente devido ao potencial de lixiviação de elementos traço presentes no carvão mineral. Durante a combustão, elementos como arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), chumbo (Pb), mercúrio (Hg) e selênio (Se) podem se concentrar nas cinzas (Querol *et al.*, 2002; Praharaj *et al.*, 2002). A mobilidade desses elementos depende de fatores como pH, condições redox, composição mineralógica da cinza e interação com a matriz do solo (Bin-Shafique *et al.*, 2010; Izquierdo; Querol, 2012). Em geral, a incorporação da *fly ash* em matrizes compactadas e/ou cimentadas tende a reduzir a lixiviação pela imobilização física e química dos contaminantes.

Nesse contexto, a realização de ensaios de lixiviação e solubilização torna-se indispensável para avaliação da viabilidade ambiental do material. Métodos padronizados, como os estabelecidos nas normas ABNT NBR 10005 e NBR 10006, além de ensaios em coluna baseados na ASTM D4874, são amplamente empregados para essa finalidade. Estudos como o de Elias (2018), que classificou cinzas volantes da UTE Pecém-CE como resíduo Classe II-A, evidenciam a importância de avaliações ambientais específicas para cada aplicação geotécnica (Elias, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a abordagem metodológica adotada para o desenvolvimento da presente tese de doutorado. O foco central da pesquisa, conforme estabelecido nos capítulos anteriores, reside na investigação do potencial da utilização combinada de fibras de polipropileno (PP) e cinza leve de carvão mineral (*fly ash*) como agentes de melhoria para um solo areno-argiloso local, visando sua aplicação em camadas de cobertura final de aterros sanitários. A problemática abordada remete às limitações das coberturas convencionais de argila compactada, particularmente sua susceptibilidade à fissuração por retração, que compromete a função de barreira e resulta em emissões fugitivas de biogás e aumento da infiltração de água, com consequentes impactos ambientais e operacionais negativos.

A metodologia aqui descrita foi delineada para avaliar experimental e analiticamente a eficácia da solução proposta (solo-fibra-cinza) em mitigar esses problemas. A estrutura deste capítulo seguirá a sequência das etapas da pesquisa, iniciando pela seleção, coleta e preparação dos materiais constituintes (solo, fibras e cinza), passando pela caracterização detalhada de suas propriedades individuais, e culminando na execução de um programa experimental em laboratório com as misturas binárias (solo-fibra e solo-cinza) e ternárias (solo-fibra-cinza). Como etapa complementar, foi realizada uma modelagem numérica comparativa, de caráter preliminar, para avaliar a sucção matricial e o grau de saturação do solo de referência e das misturas selecionadas.

3.1 Materiais – Seleção, Coleta e Preparação

Nesta seção são apresentados os procedimentos de seleção, coleta e preparação, além das características gerais dos materiais empregados como componentes nas misturas avaliadas ao longo desta pesquisa. Foram utilizados: a) um solo local, b) fibras de polipropileno comerciais, c) cinza leve de carvão mineral proveniente de termelétrica Energia Pecém, e d) água da rede pública de abastecimento.

3.1.1 Solo (S)

O solo utilizado como matriz nas misturas foi obtido do material empregado na cobertura final do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC) (Figura 8). O

aterro está localizado no município de Caucaia, na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), Ceará.

Figura 8 - Jazida do solo de cobertura e local de coleta do material da pesquisa.



Fonte: Autor (2026).

As amostras foram cedidas pela administração do aterro e coletadas na forma deformada de áreas de estoque/empréstimo utilizadas pela operação. No Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da Universidade Federal do Ceará (UFC), o material passou por um preparo inicial consistindo em secagem ao ar, destorroamento manual para minimizar a quebra de agregados naturais, homogeneização e quarteamento para obtenção de amostras representativas. O material foi armazenado em recipientes vedados até sua utilização nos ensaios.

3.1.2 Fibras de Polipropileno (PP)

O elemento de reforço utilizado foi a fibra de polipropileno (PP) monofilamento, comercializada pela Maccaferri Brasil sob a marca FibroMac®. A escolha por este tipo de fibra e fornecedor baseou-se na sua ampla disponibilidade comercial, nas especificações técnicas detalhadas fornecidas e no histórico de uso em pesquisas anteriores do grupo e na literatura nacional/internacional, que atestam sua adequabilidade (inércia química, durabilidade) para aplicações geotécnicas. As fibras de polipropileno apresentam elevada resistência à degradação biológica e relativa estabilidade química, características que favorecem seu emprego em aplicações geotécnicas de longo prazo. Entretanto, seu desempenho ao longo do tempo depende da formulação do polímero, da presença de aditivos estabilizantes e das condições ambientais de exposição, como temperatura, radiação ultravioleta e características químicas do meio (Allen; Elias, 1996; Hsuan *et al.*, 2008). Nesta pesquisa, a durabilidade das fibras discretas no compósito solo–fibra não foi avaliada experimentalmente.

Foram selecionados dois comprimentos nominais para o estudo: 6 mm e 12 mm, ambos com diâmetro nominal de 18 μm . O Quadro 1 apresenta as especificações e características técnicas de ambas as fibras fornecidas pelo fabricante.

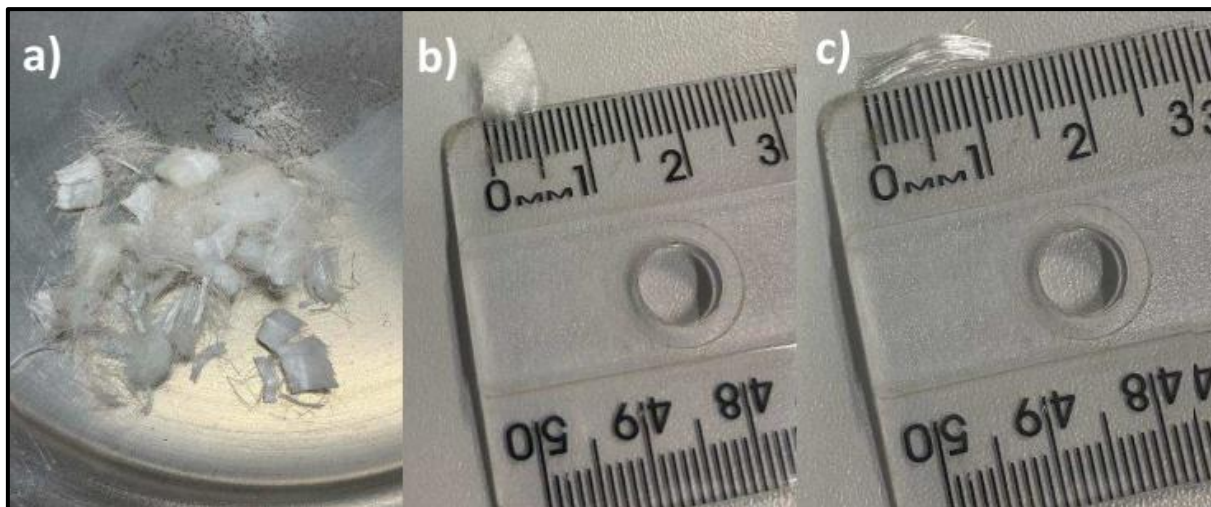
Quadro 1 - Características e especificações técnicas das fibras de polipropileno FibroMac® da empresa Maccaferri ©.

Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	18 μm	Temperatura de fusão	160 °C
Seção	Circular	Temperatura de ignição	365 °C
Comprimento	6 mm/12 mm	Resistência à tração	300 MPa (N/mm ²)
Alongamento	80%	Módulo de Young	3000 MPa
Peso Específico	0,91 g/cm ³		

Fonte: Maccaferri (2025).

As fibras foram obtidas em quantidade suficiente para todo o programa experimental e armazenadas conforme recomendações do fabricante. A Figura 9 mostra o aspecto visual das fibras utilizadas. Nesta tese, elas serão referidas pelas siglas F6 e F12, respectivamente.

Figura 9 - a) Fibras de polipropileno; b) fibra de 6 mm; c) fibra de 12 mm.



Fonte: Merville (2024).

3.1.3 Cinza Leve de Carvão Mineral (C)

A cinza leve de carvão mineral (*fly ash*) é proveniente da Usina Termelétrica (UTE) Porto do Pecém, situada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), município de São Gonçalo do Amarante-CE, e foi fornecida pela empresa Companhia de Cimento Apodi. O material encontra-se depositado no pátio de uma das instalações da empresa (Figura 10), que usa o resíduo em um de seus processos industriais.

Figura 10 - Local de coleta da cinza leve no pátio das instalações da empresa Apodi.



Fonte: Autor (2026).

3.1.4 Água

A água utilizada para umidificação das amostras durante a mistura e compactação, bem como para os ensaios de saturação e permeabilidade (exceto onde outra especificação for dada, como em ensaios ambientais específicos), foi água potável da rede pública de abastecimento de Fortaleza-CE, fornecida pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE). Optou-se por usar água da rede para simular de forma mais próxima as condições de execução de obras em campo, onde raramente se utiliza água destilada ou deionizada para grandes volumes de solo.

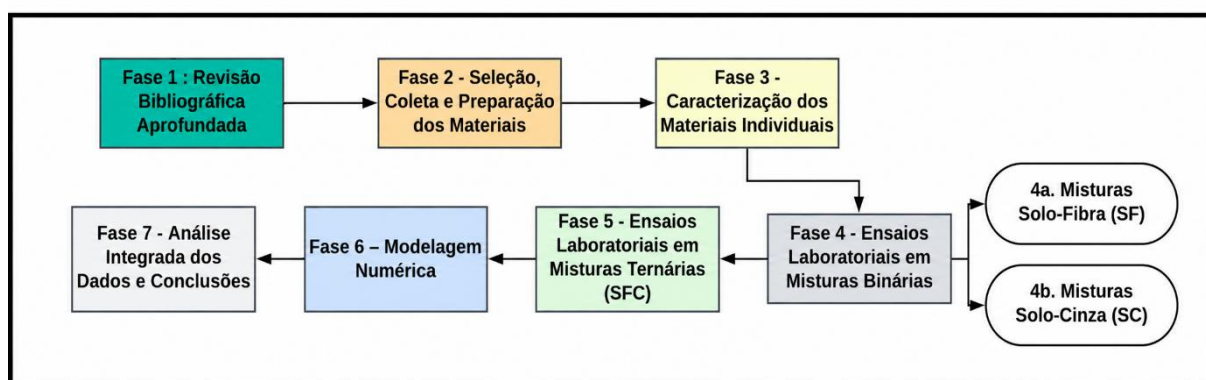
3.2 Sequência da Pesquisa e Delineamento Experimental

A investigação proposta nesta tese foi estruturada em uma sequência de fases, visando abordar os objetivos de pesquisa, desde a fundamentação teórica até a validação experimental e análise integrada dos resultados. Esta abordagem multifásica permite um entendimento progressivo do comportamento do sistema solo-fibra-cinza.

3.2.1 Sequência da Pesquisa

O desenvolvimento da pesquisa seguiu as etapas principais dispostas no Fluxograma da Figura 11:

Figura 11 - Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autor (2026).

- a) **Fase 1 - Revisão Bibliográfica Aprofundada:** Realização de um levantamento da literatura nacional e internacional sobre os temas pertinentes: aterros sanitários, biogás, sistemas de cobertura, retração e fissuração de solos argilosos, reforço de solos com fibras (com foco em PP), estabilização de solos com cinza leve de carvão mineral (CLCM) e estudos sobre a combinação desses materiais. Os resultados desta fase foram consolidados no Capítulo 2 desta tese e forneceram a base teórica e a justificativa para o presente estudo.
- b) **Fase 2 - Seleção, Coleta e Preparação dos Materiais:** Definição e obtenção dos materiais constituintes. Nessa fase também, respaldada pela literatura, foram definidas as misturas binárias e ternárias. Para as misturas binárias Solo-Fibra (SF) foram determinados os teores de 0,25%, 0,50%, 0,75%, 1,0% e 1,25% de fibra, em massa seca de solo. Para as misturas binárias Solo-Cinza (SC) foram estabelecidos os teores de 10%, 20% e 30% de cinza. As misturas ternárias Solo-Fibra-Cinza avaliadas serão compostas pelos três percentuais de cinza leve e os três melhores teores de fibras (% S%C%F). Primeiramente serão selecionados os três melhores teores de fibra que serão definidos conforme o desempenho segundo os seguintes critérios: menor condutividade hidráulica; maior resistência a tração e menor fissuração. Seguindo os mesmos critérios serão selecionados as duas melhores mistura solo-fibra e juntamente com o solo será realizada uma modelagem numérica visando avaliar o emprego dos materiais em camadas de cobertura de aterro sanitário. Os procedimentos detalhados de coleta e preparo inicial são descritos na Seção 3.3.
- c) **Fase 3 - Caracterização dos Materiais Individuais:** Realização de ensaios de laboratório para determinar as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e geotécnicas do solo argiloso e da cinza leve isoladamente. As propriedades das fibras de PP foram obtidas a partir das especificações do fabricante.
- d) **Fase 4 - Ensaios Laboratoriais em Misturas Binárias:** Esta fase visou investigar os efeitos isolados de cada aditivo (fibra ou cinza) sobre o solo base.
- **4a. Misturas Solo-Fibra (SF):** Preparação e ensaio de misturas contendo o solo e diferentes teores de fibras de PP para cada um dos comprimentos selecionados, além do solo puro (0% fibra) como controle. Foram realizados ensaios mecânicos (resistência) e hidráulicos (permeabilidade), além de ensaios de retração e caracterização de fissuras. O objetivo foi determinar a

influência do teor e do comprimento da fibra e identificar os três teores de fibra que apresentassem o melhor desempenho combinado em termos de menor permeabilidade; maior ganho de resistência a tração e maior redução da fissuração/retração, nessa ordem.

- **4b. Misturas Solo-Cinza (SC):** Preparação e ensaio de misturas contendo o solo e diferentes teores de cinza leve. Foram realizados ensaios mecânicos, hidráulicos, de retração/fissuração e também ensaios ambientais (lixiviação/solubilização) para avaliar a segurança da incorporação da cinza. O objetivo foi determinar a influência do teor de cinza e identificar o teor de cinza que apresentasse o melhor desempenho entre ganho de propriedades mecânicas/hidráulicas, controle de retração e resultados ambientais satisfatórios.
- e) **Fase 5 - Ensaios Laboratoriais em Misturas Ternárias (SFC):** Esta etapa ocorre paralelamente à modelagem descrita na Fase 6. Com base nos resultados obtidos na Fase 4, foram selecionados os três teores de fibra considerados mais adequados, independentemente do comprimento da fibra (6 mm ou 12 mm). Esses teores foram incorporados às misturas solo-cinza, considerando os três percentuais de cinza previamente definidos. As misturas ternárias resultantes foram então preparadas e submetidas a um conjunto completo de ensaios mecânicos, hidráulicos, de retração/fissuração e de análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- f) **Fase 6 – Modelagem:** Esta fase ocorreu paralelamente a fase 5. Nesta fase foram desenvolvidos modelos numéricos utilizando o software Vadose® para simular o fluxo de água e/ou gás através das camadas de cobertura compostas pelos materiais estudados. A modelagem foi aplicada aos dados experimentais obtidos para as misturas selecionadas (ao solo puro, e as duas melhores mistura SF_{ot}).
- g) **Fase 7 - Análise Integrada dos Dados e Conclusões:** Consolidação e análise descritiva e comparativa de todos os resultados experimentais e de modelagem, discussão dos achados à luz da literatura, e elaboração das conclusões finais e recomendações da tese.

3.2.2 Misturas Investigadas

Para atender aos objetivos da pesquisa, foram estudadas misturas binárias (Solo-Fibra e Solo-Cinza) e ternárias (Solo-Fibra-Cinza), com as proporções definidas com base na literatura e nos objetivos específicos de cada fase experimental. Os teores de aditivos (% Fibra e % Cinza) foram sempre calculados em relação à massa de solo seco (M_s).

Para as misturas Solo-Fibra (SF) foram investigados os teores de fibra (%F) de 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00% e 1.25% para cada comprimento (F6 e F12). A nomenclatura adotada é S + %F (Percentual de Fibra) + F (Comprimento da Fibra), por exemplo, S0.25F6 trata-se de uma mistura de solo com 0.25% de teor de fibra de 6 mm de comprimento.

Para as misturas solo-cinza (SC), foram avaliados teores de 10%, 20% e 30% de cinza leve, em substituição parcial à massa de solo seco. A nomenclatura adotada indica diretamente a proporção entre solo e cinza. Por exemplo, a mistura 90S10C corresponde a uma matriz composta por 90% de solo e 10% de cinza, em massa seca. De forma análoga, 80S20C corresponde a 80% de solo e 20% de cinza, e 70S30C corresponde a 70% de solo e 30% de cinza.

As misturas ternárias solo-cinza-fibra (SCF) foram definidas a partir das matrizes solo-cinza e dos teores de fibra selecionados nas etapas anteriores da pesquisa. Nessa fase, foram utilizadas fibras de 12 mm, nos teores de 0,50%, 0,75% e 1,25%, incorporadas às matrizes 90S10C, 80S20C e 70S30C. A nomenclatura adotada combina a composição da matriz solo-cinza com o teor e o comprimento da fibra. Por exemplo, a mistura 90S10C0.50F12 corresponde a uma matriz formada por 90% de solo e 10% de cinza, com adição de 0,50% de fibra de 12 mm.

O Quadro 2 apresenta a composição percentual das misturas investigadas e a nomenclatura utilizada ao longo da pesquisa.

Quadro 2 - Composição percentual das misturas e nomenclatura utilizada. (Continua)

Material / Mistura	% Solo	% Fibra (F6)	% Fibra (F12)	% Cinza	Nomenclatura
Solo	100	0	0	0	S
Cinza	0	0	0	100	C
Solo+F6	100	0,25	0	0	S0.25F6
Solo+F6	100	0,50	0	0	S0.50F6
Solo+F6	100	0,75	0	0	S0.75F6
Solo+F6	100	1,00	0	0	S1.00F6
Solo+F6	100	1,25	0	0	S1.25F6

Quadro 2 - Composição percentual das misturas e nomenclatura utilizada. (Conclusão)

Material / Mistura	% Solo	% Fibra (F6)	% Fibra (F12)	% Cinza	Nomenclatura
Solo+F12	100	0	0,25	0	S0.25F12
Solo+F12	100	0	0,50	0	S0.50F12
Solo+F12	100	0	0,75	0	S0.75F12
Solo+F12	100	0	1,00	0	S1.00F12
Solo+F12	100	0	1,25	0	S1.25F12
Solo+Cinza	90	0	0	10	90S10C
Solo+Cinza	80	0	0	20	80S20C
Solo+Cinza	70	0	0	30	70S30C
Solo+Cinza+Fibra	90	0	0,50	10	90S10C0.50F12
Solo+Cinza+Fibra	90	0	0,75	10	90S10C0.75F12
Solo+Cinza+Fibra	90	0	1,25	10	90S10C1.25F12
Solo+Cinza+Fibra	80	0	0,50	20	80S20C0.50F12
Solo+Cinza+Fibra	80	0	0,75	20	80S20C0.75F12
Solo+Cinza+Fibra	80	0	1,25	20	80S20C1.25F12
Solo+Cinza+Fibra	70	0	0,50	30	70S30C0.50F12
Solo+Cinza+Fibra	70	0	0,75	30	70S30C0.75F12
Solo+Cinza+Fibra	70	0	1,25	30	70S30C1.25F12

Fonte: Autor (2026).

A faixa de teores de fibra foi selecionada por ser representativa da maioria dos estudos encontrados na literatura (Tang *et al.*, 2007; Zaimoglu e Yetimoglu, 2011; Merville, 2024), permitindo avaliar desde efeitos iniciais da inclusão de fibras até teores próximos aos considerados mais eficientes em pesquisas anteriores, geralmente inferiores a 1,5%. Essa escolha também buscou evitar problemas associados a teores excessivamente elevados de fibras, como dificuldade de homogeneização, formação de aglomerados, perda de trabalhabilidade e interferências no processo de compactação.

Já para as misturas Solo-Cinza (SC) foram avaliados os teores de cinza (%C) de 10%, 20% e 30%. A escolha por esses teores relativamente moderados visa avaliar o potencial da cinza como um aditivo melhorador da matriz, focando nos efeitos físicos e no início das reações químicas, sem que a cinza se torne o componente majoritário da mistura, o que poderia ter implicações de custo e disponibilidade de materiais. Estudos como os de Prabakar *et al.* (2004) e Elias (2018) indicam, para os solos utilizados nas respectivas pesquisas, que melhorias podem ser observadas com teores de cinza de aproximadamente 20-30%.

É fundamental esclarecer a abordagem utilizada para a dosagem dos componentes nas misturas, definindo o papel de cada material:

- a) O Solo (S) constituiu a matriz base de todas as misturas, sendo utilizado como referência para as comparações de desempenho;
- b) As fibras de polipropileno (PP) foram incorporadas como *adição* à massa de solo seco (ou da matriz solo-cinza nas misturas ternárias), sem substituição de material. O teor de fibra (%F) foi calculado em relação à massa da matriz. Assim, uma mistura com 1,0% de fibra em 1000 g de solo seco contém 1000 g de solo e 10 g de fibra, totalizando 1010 g de sólidos;
- c) A cinza leve de carvão mineral foi incorporada como *substituição parcial* em massa ao solo seco. Nesse caso, parte do solo foi removida e substituída pela mesma massa de cinza, mantendo constante a massa total de sólidos. O teor de cinza (%C) corresponde à porcentagem da matriz solo-cinza. Por exemplo, em uma mistura com 20% de cinza, utilizaram-se 800 g de solo seco e 200 g de cinza, totalizando 1000 g de material sólido;
- d) Nas misturas ternárias, a fibra foi adicionada à matriz solo-cinza previamente definida. Por exemplo, uma mistura 80S20C0.50F12 corresponde a uma matriz com 80% de solo e 20% de cinza, acrescida de 0,50% de fibra de 12 mm em relação à massa seca dessa matriz.

3.3 Métodos e Procedimentos de Ensaios

O processo de caracterização dos materiais e misturas idealizados compreenderam ensaios de caracterização físico-químico e mineralógicos, tais como difração de Raio-X, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com EDS, pH, condutividade elétrica, complexo sortivo, área superficial específica; ensaios de caracterização geotécnica (densidade real, granulometria, limites de consistência e compactação) e ensaios de comportamento hidromecânico (permeabilidade, resistência à compressão simples e resistência a tração por compressão diametral) e análises complementares (sucção, avaliação de permeabilidade intrínseca, análise de retração/fissuração por *DIA*). No quadro 3 estão apresentadas as normas que balizaram os ensaios realizados.

Quadro 3 - Documentação técnica específica para realização dos ensaios.

Ensaio	Ensaio/Análise/Modelos	Referência Técnica (Normas/Manuais/trabalhos Acadêmicos)
Ensaio físico-químico e mineralógico	pH e Condutividade Elétrica (CE - em suspensão aquosa)	Metodologia da Embrapa (Manual de Métodos de Análise de Solo)
	Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	Metodologia da Embrapa (Manual de Métodos de Análise de Solo)
	Teor de Matéria Orgânica / Carbono Orgânico	Metodologia da Embrapa (Manual de Métodos de Análise de Solo); ABNT NBR 13600:2022
	Área Superficial Específica (ASE)	Metodologia da Embrapa (Manual de Métodos de Análise de Solo)
	Análise Mineralógica (Difração de Raios-X - DRX)	ASTM E3294-22
	Análise Morfológica (Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV)	Metodologia da Embrapa (Manual de Métodos de Análise de Solo)
	Análise Química (Fluorescência de Raios-X - FRX)	BS EN 15309:2007; ABNT NBR 17229:2025
Ensaio Ambiental	Ensaio de Lixiviação	ABNT NBR 10004:2024; ABNT NBR 10005:2005
	Ensaio de Solubilização	ABNT NBR 10004:2024; ABNT NBR 10006:2005
Ensaio Geotécnico (Caracterização e Compactação)	Massa Específica Real dos Grãos (Gs)	DNIT DNER-ME 093/94
	Limites de Consistência (LL, LP, IP)	ABNT NBR 6459/2025; ABNT NBR 7180/2025
	Limite de Contração	ASTM D4943-18
	Análise Granulométrica	ABNT NBR 7181/2025
	Ensaio de Compactação	ABNT NBR 7182/2025
Ensaio Geotécnico (Mecânicos)	Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo	ABNT NBR 12770: 2022; ABNT NBR 12025:2012; ASTM D2166 (2024)
	Resistência à Tração (por compressão diametral)	ABNT NBR 7222:2011; ABNT NBR 12024:2012; DNIT DNER-ME 181/94
Ensaio Geotécnico (Hidráulicos)	Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de solos argilosos a carga variável	ABNT NBR 14545 03/2021
	Permeabilidade Intrínseca ao Gás (k_g - Método de laboratório adaptado)	ASTM D6539-00 (2017), Metodologia adaptada
	Ensaio de Papel Filtro - Curva de Retenção	ASTM D5298-16 (2025)
Ensaio de Retração	Ensaio de Retração (Linear/Volumétrica - Método escolhido)	BS 1377-2:1990
	Caracterização de Fissuras (Análise de Imagem Digital - DIA)	Metodologia CIF (Crack Intensity Factor); Bezerra. (2020); ASTM E1382-97(2023)

Fonte: Autor (2026).

Para as cinzas advindas de termelétrica, por se tratar de um resíduo sólido foram realizados ensaios ambientais de lixiviação e solubilização. Além desses, foram realizados ainda ensaios de papel filtro, permeabilidade ao gás, análise de retração, caracterização de fissuras com DIA.

Neste estudo, os ensaios necessários para a caracterização dos solos, da cinza e das misturas idealizadas foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC), no Laboratório de Microscopia do Departamento de Geologia da UFC, no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da UFC, sendo todos esses localizados no *Campus* do Pici em Fortaleza/CE e na sede da empresa Concrete Ensaios Tecnológicos.

3.4 Preparação das Amostras

A preparação de corpos de prova homogêneos é fundamental para a validade e confiabilidade dos ensaios de laboratório. Esta seção descreve os procedimentos adotados para a dosagem dos materiais, mistura, compactação e cura (quando aplicável) das amostras de solo puro (S) e das misturas (SF, SC e SFC).

3.4.1 Preparação Preliminar

Independentemente do ensaio a ser realizado, todas as amostras de solo e cinza passaram por uma preparação preliminar para garantir a representatividade das alíquotas utilizadas. Este processo incluiu secagem ao ar, destorroamento manual (evitando a quebra dos grãos), e redução da amostra total pelo método do quarteamento (Esse é o procedimento preconizado pela norma ABNT NBR 6457:2024 - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – mas foi utilizado como preparação prévia para todos os ensaios). A Figura 12 ilustra parte do processo de preparo das amostras.

Figura 12 - Processo de preparação das amostras de solo e cinza. Etapa de quartearamento.



Fonte: Autor (2026).

Para os ensaios de caracterização, incluindo granulometria, massa específica dos grãos e limites de consistência, e de compactação, seguiram-se as orientações de preparação estabelecidas na ABNT NBR 6457:2024 e na DNER-ME 041/94, além das disposições previstas nas normas específicas de cada ensaio. Para os ensaios hidromecânicos, como condutividade hidráulica, compressão simples e tração por compressão diametral, os corpos de prova foram moldados na umidade ótima ($w_{ót}$) e na massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$), obtidas nos ensaios de compactação realizados com energia Proctor normal. A massa específica aparente dos corpos de prova foi aferida pela relação entre sua massa e seu volume geométrico, como parâmetro de controle da moldagem em laboratório.

Excepcionalmente, no ensaio de permeabilidade intrínseca aparente ao ar, os corpos de prova foram moldados com teor de umidade entre dois e três pontos percentuais abaixo da umidade ótima e com a massa específica seca correspondente, obtida na curva de compactação. Essa condição reduziu o grau de saturação e favoreceu a continuidade dos poros preenchidos por ar, facilitando a estabilização do fluxo e reduzindo o tempo de ensaio, além de representar condições mais secas, nas quais a migração gasosa tende a ser mais efetiva.

3.4.2 Dosagem dos Materiais

Para cada amostra ou corpo de prova, a massa de cada componente (solo, fibra, cinza) e de água foi calculada para se atingir a umidade ótima ($w_{ót}$) e a massa específica seca máxima ($\gamma_{d,máx}$) determinadas nos ensaios de compactação para aquela mistura específica, ou outra condição de umidade e massa específica estabelecida. O cálculo seguiu a lógica de adição para as fibras e de substituição para a cinza:

- a) A massa de solo seco e a massa de água foram calculadas diretamente para atingir os parâmetros de compactação do solo puro em um molde de volume conhecido.
- b) As fibras foram incorporadas como uma adição. Primeiramente, determinou-se a massa de solo seco (M_s) necessária para o corpo de prova. Em seguida, a massa de fibra (M_f) foi calculada com base no teor de fibra desejado ($\%F$), aplicando a Equação 9:

$$M_f = M_s \times \frac{\%F}{100} \quad (9)$$

A massa total de sólidos era, portanto, $M_s + M_f$. A massa de água foi calculada sobre esta massa total de sólidos.

- c) A cinza foi incorporada como uma substituição parcial do solo. Para uma massa total de sólidos da matriz (M_{matriz}) necessária para o corpo de prova, as massas de solo (M_s) e de cinza (M_c) foram calculadas com base no teor de cinza desejado ($\%C$), conforme as Equações 10 e 11:

$$M_c = M_{matriz} \times \frac{\%C}{100} \quad (10)$$

$$M_s = M_{matriz} - M_c = M_{matriz} \times \left(1 - \frac{\%C}{100}\right) \quad (11)$$

- d) A preparação das misturas ternárias seguiu uma lógica combinada. Primeiro, calcularam-se as massas de solo e cinza para formar a matriz solo-cinza ($M_{matriz} = M_s + M_c$), conforme as Equações 10 e 11. Em seguida, a massa de fibra (M_f) foi

calculada como uma adição a essa matriz, com o teor de fibra ($\%F$) sendo aplicado sobre a massa total da matriz, conforme a Equação 12:

$$M_f = M_{matriz} \times \frac{\%F}{100} \quad (12)$$

3.4.3 Procedimento de Mistura

A homogeneização correta dos componentes, especialmente das fibras, é um ponto crítico para o desempenho da mistura. Portanto, o seguinte procedimento de mistura foi adotado:

- a) A massa de solo seco (e de cinza, nas misturas SC e SFC) foi previamente homogeneizada e colocada em bandeja metálica. Antes da incorporação das fibras, adicionou-se pequena parcela da água total calculada (aproximadamente 2 a 3% de umidade), visando reduzir os efeitos da eletricidade estática e facilitar a dispersão das fibras na matriz.
- b) Em seguida, as fibras foram adicionadas gradualmente e misturadas manualmente até obtenção de distribuição homogênea e aleatória, sem formação de aglomerados ou “ninhos” de fibras.
- c) Posteriormente, o restante da água foi incorporado lentamente à mistura, mantendo-se revolvimento contínuo para garantir uniformidade de umidade e evitar formação de grumos.
- d) Após a mistura, o material foi acondicionado em sacos plásticos com vedação e armazenado por 24 horas em ambiente com temperatura controlada ($25 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$), visando à equalização da umidade antes da compactação.

A Figura 13 mostra algumas etapas desse procedimento

Figura 13 - Procedimentos de Mistura solo-fibra: (a) separação da quantidade de solo seco e fibra e homogeneização; (b) adição gradual de fibras; (c) adição de água e revolvimento; (d) armazenamento para uniformização do teor de umidade



Fonte: Autor (2026).

3.4.4 Compactação e Cura dos Corpos de Prova

Para realização dos ensaios mecânicos (compressão simples e tração por compressão diametral), foi utilizado exclusivamente a fração do solo passante na peneira de 4,8 mm (nº 4). Além disso, os corpos de prova contendo cinza (misturas SC e SFC) foram submetidos a um período de cura para permitir o desenvolvimento de possíveis reações pozolânicas/cimentícias. Após a preparação e embalagem (Figura 14), os corpos de prova foram armazenados em uma câmara úmida com umidade relativa próxima a 95% e temperatura controlada ($25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$). Os ensaios foram realizados após períodos de cura pré-definidos de 7

dias. Os resultados do solo puro e das misturas SF, que não possuem componentes cimentícios, são considerados como referência no tempo "zero" de cura.

Figura 14 – CPs para ensaios mecânicos.



Fonte: Autor (2026).

3.5 Caracterização físico-química, mineralógica e ambiental

A engenharia geotécnica moderna reconhece que o comportamento dos solos e materiais estabilizados não depende apenas de propriedades físicas e mecânicas, mas também de aspectos físico-químicos e mineralógicos, relacionados à composição, superfície das partículas e interação com a água dos poros (Mitchell; Soga, 2005; Holtz; Kovacs; Sheahan, 2011).

No contexto desta pesquisa, que envolve a incorporação de cinza leve de carvão mineral e fibras de polipropileno em um solo argiloso, a caracterização físico-química, mineralógica e ambiental foi empregada para compreender os mecanismos associados às alterações observadas no comportamento das misturas. As análises realizadas permitiram avaliar o potencial reativo das matrizes, as interações de superfície e a segurança ambiental das misturas, incluindo possíveis processos de lixiviação e solubilização.

Ressalta-se que parte das metodologias utilizadas, especialmente nos ensaios de CTC e matéria orgânica, foi originalmente desenvolvida vislumbrando aplicações agrícolas, exigindo cautela na interpretação dos resultados obtidos.

A composição mineralógica e química dos materiais exerce influência direta sobre propriedades geotécnicas como plasticidade, resistência, retração e condutividade hidráulica (Mitchell; Soga, 2005). Dessa forma, foram utilizadas técnicas como Difração de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX), complementadas por ensaios ambientais de lixiviação e solubilização, visando avaliar tanto o comportamento do material quanto sua compatibilidade ambiental (Shackelford, 1994; Rowe, 2001).

3.5.1 Determinação do pH e da Condutividade Elétrica (CE)

A determinação do pH e da Condutividade Elétrica (CE) das amostras de solo, cinza, misturas e extratos (obtidos dos ensaios ambientais) seguiram as diretrizes do Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 2017), com referência complementar aos princípios da norma ASTM D4972. O preparo das amostras consistiu em uma suspensão solo-líquido na proporção de 1:2,5, utilizando 10 g de material seco (passante na peneira de 2,0 mm) para 25 mL de líquido extrator. A mistura foi submetida à agitação vigorosa por um minuto, seguida de repouso por uma hora para o equilíbrio químico.

Para o pH, utilizou-se o método potenciométrico com equipamento calibrado via soluções tampão (pH 4,0 e 7,0). As leituras foram realizadas no sobrenadante em dois meios distintos: em água deionizada (pH ativo) e em solução de cloreto de cálcio ($CaCl_2$ 0,01 mol.L⁻¹) para determinação do pH potencial, minimizando interferências de variações na concentração salina.

A Condutividade Elétrica foi aferida na suspensão aquosa previamente preparada, utilizando condutivímetro digital calibrado com solução padrão de cloreto de potássio (KCl, 1,413 mS/cm). O equipamento operou com compensação automática de temperatura para a referência de 25 °C. A determinação conjunta destes parâmetros permite avaliar a concentração iônica solúvel e o ambiente químico das misturas, dados fundamentais para a interpretação dos mecanismos de estabilização e comportamento ambiental.

3.5.2 Complexo Sortivo, Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

As determinações referentes ao complexo sortivo seguiram os procedimentos padronizados descritos na Parte II do Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 2017). Os ensaios foram realizados no laboratório do departamento de Ciências do Solo, da

Universidade Federal do Ceará (UFC), com o objetivo de quantificar as alterações nas propriedades eletroquímicas induzidas pela incorporação da cinza ao solo.

Para a avaliação das propriedades de troca iônica e reatividade dos materiais, foram calculados três parâmetros fundamentais:

- a) Soma de Bases Trocáveis (S) - Representa a disponibilidade imediata de cátions básicos no complexo de troca, sendo calculada pelo somatório dos teores de cálcio, magnésio, sódio e potássio trocáveis (Equação 13):

$$S = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+} \quad (13)$$

- b) Capacidade de Troca Catiônica Efetiva ($CTC_{efetiva}$ ou t) - Corresponde à CTC do solo em seu pH natural. É calculada como a soma das bases trocáveis (S) mais o alumínio trocável (Al^{3+}), indicando a magnitude das cargas negativas disponíveis para adsorção de cátions sem correção de pH (Equação 14):

$$CTC_{efetiva} = S + Al^{3+} \quad (14)$$

- c) Capacidade de Troca Catiônica Total (CTC_{Total} ou T) - Refere-se à CTC potencial medida a pH tamponado (7,0). Este parâmetro engloba tanto os cátions já adsorvidos quanto a acidez potencial ($H^{+} + Al^{3+}$) passível de neutralização, refletindo a capacidade máxima de retenção de cátions do material (Equação 15):

$$CTC_{Total} (T) = S + (H^{+} + Al^{3+}) \quad (15)$$

A quantificação analítica dos cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+}) e da acidez potencial foi realizada conforme os procedimentos detalhados nos capítulos 3 e 4 da parte II da 3ª edição do Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (2017). A amostragem para estas análises priorizou o solo natural, a cinza pura e as misturas solo-cinza. Esta seleção visa fornecer os dados essenciais para a interpretação das interações físico-químicas, permitindo correlacionar as variações na CTC com o desempenho observado nos ensaios hidromecânicos e ambientais. Parâmetros complementares, como a saturação por bases ($V\%$) e por alumínio ($m\%$), não serão discutidos nesse trabalho, mantendo-se o foco nas variáveis que influenciam diretamente os mecanismos de estabilização química e no comportamento hidromecânico dos materiais.

3.5.3 Teor de matéria orgânica

A determinação do teor de matéria orgânica é relevante devido à sua influência direta nas propriedades físicas e químicas dos materiais geotécnicos. A fração orgânica atua em processos como a capacidade de troca catiônica (CTC), superfície específica, agregação de partículas e distribuição de poros (Braidá *et al.*, 2006).

Neste estudo, a quantificação foi realizada pelo método da perda de massa por ignição, conforme preconizado pela norma ABNT NBR 13600:2022. O princípio do ensaio consiste na oxidação térmica da matéria orgânica através de calcinação controlada.

O preparo das amostras envolveu secagem ao ar, destorroamento e peneiramento na malha de 2,0 mm. Uma subamostra representativa foi posteriormente cominuída em almofariz até passar integralmente na peneira de 0,420 mm (nº 40), visando a homogeneização. Para o ensaio, aproximadamente 50 g de material foram secos em estufa (105–110 °C) por 24 horas até constância de massa (M_s).

A calcinação ocorreu em mufla com aquecimento gradual até 440 °C, patamar mantido por 12 horas para assegurar a combustão completa dos compostos orgânicos. Após o ciclo térmico, as amostras foram resfriadas em dessecador para evitar a reabsorção de umidade e pesadas para obtenção da massa do resíduo mineral (M_r). O teor de matéria orgânica (MO) foi calculado pela diferença de massa antes e após a ignição, conforme a Equação 16. Os ensaios foram realizados em duplicata, adotando-se a média aritmética como resultado para garantir a representatividade dos dados.

$$MO(\%) = \left(1 - \frac{M_r}{M_s} \right) \times 100 \quad (16)$$

Onde:

- a) MO é o teor de Matéria Orgânica na amostra, em porcentagem
- b) M_s é a Massa da amostra seca em estufa a 105-110 °C, em gramas (g).
- c) M_r é a Massa da amostra após a calcinação em mufla a 440 °C, em gramas (g).

3.5.4 *Determinação de Superfície Específica*

A superfície específica dos materiais foi determinada pelo método descrito no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa, baseado na retenção de éter monoetílico do etileno glicol (EMEG) pelas partículas do solo. O princípio do método consiste na adsorção de um líquido polar sobre a superfície das partículas, formando uma camada monomolecular após a remoção do EMEG livre. A quantidade de EMEG retida pela amostra é, portanto, proporcional à superfície específica do material.

Para a realização do ensaio, utilizou-se amostra de solo seca ao ar, destorroada e passada em peneira de 60 mesh. A amostra foi seca em estufa a 105 °C, resfriada em dessecador contendo cloreto de cálcio e pesada em balança de precisão.

A superfície específica total foi calculada a partir da massa de EMEG retida pela amostra e da massa da amostra seca em estufa, conforme a equação 17:

$$S_t = \frac{a}{0,000286 \cdot b} \quad (17)$$

Onde:

- a) S_t : é a superfície específica total, em (m²/g);
- b) a : é a massa de EMEG retida pela amostra, em gramas; e
- c) b : é a massa da amostra seca em estufa a 105 °C, em gramas.

Os ensaios de superfície específica foram realizados apenas com os materiais primários (solo e cinza leve) que irão compor as matrizes dos compósitos.

3.5.5 *Análise por Fluorescência de Raios X (FRX)*

A composição química elementar das amostras de solo e cinza foi determinada por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX), técnica não destrutiva amplamente utilizada para identificação e quantificação de elementos químicos (Jenkins, 1999).

As análises foram realizadas em espectrômetro sequencial WDXRF, modelo ZSX Mini II (Rigaku), equipado com tubo de raios X de anodo de ródio (Rh). Para minimizar efeitos de matriz associados à heterogeneidade mineralógica e granulométrica, as amostras foram preparadas na forma de pastilhas vítreas fundidas. O procedimento incluiu determinação da

perda ao fogo, mistura da amostra com fundente à base de tetraborato/metaborato de lítio e posterior fusão em cadinhos de platina-ouro.

A quantificação dos óxidos maiores e elementos traço foi realizada pelo método dos Parâmetros Fundamentais (FP), que permite corrigir efeitos de absorção e interferência interelementar sem necessidade de extensas curvas de calibração empíricas.

3.5.6 Difração de Raios X (DRX)

A composição mineralógica das amostras de solo e cinza foi determinada por Difração de Raios X (DRX) pelo método do pó, conforme a ASTM E3294-22. A técnica foi empregada para identificação qualitativa e estimativa semiquantitativa das fases cristalinas presentes, com base nos padrões de difração regidos pela Lei de Bragg (Cullity; Stock, 2001). Os ensaios foram realizados em difratômetro PANalytical X'Pert Pro MPD, utilizando radiação Co K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). As amostras foram previamente secas, destorroadas e passadas na peneira #200 (0,074 mm), visando minimizar efeitos de orientação preferencial.

As leituras foram realizadas no intervalo angular de 5° a 80° (2 θ), com passo de 0,02°. O processamento dos difratogramas foi efetuado no software PANalytical X'Pert HighScore Plus®, utilizando comparação com o banco de dados ICDD PDF-2 para identificação das fases minerais.

3.5.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização morfológica e microestrutural das amostras de solo, cinza e misturas compactadas foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), complementada por Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS), permitindo avaliar a morfologia das partículas, distribuição de poros e composição química localizada (Goldstein *et al.*, 2018).

Os ensaios foram conduzidos em microscópio Hitachi TM3000 (Figura 15), equipado com detectores de elétrons secundários, retroespalhados e sistema EDS acoplado. As amostras foram previamente secas, extraídas do interior dos corpos de prova compactados e fixadas em suportes de alumínio com fita condutora. As cinzas também foram analisadas na forma de pó para avaliação de sua morfologia primária.

Figura 15 - Microscópio eletrônico de varredura com detector de EDS.



Fonte: Elias (2018).

A interpretação das micrografias concentrou-se na análise da forma das partículas, contatos interpartículas e distribuição de vazios, enquanto as análises por EDS permitiram correlacionar aspectos morfológicos e composição química das fases observadas.

3.5.8 Ensaio de Lixiviação

A avaliação do potencial de mobilização de contaminantes inorgânicos e a consequente classificação ambiental dos materiais (cinzas e misturas) seguiram os critérios da ABNT NBR 10004:2024. O procedimento de extração foi conduzido conforme a ABNT NBR 10005:2004, que define a metodologia para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos.

A preparação da amostra consistiu no peneiramento do material seco em malha de 9,5 mm. A definição do fluido extrator seguiu o fluxograma normativo, baseado na alcalinidade e na capacidade de neutralização ácida do material. Para tal, submeteu-se 5,0 g da amostra a um teste preliminar de pH e, se necessário, à acidificação com HCl. Com base nos resultados, utiliza-se a Solução Extratora nº 1 (sistema tampão ácido acético/acetato de sódio, pH $4,93 \pm 0,05$) ou a Solução Extratora nº 2 (ácido acético, pH $2,88 \pm 0,05$) para simular o comportamento do resíduo frente à precipitação ácida ou em aterros sanitários.

O ensaio foi realizado em frascos de material inerte, utilizando 100 g de amostra seca e uma relação Líquido/Sólido (L/S) de 20:1. O sistema foi submetido à agitação rotativa sob as seguintes condições controladas para garantir a representatividade da transferência de

massa: Rotação de 30 ± 2 rpm; Tempo de contato de 18 ± 2 horas; e Temperatura Ambiente de 25 ± 3 °C.

Após a extração, a separação de fases foi realizada por filtração em membrana de fibra de vidro com porosidade de $0,45 \mu\text{m}$, definindo a fração dissolvida. A quantificação dos constituintes químicos no lixiviado empregou técnicas instrumentais conforme a natureza do elemento:

- Cátions Metálicos: Espectrometria de Absorção Atômica (Varian AA240FS).
- Ânions: Cromatografia Iônica (Dionex ICS-1100).

Os resultados, expressos em mg/L , foram comparados aos Limites Máximos Permitidos (LMP) estabelecidos no Anexo F da ABNT NBR 10004:2024, determinando a periculosidade do resíduo (Classe I - Perigoso ou Classe II - Não Perigoso).

3.5.9 *Ensaio de Solubilização*

A avaliação da estabilidade química em meio aquoso e a classificação dos resíduos não perigosos (Classe II) em Classe II A (Não Inertes) ou Classe II B (Inertes) seguiram os procedimentos da norma ABNT NBR 10006:2005. Diferentemente da lixiviação dinâmica, este ensaio preconiza um contato estático prolongado para simular a liberação de constituintes em condições de saturação ou percolação lenta.

A preparação da amostra envolveu o peneiramento na malha de 9,5 mm e secagem branda (< 42 °C) para preservação da integridade química. O ensaio foi montado em frascos de extração de 1,5 L, utilizando 250 g de amostra seca, água reagente (tipo Milli-Q). Adotou-se a relação sólido/líquido de 1:4 (volume final de 1000 mL, ajustado conforme a umidade natural).

Após uma homogeneização mecânica inicial de 5 minutos, o sistema foi vedado e mantido em repouso estático por 7 dias à temperatura ambiente (25 ± 3 °C). A obtenção da fase líquida para análise ocorreu por filtração a vácuo em membrana de porosidade $0,45 \mu\text{m}$. A quantificação dos elementos no extrato solubilizado utilizou os mesmos equipamentos descritos na etapa de lixiviação (Espectrometria de Absorção Atômica para cátions e Cromatografia Iônica para ânions).

Os resultados foram confrontados com os padrões estabelecidos no Anexo G da ABNT NBR 10004:2024. A conformidade das concentrações com estes limites permitiu determinar o grau de inércia química do material, validando sua aptidão ambiental.

3.6 Caracterização geotécnica, ensaios mecânicos e hidráulicos

Nesta etapa serão realizados os ensaios de caracterização geotécnica que visam identificar as propriedades índices dos materiais (solo e cinza) e de algumas misturas. A seguir serão apresentadas breves descrições de cada ensaio.

3.6.1 Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica dos materiais teve como objetivo determinar propriedades e índices físicos relevantes para a avaliação do comportamento do solo, da cinza e das misturas propostas. Entre os parâmetros analisados estão a massa específica dos sólidos, a distribuição granulométrica e os limites de consistência e ponto ótimo de compactação.

A massa específica dos sólidos (G_s) é um parâmetro importante nas relações de índice da mecânica dos solos e depende diretamente da composição mineralógica e química do material. Para solos, os valores geralmente variam entre 2,60 e 2,80, enquanto para cinzas de carvão mineral podem apresentar maior variabilidade, influenciada pela composição química e pela presença de partículas ocas e porosas (Pandian, 2004). A determinação da massa específica real dos grãos do solo e da cinza foi realizada de forma semelhante ao procedimento descrito na DNIT ME 093/94, utilizando o método do picnômetro. As amostras foram previamente secas ao ar, destorroadas e passadas na peneira de 2,0 mm.

A distribuição granulométrica dos materiais foi determinada pelo método conjunto de peneiramento e sedimentação, conforme a ABNT NBR 7181:2025, com preparação das amostras segundo a ABNT NBR 6457:2024. O procedimento incluiu o peneiramento da fração grossa e a sedimentação da fração fina, utilizando hexametáfosfato de sódio como agente defloculante. A análise granulométrica possui grande relevância na geotecnia, uma vez que influencia diretamente propriedades hidráulicas e mecânicas dos materiais, como permeabilidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento (DAS; SOBHAN, 2017).

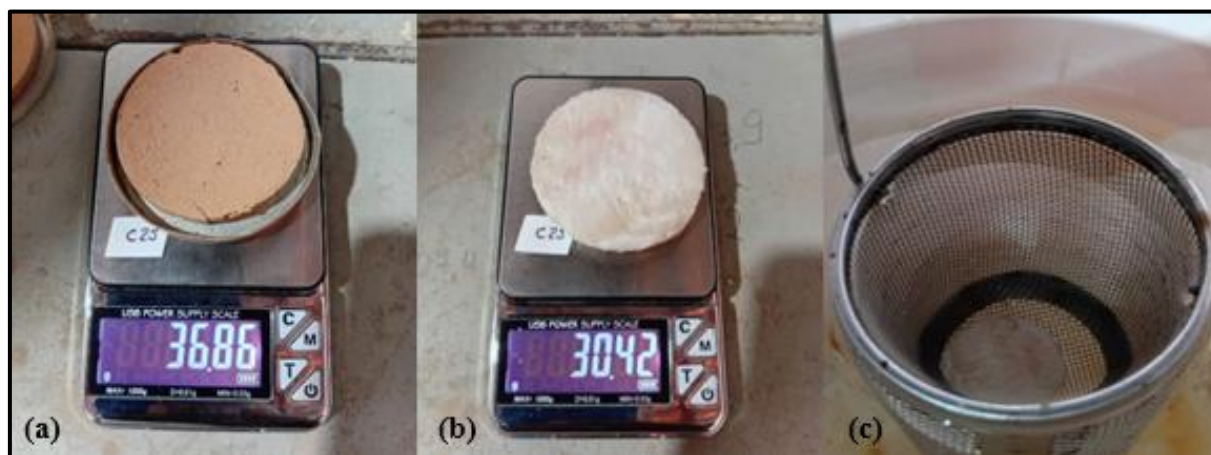
Os Limites de Atterberg foram determinados para avaliação da consistência e plasticidade dos materiais finos. Esses parâmetros possuem grande importância em sistemas de cobertura e barreiras de aterros sanitários, pois a plasticidade influencia tanto a redução da permeabilidade quanto a suscetibilidade à retração e fissuração por dessecação (Daniel, 1993). Os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade foram realizados de forma semelhante aos procedimentos estabelecidos nas normas ABNT NBR 6459:2016 e ABNT NBR

7180:2016, respectivamente, utilizando-se a fração passante na peneira de 0,42 mm, conforme preparação descrita na ABNT NBR 6457:2016.

O Limite de Contração (LC) também foi determinado, por se tratar de um parâmetro importante na avaliação da estabilidade dimensional do material e de sua suscetibilidade à retração e formação de fissuras decorrentes de ciclos de secagem. Em camadas de cobertura de aterros sanitários, esse comportamento possui elevada relevância, uma vez que o surgimento de fissuras pode comprometer a estanqueidade da barreira e favorecer a infiltração de água e a migração de gases (Daniel, 1993).

O ensaio foi conduzido conforme a ASTM D4943-18, utilizando o método da parafina em substituição ao procedimento tradicional com mercúrio metálico. Foram moldadas pastilhas com umidade ligeiramente superior ao Limite de Liquidez, submetidas à secagem ao ar e posterior secagem em estufa até constância de massa. O volume final da amostra seca foi determinado, utilizando impermeabilização com parafina e balança hidrostática (Figura 16).

Figura 16 - Etapas do ensaio de determinação do Limite de Contração (LC). (a) pesagem da amostra seca mais capsula; (b) pesagem da amostra seca parafinada; e (c) pesagem da amostra parafinada submersa.



Fonte: Autor (2026).

Já o ensaio de compactação foi realizado seguindo as diretrizes normativas estabelecidas pela ABNT NBR 7182:2025. Nesta pesquisa, o ensaio de compactação foi realizado nos materiais puros e em todas as misturas estudadas, utilizando energia Proctor Normal. A preparação das amostras seguiu a ABNT NBR 6457:2024, utilizando-se a fração passante na peneira de 4,8 mm. A partir dos resultados, foram determinadas a umidade ótima e a massa específica seca máxima de cada material, parâmetros utilizados na moldagem dos corpos de prova dos demais ensaios.

O ensaio de compactação estabelece a relação entre o teor de umidade e a massa específica seca do material compactado, permitindo a determinação da umidade ótima (w_{ot}) e da massa específica seca máxima ($\gamma_{d,max}$). Esses parâmetros são fundamentais em obras geotécnicas e exercem influência direta no comportamento hidráulico de barreiras compactadas para aterros sanitários. Segundo Daniel e Benson (1990), a compactação de solos argilosos em umidades próximas ou superiores à ótima tende a reduzir a continuidade dos macroporos, resultando em menores valores de condutividade hidráulica.

3.6.2 Caracterização Geomecânica

A caracterização geomecânica dos materiais teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico (resistência, deformação e deslocamento) das misturas estudadas, analisando a influência da incorporação de cinza leve e fibras nas propriedades mecânicas do compósito. Para isso, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, permitindo a determinação de parâmetros de resistência e rigidez dos materiais.

3.6.2.1 Ensaio de resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples (RCS) foi utilizado para avaliar a resistência e a rigidez dos materiais estudados. Para solos coesivos, a resistência à compressão simples corresponde à tensão axial máxima suportada pelo corpo de prova sem confinamento lateral, sendo amplamente empregada na análise do comportamento mecânico de solos compactados e estabilizados.

O ensaio foi realizado de forma semelhante aos procedimentos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 12770:2022 e ASTM D2166. Para cada condição experimental, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, compactados na umidade ótima e massa específica seca máxima correspondentes a cada mistura. Para as misturas contendo cinza, os ensaios foram executados após período de cura de 7 dias.

Os corpos de prova foram submetidos à compressão axial sem confinamento (Figura 17), utilizando velocidade de deslocamento de 1,0 mm/min. Considerando corpos de prova com altura inicial da ordem de 100 mm, essa velocidade corresponde aproximadamente

a taxas de deformação axial entre 1% e 2% por minuto, faixa compatível com procedimentos normativos de referência para ensaios de compressão não confinada em solos coesivos.

Figura 17 - Realização do ensaio de compressão simples.



Fonte: Autor (2026).

A partir dos dados obtidos, foram construídas curvas tensão-deformação, sendo determinados a resistência à compressão simples (q_u), a deformação axial no pico (ϵ_p), a Tenacidade até o pico (T_p) e o módulo secante a 50% da tensão de ruptura (E_{50}), utilizado como indicador da rigidez do material.

3.6.2.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Solos convencionais, especialmente os não coesivos, apresentam resistência à tração muito baixa. Entretanto, essa propriedade torna-se relevante em materiais estabilizados ou reforçados com fibras, pois está diretamente associada à resistência à formação de fissuras decorrentes de retração, variações térmicas e tensões de flexão (Holtz; Kovacs; Sheahan, 2011). A resistência à tração foi avaliada pelo ensaio de compressão diametral (“ensaio brasileiro”),

no qual a aplicação de carga compressiva ao longo do diâmetro do corpo de prova induz tensões de tração internas, provocando sua ruptura.

O procedimento experimental seguiu, de forma semelhante, as diretrizes da DNER-ME 181/94 e da ABNT NBR 12024:2012, com adaptações para os materiais estudados. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, moldados conforme descrito na Seção 3.4. Para as misturas contendo cinza, os ensaios foram realizados após 7 dias de cura. A carga foi aplicada por meio de um dispositivo de compressão a uma taxa constante 1,00 mm/min até a ruptura do corpo de prova, que se manifesta por uma fenda vertical (Figura 18).

Figura 18 - Realização do ensaio de Tração por Compressão Diametral (TCD).



Fonte: Autor (2026).

A resistência à tração por compressão diametral ($R_{t,cd}$) é calculada utilizando a Equação 18, derivada da teoria da elasticidade:

$$R_{t,cd} = \frac{2P}{100\pi \cdot l \cdot d} \quad (18)$$

Onde:

- a) $R_{t,cd}$ é a resistência a tração por compressão diametral, expressa em Mpa;
- b) P é a carga máxima de ruptura aplicada, em N;

c) l é o comprimento do corpo de prova, em cm;

d) d é o diâmetro do corpo de prova, em cm.

A partir dos dados obtidos, foram construídas curvas tensão-deslocamento, sendo determinados a resistência máxima à tração indireta ($R_{t,cd}$), deslocamento vertical no pico (δ_p); Energia absorvida até o pico (E_p) e as energias padronizadas a 0,75 mm de deslocamento ($E_{0,75}$) e a 4,5 mm de deslocamento ($E_{4,5}$).

O aumento da resistência à tração é um indicador direto da eficácia dos aditivos (fibras e cinza) em criar uma matriz de solo mais coesa e tenaz. Para camadas de cobertura de aterros, uma maior resistência à tração é altamente desejável, pois implica em uma maior capacidade de suportar as tensões de tração que se desenvolvem durante a secagem, retardando ou prevenindo a formação de fissuras que comprometeriam a função de barreira da camada (Albrecht; Benson, 2001; Consoli *et al.*, 2007).

3.6.3 Caracterização Hidráulica

A caracterização hidráulica dos materiais teve como objetivo avaliar o comportamento hidráulico e a interação água-solo das misturas estudadas, aspectos diretamente relacionados ao desempenho de barreiras compactadas e camadas de cobertura de aterros sanitários. Para isso, foram realizados ensaios de permeabilidade e determinação da curva de retenção pelo método do papel-filtro, permitindo analisar a dinâmica do fluxo e retenção de água em condição saturada e não saturada, respectivamente.

3.6.3.1 Ensaio de permeabilidade a carga variável

A condutividade hidráulica, representada pelo coeficiente k , é a propriedade que quantifica a facilidade com que um fluido escoar através de um meio poroso sob a ação de um gradiente de potencial. Para camadas de cobertura e *liners* de aterros sanitários, a condutividade hidráulica à água é o parâmetro de desempenho mais crítico. O principal objetivo de uma barreira de solo compactado é minimizar a infiltração de água, e, por isso, a legislação e os manuais de engenharia geotécnica ambiental tipicamente exigem que essas camadas possuam uma condutividade hidráulica saturada igual ou inferior a 1×10^{-7} cm/s (Daniel, 1993). A metodologia de ensaio adotada nesta pesquisa foi estruturada em duas fases complementares, preparação da amostra e realização do ensaio.

Primeiramente, para uma avaliação comparativa de todas as misturas propostas, foi adotado o procedimento do permeâmetro de parede rígida a carga variável, normatizado pela ABNT NBR 14545:2021. Este ensaio consiste em compactar o corpo de prova diretamente em um cilindro metálico de dimensões conhecidas. Após a compactação, a amostra é colocada no permeâmetro, com pedras porosas na base e no topo para distribuir o fluxo. O processo de saturação é então iniciado, geralmente por inundação lenta da base para o topo para expulsar o ar aprisionado. Uma vez que se considera a amostra saturada, o ensaio de carga variável é iniciado. Um tubo de vidro de diâmetro conhecido (bureta) conectado ao topo da amostra é preenchido com água até uma altura inicial (h_1). A água é então permitida a percolar através da amostra sob a força da gravidade, e o tempo (Δt) que o nível da água leva para baixar de h_1 para uma altura final (h_2) é registrado. Em posse dos dados calcula-se o coeficiente de permeabilidade. Este método, por sua simplicidade e rapidez, foi utilizado para realizar uma triagem e comparação do desempenho hidráulico de todas as misturas estudadas.

Destaca-se que, no presente estudo, o gradiente hidráulico inicial (i_1) ficou em torno de 15, considerando a carga hidráulica aplicada (h) e a altura dos corpos de prova (L), que variou aproximadamente entre 7 e 10 cm. Como o ensaio foi realizado à carga variável, esse gradiente reduziu gradualmente ao longo das leituras, em função da diminuição da carga hidráulica. Em geral, a variação de carga entre as leituras inicial e final (Δh) ficou entre 10 e 30 cm durante cada determinação.

Ressalta-se, ainda, conforme salienta Daniel (1993), ensaios em permeâmetros de parede rígida são altamente suscetíveis a erros para solos de baixa permeabilidade ($k < 10^{-5}$ cm/s), principalmente devido ao escoamento preferencial que pode ocorrer na interface entre a amostra e a parede rígida do cilindro, o que pode levar a uma superestimação do valor real de k em ordens de magnitude.

3.6.3.2 Ensaio de permeabilidade intrínseca ao ar

A permeabilidade intrínseca aparente ao ar foi determinada por meio de metodologia experimental adaptada, com o objetivo de avaliar comparativamente a facilidade de passagem de ar através dos corpos de prova compactados. O ensaio foi desenvolvido a partir dos princípios gerais de permeabilidade ao gás em meios porosos, considerando a compressibilidade do ar e a necessidade de associar a vazão medida às pressões de entrada e saída do sistema. No presente estudo, o ensaio foi adaptado às condições laboratoriais

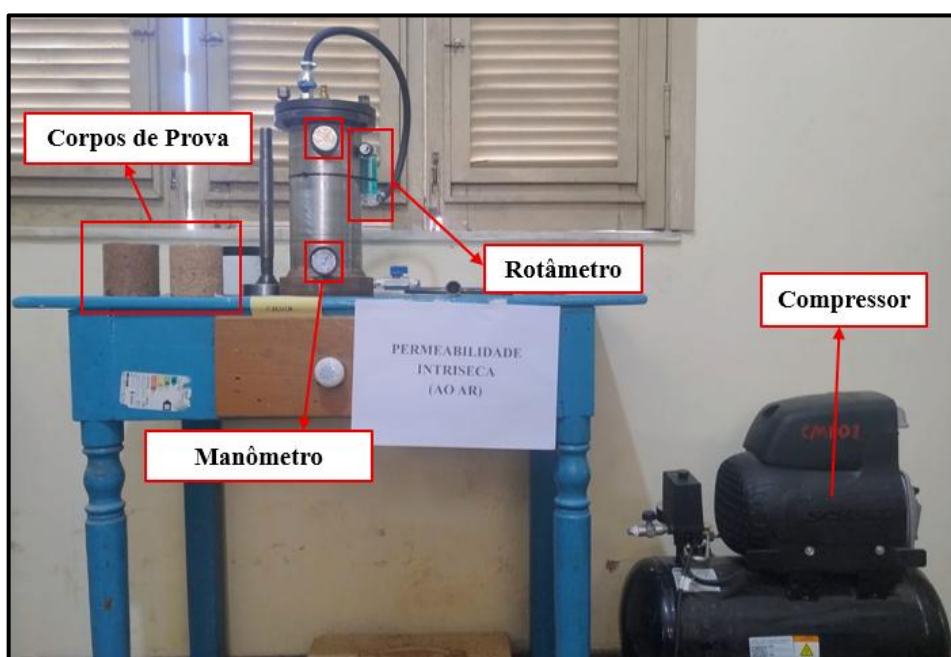
disponíveis, sendo construída uma célula metálica de parede rígida especificamente para essa finalidade.

O procedimento e o aparato utilizados basearam-se no princípio da ASTM D6539-00, que trata da avaliação da permeabilidade pneumática de materiais porosos parcialmente saturados por meio de fluxo de ar. Embora essa norma esteja atualmente classificada como histórica, seus princípios foram considerados adequados como referência metodológica para a concepção do ensaio. Devido à simplicidade de construção do equipamento e ao objetivo desta pesquisa, o arranjo experimental adotado mostrou-se satisfatório permitindo uma análise qualitativa e comparativa das amostras quanto a permeabilidade intrínseca ao ar, além de complementar a análise de condutividade hidráulica, corroborando os resultados obtidos.

Além da referência normativa, o procedimento teve como referência metodológica os trabalhos de permeabilidade intrínseca ao ar de Silva *et al.*, 2009 e Sena, 2022, que trabalharam com amostras de solo compactadas, nos quais a permeabilidade intrínseca ao ar é obtida a partir da vazão de saída, da geometria do corpo de prova, da viscosidade dinâmica do ar e das pressões absolutas de entrada e saída.

O aparato experimental (Figura 19) foi composto por uma célula cilíndrica metálica de parede rígida, sistema de alimentação de ar comprimido, válvula reguladora de pressão, manômetros, conexões pneumáticas e rotâmetro para leitura da vazão de saída.

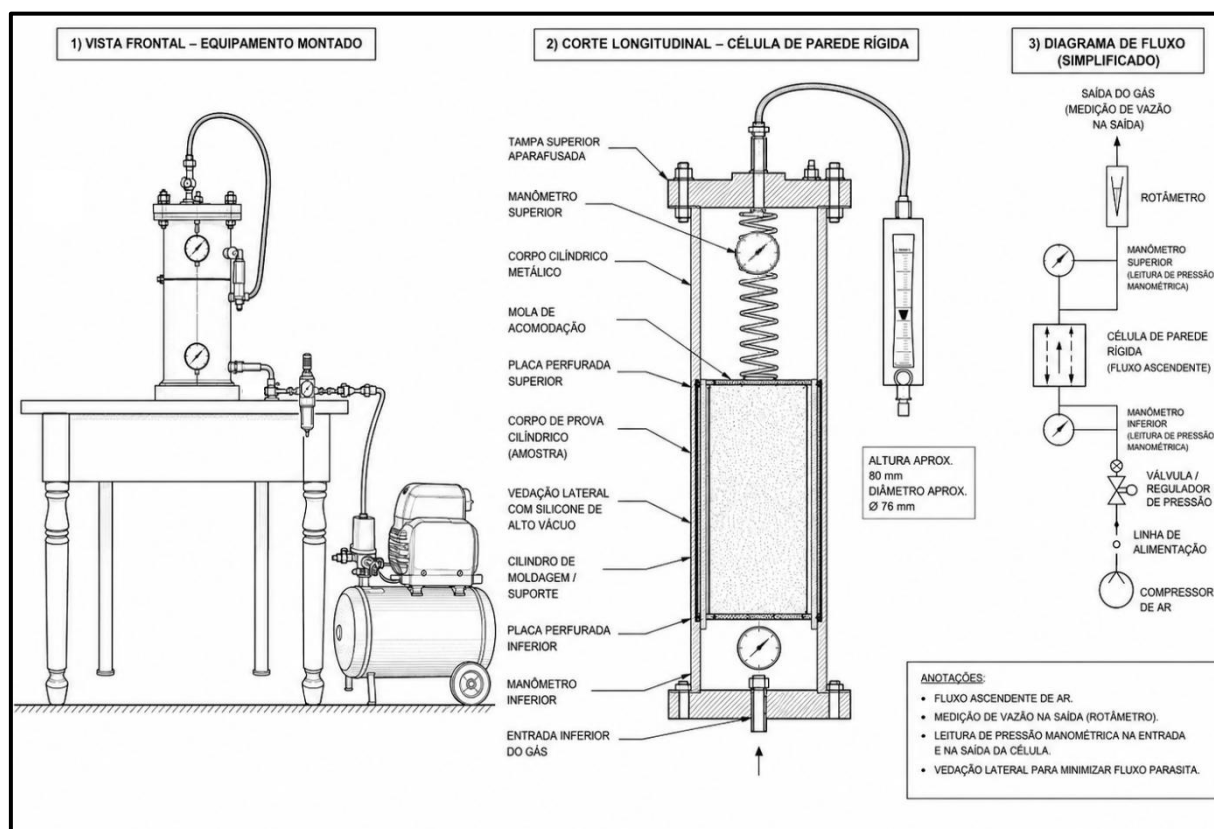
Figura 19 - Aparato experimental produzido para o ensaio de permeabilidade intrínseca ao ar.



Fonte: Autor (2026).

O fluxo de ar foi aplicado no sentido ascendente, atravessando o corpo de prova de baixo para cima. Na parte superior da célula, a vazão de ar que atravessava a amostra era medida por meio de rotâmetro, enquanto a pressão de entrada e saída era acompanhada por manômetros instalados no sistema. A Figura 20 apresenta um diagrama detalhado do aparato

Figura 20 - Diagrama da célula experimental utilizada no ensaio de permeabilidade intrínseca ao ar.



Fonte: Autor (2026). Elaborada com uso de ferramenta de IA.

Os corpos de prova foram moldados diretamente no cilindro metálico da célula, com diâmetro médio de aproximadamente 7,60 cm e altura média de aproximadamente 8,0 cm (Figura 21). A moldagem foi realizada com teor de umidade situado cerca de 2 a 3 pontos percentuais abaixo da umidade ótima de compactação de cada material ou mistura. Essa condição foi adotada para evitar a saturação excessiva dos poros e permitir a passagem mensurável de ar através da amostra. A massa específica seca correspondente foi definida a partir da curva de compactação de cada material. Como os corpos de prova foram moldados em condição ligeiramente mais seca que a umidade ótima, os resultados refletem a permeabilidade ao ar de materiais não saturados, com maior presença de poros preenchidos por ar. Essa

condição deve ser considerada na interpretação, pois tende a favorecer valores de permeabilidade ao ar superiores aos que seriam obtidos em amostras mais próximas da saturação.

Figura 21 - Moldagem dos corpos-de-prova em cilindro metálico.



Fonte: Autor (2026).

Após a moldagem, as extremidades do corpo de prova eram regularizadas e colocadas em contato com placas perfuradas, de modo a favorecer a distribuição do fluxo de ar na base e no topo da amostra. A montagem da célula foi realizada buscando garantir o contato adequado entre o corpo de prova, as placas de distribuição e os elementos de vedação. Para minimizar a ocorrência de fluxo preferencial lateral entre a amostra e a parede do cilindro, aplicou-se silicone de alto vácuo na interface lateral, reduzindo a possibilidade de passagem de ar pelas bordas do corpo de prova.

Antes de cada ensaio, o sistema era pressurizado com a saída fechada, permitindo a equalização das pressões nas câmaras inferior e superior da célula. Em seguida, a válvula de saída superior, conectada ao rotâmetro, era aberta por aproximadamente 30 min, com o objetivo de permitir a passagem inicial do ar e reduzir possíveis efeitos de aprisionamento no sistema. Após esse procedimento, a válvula era novamente fechada e o sistema permanecia pressurizado por aproximadamente 24 h, para verificação de possíveis perdas de pressão e avaliação da estanqueidade da célula.

No dia seguinte, com o compressor em funcionamento, a válvula de saída era aberta e o fluxo de ar era conduzido através do corpo de prova por aproximadamente 3 h. Durante esse

período, foram realizadas seis leituras de pressão e vazão, em intervalos aproximados de 30 min ou logo após o enchimento e desarme do compressor, quando a pressão se encontrava mais estável. Devido ao funcionamento cíclico do compressor, pequenas oscilações de pressão e vazão foram observadas durante o ensaio; por isso, as leituras foram registradas após a estabilização operacional do sistema. Fotos do aparato encontram-se no Apêndice A.

Para o cálculo da permeabilidade intrínseca aparente ao ar, considerou-se a equação 19, de fluxo compressível em meio poroso:

$$k_{ai} = \frac{2\mu L P_s Q_s}{A(P_E^2 - P_S^2)} \quad (19)$$

Onde:

- a) k_{ai} é a permeabilidade intrínseca ao ar, em (m²);
- b) μ é a viscosidade dinâmica do ar, em (Pa.s);
- c) L é a altura do corpo de prova, em m;
- d) P_S é a pressão absoluta de saída, em Pa;
- e) P_E é a pressão absoluta de entrada do ar, em Pa.
- f) Q_S é a vazão de saída do ar, em (m³/s); e
- g) A é a área da seção transversal do corpo de prova, em (m²).

A pressão absoluta de entrada (P_E) foi obtida pela soma entre a pressão atmosférica e a pressão manométrica medida na entrada da célula. Considerando a faixa de pressão manométrica de 0,2 a 2,0 kgf/cm², os valores absolutos de entrada corresponderam aproximadamente a 121 kPa e 297 kPa. A pressão absoluta de saída (P_S) foi considerada aproximadamente igual à pressão atmosférica, uma vez que a descarga do fluxo ocorria diretamente para o ambiente. As leituras de pressão, originalmente obtidas em kgf/cm², foram convertidas para Pascal antes da aplicação da equação.

A viscosidade dinâmica do ar foi adotada como 1,84×10⁻⁵ Pa.s, valor usual para o ar atmosférico em temperatura próxima de 25 °C. Para fins de cálculo, a vazão registrada no rotâmetro em L/min foi convertida para m³/s, e as dimensões do corpo de prova foram utilizadas em unidades do Sistema Internacional.

3.6.3.3 Ensaio de sucção com papel-filtro

Considerando que esta pesquisa avalia coberturas de solo submetidas a ciclos de umedecimento e secagem, a sucção possui papel fundamental na interpretação dos fenômenos de infiltração, retração e fissuração. Nesse contexto, a determinação da sucção foi realizada pelo método do papel-filtro, técnica indireta amplamente utilizada para obtenção da Curva de Retenção de Água do Solo (CRAS).

A determinação da sucção dos materiais foi conduzida seguindo as diretrizes da norma ASTM D5298 – *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*. O procedimento iniciou-se com a preparação dos corpos de prova, que foram moldados em anéis metálicos com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Para isso, o solo foi previamente preparado, utilizando-se a fração passante na peneira com abertura de malha de 2,00 mm. Os corpos de prova destinados ao ensaio de papel-filtro foram preparados por compactação dinâmica, na umidade ótima de cada material, com controle da massa específica seca para garantir condições de moldagem próximas às definidas nas curvas de compactação. Após a preparação, a variação do teor de umidade foi obtida por secagem progressiva das amostras, permitindo a determinação da sucção em diferentes estados de umidade. Com o intuito de garantir uma distribuição homogênea da umidade inicial, todos os corpos de prova foram embalados e acondicionados em um ambiente de temperatura controlada por 48 horas.

Após o período de cura e equilíbrio inicial, foi realizada a montagem do ensaio. Em cada corpo de prova, foram cuidadosamente posicionados dois discos de papel-filtro de baixa velocidade de filtração (Whatman nº 42). O primeiro foi colocado diretamente em contato com a superfície superior do solo e o segundo disco sobre o primeiro (Figura 22). Esse procedimento é adotado, pois é comum a aderência de solo ao disco em contato direto com esse, o que pode impactar os dados obtidos, dada a sensibilidade do ensaio. O segundo disco é destinado à medição da sucção mátrica.

Figura 22 - Ensaio de papel filtro.



Fonte: Autor (2026).

Após a montagem, os conjuntos foram hermeticamente selados com filme plástico e armazenados em recipiente vedado, sob temperatura controlada, permanecendo em equilíbrio por um período de 7 a 14 dias. Decorrido esse período, os papéis-filtro foram removidos com auxílio de pinça e rapidamente pesados em balança analítica de precisão para determinação do teor de umidade final. Os valores de sucção matricial e total foram obtidos a partir do teor de umidade dos papéis-filtro, utilizando as curvas de calibração do papel Whatman nº 42 apresentadas na ASTM D5298:2016.

3.6.4 Análise de retração e fissuração por ressecamento por análise digital de imagens

O processo de retração e fissuração por ressecamento está associado à perda progressiva de água dos poros. Com a evaporação, desenvolvem-se interfaces água-ar e meniscos entre as partículas, produzindo sucção capilar. O aumento da sucção leva a um aumento das tensões efetivas entre as partículas e promove a contração da matriz do solo. Quando essa contração encontra algum grau de restrição, podem se desenvolver tensões diferenciais de tração. A fissuração ocorre quando essas tensões superam a resistência à tração do material. Portanto, o comportamento observado resulta da interação entre perda de umidade, sucção, retração, resistência à tração e condições de contorno impostas ao corpo de prova.

Na presente pesquisa, a avaliação da retração e da fissuração por ressecamento foi realizada por meio de metodologia experimental adaptada, associada à análise digital de

imagens. O procedimento teve como objetivo acompanhar, ao longo do tempo, a perda de massa, a retração superficial e o eventual desenvolvimento de fissuras nos corpos de prova durante o processo de secagem.

A metodologia teve como referência o procedimento empregado por Bezerra (2020), no qual a propagação de fissuras em solos foi monitorada por meio de imagens digitais, com registro das condições ambientais e posterior quantificação de índices geométricos de fissuração. No presente estudo, o método foi adaptado às condições experimentais da pesquisa, utilizando-se uma câmara de secagem, registros fotográficos sistemáticos e uma rotina automatizada de processamento de imagens desenvolvida em Python (Apêndice B).

O aparato utilizado foi constituído por uma câmara experimental adaptada, composta por uma estrutura fechada, sistema fixo de iluminação artificial, câmera fotográfica, balança digital e termo-higrômetro (Figura 23). A disposição desses componentes permitiu registrar, em cada intervalo de observação, a superfície da amostra, a massa do conjunto e as condições de temperatura e umidade relativa do ar no interior da câmara. No Apêndice C, encontra-se fotos e imagens do aparato montado para o ensaio.

Figura 23 - Vista geral da câmara experimental, mostrando o sistema de iluminação, a câmera, a balança e o termo-higrômetro



Fonte: Autor (2026).

A iluminação foi realizada por quatro lâmpadas de 40 W, posicionadas de forma fixa e mantidas continuamente ligadas durante todo o ensaio. A câmera também permaneceu em posição fixa, conservando a mesma distância, inclinação e enquadramento em relação às amostras. O sistema não foi desligado durante o período de monitoramento, buscando-se reduzir alterações bruscas de iluminação e das condições de secagem, bem como melhorar a comparabilidade entre as imagens sucessivas.

As posições da câmera, da balança e dos recipientes foram previamente definidas e marcadas. Dessa forma, as cápsulas eram recolocadas, quando necessário, sempre na mesma orientação, evitando-se rotações ou deslocamentos que pudessem interferir na comparação temporal e no processamento automatizado das imagens.

Os corpos de prova foram moldados em recipientes circulares de acrílico, com diâmetro interno de 90 mm e espessura aproximada de 15 mm. Como para as amostras (matrizes) submetidas ao ensaio de determinação do Limite de Liquidez, os valores obtidos foram muito próximos, os corpos de prova, foram moldados com umidade superior ao *LL* do solo. Os teores variaram entre 30 e 35%, ajustados para facilitar a homogeneização da amostra e os preenchimentos dos recipientes, sobretudo para as amostras com adição de fibra. Além disso, os teores de umidade mais próximos, colocam as amostras, na mesma condição de umidade inicial, ou nas condições mais similares possíveis. Em todos os casos, buscou-se obter uma condição inicial suficientemente úmida, que permitisse acompanhar a perda de água, a retração superficial e o eventual desenvolvimento de fissuras durante a secagem.

Após a colocação do material, a superfície superior foi cuidadosamente regularizada, buscando-se obter uma superfície aproximadamente plana e adequada à análise bidimensional por imagem.

Antes do início do monitoramento, determinou-se a massa do conjunto (peso da cápsula mais amostra úmida). Em seguida, realizou-se o primeiro registro fotográfico da superfície, adotado como tempo inicial do ensaio.

Durante as primeiras 24 horas, os registros foram realizados em intervalos de 30 minutos. Em cada registro, foram obtidas informações sobre a superfície da amostra, a massa do conjunto, a temperatura e a umidade relativa do ar. A captura conjunta dessas informações permitiu relacionar a evolução superficial das amostras à perda de massa e às condições ambientais observadas durante o processo de secagem.

Além da etapa inicial de monitoramento contínuo, foram realizados registros complementares após 48 e 72 horas do início do ensaio, com o objetivo de verificar a continuidade da retração, a estabilização da massa e a possibilidade de evolução tardia da fissuração.

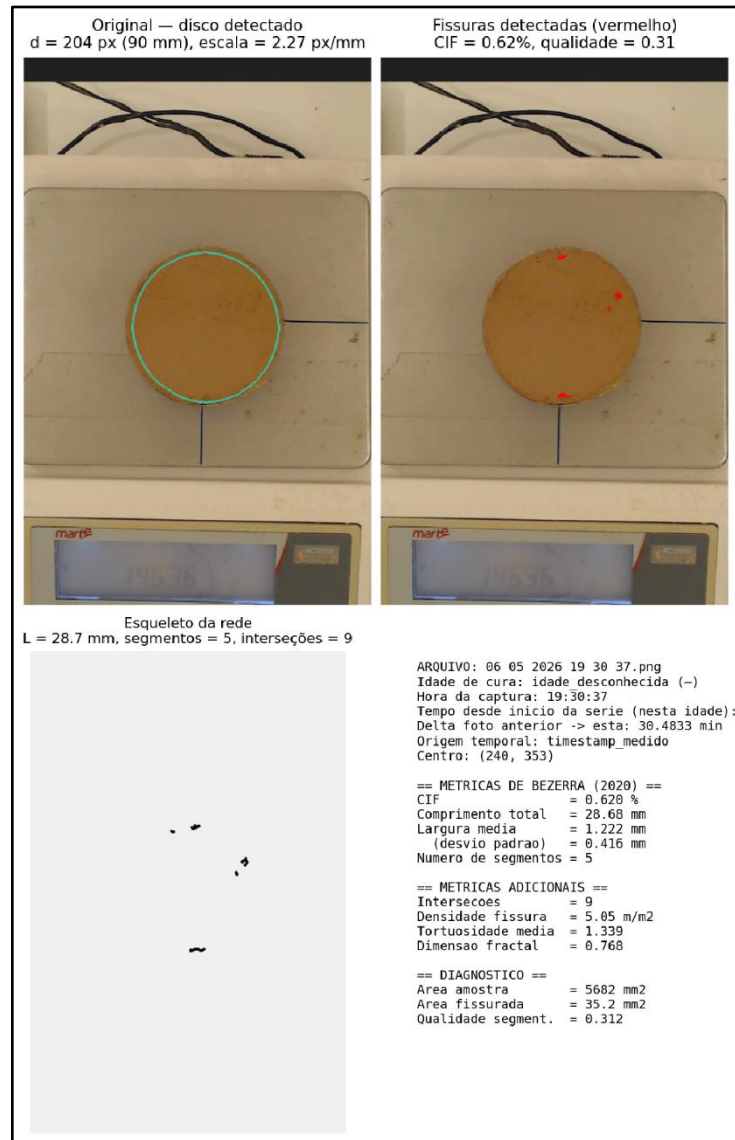
As imagens capturadas foram processadas por meio de uma rotina automatizada desenvolvida em *Python* especificamente para esta pesquisa. A rotina executa a leitura e a ordenação temporal dos arquivos. Inicialmente, ela identificava a região circular correspondente à cápsula por meio de detecção geométrica. A calibração geométrica foi realizada pela relação entre o diâmetro conhecido da cápsula, igual a 90 mm, e o diâmetro correspondente em pixels. Dessa forma, foi obtido um fator de conversão em pixels por milímetro, utilizado para expressar as áreas, os comprimentos e as larguras em unidades físicas. Para a segmentação das fissuras, foi excluída uma margem interna nominal de 2,5 mm junto à parede do recipiente, evitando que o contraste produzido pelo acrílico ou pelo vazio anelar fosse classificado como fissuração interna da amostra.

Dentro da região de interesse, as imagens foram convertidas para escala de cinza e submetidas ao realce do contraste local e à redução de ruídos, preservando-se as bordas das feições (Figura 24). A segmentação das fissuras combinou critérios globais e locais de intensidade, incluindo a limiarização adaptativa de Sauvola e Pietikäinen (2000) e o filtro de Frangi *et al.* (1998), empregado para destacar estruturas escuras, estreitas e alongadas. A associação desses procedimentos buscou reduzir a classificação indevida de sombras, manchas e irregularidades superficiais como fissuras.

A máscara binária resultante foi então esqueletizada, reduzindo cada fissura à sua linha central com espessura de um pixel. A partir da máscara e do esqueleto foram obtidos os descritores geométricos da fissuração.

Além da segmentação das fissuras, uma máscara independente foi gerada para identificar o contorno externo da amostra em cada imagem. A maior região contínua correspondente ao corpo de prova foi selecionada, e seu contorno foi utilizado para acompanhar a retração superficial. Assim, a borda da cápsula serviu como referência geométrica fixa, enquanto o contorno da amostra pôde recuar em direção ao centro durante a secagem

Figura 24 - Análise da superfície da amostra através da rotina empregada.



Fonte: Autor (2026).

A área superficial projetada da amostra em cada instante foi representada por A_t . A partir dessa área, calculou-se o diâmetro equivalente $D_{eq,t}$ (Equação 20), correspondente ao diâmetro de um círculo de mesma área:

$$D_{eq,t} = 2 \sqrt{\frac{A_t}{\pi}} \quad (20)$$

A deformação radial acumulada foi calculada pela redução relativa do diâmetro equivalente em relação à primeira imagem válida (Equação 21):

$$\varepsilon_r(t) = \frac{D_{eq,0} - D_{eq,t}}{D_{eq,0}} \times 100 \quad (21)$$

A redução relativa de área foi calculada pela equação 22:

$$\frac{\Delta A}{A_0}(t) = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (22)$$

A largura média do vazio anelar foi estimada pela metade da diferença entre o diâmetro equivalente inicial ($D_{eq,0}$) e o diâmetro equivalente no instante considerado conforme a equação 23:

$$v_a(t) = \frac{D_{eq,0} - D_{eq,t}}{2} \quad (23)$$

A anisotropia do contorno foi avaliada a partir da diferença relativa entre os eixos principal maior e menor ajustados à superfície segmentada. Valores reduzidos indicam contração aproximadamente uniforme no plano, enquanto valores mais elevados indicam maior diferença entre as direções principais de retração. Essas grandezas representam a contração planimétrica observada na fotografia zenital e não correspondem diretamente à retração volumétrica tridimensional obtida no ensaio convencional.

Foram consideradas válidas apenas as imagens nas quais a posição da cápsula, a identificação do contorno e a segmentação da superfície permaneceram compatíveis com a observação visual. Quadros com deslocamentos excessivos, obstruções, reflexos intensos, perda do contorno ou falha evidente da segmentação foram retirados da janela válida da respectiva série.

Para a avaliação de fissuração por análise de imagem digital, a principal métrica empregada foi o *Crack Intensity Factor* - CIF, definido como a razão entre a área identificada como fissura e a área útil da superfície da amostra, expressa em porcentagem (equação 24):

$$CIF = \frac{A_f}{A_a} \times 100 \quad (24)$$

Onde:

- a) A_f - corresponde à área identificada como fissura;
- b) A_a - corresponde à área útil analisada da superfície do corpo de prova.

A rotina implementada permite calcular o comprimento total das fissuras, a largura média, o número de componentes segmentados, o número de interseções, a densidade linear, a tortuosidade média ponderada e a dimensão fractal. O comprimento pode ser obtido a partir da contagem dos pixels do esqueleto e de sua conversão para milímetros. A largura média foi estimada por meio da transformada de distância aplicada à máscara binária, enquanto as interseções foram identificadas pelos pontos do esqueleto com mais de dois ramos conectados.

Esses descritores foram empregados como informações complementares e como elementos de verificação da segmentação e não foram utilizados isoladamente para caracterizar uma rede plenamente desenvolvida de fissuras ou sua conectividade através do corpo de prova, uma vez que a manifestação superficial de fissuras foi bastante reduzida, como será explicada na seção de resultados.

Entretanto, destaca-se, que como a análise digital permite acompanhar a retração superficial das amostras, nos casos em que a formação de fissuras foi pouco expressiva, a interpretação foi concentrada na redução da área superficial, na perda de massa e na evolução do contorno do corpo de prova, mantendo-se o CIF e os demais descritores como parâmetros complementares.

Ressalta-se ainda, que nas análises do CIF, para representação da evolução temporal, picos isolados associados ao processamento foram atenuados por filtros e por uma mediana móvel. Essa série pós-processada foi utilizada apenas para visualizar episódios de crescimento e a tendência de estabilização.

Dessa forma, para a comparação entre as composições, adotou-se como indicador representativo a mediana dos valores brutos de CIF dentro da janela válida, por ser menos sensível a valores isolados produzidos por sombras, reflexos ou pequenas variações de segmentação. Portanto, o CIF mediano não corresponde necessariamente ao valor final ou máximo da fissuração, mas a um descritor robusto da manifestação superficial registrada durante o intervalo analisado.

3.7 Modelagem Numérica – Vadose®

A modelagem numérica foi realizada no módulo VADOSE/W, do pacote GeoStudio. O software emprega o método dos elementos finitos para representar o comportamento hidráulico de meios não saturados. Na presente pesquisa, a modelagem foi utilizada de forma preliminar e comparativa, sendo a interpretação direcionada à evolução da sucção matricial e do grau de saturação ao longo da camada de cobertura, com o teor de umidade volumétrica empregado como variável complementar. Não foram analisadas vazões, volumes percolados ou componentes acumuladas do balanço hídrico, nem foi simulado o transporte de gás.

No presente estudo, a modelagem foi realizada com o objetivo de comparar o comportamento hidráulico de camadas de cobertura constituídas por solo puro, S0.50F12 e S0.75F12, quando submetidas às mesmas condições climáticas. Para facilitar a identificação, as três configurações foram denominadas Modelo S, Modelo S0.50F12 e Modelo S0.75F12. A análise foi direcionada à evolução da sucção matricial, do teor de umidade volumétrica e do grau de saturação, parâmetros relacionados à secagem e à manutenção do estado hidráulico da cobertura.

A seleção das misturas S0.50F12 e S0.75F12 teve como finalidade verificar o efeito da incorporação de fibras de polipropileno de 12 mm sobre a resposta hidráulica do solo. O teor de 0,50% representou uma condição intermediária de reforço, enquanto o teor de 0,75% apresentou melhor equilíbrio entre resistência à tração, deformabilidade, retração e propriedades de transporte. O solo puro foi mantido como material de referência.

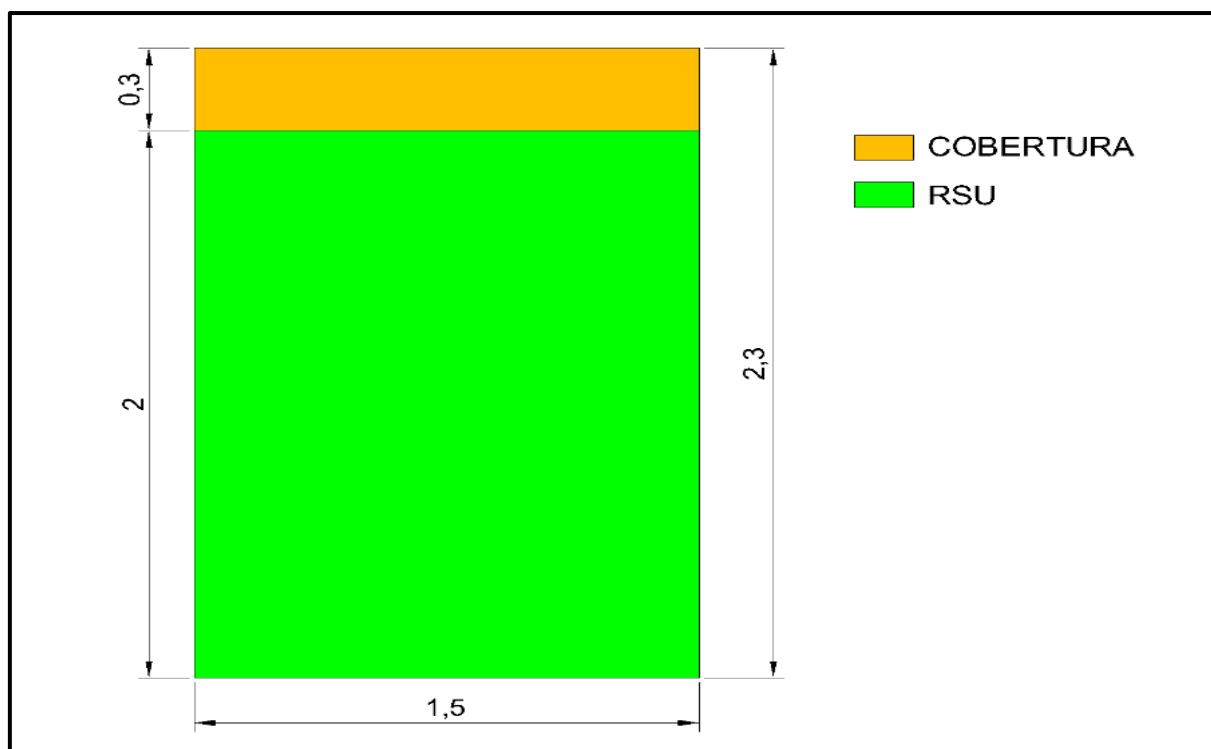
As fibras não foram representadas individualmente na malha nem por meio de parâmetros mecânicos específicos. O efeito de sua incorporação foi introduzido indiretamente pelas curvas de retenção de água e de condutividade hidráulica não saturada determinadas experimentalmente para cada composição. Dessa forma, não foi realizado um ajuste numérico específico para representar comprimento, orientação, resistência ou aderência das fibras. As únicas propriedades alteradas entre os três modelos foram as funções hidráulicas correspondentes ao solo, à S0.50F12 e à S0.75F12.

A modelagem não abrangeu todas as formulações do programa experimental, pois seu objetivo foi realizar uma verificação comparativa específica entre materiais com a mesma matriz mineral. A análise de outras misturas, especialmente das composições ternárias, deverá

ser realizada em continuidade à pesquisa, mediante a obtenção das respectivas curvas hidráulicas.

Foi considerado um domínio bidimensional com largura de 1,50 m e espessura unitária de 1,00 m perpendicular ao plano de análise. O sistema foi composto por uma camada de cobertura com 0,30 m de espessura, sobreposta a uma camada de 2,00 m representativa dos resíduos sólidos urbanos. A geometria e a camada inferior foram mantidas constantes nos três modelos, variando-se apenas o material empregado na cobertura. A Figura 25 apresenta a geometria adotada.

Figura 25 - Geometria adotada na modelagem numérica.



Fonte: Autor (2026).

Como não foram determinados, nesta pesquisa, os parâmetros de retenção hídrica e de condutividade hidráulica do RSU, considerou-se um resíduo de compostagem estudado por Almeida (2011), conforme anteriormente empregado por Souza (2018). As propriedades dessa camada foram mantidas iguais nos três modelos, fornecendo uma condição hidráulica inferior comum para a comparação entre as coberturas. Essa representação teve caráter simplificado e não pretendeu reproduzir a heterogeneidade física e hidráulica de uma massa real de resíduos.

As propriedades hidráulicas do solo, da S0.50F12 e da S0.75F12 foram representadas pelas respectivas curvas de retenção de água e de condutividade hidráulica não

saturada. As curvas foram obtidas a partir dos resultados do ensaio de papel-filtro, associados aos valores de condutividade hidráulica saturada, e ajustadas pelo modelo de van Genuchten (1980). As funções completas foram introduzidas no programa e constituíram os parâmetros hidráulicos variáveis entre os três modelos. A geometria, a camada inferior, a malha, as condições de contorno e os dados climáticos foram mantidos constantes.

Na modelagem, foi adotado o modelo de material *Simplified Thermal*, no qual foram inseridas as curvas de retenção e de condutividade hidráulica não saturada de cada composição. Os parâmetros térmicos complementares foram mantidos nos valores-padrão do programa e foram iguais nos três modelos, uma vez que a análise não teve como objetivo comparar o comportamento térmico dos materiais. O termo *Simplified Thermal* corresponde à formulação hidráulico-térmica disponível no programa; não foi empregado modelo constitutivo mecânico, pois não foram simuladas tensões, deformações, retração ou fissuração.

A discretização foi baseada na adotada por Souza (2018), guardadas as especificidades geométricas da presente pesquisa. A malha foi constituída predominantemente por elementos quadrangulares com dimensão aproximada de 5 cm. Na região superficial da camada de cobertura, foram introduzidas três faixas de elementos com 1 cm de espessura cada, de modo a representar com maior detalhe as variações de sucção e de grau de saturação decorrentes da interação entre a cobertura e as condições atmosféricas. A mesma discretização foi mantida nos três modelos analisados.

A Tabela 2 reúne os parâmetros utilizados na definição dos materiais e das condições iniciais. Os valores de umidade ótima e massa específica seca máxima caracterizam o estado de compactação a partir do qual foram estimadas as sucções iniciais, não constituindo parâmetros ajustados durante a análise numérica.

Tabela 2 - Propriedades dos materiais e condições iniciais empregadas na modelagem.

Material	$w_{ót}$ (%)	$\rho_{d,máx}$ (g/cm ³)	k_{sat} (cm/s)	Sucção inicial (kPa)	Temperatura inicial (°C)
Solo puro	13,01	1,883	$1,08 \times 10^{-7}$	91,0	38
S0.50F12	12,55	1,854	$1,72 \times 10^{-7}$	77,0	38
S0.75F12	12,98	1,804	$1,86 \times 10^{-7}$	77,0	38
RSU representativo	—	—	Função hidráulica de Almeida (2011), conforme Souza (2018)	20,0	38

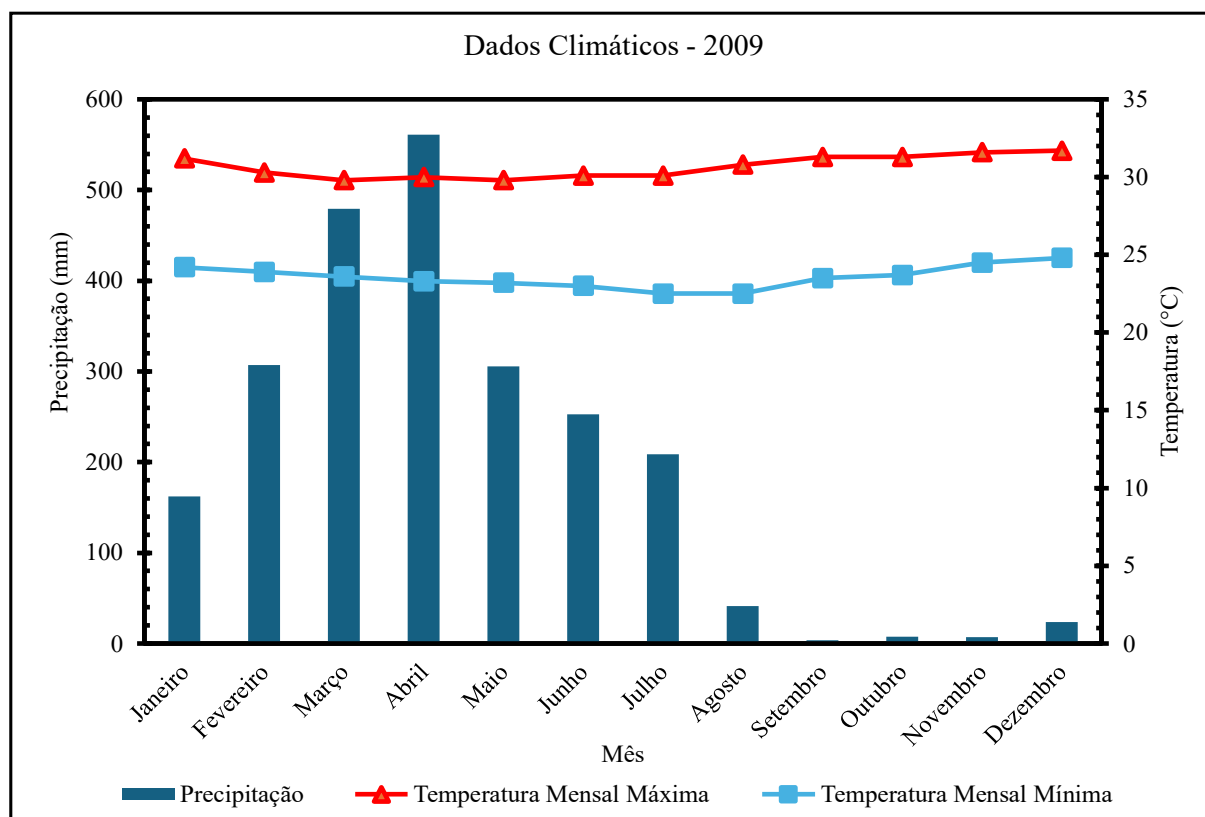
Fonte: Autor (2026).

A modelagem foi executada em duas etapas para cada configuração. Na primeira, realizou-se uma análise estacionária para estabelecer o perfil hidráulico de referência do sistema. Os valores de sucção adotados foram estimados a partir das curvas de retenção hídrica previamente obtidas pelo ensaio de papel-filtro, considerando-se a umidade ótima de compactação de cada material. Esses valores, apresentados na Tabela 2, foram empregados exclusivamente como condições de partida dos modelos.

Adotou-se temperatura uniforme de 38 °C na camada de cobertura e na camada representativa de RSU durante a análise estacionária. Esse valor foi mantido nos três modelos e não constituiu parâmetro de comparação entre os materiais. Na análise transiente, a temperatura passou a variar de acordo com a série climática diária aplicada ao modelo.

Para a análise transiente, foi utilizado como condição inicial o perfil obtido na análise estacionária. Nessa etapa, foram aplicados dados climáticos diários para um período de 365 dias. A precipitação correspondeu ao ano de 2009 e foi obtida no Posto Caucaia da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, totalizando 2.165,4 mm (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Dados climáticos para o ano de 2009.



Fonte: Souza (2018).

Esse período foi selecionado por apresentar elevada precipitação anual seguida por uma estação seca definida, permitindo avaliar tanto o umedecimento quanto a secagem da camada. As temperaturas máxima e mínima, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento foram obtidas na estação meteorológica de Fortaleza do Instituto Nacional de Meteorologia. Os dados utilizados são resumidos no Quadro 4.

Quadro 4 - Dados climáticos utilizados na análise transiente.

Parâmetro	Resolução temporal	Fonte ou tratamento
Precipitação	Diária, durante 365 dias	Posto Caucaia da FUNCEME; ano de 2009; total anual de 2.165,4 mm
Temperatura máxima	Diária	Estação Fortaleza do INMET
Temperatura mínima	Diária	Estação Fortaleza do INMET
Umidade relativa do ar	Diária	Estação Fortaleza do INMET
Velocidade do vento	Diária	Estação Fortaleza do INMET
Radiação solar	Diária	Estimada pelo VADOSE/W a partir dos dados climáticos disponíveis
Evaporação superficial	Diária	Calculada pelo modelo de Penman–Wilson disponível no programa

Fonte: Autor (2026).

Na superfície do domínio, aplicou-se uma condição atmosférica variável, definida pelos dados climáticos diários. Na base, adotou-se gradiente hidráulico unitário, representando uma condição de drenagem livre. Nas laterais, foi estabelecida condição de fluxo nulo, restringindo o transporte de água predominantemente à direção vertical. Essas condições foram mantidas iguais nos três modelos.

Para a comparação dos modelos, foram extraídos os perfis de sucção matricial e de grau de saturação ao longo da profundidade, considerando-se o último dia de cada mês do período analisado. O teor de umidade volumétrica foi utilizado como variável complementar na obtenção e interpretação desses perfis. Dessa forma, a modelagem foi utilizada para verificar se as diferenças entre as funções hidráulicas do solo, da S0.50F12 e da S0.75F12 resultavam em alterações relevantes na evolução da sucção e do grau de saturação durante um ciclo climático anual.

O modelo não simulou diretamente a retração, o desenvolvimento de tensões de tração ou a abertura de fissuras. A evolução da sucção durante a secagem foi utilizada apenas como indicador do estado hidráulico da camada e interpretada qualitativamente em conjunto

com os resultados experimentais de retração, resistência à tração e análise digital de imagens. Não foi estabelecido um valor de sucção correspondente ao início da fissuração.

Em razão dessas simplificações, os materiais foram representados como meios contínuos, homogêneos e inicialmente íntegros. O modelo não incorporou dano, alteração das propriedades hidráulicas após a fissuração, transporte preferencial através de descontinuidades ou transporte de gás. Portanto, sua aplicação teve caráter preliminar, comparativo e complementar às avaliações experimentais realizadas nesta pesquisa.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a pesquisa, confrontando-os, sempre que possível, com os valores encontrados na literatura e em normativas vigentes.

4.1 Caracterização físico-química, mineralógica e microestrutural

A caracterização físico-química, mineralógica e microestrutural foi realizada para identificar as propriedades dos materiais constituintes e compreender os mecanismos responsáveis pelas alterações observadas no comportamento geotécnico das misturas. Enquanto os ensaios de compactação, permeabilidade, resistência e retração descrevem a resposta macroscópica dos materiais, as análises desta seção permitem relacionar esse comportamento à composição química, às fases minerais, à forma das partículas, à estrutura porosa e às interações desenvolvidas entre solo, cinza e fibras.

Para a caracterização físico-química, foram considerados o solo natural, a cinza leve e as matrizes 90S10C, 80S20C e 70S30C. A composição química e a mineralogia foram avaliadas prioritariamente nos materiais primários (solo e cinza), uma vez que as misturas apresentam combinações das fases originalmente presentes no solo e na cinza. Para a análise morfológica e microestrutural, foram selecionados uma amostra dos cinco grupos representativos: solo natural; cinza leve; solo reforçado com fibra, representado pela amostra S0.75F12; matriz solo-cinza, representada pela amostra 80S20C; e mistura ternária, representada por 80S20C0.75F12.

4.1.1 Propriedades físico-químicas (pH, CE, CTC e MO)

A Tabela 3 apresenta os resultados de pH, condutividade elétrica, capacidade de troca catiônica e matéria orgânica do solo, da cinza leve e das matrizes solo-cinza.

O solo natural apresentou pH igual a 6,81, caracterizando um meio próximo da neutralidade, enquanto a cinza leve apresentou pH de 10,28, evidenciando seu caráter alcalino. A incorporação da cinza promoveu aumento progressivo da alcalinidade das matrizes, com valores de 7,55, 8,73 e 9,02 para as misturas 90S10C, 80S20C e 70S30C, respectivamente. Observa-se, entretanto, que essa elevação não ocorreu de forma linear em relação ao teor de

cinza incorporado. A adição inicial de 10% foi suficiente para deslocar significativamente o pH da condição próxima da neutralidade para um meio levemente alcalino, enquanto os incrementos posteriores produziram variações mais discretas, indicando aproximação gradual do equilíbrio químico imposto pela cinza.

Tabela 3 - Propriedades físico-químicas dos materiais e das matrizes solo-cinza.

Material	pH	CE (dS/m)	CTC (cmolc/kg)	Matéria orgânica (g/kg)
Solo (S)	6,81	0,58	5,3	5,60
90S10C	7,55	2,53	40,9	6,84
80S20C	8,73	2,93	61,7	8,92
70S30C	9,02	2,95	85,7	10,37
Cinza leve (C)	10,28	2,96	163,4	22,81

Fonte: Autor (2026).

Esse comportamento é compatível com a composição típica de cinzas leves de carvão mineral, cuja alcalinidade está associada principalmente à presença de óxidos e sais de cálcio, magnésio e outros constituintes alcalinos. A intensidade desse efeito depende tanto da composição mineralógica do carvão quanto das condições de combustão e do sistema de coleta empregado, fatores que conferem ampla variabilidade às propriedades químicas desse resíduo (Adriano *et al.*, 1980; Shaheen; Hooda; Tsadilas, 2014).

A elevação do pH modifica as condições físico-químicas da matriz, influenciando as cargas superficiais dependentes do pH, a concentração de cátions na solução dos poros e a espessura da dupla camada difusa. Essas alterações podem favorecer mudanças na interação entre as partículas e na organização estrutural do material. Todavia, seus efeitos não devem ser analisados isoladamente, uma vez que o comportamento das misturas resulta da atuação conjunta das características granulométricas, mineralógicas e químicas. Assim, as implicações dessas modificações sobre as propriedades geotécnicas serão discutidas de forma integrada nos tópicos específicos deste capítulo.

A condutividade elétrica aumentou de 0,58 dS/m no solo natural para 2,53 dS/m na mistura contendo 10% de cinza, atingindo posteriormente valores de 2,93 e 2,95 dS/m para as matrizes 80S20C e 70S30C, respectivamente, praticamente coincidentes com o valor obtido para a cinza pura (2,96 dS/m). Assim como observado para o pH, a maior alteração ocorreu com a primeira incorporação de cinza, enquanto os acréscimos posteriores foram pouco expressivos. Esse comportamento indica que a disponibilidade de espécies iônicas na solução dos poros tende a atingir rapidamente um novo equilíbrio químico, sendo influenciada pelos

processos de dissolução e precipitação dos constituintes presentes na cinza e por sua interação com a matriz do solo. Como a condutividade elétrica representa apenas uma medida indireta da concentração total de íons dissolvidos, esse parâmetro deve ser interpretado como um indicador comparativo do ambiente químico das misturas, não permitindo identificar individualmente as espécies presentes nem sua mobilidade ambiental. Resultados semelhantes são reportados por Shaheen, Hooda e Tsadilas (2014), que destacam a influência dos sais solúveis presentes nas cinzas sobre a química da solução dos poros.

No que diz respeito a capacidade de troca catiônica, o solo apresentou CTC de 5,3 cmolc/kg. Esse valor é compatível com uma matriz de baixa atividade, cuja fração argilosa é predominantemente constituída por caulinita. A incorporação da cinza aumentou a CTC para 40,9 cmolc/kg em 90S10C, 61,7 cmolc/kg em 80S20C e 85,7 cmolc/kg em 70S30C. A cinza leve apresentou 163,4 cmolc/kg. Esse incremento evidencia que a presença da cinza alterou significativamente a capacidade das matrizes de reter e disponibilizar cátions. Entretanto, diferentemente do que ocorre em argilominerais expansivos, a elevada CTC observada em cinzas alcalinas não deve ser interpretada como indicativo de elevada atividade mineralógica ou potencial expansivo. Nesses materiais, o resultado pode refletir simultaneamente o efeito do elevado pH, das cargas superficiais dependentes do meio químico, da presença de bases trocáveis e da extração parcial de constituintes solúveis durante o ensaio. Dessa forma, a elevada CTC está mais relacionada à reatividade superficial e à composição química da cinza do que à existência de estruturas lamelares expansivas típicas de esmectitas ou outros argilominerais de alta atividade.

Já o teor de matéria orgânica foi de 5,60 g/kg para o solo e aumentou gradativamente com o teor de cinza. Foram obtidos 6,84 g/kg para 90S10C, 8,92 g/kg para 80S20C e 10,37 g/kg para 70S30C. A cinza leve apresentou 22,81 g/kg. Em materiais dessa natureza, entretanto, o parâmetro matéria orgânica não representa matéria orgânica humificada, como ocorre em solos naturais, estando associado predominantemente ao carbono residual proveniente da combustão incompleta do carvão. O teor obtido para a cinza corresponde a aproximadamente 2,3% de sua massa, indicando a presença de carbono não queimado, porém sem caracterizar predominância de material carbonáceo, uma vez que sua composição permanece essencialmente mineral. Conforme apontado por Haider *et al.* (2022), embora essa fração possa contribuir para processos de adsorção de água e de compostos orgânicos, sua influência ocorre em conjunto com a mineralogia, a estrutura porosa e as demais características físico-químicas

da matriz, não sendo suficiente, isoladamente, para explicar o comportamento geotécnico das misturas.

Os resultados demonstraram que a adição da cinza provocou três alterações principais, a elevação do pH, o aumento da concentração de espécies iônicas solúveis, e o aumento da capacidade de retenção e disponibilização de cátions. Observa-se ainda que as maiores modificações ocorreram com a incorporação inicial de 10% de cinza, enquanto os incrementos subsequentes produziram variações progressivamente menores, indicando aproximação gradual das propriedades químicas das misturas às características da própria cinza.

Esses resultados evidenciam que a incorporação da cinza modifica significativamente o meio físico-químico das matrizes solo-cinza, estabelecendo condições distintas daquelas observadas no solo natural. A influência dessas alterações sobre o comportamento volumétrico, hidráulico e sobre os mecanismos de transporte de gases será analisada de forma integrada nas seções subsequentes, à medida que forem apresentados os respectivos resultados experimentais.

4.1.2 Composição química e mineralógica

A caracterização química e mineralógica dos materiais foi realizada por meio de técnicas complementares de fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX). Enquanto a fluorescência de raios X permitiu determinar a composição química global dos materiais, a difração de raios X foi empregada para identificar as principais fases mineralógicas presentes. A análise conjunta dessas técnicas fornece informações essenciais para a compreensão das propriedades físico-químicas das matrizes e para a interpretação dos resultados geotécnicos apresentados nas seções subsequentes.

4.1.2.1 Fluorescência de Raios-X

A composição química global do solo e da cinza leve foi determinada por fluorescência de raios X. Os resultados estão dispostos na Tabela 4.

O solo apresentou composição predominantemente silicoaluminosa, com teores de 56,09% de SiO_2 e 23,44% de Al_2O_3 , que juntos correspondem a aproximadamente 79,5% da composição analisada. Esse resultado é compatível com solos tropicais altamente intemperizados, nos quais a sílica ocorre predominantemente na forma de quartzo, enquanto o alumínio está associado principalmente à caulinita e a outros aluminossilicatos. O teor de Fe_2O_3 ,

correspondente a 9,73%, também é expressivo e está de acordo com a presença de óxidos e hidróxidos de ferro, característica corroborada pela identificação, durante a caracterização de campo, de concreções lateríticas distribuídas na massa do solo. A reduzida participação de CaO (3,74%) e SO₃ (0,32%) é coerente com as propriedades físico-químicas anteriormente apresentadas, particularmente o pH próximo da neutralidade e a baixa condutividade elétrica.

Tabela 4 - Composição química do solo e da cinza leve.

Componente	Solo (%)	Cinza leve (%)
SiO ₂	56,09	27,78
Al ₂ O ₃	23,44	8,93
Fe ₂ O ₃	9,73	15,02
CaO	3,74	32,51
SO ₃	0,32	12,31
K ₂ O	3,41	1,74
TiO ₂	2,62	1,38
SrO	0,04	0,26
MnO	0,11	—
ZrO ₂	0,18	—
Cl	0,32	0,08

Fonte: Autor (2026).

A cinza leve apresentou composição significativamente distinta da observada para o solo, sendo constituída principalmente por CaO (32,51%), SiO₂ (27,78%), Fe₂O₃ (15,02%), SO₃ (12,31%) e Al₂O₃ (8,93%). A soma dos óxidos de silício, alumínio e ferro correspondeu a aproximadamente 51,7%, enquanto CaO e SO₃ totalizaram cerca de 44,8%, evidenciando uma composição química marcada tanto pela fração silicoaluminosa quanto pela elevada participação de compostos cálcicos e sulfatados. Essa composição difere daquela normalmente observada em cinzas volantes de baixo teor de cálcio (Classe F), caracterizadas pelo predomínio de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, aproximando-se de materiais com maior participação de compostos cálcicos, e classificando a cinza do presente trabalho, como Classe C. Destaca-se que a composição química das cinzas de carvão mineral apresenta elevada variabilidade, sendo influenciada pela natureza do carvão, pelas condições de combustão, pela temperatura de operação, pelo sistema de coleta das partículas e pelos processos de controle de emissões atmosféricas, conforme aponta Shaheen, Hooda e Tsadilas (2014). Em função dessas características, podem ser encontradas diferentes proporções de fases vítreas e cristalinas, incluindo quartzo, cal livre, calcita, anidrita, gipsita e silicatos ou aluminatos de cálcio.

O elevado teor de CaO é compatível com o caráter alcalino anteriormente observado para a cinza, enquanto a concentração de SO₃ indica a presença de compostos sulfatados, frequentemente associados à formação de anidrita ou gipsita em materiais dessa natureza. Em conjunto, esses constituintes contribuem para explicar as maiores concentrações de espécies iônicas dissolvidas, a maior condutividade elétrica e o aumento da capacidade de troca catiônica verificados no resíduo, embora a identificação das fases minerais responsáveis por esse comportamento dependa de técnicas mineralógicas específicas.

Embora os teores de SiO₂ e Al₂O₃ indiquem disponibilidade de constituintes potencialmente reativos, sua presença isolada não permite inferir atividade pozolânica. A reatividade das cinzas depende, entre outros fatores, da fração amorfa do material, da disponibilidade de cálcio, da finura das partículas, das condições de cura e do ambiente químico em que ocorre a reação (Mehta; Monteiro, 2014). Como a fluorescência de raios X fornece apenas a composição química global dos materiais, a identificação das fases cristalinas e a estimativa da fração amorfa requerem técnicas complementares, como a difração de raios X.

4.1.2.2 Difração de Raios-X

A difração de raios X foi utilizada para identificar as principais fases cristalinas do solo e da cinza leve. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

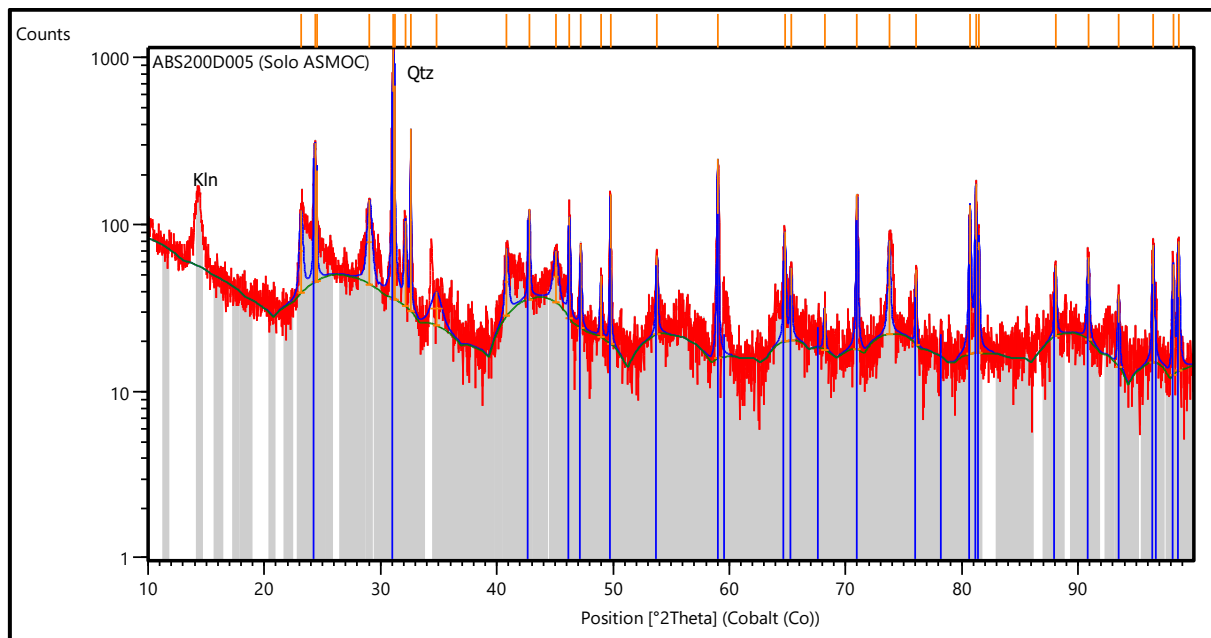
Tabela 5 - Fases minerais identificadas no solo e na cinza leve.

Amostra	Nome do mineral	Nome do componente	Fórmula química
Solo	Quartzo	Dióxido de Silício	SiO ₂
	Caulinita	Hidróxido de Silicato de Alumínio	Al ₂ (Si ₂ O ₅). (OH) ₄
	Albita (Plagioclásios)	Silicato de Alumínio e Sódio	Na(AlSi ₃ O ₈)
	Diopsídio (Clinopiroxenos)	Silicato de Cálcio Magnésio, Ferro	Ca _{1.022} (Mg _{0.906} Fe _{0.095}) ((Si _{1.9} Fe _{0.099})O ₆)
Cinza Leve	Gipsita	Sulfato de Cálcio Hidratado	CaSO ₄ .2H ₂ O
	Calcita	Carbonato de Cálcio	Ca(CO ₃)
	Zeólita	Óxido de Silício	Na ₁₂ [(AlO ₂) ₁₂ (SiO ₂) ₁₂].27H ₂ O
	Quartzo	Dióxido de Silício	SiO ₂

Fonte: Autor (2026).

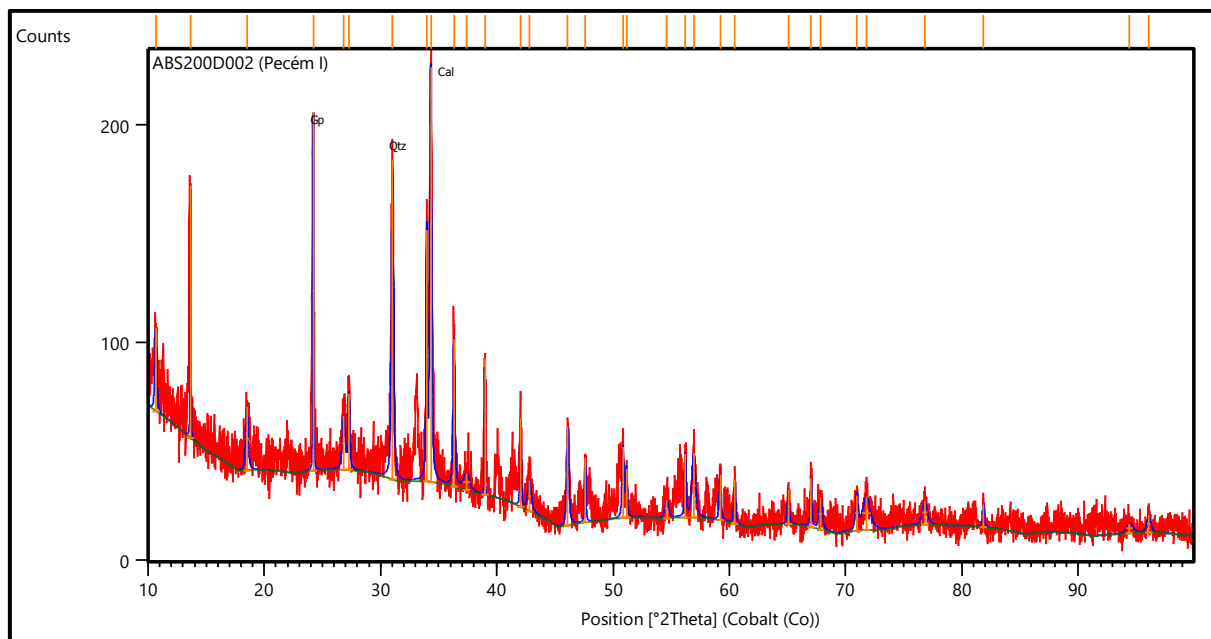
As figuras 26 e 27 apresentam os difratogramas obtidos para o solo e para a cinza analisada.

Figura 26 - Difratograma obtido da análise DRX da amostra de solo.



Fonte: Autor (2026).

Figura 27 - Difratograma obtido da análise DRX da amostra de cinza leve.



Fonte: Autor (2026).

No solo foram identificadas as fases minerais quartzo, caulinita, albita e diopsídio. O quartzo constitui a principal fase cristalina não argilosa, resultado compatível com o elevado

teor de SiO_2 determinado por fluorescência de raios X. A caulinita foi identificada como o principal argilomineral, corroborando a composição silicoaluminosa anteriormente observada. Também foram identificadas pequenas quantidades de albita, pertencente ao grupo dos feldspatos, e diopsídio, um silicato de cálcio e magnésio, que compõem a fração mineral acessória do solo.

A predominância de caulinita é compatível com os resultados físico-químicos obtidos anteriormente, especialmente com a baixa capacidade de troca catiônica. Esse argilomineral possui estrutura cristalina do tipo 1:1, caracterizada por reduzida área superficial específica e baixa atividade quando comparada a minerais expansivos, como as esmectitas (Mitchell; Soga, 2005). Dessa forma, a mineralogia identificada indica um material de baixa atividade, embora esse aspecto, isoladamente, não seja suficiente para caracterizar seu comportamento geotécnico.

Caso o solo venha a apresentar retração elevada durante a secagem, esse comportamento não deverá ser interpretado como incompatível com a mineralogia determinada. Embora a composição da fração argilosa (tipo de argilomineral) exerça influência sobre as variações volumétricas, a retração também depende de fatores como o teor de finos, a estrutura e o arranjo das partículas, a umidade inicial, a densidade de compactação e a trajetória de secagem. Desse modo, mesmo em solos predominantemente caulíníticos e na ausência de argilominerais expansivos, poderão ocorrer deformações volumétricas decorrentes da perda de umidade, dependendo das características estruturais e das condições da matriz.

Na cinza leve foram identificados quartzo, calcita e gipsita. Também foi observado um conjunto de reflexões de baixa intensidade associado a uma fase aluminossilicática, inicialmente relacionada a material possivelmente zeolítico. Entretanto, a identificação dessa fase requer análises complementares, como refinamento estrutural pelo método de Rietveld ou outras técnicas mineralógicas, não sendo possível confirmar sua natureza apenas a partir do difratograma obtido.

A gipsita é coerente com os elevados teores de CaO e SO_3 . A calcita contribui para o teor de cálcio e para o caráter alcalino do resíduo. O quartzo, por sua vez, corresponde a uma fase relativamente estável durante a combustão do carvão, sendo frequentemente preservado nas cinzas em função de sua elevada estabilidade térmica. A identificação conjunta dessas fases demonstra boa concordância entre os resultados obtidos por FRX e DRX, uma vez que os principais constituintes químicos determinados por fluorescência foram associados às respectivas fases cristalinas identificadas por difração.

A mineralogia observada diferencia a cinza estudada daquelas em que quartzo e mulita constituem as fases cristalinas predominantes, situação frequentemente encontrada em cinzas volantes de baixo teor de cálcio. Conforme apontado por Heidrich, Feuerborn e Weir (2013) a composição mineralógica das cinzas é fortemente influenciada pela origem geológica do carvão, pelas condições de combustão e pelos processos de resfriamento das partículas, podendo resultar em diferentes proporções de quartzo, calcita, anidrita, gipsita, silicatos de cálcio e fases vítreas.

Cabe destacar que a difração de raios X identifica predominantemente fases cristalinas. Em cinzas de carvão mineral, parcela significativa do material pode estar presente na forma amorfa ou vítrea, normalmente evidenciada por uma elevação difusa da linha de base dos difratogramas. Embora esse comportamento possa ser observado qualitativamente, a técnica empregada não permite quantificar essa fração sem procedimentos específicos de refinamento, razão pela qual não é adequado atribuir percentuais de material amorfo apenas com base na interpretação visual do difratograma.

4.1.3 Superfície específica e estrutura porosa

A superfície específica do solo natural e da cinza leve foi determinada pelo método de retenção do éter monoetílico do etilenoglicol (EMEG). O procedimento baseia-se na retenção de uma camada do líquido polar sobre as superfícies acessíveis das partículas, permitindo estimar a área superficial por unidade de massa do material. Por empregar uma molécula polar, o método representa a superfície hidratável acessível ao EMEG, incluindo superfícies externas e, quando acessíveis, superfícies internas dos constituintes minerais (Carter; Heilman; Gonzalez, 1965; Cerato; Lutenegeger, 2002). A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para os dois materiais primários.

Tabela 6 - Superfície específica do solo e da cinza leve determinada pelo método EMEG.

Material	Superfície específica (m ² /g)
Solo natural	39,94
Cinza leve	6,14

Fonte: Autor (2026).

O solo natural apresentou superfície específica de 39,94 m²/g, valor substancialmente superior ao determinado para a cinza leve, de 6,14 m²/g. Essa diferença indica que o solo possui maior área superficial acessível por unidade de massa e, conseqüentemente, maior potencial de interação superficial com a água e com as espécies químicas presentes na solução dos poros.

Destaca-se que para análise foi utilizada apenas a fração fina do solo. A maior superfície específica do solo é coerente com a presença de partículas finas, agregados de geometria irregular e argilominerais, principalmente caulinita, identificada na análise mineralógica. Embora a caulinita apresente superfície específica e atividade inferiores às de argilominerais expansivos, como as esmectitas, sua presença, associada aos óxidos, hidróxidos e demais partículas finas do solo, contribui para o aumento da superfície acessível ao EMEG.

A predominância de caulinita identificada nos solos da Formação Barreiras da Região Metropolitana de Fortaleza é compatível com valores relativamente baixos a intermediários de área superficial específica. Em frações argila de solos desenvolvidos sobre sedimentos correlatos do Grupo Barreiras, Fonseca (1986) encontrou valores entre 69 e 111 m²/g pelo método EGME, enquanto Lima Neto *et al.* (2009) reportaram valores entre 24 e 36 m²/g por adsorção de vapor d'água, evidenciando a influência do método analítico e da composição mineralógica sobre os resultados. Entretanto, a comparação deve considerar que solos naturais não são constituídos exclusivamente por caulinita e podem conter óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, minerais interestratificados e diferentes proporções de partículas finas.

A cinza leve apresentou superfície específica inferior à do solo, comportamento compatível com sua morfologia predominantemente formada por partículas arredondadas ou aproximadamente esféricas, muitas delas com superfícies externas relativamente regulares. Além disso, parte de seus constituintes encontra-se organizada em fases vítreas ou cristalinas que não apresentam a estrutura lamelar e a superfície hidratável características dos argilominerais.

O valor obtido para a cinza encontra-se na faixa reportada para resíduos semelhantes. Diatta *et al.* (2017), utilizando o método EMEG, determinaram superfície específica de 6,82 m²/g para uma cinza leve de carvão mineral e de 4,37 m²/g para uma cinza de fundo. Os autores associaram esses valores relativamente baixos às características mineralógicas e morfológicas dos resíduos.

A menor superfície específica da cinza ajuda a explicar seu comportamento não plástico e sua menor capacidade de retenção de água por mecanismos superficiais quando comparada ao solo. Nas misturas solo-cinza, a substituição parcial da fração mineral do solo por partículas de cinza tende, portanto, a reduzir a área superficial média da matriz. Essa alteração contribui para a diminuição da quantidade de água associada às superfícies das partículas e pode propiciar a redução dos limites de consistência e da retração com o aumento do teor de cinza. Entretanto, a menor superfície específica da cinza não deve ser interpretada como ausência de porosidade ou de reatividade. Além disso, a reatividade do resíduo depende não apenas de sua superfície específica, mas também da composição química, da proporção de fases amorfas, da alcalinidade, da solubilidade dos constituintes e das condições de umidade e cura.

Dessa forma, os resultados demonstram que o solo apresenta maior capacidade de interação superficial, enquanto a cinza possui uma superfície acessível mais reduzida. A incorporação da cinza modifica, assim, a natureza das superfícies presentes na matriz, reduzindo proporcionalmente a participação da fração argilosa e contribuindo para as possíveis alterações, na demanda de água e na estabilidade dimensional das misturas.

4.1.4 Morfologia e microestrutura (Microscopia Eletrônica de Varredura- MEV)

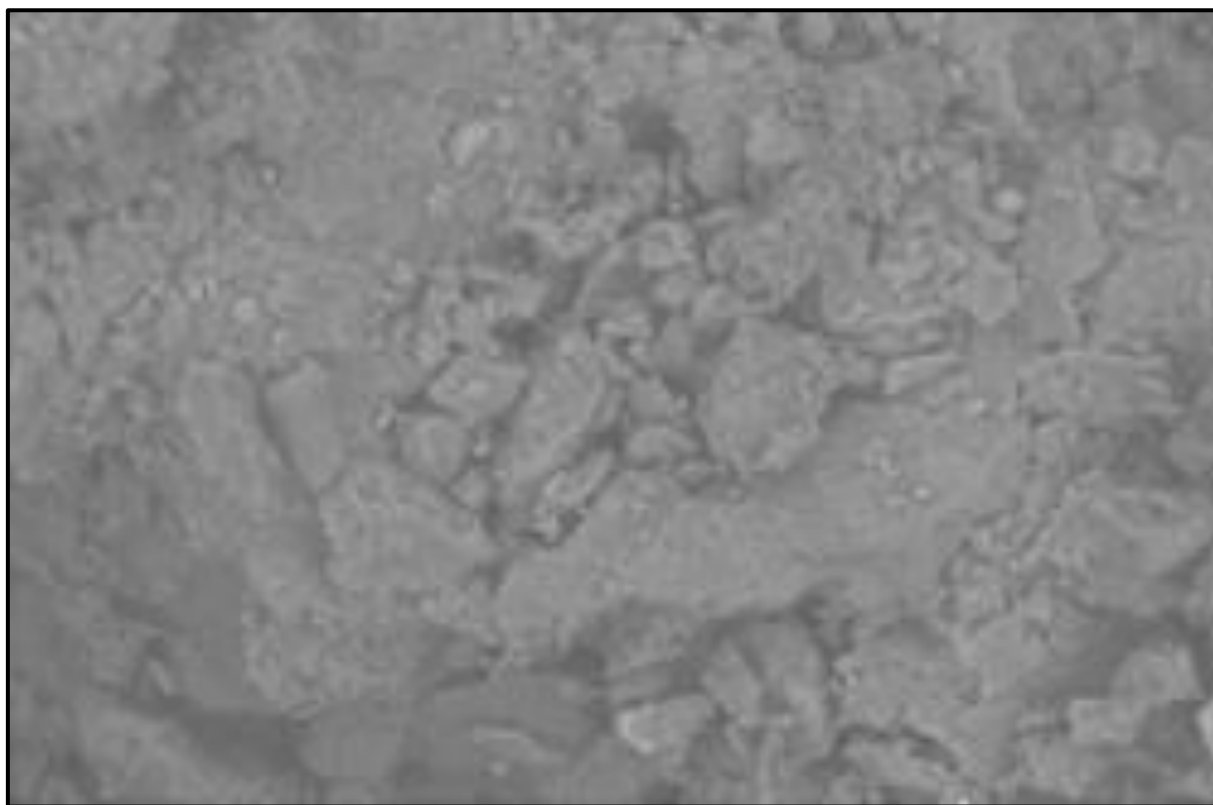
A microscopia eletrônica de varredura foi empregada para avaliar a forma das partículas, a organização dos agregados, a distribuição qualitativa dos vazios e as interfaces entre os constituintes. As micrografias representam regiões restritas de pequenos fragmentos. Portanto, não foram empregadas para quantificar a porosidade global ou afirmar que a estrutura observada ocorre uniformemente em todo o corpo de prova. Descontinuidades produzidas durante a fragmentação e a preparação das amostras também devem ser diferenciadas de vazios ou fissuras previamente existentes.

As micrografias obtidas por MEV foram registradas com diferentes aumentos em função das características morfológicas e dimensionais dos materiais analisados. Nas amostras primárias, solo e cinza apresentaram partículas com dimensões e feições distintas, exigindo aumentos específicos para a adequada visualização dos detalhes microestruturais, sendo necessário maior aumento para a observação da fração argilosa do solo em comparação às partículas de cinza. Nas misturas solo-cinza-fibra, essa diferença de escala torna-se ainda mais evidente, uma vez que as fibras de polipropileno possuem dimensões significativamente

superiores às partículas minerais da matriz. Dessa forma, não é possível observar, com o mesmo aumento, todos os constituintes com igual nível de detalhe. Assim, nas micrografias das misturas, optou-se por aumentos que permitissem identificar principalmente a interação entre as fibras e a matriz mineral, sem prejuízo da interpretação qualitativa da organização microestrutural dos materiais.

A micrografia do solo (Figura 28) apresentou estrutura composta por agregados irregulares, partículas lamelares e partículas angulares ou subangulares. A matriz mostrou aspecto relativamente contínuo, com partículas finas ocupando parte dos espaços entre os grãos de maiores dimensões.

Figura 28 - Micrografia do solo aumentada x1000.



Fonte: Autor (2026).

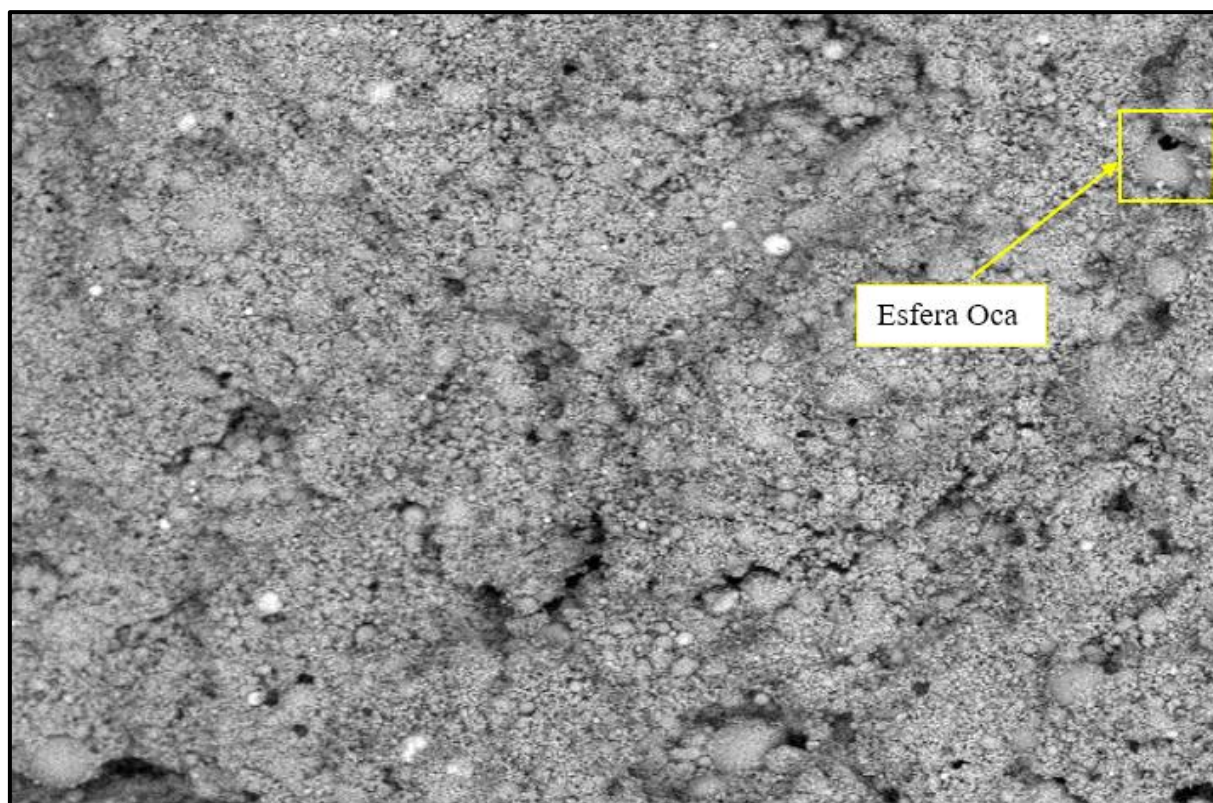
As partículas lamelares podem ser associadas aos argilominerais presentes, principalmente à caulinita, enquanto as partículas angulares e subangulares correspondem predominantemente à fração quartzosa e aos demais minerais não argilosos. Segundo Mitchell e Soga (2005), a organização dos agregados e os contatos entre partículas exercem influência significativa sobre o comportamento dos solos, sendo a resposta macroscópica resultado da interação entre composição mineralógica, estrutura e condições de compactação.

A análise de EDS mostrou uma composição localizada com predominância de silício e alumínio, em concordância com o FRX e o DRX. A presença secundária de ferro, potássio, magnésio, cálcio e titânio é compatível com os minerais acessórios e com óxidos ou hidróxidos presentes na matriz.

A estrutura relativamente contínua do solo contribui para sua baixa condutividade hidráulica. Entretanto, a quantidade de finos e a umidade inicial elevada favorecem a retração durante a secagem, especialmente quando a deformação é restringida.

A micrografia da cinza (Figura 29) revelou morfologia substancialmente distinta daquela observada no solo, caracterizada pela presença de partículas aproximadamente esféricas, partículas ocas ou parcialmente fraturadas, aglomerados e fragmentos irregulares. Essa morfologia é típica de cinzas leves de carvão mineral e resulta da fusão parcial dos constituintes minerais durante a combustão, seguida de resfriamento rápido das partículas transportadas pelos gases (Vassilev; Vassileva, 2007).

Figura 29 - Micrografia da cinza aumentada x100.



Fonte: Autor (2026).

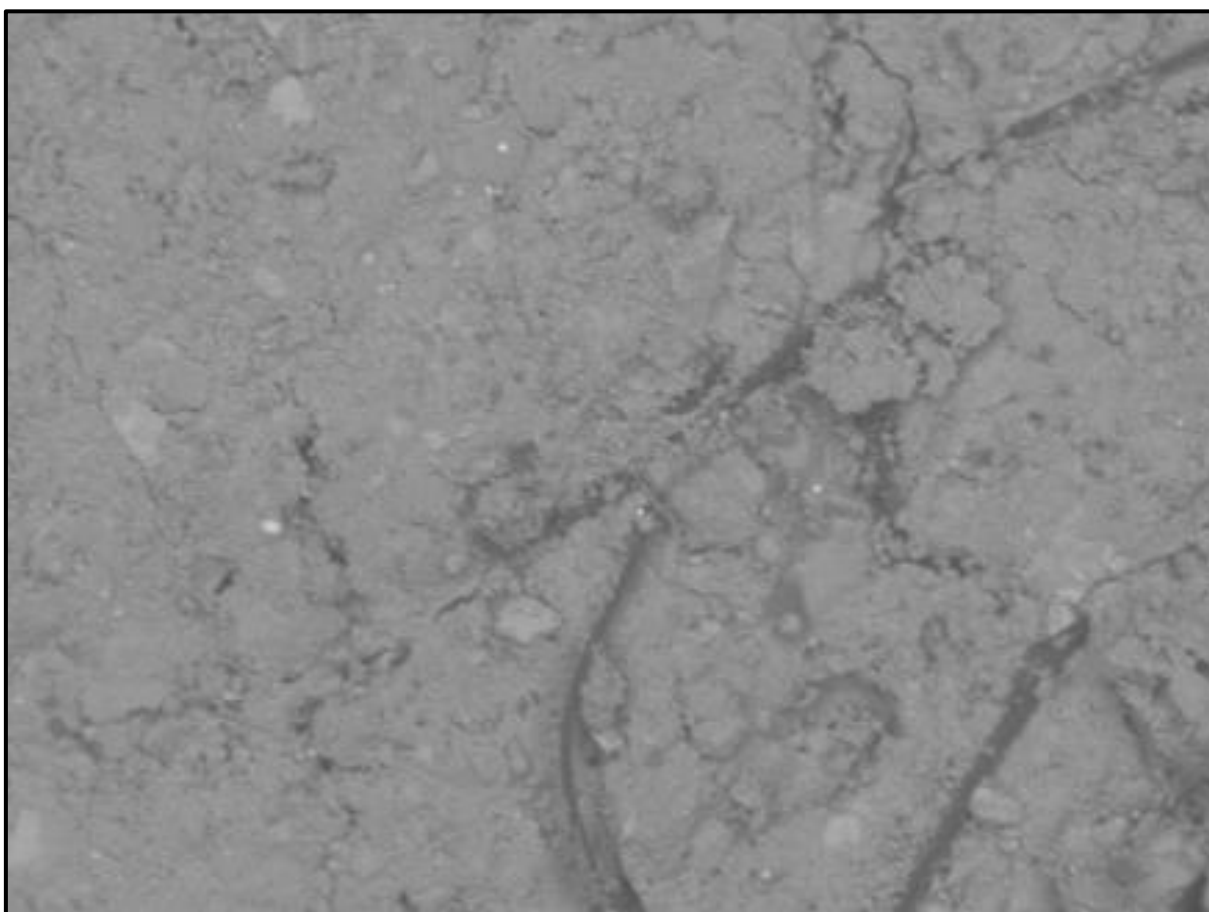
As partículas esféricas são formadas durante a combustão quando componentes minerais fundem ou amolecem e são transportados pelos gases. A tensão superficial favorece a

geometria esférica, que é preservada durante o resfriamento. A liberação de gases durante a solidificação pode produzir partículas ocas, denominadas *cenospheres*, embora nem toda partícula esférica observada deva ser classificada como oca. A presença de esferas quebradas expõe cavidades internas e confirma que pelo menos parte das partículas possui estrutura oca ou porosa. A coexistência entre esferas, fragmentos, partículas irregulares e aglomerados evidencia a heterogeneidade morfológica do resíduo.

A análise de EDS evidenciou partículas silicoaluminosas e regiões enriquecidas em ferro, cálcio e enxofre, corroborando a composição química determinada por fluorescência de raios X.

Na mistura S0.75F12 (Figura 30), as fibras de polipropileno foram observadas distribuídas em diferentes orientações no interior da matriz compactada. Em diversas regiões verificou-se o recobrimento parcial das fibras por partículas e agregados do solo, indicando contato físico entre os constituintes.

Figura 30 - Micrografia do compósito S0.75F12 aumentada x200 e detalhes da interface solo-fibra.



Fonte: Autor (2026).

Também foram observados pequenos espaços localizados na interface fibra-matriz. Essas discontinuidades podem estar relacionadas tanto à dificuldade de acomodação do solo junto à superfície relativamente lisa do polímero quanto às alterações ocorridas durante a preparação das amostras ou à própria retração da matriz durante a secagem. A coexistência de regiões com maior contato e outras com pequenos vazios evidencia que a interface solo-fibra apresenta comportamento heterogêneo.

Segundo Tang *et al.* (2007), a contribuição das fibras de polipropileno para o comportamento dos solos está associada principalmente ao desenvolvimento de mecanismos de ponteamto, atrito interfacial, ancoragem mecânica e arrancamento progressivo. As micrografias obtidas neste estudo são compatíveis com esses mecanismos, embora sua efetiva mobilização dependa das condições de carregamento e não possa ser comprovada exclusivamente pela análise microestrutural.

A presença de fibras atravessando discontinuidades pode contribuir para um aumento dos valores de deformação no pico e tenacidade das amostras com adição de fibras. A matriz pode perder parte de sua continuidade, mas os filamentos permanecem mobilizados e retardam a concentração da deformação em um único plano. Os vazios interfaciais também ajudam a interpretar o aumento moderado das propriedades de transporte. Embora a fibra seja impermeável, espaços longitudinais junto à sua superfície podem constituir pequenos trechos preferenciais para o fluxo de água ou ar. O efeito global depende da conectividade desses espaços, que não pode ser determinada apenas por uma micrografia bidimensional.

Na matriz 80S20C (Figura 31), foram identificadas partículas esféricas provenientes da cinza distribuídas entre agregados argilosos e grãos minerais do solo. Em diversas regiões observou-se que a matriz do solo envolve parcialmente essas partículas, preenchendo parte dos espaços originalmente existentes entre elas. Essa configuração modifica o arranjo originalmente dominado por partículas lamelares e grãos angulares, introduzindo contatos entre materiais de morfologias distintas. Embora essa alteração microestrutural possa influenciar o comportamento macroscópico das misturas, a microscopia eletrônica, isoladamente, não permite estabelecer relações quantitativas entre essas feições e as propriedades geotécnicas.

Figura 31 - Micrografia da matriz 80S20C aumentada x100.



Fonte: Autor (2026).

Não foram observadas evidências conclusivas da formação de produtos cimentantes. A aparência mais densa de determinadas regiões pode resultar do próprio processo de compactação, do preenchimento local de vazios ou da fragmentação das amostras durante sua preparação. A confirmação de processos de cimentação exigiria técnicas analíticas complementares.

A mistura 80S20C0.75F12 foi selecionada para representar o grupo ternário. A Figura 32 apresenta a micrografia do compósito e detalhes das interfaces solo–cinza–fibra. Nessa composição a microestrutura passou a reunir três componentes com morfologias distintas: agregados e partículas minerais do solo, partículas aproximadamente esféricas provenientes da cinza e fibras de polipropileno distribuídas na matriz.

Figura 32 - Micrografia da matriz 80S20C0.75F12.



Fonte: Autor (2026).

Foram observadas partículas de cinza junto às fibras, além de regiões nas quais agregados do solo permaneciam aderidos à superfície dos filamentos. Em outros pontos verificaram-se pequenos espaços interfaciais, indicando que a incorporação das fibras modifica localmente a organização da matriz. As fibras que atravessam regiões descontínuas podem restringir a abertura de fissuras e manter a transferência de tensões depois que a matriz perde continuidade. A cinza, por sua vez, reduziu a proporção relativa da fração argilosa e pode contribuir para diminuir a retração.

Os resultados mostram que a incorporação da cinza não representa apenas uma substituição granulométrica. O resíduo alterou o ambiente químico, introduziu fases cálcicas e sulfatadas, modificou os contatos entre partículas e aumentou a heterogeneidade da estrutura porosa.

O espectro de EDS da mistura mostrou predomínio de silício e alumínio, acompanhado pela presença de cálcio e enxofre. O resultado confirma que a região analisada continha simultaneamente a matriz do solo e partículas de cinza. Entretanto, a mesma substituição pode

aumentar a continuidade dos vazios interpartículas. Por esse motivo, a redução da retração com o teor de cinza foi acompanhada por aumento da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar.

De forma geral, as micrografias demonstram que a incorporação da cinza e das fibras altera a organização microestrutural da matriz, aumentando sua heterogeneidade e modificando os contatos entre partículas. As possíveis implicações dessas alterações sobre o comportamento mecânico, hidráulico, volumétrico e de transporte de gases serão discutidas de forma integrada nas seções subsequentes, à luz dos resultados experimentais específicos.

4.2 Análise Ambiental

A análise ambiental da cinza leve foi realizada por meio dos ensaios de lixiviação e solubilização, com o objetivo de verificar a possibilidade de liberação de constituintes inorgânicos quando o resíduo é submetido a diferentes condições de contato com soluções aquosas. Essa caracterização é necessária porque a viabilidade técnica de utilização da cinza em aplicações geotécnicas não depende apenas de seu desempenho mecânico, hidráulico e dimensional, mas também da possibilidade de mobilização de substâncias potencialmente prejudiciais ao meio ambiente.

O ensaio de lixiviação é empregado para avaliar se a liberação de determinados constituintes pode conferir periculosidade ao resíduo. O ensaio de solubilização, por sua vez, avalia a quantidade de substâncias transferidas para a água em uma condição de contato prolongado, permitindo verificar se o material apresenta comportamento inerte.

Nesta seção foram considerados exclusivamente os resultados da cinza leve empregada na presente pesquisa. Os resultados foram comparados aos valores máximos permitidos adotados no programa experimental, conforme a ABNT NBR 10004:2004 e os procedimentos estabelecidos pelas ABNT NBR 10005:2004 e ABNT NBR 10006:2004.

A interpretação concentrou-se nos parâmetros inorgânicos efetivamente analisados. Dessa forma, a classificação apresentada deve ser entendida dentro do conjunto de substâncias avaliadas, uma vez que nem todos os compostos orgânicos e inorgânicos previstos no sistema normativo foram determinados. A Tabela 7 apresenta as concentrações dos ânions determinadas nos extratos lixiviado e solubilizado da cinza leve.

Tabela 7 - Concentrações dos parâmetros aniônicos nos extratos lixiviado e solubilizado da cinza.

Parâmetro	Extrato lixiviado (mg.L ⁻¹)	VMP – lixiviação (mg.L ⁻¹)	Extrato solubilizado (mg.L ⁻¹)	VMP – solubilização (mg.L ⁻¹)	Avaliação
Brometo – Br ⁻	<0,24	—	1,319	—	Sem VMP de comparação
Cloreto – Cl ⁻	36,562	—	125,163	250	Inferior ao VMP
Fluoreto – F ⁻	1,083	150	1,837	1,5	Acima do VMP no solubilizado
Nitrito – NO ₂ ⁻	<0,27	—	3,617	—	Sem VMP de comparação
Nitrato – NO ₃ ⁻	3,376	—	7,930	10	Inferior ao VMP
Fosfato – PO ₄ ³⁻	<0,50	—	<0,50	—	Sem VMP de comparação
Sulfato – SO ₄ ²⁻	427,457	—	2.265,715	250	Acima do VMP no solubilizado

Fonte: Autor (2026).

Nota: (1) o símbolo “<” indica concentração inferior ao limite de quantificação do procedimento analítico. O travessão indica ausência de valor máximo permitido aplicável na tabela de referência utilizada; (2) VMP – Valor Máximo Permitido

No extrato lixiviado, o fluoreto apresentou concentração de 1,083 mg.L⁻¹, valor significativamente inferior ao limite de 150 mg.L⁻¹ estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004. Para os demais ânions determinados, a norma não estabelece valores de referência para esse ensaio. Dessa forma, os parâmetros aniônicos avaliados não indicaram potencial de periculosidade da cinza nas condições de lixiviação adotadas.

No extrato solubilizado, as concentrações de cloreto e nitrato permaneceram abaixo dos respectivos limites normativos, enquanto o fosfato apresentou concentração inferior ao limite de quantificação. Para brometo e nitrito, não há valores máximos estabelecidos na legislação utilizada para comparação.

As não conformidades observadas no ensaio de solubilização restringiram-se ao fluoreto e ao sulfato. O fluoreto apresentou concentração de 1,837 mg.L⁻¹, aproximadamente 22% superior ao limite de 1,5 mg.L⁻¹. O sulfato atingiu 2.265,715 mg.L⁻¹, valor cerca de nove vezes superior ao limite de 250 mg.L⁻¹, constituindo o ânion com maior excedente em relação ao padrão normativo.

A elevada concentração de sulfato é compatível com a caracterização química e mineralógica apresentada anteriormente, na qual foram identificados elevados teores de SO₃ por fluorescência de raios X e a presença de gipsita por difração de raios X. Entretanto, a composição química global do resíduo não permite inferir diretamente sua mobilidade, uma vez que a solubilização dos constituintes depende das fases minerais em que se encontram, de sua

solubilidade e das condições físico-químicas do meio extrator. Conforme discutem Adriano *et al.* (1980) e Shaheen, Hooda e Tsadilas (2014), a liberação de íons provenientes de cinzas de carvão mineral é controlada pela especiação química dos elementos e pelas condições de contato entre o resíduo e a solução, não apenas pela concentração total presente no material. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos para os cátions analisados.

Tabela 8 - Concentrações dos parâmetros catiônicos nos extratos lixiviado e solubilizado da cinza.

Parâmetro	Extrato lixiviado (mg.L ⁻¹)	VMP – lixiviação (mg.L ⁻¹)	Extrato solubilizado (mg.L ⁻¹)	VMP – solubilização (mg.L ⁻¹)	Avaliação
Cádmio – Cd ²⁺	<0,03	0,50	0,047	0,005	Acima do VMP no solubilizado
Cobre – Cu ²⁺	<0,18	—	<0,18	2,00	Inferior ao VMP
Ferro – Fe	0,108	—	<0,05	0,30	Inferior ao VMP
Níquel – Ni	0,132	—	0,088	—	Sem VMP de comparação
Chumbo – Pb ²⁺	0,220	1,00	0,200	0,01	Acima do Vmp no solubilizado

Fonte: Autor (2026).

Nota: (1) o símbolo “<” indica concentração inferior ao limite de quantificação do procedimento analítico. O travessão indica ausência de valor máximo permitido aplicável na tabela de referência utilizada; (2) VMP – Valor Máximo Permitido.

No extrato lixiviado, o cádmio apresentou concentração inferior ao limite de quantificação de 0,03 mg.L⁻¹, permanecendo abaixo do VMP de 0,50 mg.L⁻¹. O chumbo atingiu 0,220 mg.L⁻¹, também inferior ao limite de 1,00 mg.L⁻¹. Dessa forma, os cátions avaliados não apresentaram concentrações capazes de caracterizar toxicidade no ensaio de lixiviação.

No extrato solubilizado, cobre e ferro permaneceram abaixo dos respectivos valores máximos permitidos. O níquel apresentou concentração de 0,088 mg.L⁻¹. O cádmio atingiu 0,047 mg.L⁻¹, aproximadamente 9 vezes o limite de 0,005 mg.L⁻¹. O chumbo apresentou 0,200 mg.L⁻¹, valor 20 vezes superior ao VMP de 0,01 mg.L⁻¹. Apesar de as concentrações absolutas serem relativamente baixas, os limites aplicados ao ensaio de solubilização são mais restritivos, pois seu objetivo é verificar se o resíduo pode ser considerado inerte. Os resultados mostram, portanto, que a cinza possui uma fração solúvel relevante, especialmente associada ao sulfato.

Considerando os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 10004:2004, nenhum dos parâmetros determinados no extrato lixiviado ultrapassou os limites aplicáveis para caracterização da periculosidade. Entretanto, no extrato solubilizado, fluoreto, sulfato, cádmio e chumbo apresentaram concentrações superiores aos respectivos valores máximos permitidos.

Assim, para o conjunto de parâmetros analisados, a cinza foi classificada como *resíduo não perigoso e não inerte (Classe II A)*.

A conclusão deve permanecer restrita aos parâmetros avaliados. Não foram determinadas todas as substâncias previstas para uma classificação ambiental integral, nem foram reavaliadas outras características de periculosidade.

A classificação como resíduo Classe II A não inviabiliza automaticamente a utilização da cinza em aplicações geotécnicas, mas demonstra que o material não deve ser considerado ambientalmente inerte. Seu emprego deve evitar condições que favoreçam contato direto, contínuo e descontrolado com a água

É importante ressaltar que cinzas de carvão mineral podem apresentar variabilidade nos resultados das análises ambientais. Depois, Pozebon e Kalkreuth (2008), ao estudarem resíduos de termelétricas brasileiras, verificaram que a extração aquosa de elementos menores e traços foi geralmente mais elevada nas cinzas leves do que nas cinzas de fundo. Os autores também observaram diferenças expressivas entre resíduos provenientes de diferentes usinas, demonstrando que a origem do carvão e as condições de combustão influenciam a composição e a mobilidade dos constituintes.

Moreno *et al.* (2005) encontraram ampla variação química e mineralógica entre cinzas leves de diferentes termelétricas europeias. Em algumas amostras, as concentrações de elementos lixiviáveis impuseram restrições a determinados usos, indicando que a viabilidade ambiental deve ser avaliada individualmente para cada cinza e não pode ser generalizada apenas pela classificação do material como cinza volante.

Izquierdo e Querol (2012), ao revisarem mais de 90 estudos, demonstraram que parte significativa dos elementos pode permanecer fortemente ligada à matriz da cinza, enquanto outra parcela apresenta mobilidade dependente do pH e da forma mineralógica. Em meios alcalinos, a liberação de cádmio, cobre, níquel e chumbo tende a ser atenuada, embora esse comportamento não impeça que concentrações relativamente baixas ultrapassem limites restritivos de solubilização.

4.3 Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica dos materiais constitui uma etapa fundamental para a compreensão de seu comportamento geotécnico e para a adequada interpretação dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos e hidráulicos. Os parâmetros determinados permitem identificar

características relacionadas à constituição dos materiais, à distribuição granulométrica, ao estado de consistência e às propriedades físicas das partículas sólidas.

4.3.1 *Massa Específica dos Grãos*

A massa específica dos grãos (ou massa específica dos sólidos) foi obtida para o solo puro, a cinza leve (*fly ash*) e as misturas binárias e os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados de Massa Específica dos Grãos.

Material / Mistura	Composição (%)	Massa Específica dos Grãos (ρ_s) (g/cm ³)	Densidade Relativa (G_s)	Variação em relação ao Solo (%)
Solo Puro (S)	100% S	2,66	2,66	-
Mistura 90S10C	90% S + 10% C	2,63	2,63	-1,13%
Mistura 80S20C	80% S + 20% C	2,59	2,59	-2,63%
Mistura 70S30C	70% S + 30% C	2,51	2,51	-5,64%
Cinza Pura (C)	100% C	2,45	2,45	-

Fonte: Autor (2026).

O solo natural utilizado na pesquisa e empregado na camada de cobertura do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), apresentou um valor de 2,66 g/cm³. Este material é coletado em jazida próximo ao aterro, estando o valor condizente com a mineralogia típica de solos argilosos e areno-argilosos da região, compostos predominantemente por quartzo e argilominerais do grupo da caulinita, cujos valores de referência situam-se geralmente entre 2,65 e 2,70 g/cm³. O resultado obtido corrobora os dados de Elias (2018) e Merville (2024) (Tabela 10), que trabalharam com solos da mesma formação geológica, e utilizados no aterro sanitário.

Já a cinza de carvão mineral (C) apresentou uma massa específica de 2,45 g/cm³. Este valor pode ser atribuído ao próprio processo de geração da cinza. Durante a combustão do carvão nas termelétricas, formam-se partículas esféricas (cenosferas) que podem conter ar ou gases aprisionados em seu interior, reduzindo a densidade global do particulado (Hemalatha e Ramaswamy, 2017).

Tabela 10 - Valores de Referência de solos da RMF.

Referência	Material Analisado	ρ_s (g/cm ³)	Observações
Elias (autor) (2026)	RMF - Caucaia	2,66	Foram identificadas, visualmente, pequenas concreções lateríticas.
Merville (2024)	RMF - Caucaia	2,69	-
Bastos (2023)	RMF - Caucaia	2,71	Argila de alta plasticidade
Elias (2018)	RMF - Caucaia	2,64	Argila arenosa
Barroso (2002)	RMF	2,58-2,65	Solos variados da RMF

Fonte: Autor (2026).

Os valores de densidade real obtidos nesta pesquisa estão em consonância com os resultados de Elias (2015), Vasconcelos (2016) e Elias (2018) que reportaram 2,66, 2,46 e 2,64 respectivamente, o mesmo resíduo da UTE Pecém. Em contrapartida, autores como Nardi (1975), Rohde *et al.* (2006) e Bastos (2015) observaram valores ligeiramente inferiores, situados entre 2,15 e 2,32 (Tabela 11). Essas diferenças podem ser atribuídas às variações no processo de geração das cinzas e à natureza do carvão mineral utilizado.

Tabela 11 - Valores de massa específica real dos grãos encontrados em outras pesquisas.

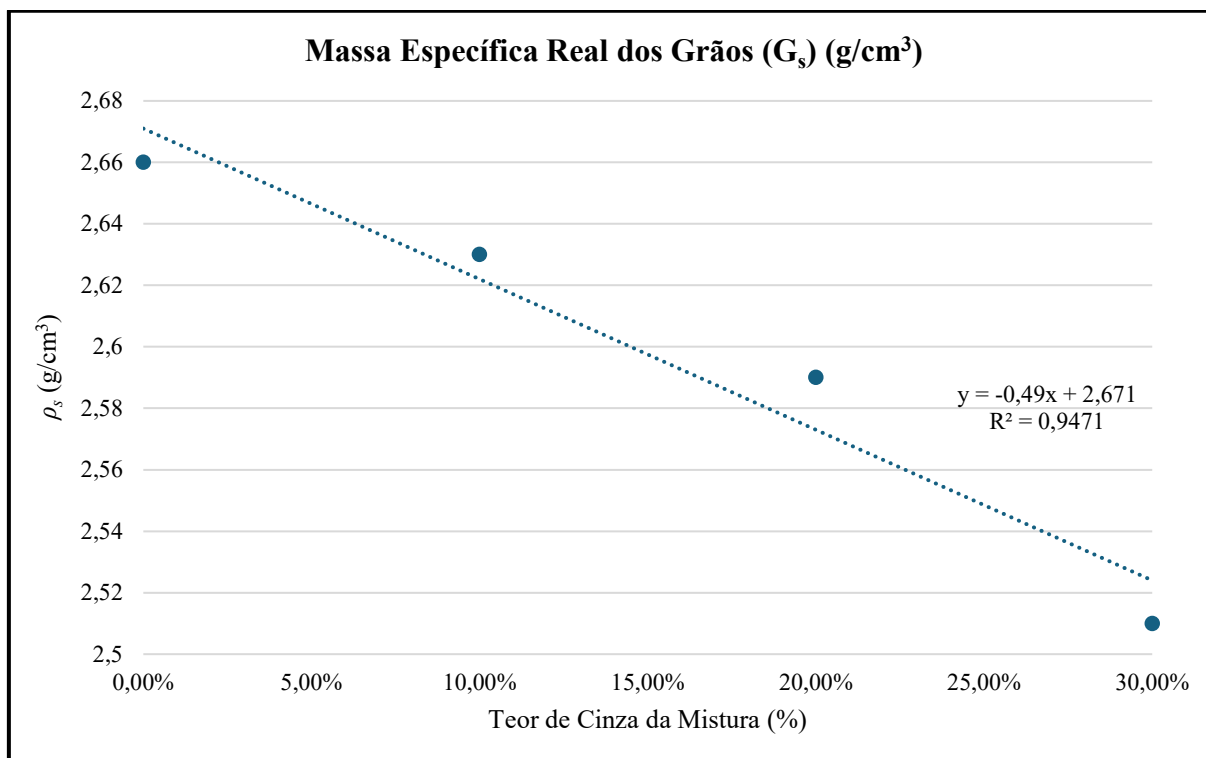
Referência	Material Analisado	ρ_s (g/cm ³)	Gs
Elias (Autor) (2026)	Cinza volante (<i>fly-ash</i>)	2,45	2,45
Elias (2018)	Cinza volante (<i>fly-ash</i>)	2,64	2,64
Feitosa (2018)	Cinza volante (<i>fly-ash</i>)	2,36	2,36
Vasconcelos (2016)	Cinza volante (<i>fly-ash</i>)	2,46	2,46
Elias (2015)	Cinza volante (<i>fly-ash</i>)	2,66	2,66
Nardi (1975); Rohde <i>et al.</i> (2006); Bastos (2015)	Cinza volante (<i>fly-ash</i>)	2,71	2,71

Fonte: Autor (2026).

Para as misturas 90SC10, 80SC20 e 70S30C foram encontrados os valores de massa específica dos sólidos de 2,63, 2,59 e 2,51 g/cm³, respectivamente. A análise dos valores encontrados mostra que a incorporação de cinza ao solo (em teor de até 30% em relação a massa de solo), promove uma redução quase linear ($R^2 > 0,94$) da massa específica real dos grãos da mistura. Este comportamento (Gráfico 2) indica que a mistura ocorre por substituição física

direta de volume, sem reações químicas imediatas que alterem a estrutura cristalina dos grãos nessa fase.

Gráfico 2 - Variação da massa específica das misturas com o incremento do teor de cinza.



Fonte: Autor (2026).

4.3.2 Limites de Consistência (LL, LP e LC)

4.3.2.1 Limites de Liquidez e Plasticidade

Os limites de consistência, ou Limites de Atterberg, foram determinados conforme as normas ABNT NBR 6459/2025 - Determinação do limite de liquidez; ABNT NBR 7180/2025 - Determinação do limite de plasticidade; e através de metodologia adaptada para determinação do limite de contração. Estes parâmetros definem as fronteiras entre os estados de consistência do solo, permitindo a avaliação do seu emprego como camada de cobertura, além de permitir a obtenção de outros parâmetros como, por exemplo, o Índice de Plasticidade (IP).

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para o solo puro, a cinza volante e as misturas solo-cinza.

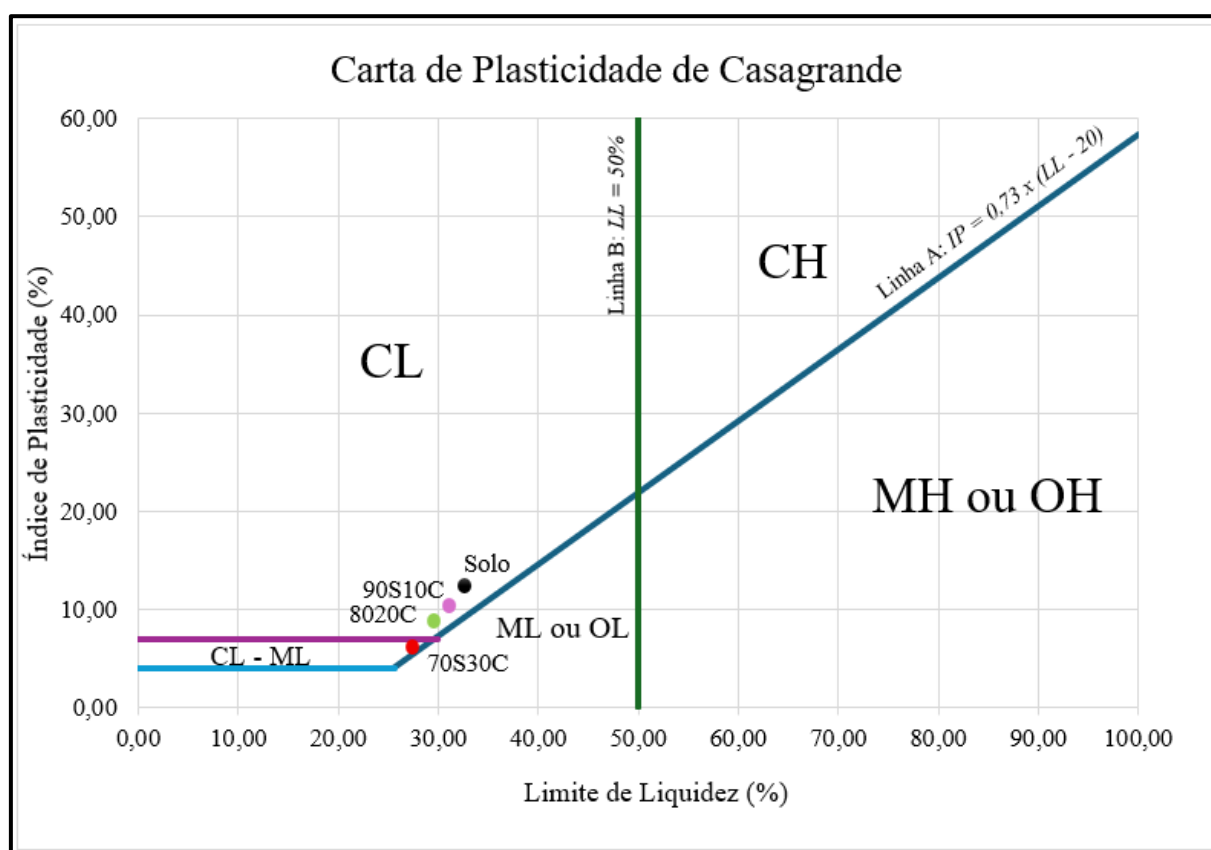
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de determinação dos Limites de Consistência (LL e LP).

Material / Mistura	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo	33,3	19,8	13,5
Cinza	NL	NP	-
90S10C	31,2	21,1	10,1
80S20C	30,0	20,5	9,5
70S30C	27,5	20,7	6,8

Fonte: Autor (2026).

O solo natural coletado no ASMOC apresentou um Limite de Liquidez de 33,3% e um Índice de Plasticidade de 13,5%. Plotando estes valores na Carta de Plasticidade de Casagrande (Gráfico 3), o material situa-se acima da Linha A.

Gráfico 3 - Plotagem dos valores encontrados na Carta de Plasticidade de Casagrande.



Fonte: Autor (2026).

Este resultado está coerente com as características encontradas para solos da Formação Barreiras da região, que frequentemente indicam características texturais similares, como constatado por Barroso (2002). Merville (2024), trabalhando com material da mesma jazida, também identificou um comportamento de plasticidade intermediária, atribuindo-o à

presença significativa de quartzo e caulinita, minerais que conferem menor atividade coloidal se comparados às esmectitas. Ainda assim, um IP de 13,5% indica um material com suscetibilidade moderada a variações volumétricas, exigindo cuidados quanto à retração por secagem em aplicações de cobertura final.

A análise dos resultados encontrados para as misturas mostra que a incorporação progressiva de cinza ao solo promove a redução da plasticidade da mistura. O Índice de Plasticidade decresceu de 13,5% (solo puro) para 6,8% (mistura com 30% de cinza), uma redução de aproximadamente 53%. Ao plotarmos os valores encontrados para as misturas na carta de plasticidade, observa-se os pontos estão "descendo" paralelamente à linha A em direção à zona CL-ML, a medida que o teor de cinza aumenta

Este fenômeno pode ser explicado pela substituição de partículas de argila (material ativo e plástico) por partículas de cinza (material inerte e não plástico). Ao reduzir a fração volumétrica de argilominerais na matriz, diminui-se proporcionalmente a superfície específica disponível para a adsorção de água, resultando em menores valores de Limite de Liquidez.

O aumento observado no Limite de Plasticidade (de 19,8% para 21,1% na mistura com 10% de cinza) sugere uma mudança na demanda de água para que o material comece a apresentar comportamento plástico. A morfologia esférica das cinzas (cenosferas) pode alterar o empacotamento das partículas, exigindo um teor de umidade ligeiramente maior para lubrificar a mistura e permitir a deformação plástica sem ruptura, embora a faixa plástica total (IP) diminua.

A cinza leve, por sua vez, revelou-se um material Não Plástico (NP). A impossibilidade de moldagem do cilindro de 3 mm no ensaio de LP confirma a ausência de coesão verdadeira e a natureza granular fina do resíduo. Esse comportamento corrobora integralmente os estudos de Elias (2015), Vasconcelos (2016) e Elias (2018), que caracterizam a *fly ash* local como um material de comportamento siltoso, constituído por esferas vítreas inertes.

Elias (2018) atribui essa característica à natureza mineralógica do resíduo diferentemente dos argilominerais, que possuem cargas elétricas de superfície e capacidade de troca catiônica (CTC) que atraem moléculas de água (camada dupla difusa), as partículas de cinza são constituídas por aluminossilicatos amorfos eletricamente estáveis.

Vasconcelos (2016), também estudando o resíduo do Pecém para fins de pavimentação, reforça que o caráter não plástico é vantajoso para a estabilidade volumétrica. Materiais NP não sofrem expansão ou contração significativas com a variação de umidade.

Destaca-se que a redução excessiva da plasticidade ($IP < 7\%$) pode levar a um material muito friável e com menor coesão, potencialmente mais suscetível à erosão superficial. O teor de 30% de cinza, resultando em um IP de 6,3%, situa-se no limite inferior recomendado para barreiras impermeáveis, sugerindo que, para esta dosagem, a inclusão das fibras de reforço torna-se ainda mais viável para garantir a integridade mecânica e a resistência à tração do compósito.

4.3.2.2 Fatores de contração e retração volumétrica e linear

A retração por secagem constitui um dos principais mecanismos associados à perda de integridade de camadas de cobertura constituídas por solos compactados. À medida que a água é removida dos poros, desenvolvem-se meniscos e forças capilares que promovem a aproximação entre as partículas e a redução do volume da matriz. Quando essa deformação é restringida pelo atrito entre partículas, pelas condições de contorno ou pela heterogeneidade do material, podem ser mobilizadas tensões de tração e, conseqüentemente, ocorrer a formação de fissuras.

Em camadas de cobertura, essas fissuras podem gerar caminhos preferenciais para a infiltração de água e para o transporte de gases. Entretanto, retração e fissuração não são fenômenos equivalentes. A primeira representa a redução global das dimensões ou do volume do material, enquanto a segunda depende também da resistência à tração, da rigidez, da geometria da camada, das condições de restrição e da velocidade de secagem (Miller; Rifai, 2004; Tang *et al.*, 2012; Al-Jeznawi *et al.*, 2025).

Nesta pesquisa, a estabilidade dimensional das composições foi inicialmente avaliada por meio do limite de contração, da retração volumétrica e da retração linear. Posteriormente, esses resultados serão analisados em conjunto com a evolução da área superficial e da fissuração obtida por análise digital de imagens.

O ensaio foi realizado com base no princípio estabelecido pela ASTM D4943-08, que determina os fatores de contração de solos coesivos a partir da massa, da umidade inicial e do volume final da pastilha seca, obtido por submersão em água. A norma permite determinar o limite de contração, a razão de contração, a retração volumétrica e a retração linear.

A cinza pura não foi incluída nessa avaliação, pois apresentou comportamento não plástico e não permitiu a formação de uma pastilha coesiva estável nas mesmas condições dos

demais materiais. Essa limitação é compatível com o campo de aplicação da ASTM D4943-08, para materiais coesivos.

A Tabela 13 apresenta os resultados médios de umidade inicial, limite de contração, razão de contração, retração volumétrica e retração linear das composições avaliadas.

Tabela 13 - Resultado dos ensaios de determinação dos fatores de contração.

Amostra	$w_i(\%)$	$LC(\%)$	R	$VS(w_i)(\%)$	$LS(w_i)(\%)$
Solo (S)	36,44	16,99	1,828	35,55	9,64
S0.50F12	36,44	17,51	1,798	34,04	9,30
S0.75F12	36,23	17,80	1,784	32,88	9,04
90S10C	34,58	17,30	1,808	31,24	8,66
80S20C	33,10	17,81	1,772	27,10	7,68
70S30C	30,57	18,39	1,717	20,90	6,13
90S10C0.50F12	34,64	17,70	1,783	30,19	8,42
90S10C0.75F12	34,57	17,99	1,768	29,30	8,21
80S20C0.50F12	33,28	18,19	1,750	26,40	7,51
80S20C0.75F12	33,38	18,50	1,735	25,82	7,37
70S30C0.50F12	31,20	18,79	1,696	21,04	6,17
70S30C0.75F12	31,26	19,01	1,684	20,62	6,06

Fonte: Autor (2026).

Os resultados mostram que o solo natural apresentou limite de contração de 16,99%, retração volumétrica de 35,55% e retração linear equivalente de 9,64%. Esses valores foram adotados como referência para avaliar os efeitos das fibras, da cinza e da combinação entre os dois materiais.

O limite de contração das misturas variou de 17,30% a 19,01%, enquanto a retração volumétrica variou de 20,62% a 34,04%. A retração linear situou-se entre 6,06% e 9,30%. Portanto, todas as composições modificadas apresentaram limite de contração superior ao do solo, e quase todas apresentaram menores retrações volumétrica e linear.

A elevação do LC foi acompanhada, de modo geral, por uma redução do intervalo de umidade em que ocorreu a contração ($\Delta w_c = w_i - LC$). No solo, esse intervalo foi de aproximadamente 19,45%. Na composição 70S30C0.75F12, o intervalo foi reduzido para aproximadamente 12,24 %. Essa redução contribuiu diretamente para o menor valor de retração volumétrica da mistura.

A razão de contração diminuiu gradualmente de 1,828, no solo, para valores próximos de 1,68 nas composições com maiores teores de cinza e fibras. Essa tendência indica

a formação de pastilhas secas com menor massa seca por unidade de volume. Entretanto, a diminuição de R não produziu aumento da retração, pois foi acompanhada por uma redução mais expressiva da diferença entre w_i e LC .

A incorporação das fibras de 12 mm ao solo promoveu redução moderada da retração (Tabela 14). A composição S0.50F12 apresentou $VS(w_i) = 34,04\%$, representando redução de aproximadamente 4,2% em relação ao solo. Sua retração linear foi de 9,30%, cerca de 3,5% inferior ao valor de referência. Para S0.75F12, a retração volumétrica foi reduzida para 32,88%, correspondendo a uma diminuição de aproximadamente 7,5%. A retração linear foi de 9,04%, redução de aproximadamente 6,2%.

Tabela 14 - Variação dos fatores de contração das amostras com adição de fibra 12 mm em relação ao solo.

Composição	Variação do LC em relação ao solo	Redução de $VS(w_i)$	Redução de $LS(w_i)$
S0.50F12	+3,0%	4,2%	3,5%
S0.75F12	+4,7%	7,5%	6,2%

Fonte: Autor (2026).

O aumento do teor de fibras de 0,50% para 0,75% ampliou a redução da retração, mas o efeito permaneceu relativamente moderado quando comparado ao produzido pela cinza. As fibras não substituem uma parcela significativa da matriz mineral e, portanto, sua influência sobre a variação volumétrica global tende a ser menor. Sua principal contribuição pode ocorrer na redistribuição das deformações e no controle da abertura e da propagação das fissuras.

Olgun (2013) observou aumento do limite de contração e redução da variação volumétrica de uma argila estabilizada com cinza, cimento e fibras de polipropileno. No estudo, o efeito tornou-se mais evidente com o aumento do teor e do comprimento das fibras, embora a utilização de fibras muito longas ou em teores elevados tenha dificultado a distribuição uniforme do reforço.

Em ensaios de retração, o reforço fibroso também pode reduzir a largura média e o comprimento das fissuras por meio do ponteamto entre suas faces. A magnitude desse efeito depende da aderência solo–fibra, do teor, do comprimento e da distribuição dos filamentos na matriz (Miller; Rifai, 2004; Tang *et al.*, 2012).

Consequentemente, a redução relativamente pequena da retração volumétrica das misturas solo–fibra não significa, necessariamente, pequena eficiência no controle da fissuração. Mesmo quando a variação global de volume permanece próxima à do solo, as fibras

podem distribuir melhor as deformações e restringir a concentração das tensões de tração em uma única fissura de maior abertura.

Já a cinza exerceu influência mais acentuada que as fibras sobre os parâmetros de retração (Tabela 15). À medida que o teor de cinza aumentou, a retração volumétrica foi reduzida progressivamente de 35,55% no solo natural para 31,24%, 27,10% e 20,90% nas misturas 90S10C, 80S20C e 70S30C, respectivamente. Em relação ao solo de referência, essas variações correspondem a reduções de aproximadamente 12,1%, 23,8% e 41,2%, evidenciando uma relação inversa entre o teor de cinza e a magnitude da contração volumétrica durante a secagem.

Tabela 15 - Variação dos fatores de contração das misturas solo-cinza em relação ao solo.

Composição	LC(%)	VS(w_i)(%)	Redução de VS	LS(w_i)(%)	Redução de LS
Solo	16,99	35,55	—	9,64	—
90S10C	17,30	31,24	12,1%	8,66	10,1%
80S20C	17,81	27,10	23,8%	7,68	20,3%
70S30C	18,39	20,90	41,2%	6,13	36,4%

Fonte: Autor (2026).

A retração linear apresentou tendência semelhante, diminuindo de 9,64% no solo natural para 8,66%, 7,68% e 6,13% nas misturas contendo 10%, 20% e 30% de cinza. A composição 70S30C apresentou o menor valor e a maior redução relativa, de aproximadamente 36,4%. Os resultados demonstram que a substituição parcial do solo pela cinza reduziu de forma consistente a variação dimensional da matriz, sendo esse efeito mais pronunciado nas misturas com maiores teores do resíduo.

A substituição parcial da matriz argilosa por partículas predominantemente siltosas também reduz a participação relativa da fração mineral responsável pelas maiores deformações associadas à perda de água. Esse mecanismo deve ser interpretado em conjunto com a alteração da granulometria, da massa específica seca e da estrutura dos poros.

A influência de cinzas sobre a retração não é universal, pois depende de sua composição química e mineralógica, da granulometria, do teor utilizado e da presença de agentes cimentantes. No presente estudo, a evolução gradual da retração com o teor de cinza indica que a substituição física da matriz exerceu papel relevante. A eventual contribuição de reações pozolânicas não pode ser descartada, mas sua confirmação exigiria a identificação de produtos cimentantes por análises mineralógicas ou microestruturais.

A incorporação das fibras às matrizes solo–cinza promoveu reduções adicionais nos parâmetros de retração, especialmente nas composições com 10% e 20% de cinza (Tabela 16).

Tabela 16 - Variação dos fatores de contração das misturas solo-cinza com adição de fibra 12 mm em relação à mesma matriz (mistura solo-cinza).

Amostra	$VS(w_i)(\%)$	$LS(w_i)(\%)$	Redução de VS em relação à matriz	Redução de LS em relação à matriz
90S10C0.50F12	30,19	8,42	3,3%	2,8%
90S10C0.75F12	29,30	8,21	6,2%	5,2%
80S20C0.50F12	26,40	7,51	2,6%	2,2%
80S20C0.75F12	25,82	7,37	4,7%	4,0%
70S30C0.50F12	21,04	6,17	-0,7%	-0,6%
70S30C0.75F12	20,62	6,06	1,3%	1,2%

Fonte: Autor (2026).

Na matriz 90S10C, a retração volumétrica diminuiu de 31,24% para 30,19% e 29,30% com a adição de 0,50% e 0,75% de fibras, respectivamente. Em relação à matriz sem reforço, essas variações correspondem a reduções de aproximadamente 3,3% e 6,2%. A retração linear apresentou comportamento semelhante, passando de 8,66% para 8,42% e 8,21%.

Na matriz 80S20C, a retração volumétrica foi reduzida de 27,10% para 26,40% e 25,82%, enquanto a retração linear diminuiu de 7,68% para 7,51% e 7,37%. Embora os efeitos tenham sido mais discretos que os promovidos pela cinza, os resultados mostram que as fibras contribuíram para limitar as deformações de secagem e melhorar a estabilidade dimensional das misturas.

Para a matriz 70S30C, a contribuição adicional das fibras foi mais discreta. A mistura contendo 0,50% de fibras apresentou retração volumétrica ligeiramente superior à da matriz sem reforço, enquanto a incorporação de 0,75% promoveu redução de apenas 1,3%. Esse comportamento sugere que a substituição de parte da fração fina do solo pela cinza já havia reduzido significativamente o potencial de retração da matriz, limitando os ganhos adicionais proporcionados pelo reforço fibroso. Além disso, a introdução das fibras pode alterar localmente o empacotamento das partículas e a distribuição dos vazios, compensando parcialmente seu efeito restritivo.

A menor retração volumétrica foi obtida para 70S30C0.75F12, com 20,62%, enquanto a menor retração linear foi de 6,06%. Esses resultados correspondem a reduções de aproximadamente 42,0% e 37,2%, respectivamente, em relação ao solo natural.

Os resultados obtidos pelo método da parafina representam a deformação volumétrica global entre a moldagem e a condição seca, mas não permitem identificar os mecanismos pelos quais essa deformação ocorreu. Uma mesma retração volumétrica pode estar associada à formação de poucas fissuras de grande abertura, a uma rede de fissuras finas e distribuídas, à contração periférica sem fissuração significativa ou ainda à combinação desses processos. Além da composição do material, a evolução desse comportamento é influenciada pelas dimensões do corpo de prova, pelas condições de secagem, pela umidade inicial e pelo estado de compactação, conforme discutido por Tang *et al.* (2008) e Tang *et al.* (2011), que demonstraram a influência conjunta desses fatores na evolução da retração e da fissuração em solos compactados.

Dessa forma, o limite de contração, a retração volumétrica e a retração linear devem ser interpretados como indicadores da estabilidade dimensional das misturas, mas não como medidas diretas da intensidade da fissuração. No caso das fibras, esse aspecto é particularmente relevante, pois seu principal mecanismo de atuação consiste no ponteamto das fissuras e na redistribuição das tensões desenvolvidas durante a secagem, efeitos que nem sempre são refletidos por reduções expressivas da retração global (Tang *et al.*, 2012). Assim, pequenas reduções de retração podem estar associadas a alterações significativas na geometria, abertura e conectividade das fissuras.

De forma semelhante, embora a incorporação da cinza reduza a retração global das matrizes, essa condição, isoladamente, não garante melhor desempenho frente à fissuração. A resposta do material depende da interação entre retração, resistência à tração, capacidade de deformação e propagação das fissuras, aspectos que serão analisados de forma integrada nas seções seguintes.

Com o objetivo de superar as limitações inerentes ao método da parafina, o programa experimental incorporou a análise digital de imagens para o acompanhamento da evolução da fissuração durante a secagem. A metodologia empregada permite quantificar parâmetros como área fissurada, largura, comprimento e conectividade das fissuras, além da retração superficial, por meio de registros fotográficos obtidos em condições controladas de iluminação e posicionamento da câmera, associados ao monitoramento simultâneo da massa, da temperatura e da umidade relativa do ambiente.

A análise digital de imagens constitui uma ferramenta complementar aos ensaios convencionais de retração, permitindo acompanhar de forma não destrutiva e temporalmente contínua a evolução da fissuração e fornecendo informações que não podem ser obtidas apenas pela comparação entre os volumes inicial e final dos corpos de prova. Por essa razão, os resultados obtidos por essa técnica serão discutidos na sequência, em conjunto com os parâmetros de estabilidade dimensional apresentados anteriormente.

4.3.3 *Análise Granulométrica*

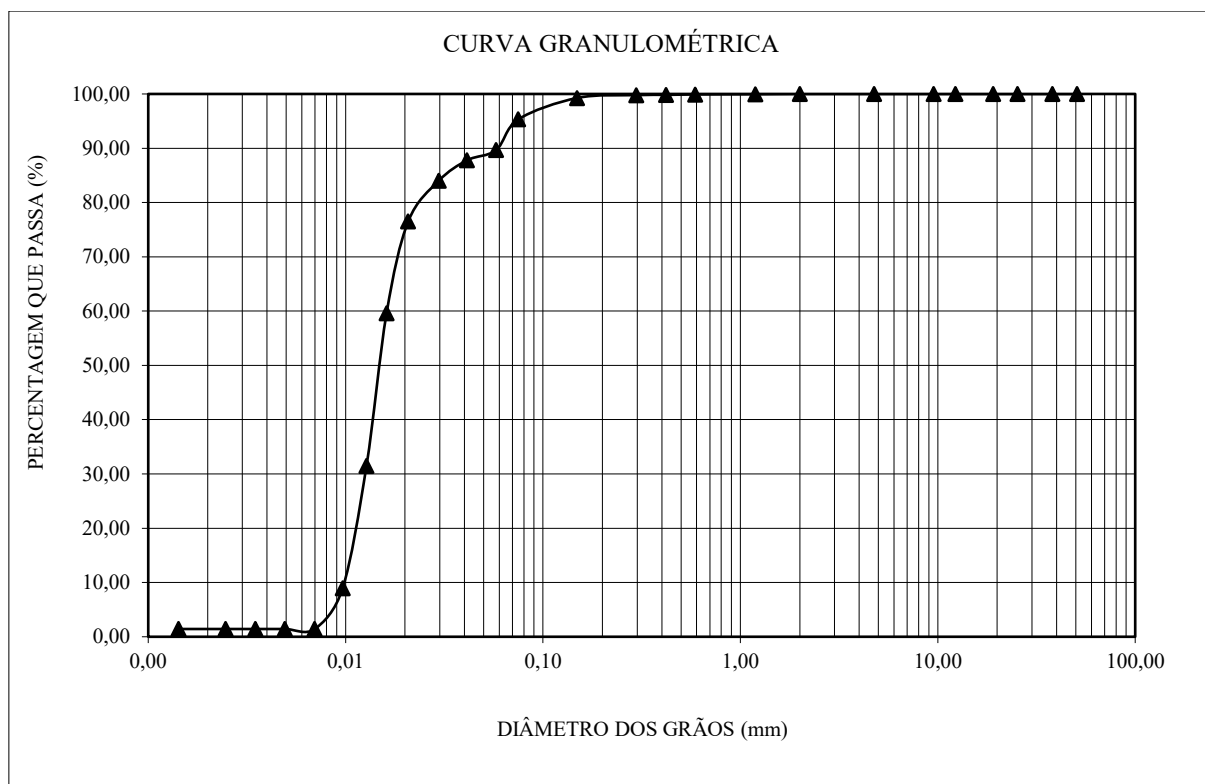
A determinação da composição granulométrica das amostras foi realizada por meio de peneiramento e sedimentação, conforme a norma ABNT NBR 7181/2025. A tabela 17 apresenta o percentual das frações de pedregulho, areia, silte e argila para as amostras de solo (puro), cinza leve e misturas.

Tabela 17 - Frações granulométricas das amostras analisadas.

Amostra	Pedregulho (%)	Areia (%)			Silte (%)	Argila (%)	G _s	SUCS
		Grossa	Média	Fina				
Solo	8	21	18	17	9	25	2,65	SC
Cinza	0	0	0	5	94	1	2,45	ML
90S10C	7	19	17	17	17	22	2,63	SC
80S20C	7	17	14	15	27	20	2,59	SC
70S30C	5	15	13	14	35	18	2,51	CL-ML

Fonte: Autor (2026).

A curva granulométrica obtida para o solo natural (Gráfico 4), mostrou um percentual de finos (%< 0,075 mm) de 34% e um percentual elevado da fração arenosa de ~59%. Deve-se destacar a presença de concreções lateríticas (grumos de argila cimentados por óxidos de ferro que resistem ao desmonte mecânico simples), características da formação geológica da região. O processo de preparação para o ensaio de sedimentação, mostrou-se fundamental, uma vez que caso não houvesse a dispersão dos grãos, a curva seria artificialmente deslocada para a esquerda (frações mais grossas), mascarando as características reais do solo

Gráfico 5 - Curva granulométrica da amostra de cinza (*fly ash*).

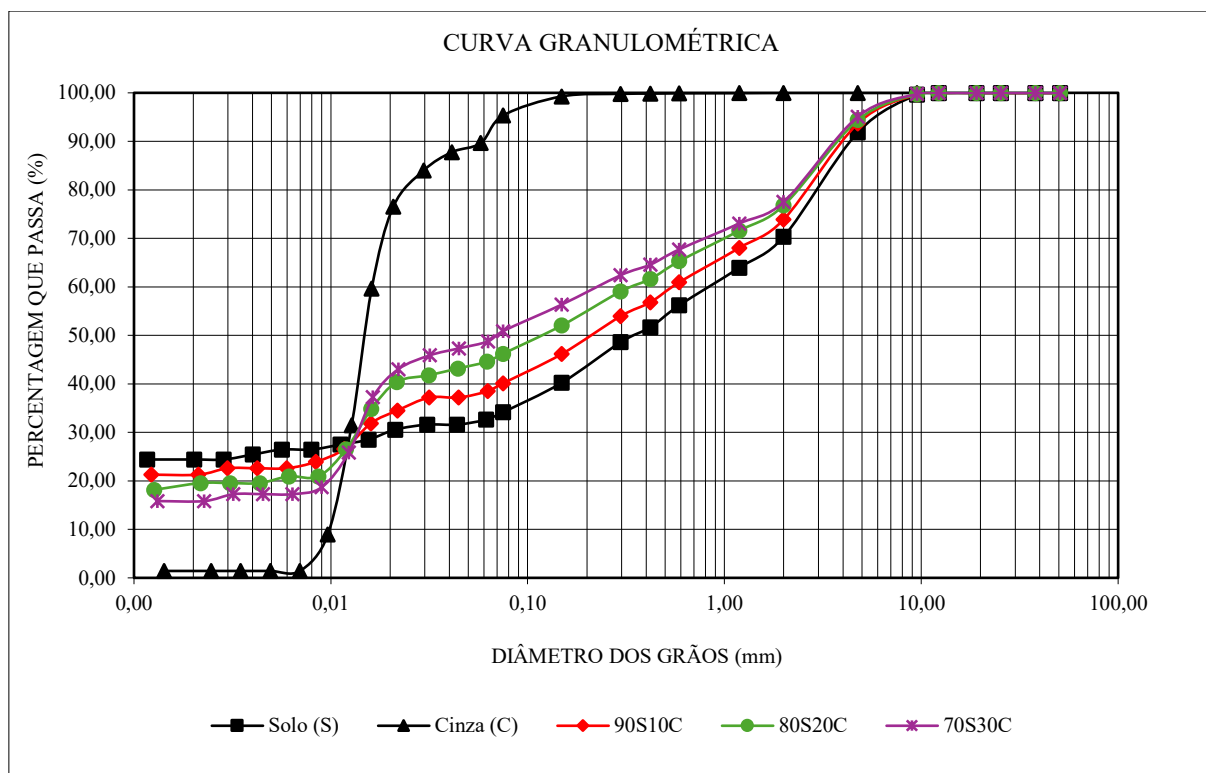
Fonte: Autor (2026).

A curva granulométrica da cinza revela a predominância de material com dimensões granulométricas características da fração fina de solos. Aproximadamente 95% da amostra de cinza analisada possui dimensão inferior a 0,075 mm (5% da amostra com grãos de dimensões na faixa de areia fina, 94% na faixa de silte e apenas 1% da amostra possui dimensões na faixa de argila). A análise evidencia ainda um material de granulometria uniforme (Coeficiente de uniformidade de aproximadamente 6,87). Isso somado as características não plásticas da cinza e suas características morfológicas (cenoasferas vítreas) nos permite inferir que a mesma possui características texturais mais próximas de um “silte” não plástico, comportando-se como um solo fino inerte.

Destaca-se que este perfil granulométrico, característico do material e associado ao seu próprio processo de formação, foi confirmado por Elias, (2015), Vasconcelos (2016) e Elias (2018).

A substituição parcial do solo pela cinza promoveu uma alteração progressiva na distribuição dos tamanhos das partículas (Gráfico 6).

Gráfico 6 - Curvas granulométricas do solo, da cinza e das misturas binárias solo-cinza.



Fonte: Autor (2026).

O teor de finos aumentou de 34% no solo natural para 40,1%, 46,2% e 52,3% nas matrizes 90S10C, 80S20C e 70S30C, respectivamente. Já a fração total de areia diminuiu. Esse comportamento decorre da substituição parcial de uma areia argilosa por uma cinza constituída quase integralmente por partículas com dimensão de silte.

Apesar do aumento do teor total de finos, a fração com dimensão de argila diminuiu de 25% no solo, para 17,8% na mistura com 30% de cinza. Portanto, o incremento de finos ocorreu predominantemente pela incorporação de partículas siltosas e não plásticas, e não pelo aumento da quantidade de partículas argilosas ativas.

Como foi visto anteriormente a massa específica real dos grãos também apresentou redução com a incorporação da cinza. Essa tendência é compatível com a substituição de partículas do solo por partículas de cinza de menor massa específica dos grãos.

As matrizes 90S10C e 80S20C permaneceram classificadas como SC, embora tenham apresentado aumento expressivo do teor de finos. Na mistura 80S20C, por exemplo, 46,2% da massa corresponde a silte e argila; contudo, 53,8% permanece retida na peneira de 0,075 mm, mantendo o material no grupo dos solos de granulação grossa. Como a areia predomina na fração grossa e os finos apresentam comportamento argiloso, a classificação permanece como areia argilosa.

Na matriz 70S30C, o teor de finos atingiu 52,3%, ultrapassando o limite de 50% utilizado pelo SUCS para separar solos de granulação grossa e fina. Nessa condição, a classificação passa a depender prioritariamente dos limites de consistência. Considerando $LL = 27,5\%$ e $IP = 6,8\%$, o ponto encontra-se próximo da linha A e dentro da faixa de transição entre silte e argila de baixa plasticidade, justificando a classificação dupla CL–ML. Assim, a incorporação de 30% de cinza foi suficiente para alterar não apenas as proporções granulométricas, mas também a classificação do material. Essa transição deve ser interpretada em conjunto com a redução da plasticidade. Embora a mistura 70S30C seja classificada como solo fino, sua fração fina é composta por uma quantidade crescente de silte não plástico proveniente da cinza.

A análise granulométrica demonstrou que a cinza leve atua como um material fino, predominantemente siltoso e não plástico. Sua incorporação reduziu as frações de pedregulho, areia e partículas com dimensão de argila, enquanto aumentou progressivamente a fração siltosa e o teor total de finos. Essas alterações serão importantes para a interpretação dos resultados de compactação, bem como para a avaliação posterior do comportamento hidráulico e da retração das misturas.

Como complemento à caracterização granulométrica, calculou-se o índice de atividade de Skempton, definido pela relação entre o índice de plasticidade e o percentual da fração com dimensão inferior a 0,002 mm. Os valores obtidos variaram entre 0,38 e 0,54, classificando o solo natural e todas as matrizes solo–cinza como materiais de baixa atividade. (Tabela 18).

Tabela 18 - Índice de atividade do solo, da cinza e das matrizes solo–cinza.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Fração argila < 0,002 mm (%)	Cálculo	IA	Classificação
Solo	33,3	19,8	13,5	25	13,5/25	0,54	Inativa
Cinza	NL	NP	-	1	-	-	Não aplicável
90S10C	31,2	21,1	10,1	22	10,1/22	0,46	Inativa
80S20C	30,0	20,5	9,5	20	9,5/20	0,48	Inativa
70S30C	27,5	20,7	6,8	18	6,8/18	0,38	Inativa

Fonte: Autor (2026).

Nota: (1) De acordo com a classificação de Skempton, materiais com $I_A < 0,75$ são considerados **inativos**; aqueles com $0,75 \leq I_A \leq 1,25$, **normalmente ativos**; e os que apresentam $I_A > 1,25$, **ativos**. Para materiais não plásticos, o índice de atividade não é aplicável; (2) Para a cinza, como o material foi classificado como não plástico e sua fração de tamanho argila não representa necessariamente a presença de argilominerais, o índice de atividade não é aplicável.

O solo apresentou índice de 0,54, resultado coerente com a predominância de caulinita na fração argilosa, com sua baixa capacidade de troca catiônica, de 5,3 cmolc/kg, e com a ausência de argilominerais expansivos identificáveis. Com a incorporação da cinza, os índices foram reduzidos para 0,46, 0,48 e 0,38 nas matrizes 90S10C, 80S20C e 70S30C, respectivamente.

A pequena oscilação entre as duas primeiras matrizes não altera a tendência geral nem sua classificação, podendo decorrer da própria relação entre duas grandezas experimentais e do arredondamento dos percentuais granulométricos. Embora a adição de cinza tenha aumentado o teor total de finos, esse incremento ocorreu predominantemente na fração siltosa, enquanto a fração com dimensão de argila e o índice de plasticidade diminuíram progressivamente. Esse resultado é compatível com o caráter predominantemente siltoso e não plástico da cinza, com sua menor superfície específica determinada pelo método EMEG — 6,14 m²/g, comparativamente a 39,94 m²/g para o solo — e com a presença de quartzo, calcita, gipsita e material aluminossilicático, em contraste com a matriz caulinítica do solo. Deve-se observar que o aumento do pH, da condutividade elétrica e da CTC das misturas com cinza não representa aumento da atividade argilosa ou do potencial expansivo, pois, em materiais alcalinos, esses resultados também podem refletir cargas superficiais dependentes do pH, bases trocáveis e constituintes solúveis. Assim, a análise integrada indica que a cinza promove a substituição parcial da fração argilosa ativa por partículas predominantemente siltosas e não plásticas, reduzindo o comportamento plástico-coloidal das matrizes e sua tendência à variação volumétrica associada à interação entre os finos e a água.

4.4 Ensaios de Compactação

O ensaio de compactação dos materiais e dos compósitos foi realizado sob a energia *Proctor* Normal, conforme as diretrizes da norma ABNT NBR 7182/2025. Foram realizados ensaios em duplicatas par cada amostra, sendo feito a média da umidade ótima (w_{ot}) e da massa específica seca máxima ($\rho_{d,max}$), obtidos para os dois ensaios.

A Tabela 19 apresenta os parâmetros obtidos para o solo puro, cinza pura e as diversas misturas com adição de fibras.

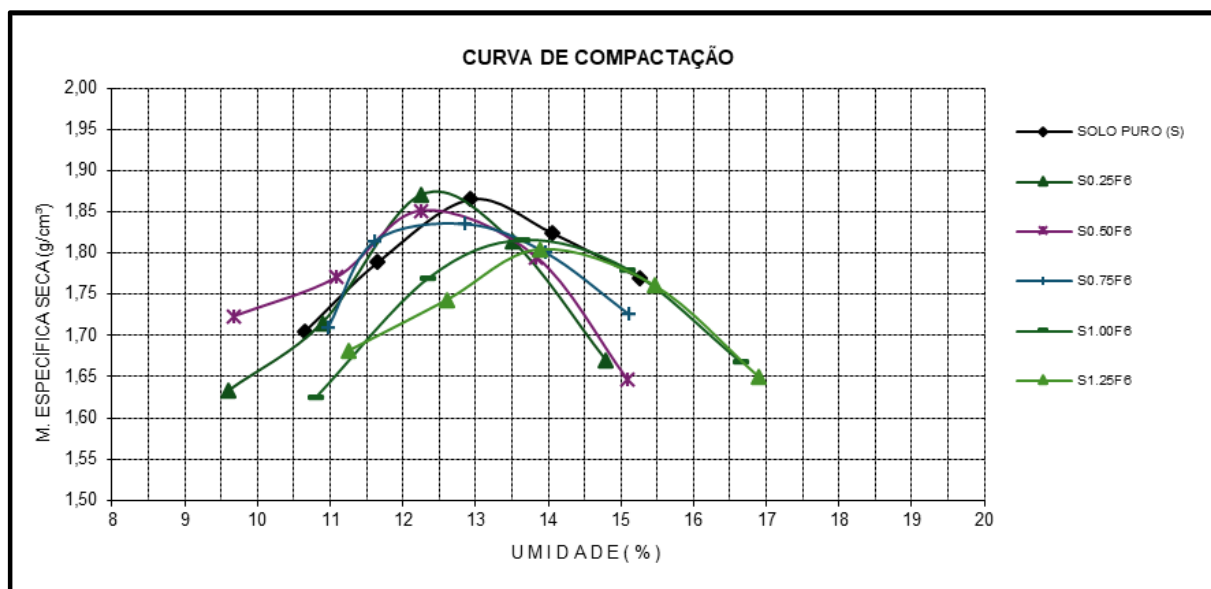
Tabela 19 - Resultado dos ensaios de compactação (com energia proctor normal).

Amostra	Ensaio	ω_{ot} (%)	$\rho_{d,max}$ (g/cm ³)	$\omega_{ot,med}$ (%)	$\rho_{d,max,med}$ (g/cm ³)
Solo (S)	Ensaio (1)	13,00	1,875	13,005	1,883
	Ensaio (2)	13,01	1,891		
S0.25F6	Ensaio (1)	12,50	1,875	12,450	1,880
	Ensaio (2)	12,40	1,884		
S0.50F6	Ensaio (1)	12,20	1,851	12,350	1,850
	Ensaio (2)	12,50	1,849		
S0.75F6	Ensaio (1)	12,65	1,837	12,575	1,841
	Ensaio (2)	12,50	1,845		
S1.00F6	Ensaio (1)	13,65	1,820	13,600	1,823
	Ensaio (2)	13,55	1,825		
S1.25F6	Ensaio (1)	14,00	1,810	13,950	1,805
	Ensaio (2)	13,90	1,800		
S0.25F12	Ensaio (1)	12,20	1,865	12,150	1,859
	Ensaio (2)	12,10	1,852		
S0.50F12	Ensaio (1)	12,75	1,848	12,550	1,854
	Ensaio (2)	12,35	1,860		
S0.75F12	Ensaio (1)	12,95	1,812	12,975	1,804
	Ensaio (2)	13,00	1,795		
S1.00F12	Ensaio (1)	13,39	1,780	13,320	1,785
	Ensaio (2)	13,25	1,790		
S1.25F12	Ensaio (1)	14,80	1,748	14,650	1,754
	Ensaio (2)	14,50	1,759		
Cinza (fly ash) (C)	Ensaio (1)	35,60	1,267	36,060	1,164
	Ensaio (2)	36,52	1,061		

Fonte: Autor (2026).

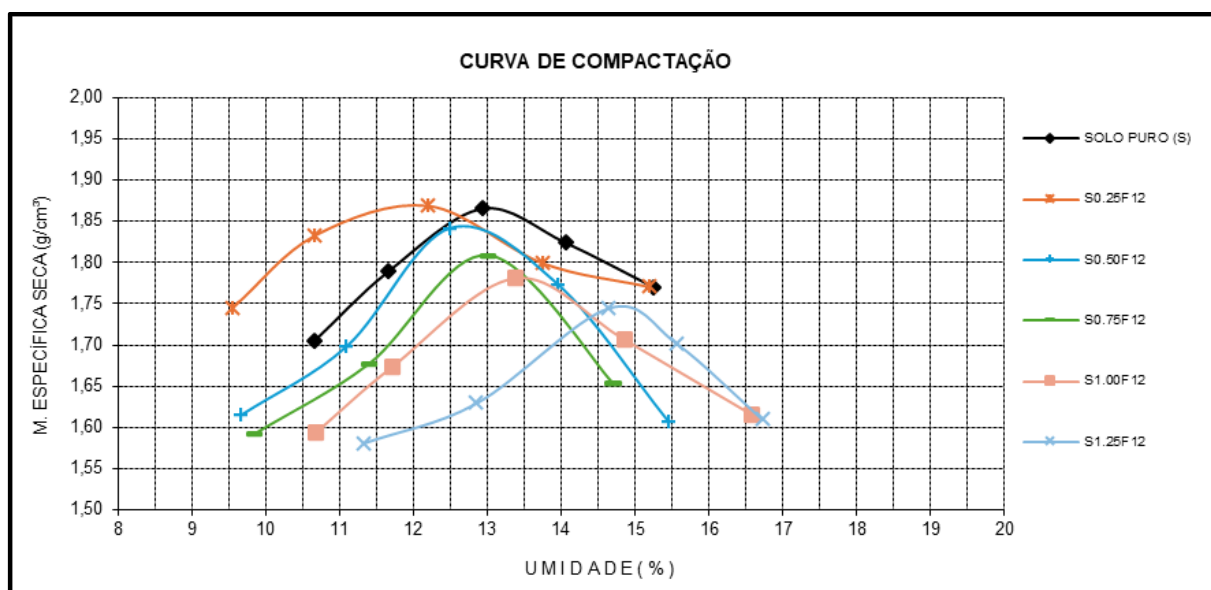
Os gráficos 7 e 8 apresentam as curvas de compactação de um dos ensaios realizados para cada amostra (solo e misturas), para as fibras de 6,00 mm e de 12,00 mm, respectivamente.

Gráfico 7 - Curvas de compactação do solo e das misturas com fibras de 6,00 mm de comprimento.



Fonte: Autor (2026).

Gráfico 8 - Curvas de compactação do solo e das misturas com fibras de 12,00 mm de comprimento.

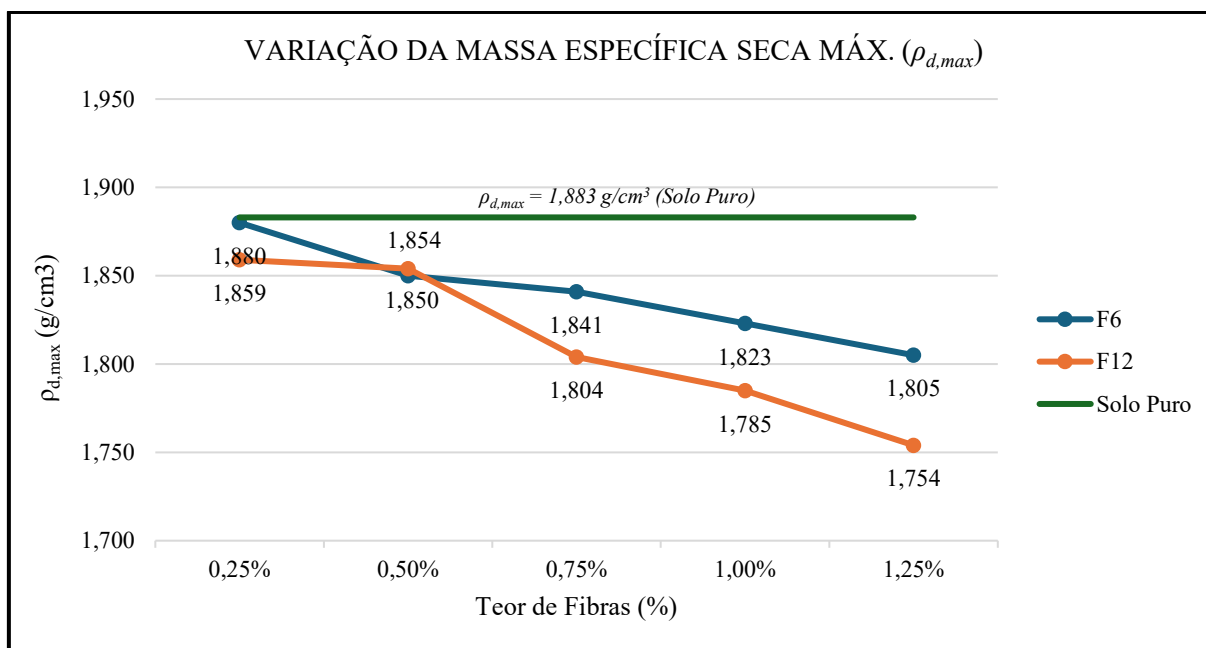


Fonte: Autor (2026).

Analisando os resultados obtidos nota-se que a amostras de solo do ASMOC apresentou uma curva de compactação bem definida, típica de solos com boa graduação, atingindo uma densidade seca máxima média 1,883 g/cm³ e uma umidade ótima média de 13,0%. A cinza volante, material apresentou massa específica seca máxima média de 1,164 g/cm³ e umidade ótima elevada de 36,06%.

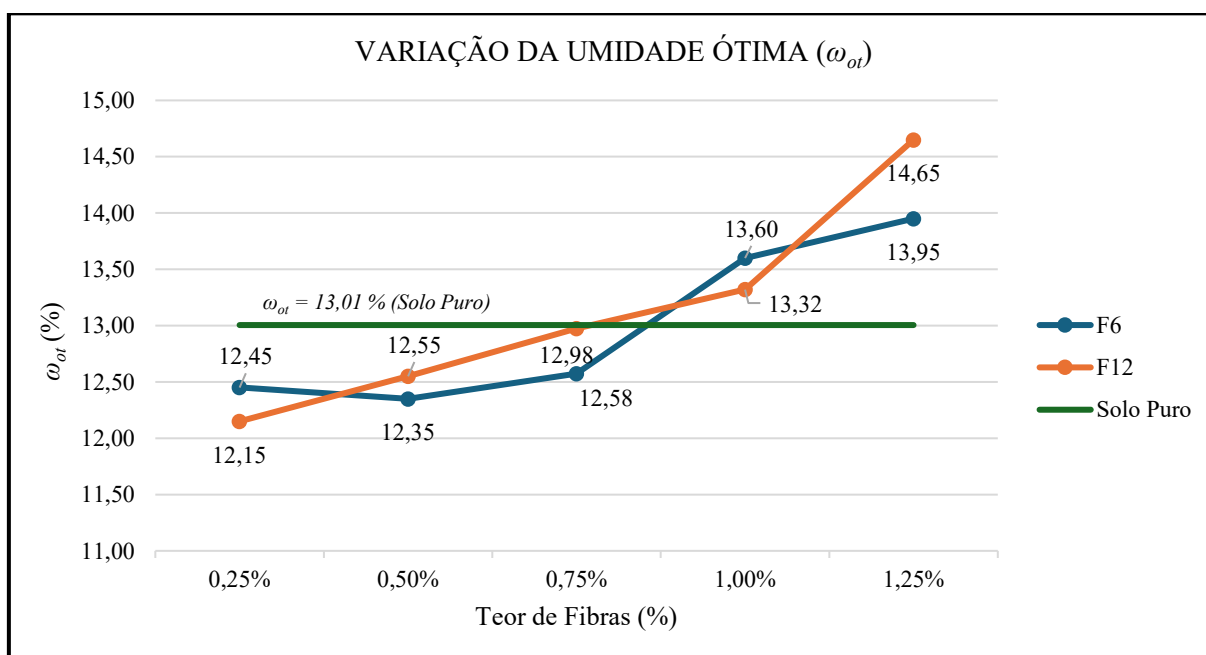
A análise dos dados da Tabela. 19 mostrou ainda que a inclusão de fibras provoca a redução da massa específica seca máxima (Gráfico 9) e o aumento da umidade ótima (Gráfico 10) em relação ao solo puro.

Gráfico 9 - Variação da massa específica seca máxima com o teor de fibras.



Fonte: Autor (2026).

Gráfico 10 - Variação da umidade ótima com o teor de fibras.



Fonte: Autor (2026).

Este fenômeno é um comportamento característico de solos reforçados e corroborados por Feuerharmel (2000), Casagrande (2001) e Merville (2024). Uma possível explicação para esse comportamento é resistência elástica e o impedimento ao rearranjo proporcionado pela fibra adicionada. Durante a compactação, as fibras atuam como elementos elásticos. Elas absorvem parte da energia de compactação que deveria ser destinada ao rearranjo das partículas de solo. As fibras, então ofereceriam resistência à densificação, dificultando a expulsão do ar dos vazios. Além disso, ao cessar o golpe do soquete, as fibras tendem a recuperar elasticamente sua forma, provocando uma leve expansão volumétrica da matriz de solo. Isso resulta em um volume de vazios final maior do que no solo não reforçado.

Ainda analisando os resultados obtidos é possível observar que fibras mais longas (12mm) causam uma queda de densidade mais acentuada que as fibras curtas (6mm), para o mesmo teor. Isso deve-se, possivelmente, porque fibras mais longas têm maior probabilidade de se entrelaçar e formar pontes entre os grãos de solo, criando macroporos que o processo de compactação não consegue fechar. Além disso, fibras longas aumentam o atrito interno da mistura, exigindo mais água para lubrificar a interface fibra-solo.

Ressalta-se que redução da densidade seca máxima pode ser benéfica para aplicação em camadas de coberturas. Coberturas excessivamente densas e rígidas tendem a fissurar com facilidade sob recalques diferenciais. O solo reforçado, sendo ligeiramente menos denso e mais dúctil acomoda melhor as deformações impostas pela biodegradação dos resíduos, minimizando os efeitos no comportamento hidráulico.

A tabela 20 apresenta os valores médios de umidade ótima e massa específica seca máxima obtidos para as misturas solo-cinza e os efeitos produzidos pela substituição parcial do solo por cinza.

Tabela 20 - Resultado dos ensaios de compactação do solo, cinza e misturas binárias solo-cinza.

Amostra	$\omega_{ot,med}$ (%)	Variação de $\omega_{ot,med}$ em relação ao solo (%)	$\rho_{d,max,med}$ (g/cm ³)	Variação $\rho_{d,max,med}$ em relação ao solo (%)
Solo	13,005	—	1,883	—
Cinza (<i>fly-ash</i>) (C)	36,060	—	1,164	—
90S10C	15,100	+16,1%	1,793	-4,8%
80S20C	15,700	+20,7%	1,678	-10,9%
70S30C	16,430	+26,3%	1,599	-15,1%

Fonte: Autor (2026).

A incorporação da cinza fez com que a umidade ótima aumentasse progressivamente, enquanto a massa específica seca máxima diminuiu com o aumento do teor de cinza. A redução da massa específica seca máxima está relacionada, principalmente, à substituição gradual das partículas do solo, cuja massa específica dos grãos é de aproximadamente 2,65 g/cm³, pelas partículas de cinza, com valor próximo de 2,45 g/cm³. Além disso, o aumento da fração siltosa e a possível presença de partículas ocas ou porosas dificultam a obtenção de uma estrutura tão densa quanto a do solo natural.

A elevação da umidade ótima pode ser associada ao aumento da quantidade de partículas finas e da superfície total de contato, à maior água necessária para a homogeneização da cinza e ao preenchimento dos vazios e irregularidades superficiais das partículas. A cinza apresentou 95% de material fino, contra 34% no solo, de modo que seu aumento na mistura altera significativamente a relação entre água, partículas e energia de compactação.

Mahvash, López-Querol e Bahadori-Jahromi (2017), ao avaliarem misturas de areia fina com cinza volante, verificaram que o aumento do teor de cinza resultou em redução da massa específica seca máxima e aumento da umidade ótima. Os autores relacionaram essa resposta às diferenças de massa específica, granulometria e estrutura das partículas de cinza.

Yilmaz (2015) também avaliou curvas de compactação de um solo argiloso contendo teores de cinza entre 0% e 30%. O estudo destaca que a resposta depende do tipo de solo e da classe da cinza, mas confirma que a incorporação da cinza altera, a umidade ótima, a densidade e o comportamento mecânico.

A tendência obtida também é consistente com os resultados de granulometria. À medida que o teor de cinza aumentou, a fração de areia diminuiu, enquanto o teor de silte e o teor total de finos aumentaram. Assim, a redução de $\rho_{d,máx}$ não decorre exclusivamente da menor massa específica dos grãos de cinza, mas também da alteração do empacotamento e da estrutura interna das misturas.

A tabela 21 apresenta os resultados obtidos no ensaio de compactação para as misturas ternárias, bem como a variação desses parâmetros em relação aos do solo. A incorporação conjunta de cinza e fibras resultou, de modo geral, no aumento da umidade ótima e na redução da massa específica seca máxima, especialmente para os maiores teores de fibras.

Tabela 21 - Resultado dos ensaios de compactação do solo, cinza e misturas ternárias solo-cinza-fibra.

Amostra	$\omega_{ot,med}$ (%)	Variação de $\omega_{ot,med}$ em relação ao solo (%)	$\rho_{d,max,med}$ (g/cm ³)	Variação $\rho_{d,max,med}$ em relação ao solo (%)
Solo ASMOC	13,005	0,00	1,883	0,00
Cinza leve CL (1)	36,060	+173,74	1,164	-32,71
90S10C0.50F12	15,500	+19,18	1,700	-9,72
90S10C0.75F12	15,850	+21,88	1,689	-10,30
90S10C1.25F12	16,100	+23,80	1,657	-12,00
80S20C0.50F12	15,730	+20,95	1,675	-11,05
80S20C0.75F12	16,130	+24,03	1,615	-14,23
80S20C1.25F12	16,280	+25,18	1,596	-15,24
70S30C0.50F12	16,400	+26,11	1,612	-14,39
70S30C0.75F12	17,050	+31,10	1,591	-15,51
70S30C1.25F12	17,500	+34,56	1,534	-18,53

Fonte: Autor (2026).

Na série 90S10C, o aumento do teor de fibras de 12 mm elevou gradualmente a umidade ótima de 15,10% para 16,10%, enquanto a massa específica seca máxima diminuiu de 1,793 para 1,657 g/cm³. Tendência semelhante foi observada na série 80S20C, embora a adição de 0,50% de fibras tenha produzido alterações pouco expressivas. A partir de 0,75%, a redução da densidade tornou-se mais evidente, indicando maior interferência das fibras no arranjo das partículas.

Na série 70S30C, a mistura com 0,50% de fibras apresentou comportamento próximo ao da matriz sem reforço, com pequena elevação da massa específica seca máxima. Essa diferença pode ser atribuída à variabilidade experimental ou a um rearranjo localizado das partículas. Para os teores de 0,75% e 1,25%, contudo, voltou a predominar a tendência geral de aumento da umidade ótima e redução da densidade seca máxima.

O comportamento das misturas ternárias resulta da sobreposição de dois efeitos. A cinza aumenta a quantidade de partículas finas, reduz a massa específica e eleva a demanda de água. As fibras, por sua vez, introduzem elementos alongados que dificultam a aproximação e o rearranjo das partículas. Yilmaz (2015) analisou solo argiloso contendo cinza e fibras de polipropileno com diferentes tipos, comprimentos e dosagens, destacando que a resposta dos

compósitos depende da interação entre o teor de cinza e as características das fibras. O autor verificou que o efeito da cinza sobre o comportamento global pode ser superior ao efeito isolado das fibras, embora o comprimento e o teor das fibras influenciem significativamente a estrutura e a resposta pós-pico.

Olgun (2013) investigou uma matriz argilosa estabilizada com 30% de cinza, cimento e fibras de polipropileno de 6, 12 e 20 mm, nos teores de 0,25% a 1,00%. Embora o estudo tenha se concentrado principalmente na resistência e na variação volumétrica, os resultados mostraram que o teor e o comprimento das fibras alteram significativamente o comportamento do compósito, com desempenho relevante para fibras de 12 mm nos teores de 0,50% e 0,75%.

4.5 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica saturada (k) constitui o parâmetro governante para a validação de camadas de cobertura final em aterros sanitários, uma vez que controla o fluxo advectivo de água através da barreira e, conseqüentemente, a geração de lixiviado e a migração de gases. Segundo Boscov (2008), barreiras minerais compactadas devem apresentar coeficiente de permeabilidade igual ou inferior a $1,00 \times 10^{-7}$ cm/s, de modo a minimizar a percolação de águas pluviais para o interior da célula de resíduos.

Nesta pesquisa, os ensaios de permeabilidade foram conduzidos em permeâmetro de parede rígida, submetidos a carga variável e sob gradiente hidráulico controlado. Para cada mistura, foram ensaiados dois corpos de prova, adotando-se a média aritmética como valor representativo. Os resultados obtidos estão detalhados na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável. (Continua)

Material/amostra	k_{20} médio (cm/s)	k_{20}/k_{solo}
Solo (S)	$1,08 \times 10^{-7}$	1,00
S0.25F6	$1,95 \times 10^{-7}$	1,81
S0.50F6	$2,35 \times 10^{-7}$	2,18
S0.75F6	$3,90 \times 10^{-7}$	3,61
S1.00F6	$5,17 \times 10^{-7}$	4,79
S1.25F6	$5,90 \times 10^{-7}$	5,46
S0.25F12	$1,93 \times 10^{-7}$	1,79
S0.50F12	$1,72 \times 10^{-7}$	1,59

Tabela 22 - Resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável. (Conclusão)

Material/amostra	k_{20} médio (cm/s)	k_{20}/k_{solo}
S0.75F12	$1,86 \times 10^{-7}$	1,72
S1.00F12	$3,22 \times 10^{-7}$	2,98
S1.25F12	$4,03 \times 10^{-7}$	3,73
90S10C	$6,80 \times 10^{-7}$	6,30
80S20C	$1,52 \times 10^{-7}$	1,41
70S30C	$2,86 \times 10^{-7}$	2,65
90S10C0.50F12	$8,15 \times 10^{-7}$	7,55
90S10C0.75F12	$8,01 \times 10^{-7}$	7,42
90S10C1.25F12	$1,18 \times 10^{-6}$	10,93
80S20C0.50F12	$1,72 \times 10^{-6}$	15,93
80S20C0.75F12	$1,95 \times 10^{-6}$	18,06
80S20C1.25F12	$3,30 \times 10^{-6}$	30,56
70S30C0.50F12	$3,25 \times 10^{-6}$	30,09
70S30C0.75F12	$3,68 \times 10^{-6}$	34,07
70S30C1.25F12	$4,35 \times 10^{-6}$	40,28
Cinza leve (C)	$7,61 \times 10^{-5}$	704,63

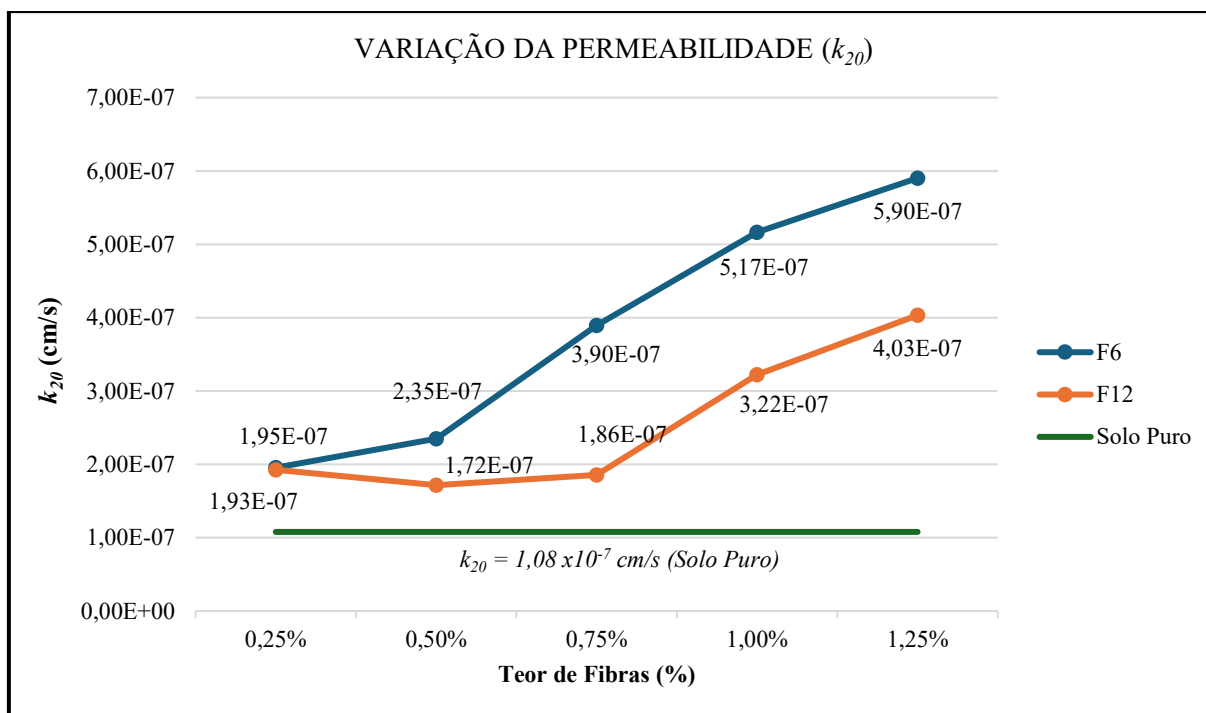
Fonte: Autor (2026).

Analisando os resultados obtidos o solo natural apresentou uma permeabilidade média de $1,08 \times 10^{-7}$ cm/s, situando-se no limiar da exigência normativa. Este valor é consistente com sua classificação granulométrica (SC) e confirma sua aptidão como material de base para barreiras impermeabilizantes.

O valor de condutividade encontrado pode ser associado à presença de 34% de finos, incluindo 25% de partículas com dimensão de argila, à plasticidade da fração fina e à massa específica seca máxima de $1,883 \text{ g/cm}^3$. Além disso, a estrutura desenvolvida durante a compactação também exerce influência importante. Em solos argilosos, pequenas alterações no teor de umidade de moldagem podem produzir mudanças expressivas na orientação das partículas.

A análise da influência das fibras mostra que o aumento do teor de fibras resulta na elevação da condutividade hidráulica (Gráfico 11). Para a fibra de 12 mm no teor de 1,25%, por exemplo, o coeficiente atingiu $4,03 \times 10^{-7}$ cm/s, representando um acréscimo de 4 vezes em relação ao solo não reforçado.

Gráfico 11 - Variação da permeabilidade com o teor de fibras.



Fonte: Autor (2026).

Intuitivamente, poderia esperar que a adição de fibras reduzisse a permeabilidade, partindo da premissa de que as fibras ocupam espaço físico nos vazios e aumentam a tortuosidade do caminho de fluxo. No entanto, os resultados demonstram o oposto. Este fenômeno, embora pareça contraditório, é observado na literatura (Tang *et al.*, 2012; Maher; Ho, 1994; Feitosa, 2022 e Merville, 2024) e justifica-se pela interação em microescala entre o polímero e a matriz argilosa.

A causa preponderante para o aumento do fluxo é a natureza hidrofóbica do polipropileno. Enquanto as partículas de argila são hidrofílicas e formam uma camada de água adsorvida, as fibras de plástico não permitem a aderência da água a sua superfície. Isso impede uma adesão perfeita entre a pasta de argila e a superfície da fibra. Como resultado, criam-se zonas de descontinuidade longitudinais na interface solo-fibra, que atuam como canais preferenciais de percolação, facilitando a passagem do fluido (Abdi *et al.*, 2008; Tang *et al.*, 2012).

Além disso, conforme discutido na seção de compactação, a presença das fibras dificulta o rearranjo das partículas, resultando em uma menor densidade seca e, conseqüentemente, em um maior índice de vazios inicial. Diferente dos vazios isolados na matriz argilosa, os vazios gerados ao redor de fibras tendem a ser mais interconectados,

reduzindo a tortuosidade efetiva do meio (Divya; Viswanadham; Gourc, 2018), aspectos esses observados nas microscopias.

Vale ressaltar, entretanto, que a literatura não é unânime quanto à direção desse efeito. Parte dos estudos reporta que, em teores moderados e sob compactação no ramo úmido, a fibra pode inibir a formação de microfissuras de retração durante a secagem e, com isso, preservar, ou até reduzir, a condutividade hidráulica em relação ao solo puro fissurado (Malekzadeh; Bilsel, 2014; Giresh; Cyrus; Abraham, 2024). Essa divergência pode acontecer devido a atuação de dois mecanismos distintos. Em algumas situações pode prevalecer o aumento local de permeabilidade pela interface hidrofóbica, de um lado, e a mitigação de microfissuras por dessecação, de outro. Para camadas de cobertura submetidas a ciclos de umedecimento e secagem, é justamente o segundo mecanismo que governa o desempenho hidráulico de longo prazo (Chaduvula; Viswanadham; Kodikara, 2017; Julina; Thyagaraj, 2020).

Avaliando apenas o efeito da fibra, observou-se ainda, que as fibras mais longas (12 mm), apresentaram valores de permeabilidade menores que as fibras mais curtas de 6 mm. Esse resultado contradiz o que normalmente se encontra na literatura, que sugere que fibras mais longas criam canais de percolação mais longos e conectados. Todavia, a baixa variabilidade dos coeficientes de permeabilidade (sem alterações na ordem de grandeza de 10^{-7}), para os diversos teores e comprimentos, pode evidenciar que a diferença de comprimento entre as fibras de 6 mm e de 12 mm e relação aos vazios do solo, podem não ser tão significativas como fibras mais longas de 24 mm e 36 mm, conforme observado em Feuerharmel (2000) e Casagrande (2001).

Para validar a consistência dos resultados encontrados, procedeu-se a uma comparação direta com estudos que utilizaram compósitos de solo-fibra para aplicações geoambientais e geotécnicas. A Tabela 23 apresenta os valores de permeabilidade e as tendências observadas em trabalhos de referência.

A maioria dos autores reporta um aumento sutil da permeabilidade (entre 1,5 a 3 vezes) ou a manutenção da ordem de grandeza, exatamente como observado aqui

Tabela 23 - Variação dos valores da permeabilidade com adição de fibras de polipropileno na literatura.

Autor (Ano)	Material / Fibra	Teor Comparado	k do Solo Puro (cm/s)	k da Mistura (cm/s)	Tendência Observada	Similaridade
Autor (2026)	Solo SC + Fibra PP (12 mm)	0,5%	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,72 \times 10^{-7}$	Leve Aumento	-
Merville (2024)	Solo + Fibra PP (12 mm)	0,5%	$9,8 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-6}$	Aumento	Alta (Mesmo Solo)
Feitosa (2022)	Argila Bentonítica + Fibra	0,5%	$2,1 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-8}$	Leve Aumento	Alta (Tendência)
Tang <i>et al.</i> (2012)	Argila Siltosa + Fibra PP	0,25%	$1,5 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-7}$	Aumento	Média
Abdi <i>et al.</i> (2008)	Silte Argiloso + Fibra	1,0%	$1,2 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-6}$	Leve Aumento	Alta (Mec. 12mm)
Miller e Rifai (2004)	Solo Argiloso (CL) + Fibra	0,5%	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	Manutenção	Alta (Fibras Longas)

Fonte: Autor (2026).

Abdi *et al.* (2008) estudaram solos reforçados com fibras de polipropileno. Eles concluíram que a adição de fibras reduziu os recalques por adensamento e o inchamento, mas aumentou ligeiramente a condutividade hidráulica (permeabilidade) com o aumento do teor e comprimento da fibra. No entanto, para o controle de trincas de retração, o comprimento de 12 mm foi apontado como eficaz. Os autores destacam ainda que, em solos compactados no lado úmido da curva, a fibra pode reduzir a formação de microfissuras de retração durante a secagem, resultando em permeabilidades menores que as do solo puro, que pode fissurar microscopicamente.

Miller e Rifai (2004), por sua vez, observaram que a permeabilidade se manteve em $1,0 \times 10^{-7}$ cm/s, mesmo com a adição de fibras em relação ao solo puro, o que para os autores mostrou-se benéfico devido aos ganhos na resistência à tração (controle de trincas). Já Daniel e Wu (1993) aponta que o colapso da barreira hidráulica raramente ocorre por fluxo intersticial através da matriz intacta. O colapso ocorre por macrofissuração, de modo que, um discreto aumento da permeabilidade da matriz, desde que mantido dentro da ordem de grandeza normativa, é amplamente compensado pela maior resistência à fissuração conferida pelas fibras, aspecto importante para o desempenho de coberturas expostas a ciclos climáticos (Chaduvula; Viswanadham; Kodikara, 2017; Julina; Thyagaraj, 2020).

Com base nos resultados encontrados, as misturas reforçadas com fibras de 12 mm nos teores de 0,50% e 0,75% apresentaram o melhor resultado no que tange o comportamento

hidráulico para aplicação em camadas de cobertura de aterro sanitário, apresentado coeficientes de permeabilidade de $1,72 \times 10^{-7}$ cm/s e $1,86 \times 10^{-7}$ cm/s.

Para a cinza leve de carvão mineral, o valor encontrado de permeabilidade situa a cinza na ordem de grandeza de 10^{-5} cm/s. Comparativamente, este material é cerca de 700 vezes mais permeável que o solo estudado. Este resultado está em consonância com a caracterização geotécnica do resíduo apresentada em trabalhos anteriores e corroborado na literatura conforme apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Condutividade Hidráulica Típica de Cinzas Volantes (*Fly-Ash*).

Referência	Material	Permeabilidade (k, cm/s)
Autor (2026)	Cinza Volante (<i>fly-ash</i>)	$7,61 \times 10^{-5}$
Elias (2018)	Cinza Volante (<i>fly-ash</i>)	$8,21 \times 10^{-5}$
Vasconcelos (2016)	Cinza Volante (<i>fly-ash</i>)	$4,70 \times 10^{-5}$
Ubaldo (2005)	Cinza Volante (<i>fly-ash</i>)	$6,00 \times 10^{-5}$
Heineck (2002)	Cinza Volante (<i>fly-ash</i>)	$5,67 \times 10^{-5}$

Fonte: Autor (2026).

Kaniraj e Gayathri (2004) verificaram que a permeabilidade de cinzas compactadas pode ser comparável à de siltes não plásticos, sendo influenciada pelo índice de vazios e pela condição de compactação. Zabielska-Adamska (2020) também demonstrou, assim como nos solos, que a condutividade hidráulica de cinzas varia significativamente com o teor de umidade de moldagem, a energia de compactação, a tensão efetiva e o grau de saturação. A autora observou variações de várias ordens de grandeza para um mesmo material quando as condições de preparação e ensaio foram alteradas.

Esses resultados reforçam que a cinza leve não deve ser tratada apenas como um material fino. Sua morfologia, porosidade interna, baixa plasticidade e resposta à compactação desempenham papel importante no comportamento hidráulico das misturas

Dessa forma, a substituição parcial do solo pela cinza leve aumentou progressivamente a condutividade hidráulica das matrizes (Tabela 25). O valor passou de $1,08 \times 10^{-7}$ cm/s, no solo natural, para $2,86 \times 10^{-6}$ cm/s nas misturas com 30% de cinza, respectivamente.

Tabela 25 - Influência do teor de cinza sobre a condutividade hidráulica.

Matriz	$k_{20}(\text{cm/s})$	k/k_{solo}	Variação em relação ao solo
Solo	$1,08 \times 10^{-7}$	1,00	—
90S10C	$6,80 \times 10^{-7}$	6,30	+529,6%
80S20C	$1,52 \times 10^{-7}$	14,07	+1.307,4%
70S30C	$2,86 \times 10^{-6}$	26,48	+2.548,1%
Cinza	$7,61 \times 10^{-5}$	704,63	+70.363,0%

Fonte: Autor (2026).

O aumento da condutividade hidráulica foi acompanhado pela redução da massa específica seca máxima das matrizes. O solo apresentou $\rho_{d,\text{máx}} = 1,883 \text{ g/cm}^3$, enquanto as matrizes 90S10C, 80S20C e 70S30C apresentaram 1,793, 1,678 e 1,599 g/cm^3 , respectivamente. A menor densificação favorece o aumento do volume de vazios e a formação de trajetórias contínuas para o fluxo de água.

Nas matrizes solo–cinza, a incorporação das fibras de 12 mm promoveu aumento adicional da condutividade hidráulica (Tabela 26). Esse efeito foi relativamente reduzido nos teores de 0,50% e 0,75%, tornando-se mais pronunciado no teor de 1,25%.

Tabela 26 - Condutividade hidráulica das misturas solo–cinza–fibra.

Matriz/amostra	$k_{20}(\text{cm/s})$	k/k_{matriz}	Variação em relação à matriz	k/k_{solo}	Variação em relação ao solo
90S10C	$6,80 \times 10^{-7}$	1,00	—	6,30	+529,6%
90S10C0.50F12	$8,15 \times 10^{-7}$	1,20	+19,9%	7,55	+654,6%
90S10C0.75F12	$8,01 \times 10^{-7}$	1,18	+17,8%	7,42	+641,7%
90S10C1.25F12	$1,18 \times 10^{-6}$	1,74	+73,5%	10,93	+992,6%
80S20C	$1,52 \times 10^{-6}$	1,00	—	14,07	+1.307,4%
80S20C0.50F12	$1,72 \times 10^{-6}$	1,13	+13,2%	15,93	+1.492,6%
80S20C0.75F12	$1,95 \times 10^{-6}$	1,28	+28,3%	18,06	+1.705,6%
80S20C1.25F12	$3,30 \times 10^{-6}$	2,17	+117,1%	30,56	+2.955,6%
70S30C	$2,86 \times 10^{-6}$	1,00	—	26,48	+2.548,1%
70S30C0.50F12	$3,25 \times 10^{-6}$	1,14	+13,6%	30,09	+2.909,3%
70S30C0.75F12	$3,68 \times 10^{-6}$	1,29	+28,7%	34,07	+3.307,4%
70S30C1.25F12	$4,35 \times 10^{-6}$	1,52	+52,1%	40,28	+3.927,8%

Fonte: Autor (2026).

Na matriz 90S10C, os teores de 0,50% e 0,75% de fibras produziram condutividades hidráulicas muito próximas, indicando pouca influência do aumento de fibras

nessa faixa. Entretanto, com 1,25%, o coeficiente aumentou para $1,18 \times 10^{-6}$ cm/s, evidenciando maior interferência das fibras e das interfaces criadas na estrutura do material.

Comportamento semelhante foi observado nas demais séries, porém de forma mais acentuada na matriz 80S20C, que apresentou o maior incremento relativo com 1,25% de fibras. Já a série 70S30C manteve os maiores valores absolutos de condutividade hidráulica, principalmente por partir de uma matriz mais permeável em razão do maior teor de cinza.

De modo geral, a incorporação simultânea de cinza e fibras favoreceu o aumento da condutividade hidráulica, sobretudo nos maiores teores de fibra. Esse comportamento resulta da combinação entre a redução da massa específica seca e da plasticidade promovida pela cinza e a formação de interfaces e descontinuidades associadas às fibras, que dificultam o empacotamento das partículas e favorecem uma estrutura porosa mais aberta e conectada.

A análise conjunta dos resultados de compactação e de condutividade hidráulica evidencia uma tendência de aumento de k_{20} com a redução da massa específica seca máxima. O solo natural apresentou simultaneamente a maior massa específica seca máxima e a menor condutividade hidráulica, enquanto a cinza apresentou a menor densidade seca e o maior valor de k_{20} . As misturas solo–cinza ocuparam posições intermediárias, apresentando incremento gradual da condutividade à medida que a densidade seca diminuiu.

Essa tendência é coerente com o papel da estrutura porosa no fluxo de água. Embora materiais menos densos apresentem, em geral, maior volume de vazios, a condutividade hidráulica depende principalmente da conectividade desses poros e da continuidade dos caminhos preferenciais de fluxo. A incorporação de fibras também modifica essa estrutura, uma vez que os vazios formados ao redor dos filamentos tendem a apresentar geometria mais alongada e potencialmente mais conectada do que aqueles existentes apenas entre as partículas da matriz. Resultado semelhante foi observado por Benson, Zhai e Wang (1994), que identificaram a condição de compactação e a composição do solo como fatores determinantes da condutividade hidráulica de barreiras compactadas.

Considerando como referência o valor de $1,0 \times 10^{-7}$ cm/s, o solo natural foi o material que mais se aproximou do desempenho desejado, apresentando $1,08 \times 10^{-7}$ cm/s. Entre as misturas reforçadas, S0.50F12 e S0.75F12 apresentaram os melhores resultados hidráulicos ($1,72 \times 10^{-7}$ e $1,86 \times 10^{-7}$ cm/s, respectivamente). Embora superiores ao valor do solo natural, esses coeficientes permaneceram na ordem de grandeza de 10^{-7} cm/s, apresentando aumentos inferiores aos observados nas demais misturas reforçadas.

Entretanto, a avaliação do desempenho de uma camada de cobertura não deve considerar apenas a condutividade hidráulica de corpos de prova intactos. Em condições de campo, a ocorrência de ciclos de secagem pode induzir retração e fissuração, formando caminhos preferenciais de fluxo muito mais significativos que os poros originalmente presentes na matriz. Miller e Rifai (2004) demonstraram que a incorporação de fibras pode reduzir o desenvolvimento de fissuras em solos compactados empregados na contenção de resíduos, enquanto Viswanadham, Jha e Sengupta (2009) destacam que o reforço fibroso aumenta a capacidade desses materiais de acomodar deformações sem perda abrupta de integridade.

Assim, uma elevação moderada da condutividade hidráulica da matriz intacta pode ser compensada, em determinadas condições, pela redução da abertura e da conectividade das fissuras desenvolvidas durante a secagem. Essa hipótese será analisada de forma integrada com os resultados de retração, da análise digital de imagens e da permeabilidade ao gás.

As misturas contendo cinza apresentaram, predominantemente, condutividades hidráulicas da ordem de 10^{-6} cm/s, com exceção da composição 90S10C e das misturas 90S10C com menores teores de fibras, que permaneceram na ordem de 10^{-7} cm/s. Esses resultados evidenciam que a incorporação da cinza deve ser realizada de forma criteriosa, buscando conciliar a redução da plasticidade e da retração com a manutenção de um desempenho hidráulico compatível com a aplicação pretendida. A cinza pura, por sua vez, apresentou $7,61 \times 10^{-5}$ cm/s, indicando que seu emprego isolado como barreira hidráulica não é adequado. Contudo, sua utilização em misturas pode ser tecnicamente viável quando integrada a sistemas multicamadas de cobertura ou quando os benefícios relacionados ao controle da retração e ao aproveitamento ambiental do resíduo compensarem o incremento da condutividade hidráulica.

4.6 Permeabilidade intrínseca aparente ao ar

A permeabilidade ao ar constitui um parâmetro relevante para a avaliação de camadas de cobertura de aterros sanitários, uma vez que a fase gasosa presente nos vazios do solo representa um dos principais meios de transporte do metano, do dióxido de carbono e dos demais componentes do biogás. Diferentemente da condutividade hidráulica, associada ao fluxo de água, a permeabilidade intrínseca é expressa em unidade de área e procura representar a capacidade da estrutura porosa transmitir um fluido, descontando-se a influência direta de propriedades como a viscosidade dinâmica.

Em materiais não saturados, contudo, a passagem do gás ocorre somente através da parcela dos poros ocupada por ar e interconectada. Por esse motivo, a permeabilidade medida é fortemente influenciada pelo teor de água, pelo grau de saturação, pela massa específica seca, pela distribuição dos tamanhos dos poros e pela tortuosidade das trajetórias gasosas. A permeabilidade ao ar dos solos pode variar entre aproximadamente 10^{-19} e 10^{-7} m², evidenciando a amplitude desse parâmetro e sua sensibilidade às condições de preparação e ensaio.

Lu *et al.* (2023) ressaltam que ensaios de permeabilidade ao ar podem ser realizados em regime permanente ou transiente, mas que a interpretação deve considerar possíveis efeitos de fuga do gás pelas interfaces do sistema, não linearidade do fluxo, variação de saturação e características específicas do equipamento. Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo representam o comportamento das amostras nas condições de moldagem e pressão avaliadas, não devendo ser empregados diretamente como parâmetros universais de campo.

A Tabela 27 reúne os valores de permeabilidade intrínseca aparente ao ar das composições analisadas. O solo natural foi adotado como referência para o cálculo da permeabilidade relativa.

Tabela 27 - Permeabilidade intrínseca aparente ao ar dos materiais e compósitos. (Continua)

Material/amostra	k_{ai} (m ²)	$\log_{10} k_{ai}$	$k_{ai}/k_{ai,solo}$
Solo (S)	$1,00 \times 10^{-14}$	-14,000	1,00
S0.50F6	$2,30 \times 10^{-14}$	-13,638	2,30
S0.75F6	$3,60 \times 10^{-14}$	-13,444	3,60
S1.25F6	$6,10 \times 10^{-14}$	-13,215	6,10
S0.50F12	$2,05 \times 10^{-14}$	-13,688	2,05
S0.75F12	$2,80 \times 10^{-14}$	-13,553	2,80
S1.25F12	$6,80 \times 10^{-14}$	-13,167	6,80
90S10C	$5,20 \times 10^{-14}$	-13,284	5,20
80S20C	$1,25 \times 10^{-13}$	-12,903	12,50
70S30C	$2,45 \times 10^{-13}$	-12,611	24,50
90S10C0.50F12	$6,80 \times 10^{-13}$	-13,167	6,80
90S10C0.75F12	$8,30 \times 10^{-13}$	-13,081	8,30
90S10C1.25F12	$1,15 \times 10^{-13}$	-12,939	11,50

Tabela 27 - Permeabilidade intrínseca aparente ao ar dos materiais e compósitos. (Conclusão)

Material/amostra	$k_{ai}(m^2)$	$\log_{10} k_{ai}$	$k_{ai}/k_{ai,solo}$
80S20C0.50F12	$1,48 \times 10^{-13}$	-12,830	14,80
80S20C0.75F12	$1,75 \times 10^{-13}$	-12,757	17,50
80S20C1.25F12	$2,25 \times 10^{-13}$	-12,648	22,50
70S30C0.50F12	$2,85 \times 10^{-13}$	-12,545	28,50
70S30C0.75F12	$3,00 \times 10^{-13}$	-12,523	30,00
70S30C1.25F12	$3,20 \times 10^{-13}$	-12,495	32,00
Cinza leve (C)	$8,00 \times 10^{-12}$	-11,097	800,00

Fonte: Autor (2026).

Os resultados abrangeram aproximadamente três ordens de grandeza, desde $1,00 \times 10^{-14} m^2$, para o solo natural, até $8,00 \times 10^{-12} m^2$, para a cinza leve. Apesar dessa variação, todos os valores permaneceram dentro do intervalo documentado para solos e materiais porosos ensaiados com ar.

O solo apresentou a menor permeabilidade entre as matrizes compactadas, indicando uma estrutura com baixa continuidade de poros preenchidos por ar na condição de ensaio. A incorporação de fibras e cinza elevou progressivamente a permeabilidade aparente, embora a magnitude do efeito tenha variado conforme a composição.

A incorporação de fibras de polipropileno aumentou a permeabilidade ao ar do solo em todas as dosagens avaliadas, com efeito mais pronunciado à medida que o teor de fibras aumentou. Para ambos os comprimentos, os maiores valores foram registrados com 1,25% de fibras, quando a permeabilidade atingiu $6,10 \times 10^{-14} m^2$ para 6 mm e $6,80 \times 10^{-14} m^2$ para 12 mm.

Embora tenham ocorrido pequenas diferenças entre os comprimentos, o teor de fibras mostrou-se o fator mais influente. Esse comportamento indica que o aumento da quantidade de fibras favoreceu a formação de interfaces e caminhos preferenciais de fluxo, tornando a estrutura do material mais aberta e permeável ao ar.

Nos teores de 0,50% e 0,75%, as fibras de 12 mm apresentaram permeabilidades aproximadamente 11% e 22% inferiores às das fibras de 6 mm. Em contrapartida, no teor de 1,25%, a amostra com fibras de 12 mm apresentou valor cerca de 11% superior ao obtido com fibras de 6 mm. Esse comportamento indica que não existe uma relação linear simples entre comprimento da fibra e permeabilidade. Com o aumento do teor para 1,25%, entretanto, a maior

sobreposição entre filamentos e a dificuldade de homogeneização podem favorecer a formação de vazios interconectados.

A elevação de k_{ai} pode ser associada à redução da massa específica seca máxima observada nas misturas reforçadas e à formação de interfaces entre o polímero e as partículas sólidas da matriz. Essas interfaces podem atuar como poros alongados, cuja contribuição para o fluxo depende da orientação, da dispersão e do contato entre as fibras.

Lu *et al.* (2023) destacam que a permeabilidade ao ar é controlada principalmente pelos poros preenchidos por ar que participam de uma rede contínua, não sendo suficiente considerar somente a porosidade total. Feng *et al.* (2023) também demonstraram que a distribuição dos tamanhos dos poros e a conectividade dos macroporos influenciam de forma decisiva o transporte gasoso em materiais compactados.

A substituição parcial do solo por cinza leve aumentou de forma expressiva a permeabilidade intrínseca aparente ao ar. Esse efeito tornou-se mais intenso com o aumento do teor de cinza, alcançando valores quase 25 vezes superior ao do solo na mistura 70S30C, respectivamente.

A tendência confirma que a incorporação da cinza favoreceu uma estrutura mais aberta e permeável, com maior conectividade entre os poros à medida que sua participação na matriz aumentou. O aumento do teor de cinza nas misturas solo-cinza também foi acompanhado por redução da massa específica seca máxima. A redução da densificação tende a aumentar o volume de vazios, mas o efeito sobre o transporte gasoso depende, principalmente, da parcela desses vazios que permanece ocupada por ar e conectada através do corpo de prova.

Tendência semelhante foi relatada por Sena *et al.* (2020) em misturas de solo e composto orgânico para biocoberturas, nas quais a incorporação de um material menos denso e mais poroso elevou a permeabilidade ao ar da ordem de 10^{-14} para 10^{-13} m². Embora o composto orgânico e a cinza apresentem naturezas distintas, ambos os resultados mostram que a presença de materiais leves e porosos pode ampliar a conectividade da fase gasosa.

A adição das fibras às matrizes contendo cinza promoveu aumento adicional da permeabilidade intrínseca aparente ao ar. A magnitude do acréscimo, entretanto, diminuiu em termos relativos à medida que a participação da cinza aumentou (Tabela 28).

Tabela 28 - Efeito das fibras sobre a permeabilidade ao ar das matrizes solo–cinza.

Matriz/amostra	$k_{ai}(m^2)$	$k_{ai}/k_{ai,matriz}$	Variação em relação à matriz
90S10C	$5,20 \times 10^{-14}$	1,00	—
90S10C0.50F12	$6,80 \times 10^{-14}$	1,31	+30,8%
90S10C0.75F12	$8,30 \times 10^{-14}$	1,60	+59,6%
90S10C1.25F12	$1,15 \times 10^{-13}$	2,21	+121,2%
80S20C	$1,25 \times 10^{-13}$	1,00	—
80S20C0.50F12	$1,48 \times 10^{-13}$	1,18	+18,4%
80S20C0.75F12	$1,75 \times 10^{-13}$	1,40	+40,0%
80S20C1.25F12	$2,25 \times 10^{-13}$	1,80	+80,0%
70S30C	$2,45 \times 10^{-13}$	1,00	—
70S30C0.50F12	$2,85 \times 10^{-13}$	1,16	+16,3%
70S30C0.75F12	$3,00 \times 10^{-13}$	1,22	+22,4%
70S30C1.25F12	$3,20 \times 10^{-13}$	1,31	+30,6%

Fonte: Autor (2026).

Na matriz 90S10C, o efeito das fibras foi expressivo, principalmente no teor de 1,25%, para o qual a permeabilidade tornou-se aproximadamente 2 vezes maior que à da matriz sem reforço. Na série 80S20C, os aumentos variaram entre 18% e 80%. Na série 70S30C, os acréscimos foram mais limitados, situando-se entre aproximadamente 16% e 31%.

A diminuição do efeito relativo das fibras com o aumento do teor de cinza sugere que a matriz 70S30C já apresentava uma rede gasosa suficientemente aberta e conectada. Nessa condição, a introdução de novas interfaces fibra–matriz produziu um incremento marginal menor do que aquele observado na matriz mais densa, com 10% de cinza.

Em valores absolutos, contudo, as misturas com 30% de cinza apresentaram as maiores permeabilidades entre os compósitos. A amostra 70S30C1.25F12 atingiu $3,20 \times 10^{-13} m^2$, valor 32 vezes superior ao do solo natural.

O efeito combinado pode ser compreendido como a sobreposição de dois mecanismos. A cinza reduz a densidade e a plasticidade da matriz, ampliando a porosidade preenchida por ar. As fibras acrescentam interfaces alongadas e podem dificultar o rearranjo das partículas durante a compactação. Quando esses mecanismos atuam simultaneamente, aumenta a probabilidade de formação de trajetórias gasosas contínuas.

A comparação entre os resultados de compactação e permeabilidade mostrou que as composições de menor massa específica seca máxima apresentaram, de maneira geral, maior permeabilidade intrínseca ao ar. Considerando todos os compósitos, com exceção da cinza pura, observou-se forte correlação linear negativa entre $\log_{10} k_{ai}$ e a massa específica seca máxima, com $r = -0,96$. Essa associação indica que a redução da densificação foi acompanhada pelo aumento da conectividade da fase gasosa, embora não demonstre uma relação causal exclusiva.

Também foi observada forte correlação positiva entre a permeabilidade intrínseca ao ar e a condutividade hidráulica, quando ambas foram analisadas em escala logarítmica, com $r = 0,98$. O resultado indica que as modificações que favoreceram o fluxo de água também favoreceram, de modo geral, o fluxo de ar. Essa convergência pode ser atribuída ao aumento do índice de vazios e da conectividade dos poros produzido pela incorporação da cinza e das fibras. Os valores utilizados nessa análise correspondem aos resultados consolidados de permeabilidade ao ar, condutividade hidráulica e compactação.

Apesar dessa correlação, os mecanismos de fluxo são distintos. Enquanto a água escoar preferencialmente pelos poros preenchidos pela fase líquida, o transporte de ar depende da continuidade dos poros drenados. Assim, materiais com porosidade total semelhante podem apresentar permeabilidades gasosas distintas em função do grau de saturação e da distribuição do tamanho dos poros.

Resultados semelhantes foram apresentados por Lu *et al.* (2023), que identificaram a densidade, a porosidade e o teor de água como fatores determinantes da permeabilidade ao ar em solos compactados. Segundo os autores, o aumento do grau de saturação reduz a porosidade preenchida por ar e pode limitar significativamente o transporte gasoso, sobretudo quando a água interrompe a continuidade dos macroporos. Da mesma forma, Wen *et al.* (2023) demonstraram que o fluxo de gás em camadas compactadas também é controlado pela pressão de entrada do gás e pela pressão capilar, que condicionam a abertura e a continuidade dos caminhos preferenciais de fluxo.

Os valores obtidos nesta pesquisa representam corpos de prova preparados sob condições controladas de compactação e umidade. Em campo, entretanto, a permeabilidade ao ar varia continuamente em resposta aos ciclos de umedecimento e secagem. Durante o umedecimento, a água ocupa progressivamente os poros e reduz a continuidade da fase gasosa; durante a secagem, o esvaziamento dos poros restabelece essas conexões e favorece o transporte de ar. Além disso, a perda de umidade pode induzir retração e fissuração, criando trajetórias de fluxo muito mais significativas que os poros originalmente presentes na matriz.

A incorporação das fibras promoveu aumento da permeabilidade ao ar da matriz intacta. Entretanto, esse comportamento deve ser analisado em conjunto com sua capacidade potencial de restringir a abertura e a propagação de fissuras durante a secagem, aspecto que pode reduzir a permeabilidade equivalente da camada em condições de campo. Essa interação será discutida posteriormente com base nos resultados de retração e da análise digital de imagens.

Não existe um único valor máximo de permeabilidade intrínseca ao ar aplicável a todas as camadas de cobertura. O desempenho desejável depende da função da camada no sistema. Em uma camada de cobertura destinada à retenção do biogás, valores menores de k_{ai} são favoráveis, pois restringem o fluxo advectivo ascendente. Em contrapartida, em uma camada de oxidação de metano, uma permeabilidade moderada pode ser necessária para permitir a entrada de oxigênio e sustentar a atividade dos microrganismos metanotróficos. Em camadas de biocoberturas o teor de material orgânico, a compactação e o grau de saturação devem ser ajustados para conciliar transporte gasoso, retenção de água e oxidação do metano.

Para uma camada com função predominantemente de barreira, o solo natural apresentou o comportamento mais favorável entre os materiais intactos, com $k_{ai} = 1,00 \times 10^{-14} \text{ m}^2$. Entre as misturas solo-fibra, os menores valores foram observados em S0.50F12 e S0.75F12, indicando que baixos teores de fibras podem ser incorporados sem comprometer de forma significativa a capacidade de retenção gasosa.

As composições com 10% de cinza ainda permaneceram próximas da ordem de grandeza das misturas reforçadas sem cinza. Entretanto, o aumento para 20% e 30% deslocaram predominantemente os resultados para a ordem de 10^{-13} m^2 , evidenciando maior facilidade de transporte de gás através da matriz compactada.

4.7 Resistência à compressão não confinada

O ensaio de compressão não confinada foi empregado para avaliar a resposta mecânica do solo natural, da cinza leve e das misturas produzidas com fibras de polipropileno. Para a aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários, a análise não se limitará à resistência máxima, pois o material também precisa acomodar deformações decorrentes de retração, variações de umidade e recalques diferenciais sem apresentar ruptura localizada.

Neste capítulo, a resposta dos materiais foi analisada por meio da resistência à compressão não confinada q_u , a deformação axial correspondente ao pico ε_p e a tenacidade até

o pico T_p . Essa escolha permite avaliar conjuntamente a capacidade resistente, a deformabilidade e a energia absorvida até a mobilização da resistência máxima.

A resistência à compressão não confinada corresponde ao maior valor de tensão registrado na curva tensão–deformação $q_u = \sigma_{c,max}$. A deformação no pico corresponde à deformação axial na qual q_u é mobilizada. A tenacidade até o pico foi obtida pela área sob a curva entre o início do ensaio e ε_p .

A relação $s_u = q_u/2$, frequentemente utilizada para solos coesivos saturados submetidos a carregamento não drenado, não foi aplicada aos compósitos estudados. Os corpos de prova foram produzidos por compactação, encontravam-se parcialmente saturados e continham constituintes com comportamentos mecânicos distintos, de modo que q_u foi empregado diretamente como parâmetro comparativo.

O quadro 5 apresenta os parâmetros utilizados na análise dos ensaios de compressão simples não confinada, suas formas de obtenção, unidades e respectivas finalidades na interpretação do comportamento mecânico das misturas.

Quadro 5 - Parâmetros avaliados nos ensaios de compressão simples não confinada.

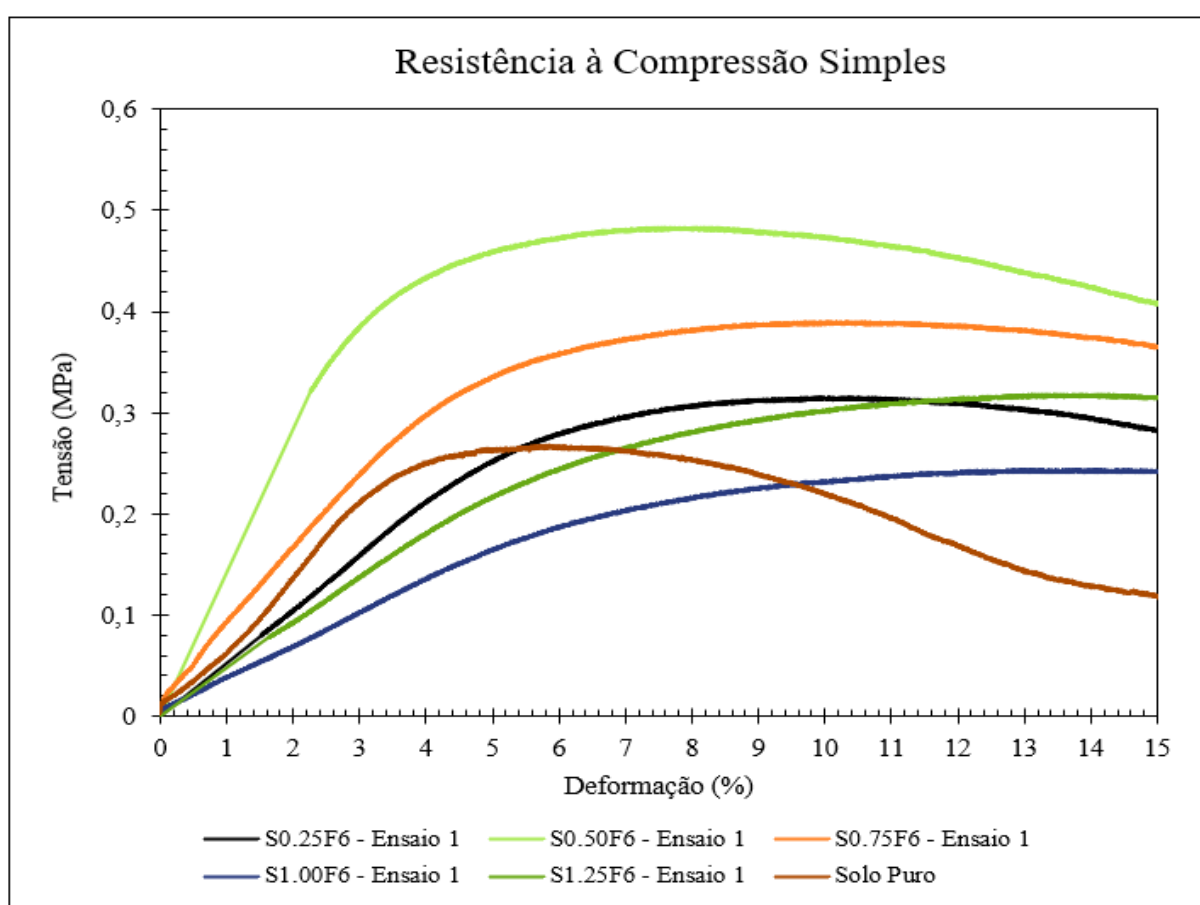
Parâmetro	Símbolo	Forma de obtenção	Unidade	Finalidade da análise
Tensão máxima de compressão	$q_u (\sigma_{c,max})$	Maior valor de tensão registrado na curva tensão–deformação	kPa	Avaliar a resistência de pico da mistura
Deformação axial no pico	ε_{pico}	Deformação axial correspondente à tensão máxima de compressão	%	Indicar a capacidade de deformação até a mobilização da resistência máxima
Módulo secante a 50% da tensão máxima	E_{50}	Razão entre 50% da tensão máxima e a deformação correspondente no ramo inicial da curva	kPa	Avaliar a rigidez secante inicial da mistura
Tenacidade até o pico	T_{pico}	Área sob a curva tensão–deformação entre o início do ensaio e a deformação de pico	kJ/m ³	Quantificar a energia absorvida até a resistência máxima

Fonte: Autor (2026).

Os Gráficos 12 e 13 apresentam as curvas tensão–deformação obtidas nos ensaios de compressão não confinada para o solo natural e para as misturas reforçadas com fibras de 6 mm e 12 mm, respectivamente. As curvas permitem visualizar qualitativamente a influência do comprimento e da dosagem das fibras sobre a resistência, a deformabilidade e a forma da resposta mecânica das misturas, complementando a análise quantitativa apresentada. No solo

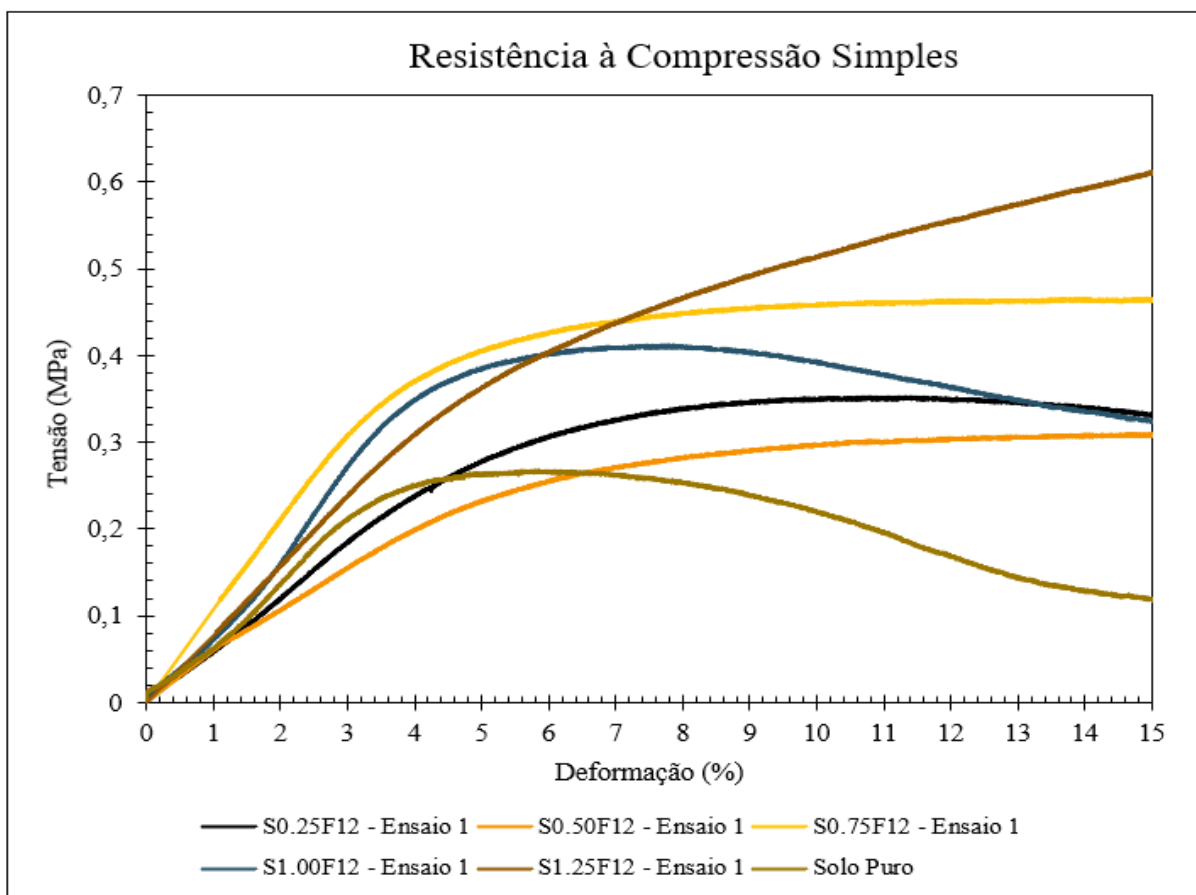
natural, a resistência máxima foi mobilizada em deformações relativamente pequenas, sendo seguida por redução gradual da tensão, comportamento característico de uma ruptura mais localizada e de menor capacidade de redistribuição das tensões. A incorporação das fibras promoveu deslocamento do pico de resistência para maiores deformações e aumento da área sob as curvas, indicando maior capacidade de absorção de energia e comportamento progressivamente mais dúctil.

Gráfico 12 - Curva tensão-deformação para os ensaios de RCS da amostra de solo (puro) e para as amostras com os diferentes teores da fibra F6.



Fonte: Autor (2026).

Gráfico 13 - Curva tensão-deformação para os ensaios de RCS da amostra de solo (puro) e para as amostras com os diferentes teores da fibra F12.



Fonte: Autor (2026).

Nas misturas reforçadas com fibras de 6 mm observa-se que a resposta mecânica variou com a dosagem incorporada. A mistura S0.50F6 apresentou a maior tensão de pico entre as composições dessa série, enquanto os maiores teores de fibras não resultaram em incrementos proporcionais de resistência. Em contrapartida, algumas misturas, especialmente S1.25F6, apresentaram maior capacidade de sustentar tensões em deformações elevadas, evidenciando que o reforço passou a atuar predominantemente sobre a ductilidade e a resposta pós-pico. Esse comportamento indica que o aumento da dosagem não produz, necessariamente, ganhos contínuos de resistência, dependendo da eficiência da dispersão das fibras e da interação estabelecida com a matriz do solo.

As curvas das misturas contendo fibras de 12 mm evidenciam comportamento distinto. Além do aumento da resistência máxima em algumas composições, observa-se deslocamento mais pronunciado do pico para maiores deformações e manutenção da capacidade resistente ao longo do carregamento. Destaca-se a mistura S1.25F12, cuja curva apresentou crescimento contínuo da tensão até o limite de deformação imposto pelo ensaio, sem

evidenciar perda significativa de resistência, sugerindo que o mecanismo de reforço permaneceu ativo durante toda a deformação analisada. As misturas S0.75F12 e S1.00F12 também apresentaram comportamento marcadamente mais dúctil que o solo natural, com aumento expressivo da área sob a curva.

A Tabela 29 apresenta os valores médios obtidos para os três parâmetros principais. Os resultados são apresentados como média e desvio-padrão para q_u . Quando apenas um corpo de prova foi mantido na análise, não foi calculada medida de dispersão.

Tabela 29 - Resultados consolidados dos ensaios de compressão não confinada.

Mistura	n	q_u médio $\pm$ DP (kPa)	ε_p médio (%)	T_p médio (kJ/m ³)
Solo	3	279 $\pm$ 24	7,22	12,66
Cinza leve	4	119 $\pm$ 63	4,53	2,88
S0.25F6	2	292 $\pm$ 33	9,95	18,79
S0.50F6	2	469 $\pm$ 20	9,22	29,40
S0.75F6	1	390	10,03	28,52
S1.00F6	2	240 $\pm$ 6	13,07	21,64
S1.25F6	2	331 $\pm$ 18	14,57	34,01
S0.25F12	2	382 $\pm$ 7	10,86	29,34
S0.50F12	2	327 $\pm$ 23	15,37	36,10
S0.75F12	2	544 $\pm$ 66	26,12	119,35
S1.00F12	1	390	22,67	70,15
S1.25F12	2	807 $\pm$ 16	30,34	169,35
90S10C	3	574 $\pm$ 123	4,32	13,54
80S20C	3	341 $\pm$ 51	4,51	7,80
70S30C	3	338 $\pm$ 21	2,27	3,72
90S10C0.50F12	3	442 $\pm$ 78	19,99	73,92
90S10C0.75F12	3	468 $\pm$ 58	17,78	59,87
90S10C1.25F12	3	566 $\pm$ 77	21,24	78,57
80S20C0.50F12	2	586 $\pm$ 23	13,12	63,11
80S20C0.75F12	2	484 $\pm$ 52	19,87	81,03
80S20C1.25F12	3	842 $\pm$ 64	21,65	116,06
70S30C0.50F12	3	358 $\pm$ 69	19,26	51,50
70S30C0.75F12	3	330 $\pm$ 43	9,95	22,18
70S30C1.25F12	3	623 $\pm$ 59	20,81	79,20

Fonte: Autor (2026).

O solo natural apresentou resistência média à compressão simples q_u de 279 kPa, deformação axial no pico de 7,22% e tenacidade de 12,66 kJ/m³, constituindo a condição de

referência para avaliação do efeito do reforço fibroso. A incorporação das fibras modificou simultaneamente a resistência, a deformabilidade e a capacidade de absorção de energia das misturas, embora a resposta não tenha sido monotônica em toda a faixa de dosagens investigada.

Entre as misturas reforçadas com fibras de 6 mm, o melhor desempenho foi obtido para S0.50F6, cuja resistência aumentou aproximadamente 68% em relação ao solo natural, enquanto a tenacidade apresentou incremento superior a 100%. Entretanto, o aumento do teor de fibras não resultou em ganhos contínuos de resistência. A mistura S1.00F6 apresentou resistência inferior à do solo de referência, enquanto S1.25F6 destacou-se principalmente pelo aumento da deformação no pico, aproximadamente duas vezes superior à observada para o solo. Esses resultados indicam que, para fibras de menor comprimento, o principal benefício do reforço esteve relacionado ao aumento da ductilidade e da capacidade de absorção de energia, e não ao incremento sistemático da resistência de pico.

Esse comportamento pode ser atribuído à interação entre as fibras e a matriz do solo. Em teores moderados, as fibras interceptam superfícies potenciais de ruptura e transferem tensões por aderência e atrito desenvolvidos na interface fibra–solo, retardando a propagação das descontinuidades e aumentando a deformabilidade do material. Entretanto, o aumento da dosagem não implica, necessariamente, maior eficiência do reforço. Conforme discutido por Tang *et al.* (2007), a resposta mecânica depende da qualidade da interação fibra–matriz, enquanto Hejazi *et al.* (2012) destacam que teores elevados podem dificultar a distribuição homogênea das fibras, reduzindo a eficiência dos mecanismos de reforço.

As misturas contendo fibras de 12 mm apresentaram comportamento significativamente superior ao observado para as fibras de menor comprimento. A composição S0.75F12 atingiu resistência de 544 kPa e tenacidade aproximadamente 9,4 vezes superior à do solo natural, enquanto o melhor desempenho foi obtido para S1.25F12, com resistência média de 807 kPa, deformação axial no pico de 30,34% e tenacidade de 169,35 kJ/m³. Em relação ao solo natural, esses resultados representam incremento de aproximadamente 189% na resistência, acompanhado de expressivo aumento da ductilidade e da energia absorvida até o pico.

O desempenho superior das fibras de 12 mm está associado ao maior comprimento de ancoragem desenvolvido na matriz, que amplia a área de contato entre fibra e solo e aumenta a resistência ao arrancamento. Como consequência, ocorre maior mobilização dos mecanismos de transferência de tensões e redistribuição dos esforços durante o carregamento, retardando a formação da superfície de ruptura e favorecendo um comportamento menos frágil. Tendência

semelhante foi observada por Tang *et al.* (2007) em solos argilosos reforçados com fibras de polipropileno, que apresentaram aumento simultâneo da resistência à compressão simples, da deformação na ruptura e da resistência residual. Revisando diferentes estudos sobre reforço fibroso, Hejazi *et al.* (2012) também destacam que o comprimento das fibras exerce influência decisiva na eficiência do reforço, desde que haja adequada dispersão na matriz.

Com o objetivo de facilitar a comparação entre as misturas reforçadas com fibras de 12 mm, a Tabela 30 apresenta os incrementos percentuais de resistência à compressão simples, deformação axial no pico e tenacidade em relação ao solo natural.

Tabela 30 - Variação dos parâmetros mecânicos das misturas reforçadas com fibras de 12 mm em relação ao solo natural

Mistura	q_u médio (kPa)	ε_p médio (%)	T_p médio (kJ/m³)	Variação de q_u	Variação de ε_p	Variação de T_p
Solo	279	7,22	12,66	-	-	-
S0.25F12	382	10,86	29,34	+36,9%	+50,4%	+131,8%
S0.50F12	327	15,37	36,10	+17,2%	+112,9%	+185,2%
S0.75F12	544	26,12	119,35	+95,0%	+261,8%	+842,7%
S1.00F12	390	22,67	70,15	+39,8%	+214,0%	+454,1%
S1.25F12	807	30,34	169,35	+189,2%	+320,2%	+1.237,7%

Fonte: Autor (2026).

A Tabela 30 evidencia que a incorporação de fibras de 12 mm promoveu incrementos expressivos nos parâmetros mecânicos, porém com magnitudes distintas. Os maiores ganhos foram observados para a tenacidade, seguida pela deformação axial no pico, enquanto os incrementos de resistência à compressão simples, embora significativos, apresentaram menor magnitude relativa. Esse comportamento demonstra que o principal efeito das fibras consistiu em modificar o modo de ruptura da matriz, tornando-a progressivamente menos frágil e mais capaz de absorver energia antes da ruptura.

Observa-se ainda que o aumento do teor de fibras não resultou em incrementos proporcionais para todos os parâmetros. Embora a resistência tenha apresentado oscilações entre as diferentes dosagens, a deformação axial no pico e a tenacidade exibiram tendência geral de crescimento, alcançando seus maiores valores na mistura S1.25F12. Esses resultados sugerem que o maior comprimento das fibras favoreceu o desenvolvimento de um comprimento de ancoragem mais eficiente, ampliando a transferência de tensões entre fibra e matriz e retardando a propagação das superfícies de ruptura.

Essa interpretação é consistente com os resultados apresentados por Tang *et al.* (2007), que observaram aumentos mais expressivos na ductilidade e na capacidade de absorção de energia do que na resistência máxima em solos argilosos reforçados com fibras de polipropileno. De forma semelhante, Hejazi *et al.* (2012) destacam que o principal benefício do reforço fibroso está associado ao aumento da ductilidade e à redistribuição das tensões na matriz. Em aplicações voltadas a barreiras geotécnicas, Plé e Lê (2012) verificaram que a incorporação de fibras de polipropileno reduziu o comportamento frágil de uma argila siltosa utilizada como material de cobertura, enquanto Ehrlich, Almeida e Curcio (2019) observaram que a inclusão de fibras produziu compósitos simultaneamente mais resistentes e mais deformáveis, evidenciando a capacidade do reforço em retardar a evolução das superfícies de ruptura.

Sob o ponto de vista da aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários, esses resultados são particularmente relevantes, pois materiais com maior capacidade de deformação e absorção de energia tendem a acomodar tensões decorrentes da retração, de recalques diferenciais e das variações de umidade com menor propensão ao desenvolvimento de fissuras. Assim, além do aumento da resistência mecânica, o reforço fibroso pode contribuir para a preservação da integridade estrutural da camada de cobertura, aspecto que será discutido de forma integrada nas seções seguintes, juntamente com os resultados de retração, análise digital de imagens e permeabilidade ao gás.

Embora a mistura S1.25F12 tenha apresentado o melhor desempenho mecânico entre os compósitos solo-fibra, sua seleção para aplicação em camadas de cobertura deve considerar também aspectos relacionados à trabalhabilidade, à homogeneidade da mistura, à facilidade de compactação e ao desempenho hidráulico. Sob esse aspecto, a composição S0.75F12 apresentou comportamento particularmente interessante, pois combinou elevada resistência, deformabilidade e tenacidade com menor consumo de fibras, configurando uma alternativa potencialmente mais equilibrada sob os pontos de vista mecânico e executivo.

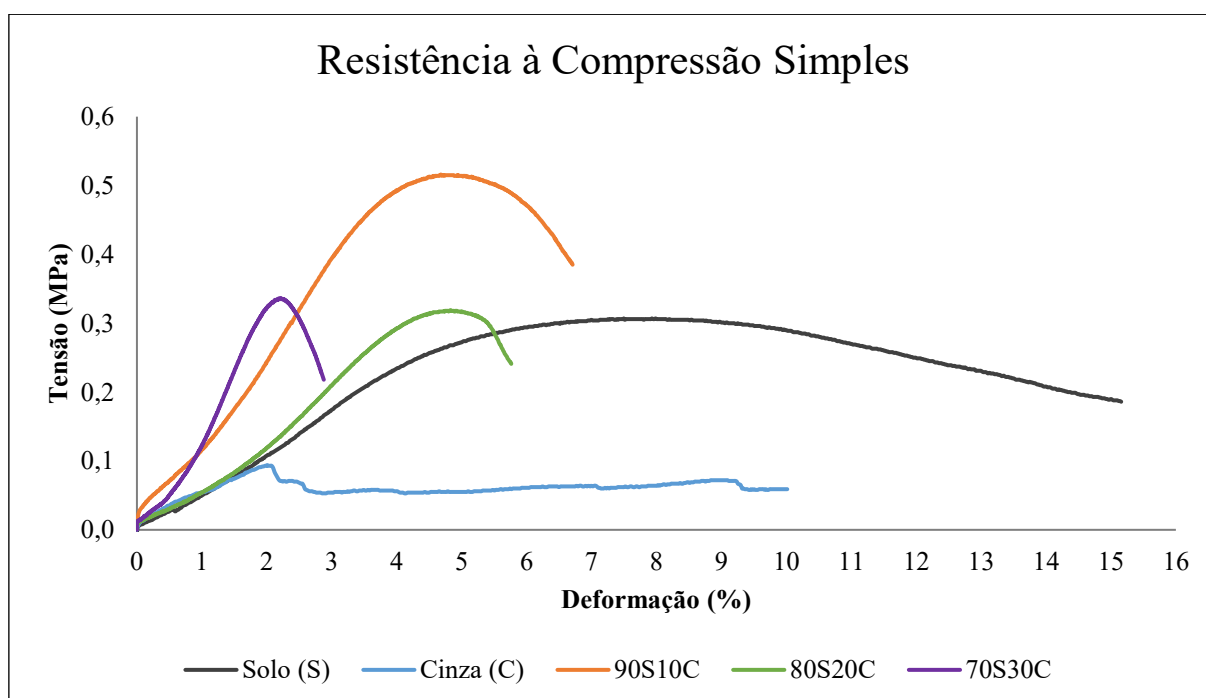
Considerando os resultados obtidos para o solo reforçado, optou-se por utilizar apenas fibras de 12 mm nas misturas solo-cinza. Essa escolha fundamentou-se no desempenho superior observado na etapa anterior, na qual esse comprimento proporcionou ganhos simultâneos de resistência, ductilidade e capacidade de absorção de energia. Além disso, a adoção de um único comprimento de fibras permitiu reduzir o número de combinações experimentais e aprofundar a avaliação da interação entre a cinza leve e o reforço fibroso.

A cinza leve, quando avaliada isoladamente, apresentou resistência média à compressão simples de 119 kPa, deformação axial no pico de 4,53% e tenacidade de 2,88 kJ/m³, evidenciando comportamento significativamente inferior ao do solo natural. Entretanto, sua incorporação em substituição parcial ao solo produziu respostas distintas em função do teor utilizado. A matriz 90S10C apresentou resistência média de 574 kPa, superior ao dobro daquela obtida para o solo natural, embora acompanhada por redução da deformação no pico para 4,32%. A tenacidade permaneceu próxima à do solo de referência, indicando que o expressivo aumento da resistência não foi acompanhado por ganho proporcional na capacidade de absorção de energia.

Nas matrizes 80S20C e 70S30C, os ganhos de resistência foram mais modestos, com valores de 341 kPa e 338 kPa, respectivamente, correspondendo a incrementos de aproximadamente 22% e 21% em relação ao solo natural. Em contrapartida, ambas apresentaram redução da deformabilidade e da tenacidade, indicando que o aumento do teor de cinza tornou a resposta mecânica progressivamente mais rígida e menos capaz de suportar deformações antes da ruptura.

O Gráfico 14 apresenta as curvas tensão-deformação obtidas para as misturas binárias solo-cinza, juntamente com as curvas do solo e da cinza.

Gráfico 14 - Curva tensão-deformação para os ensaios de RCS da amostra de solo (puro), cinza e misturas binárias solo-cinza.



Fonte: Autor (2026).

O comportamento observado através dos gráficos sugere que a incorporação da cinza modificou a resposta mecânica da matriz por mecanismos distintos. No teor de 10%, observou-se expressivo incremento da resistência, possivelmente associado ao melhor empacotamento das partículas, à redução da plasticidade e à ocorrência de interações físico-químicas favorecidas pelo elevado teor de cálcio da cinza. Nos teores mais elevados, entretanto, esses benefícios foram parcialmente compensados pelo aumento da participação de partículas não coesivas e pela redução da fração argilosa ativa, resultando em menores ganhos de resistência e redução da ductilidade. Conforme discutem Yilmaz (2015), a resposta mecânica de misturas solo–cinza reforçadas com fibras depende simultaneamente do teor de cinza, da dosagem de fibras e da interação entre ambos os materiais.

Para avaliar exclusivamente o efeito do reforço fibroso, as misturas contendo cinza foram comparadas às respectivas matrizes sem fibras. A Tabela 31 apresenta os incrementos relativos de resistência à compressão simples, deformação axial no pico e tenacidade obtidos com a incorporação de fibras de 12 mm.

Tabela 31 - Variação dos parâmetros mecânicos das misturas solo–cinza reforçadas com fibras de 12 mm em relação às respectivas matrizes sem reforço.

Mistura	q_u médio (kPa)	ε_p médio (%)	T_p médio (kJ/m³)	Variação de q_u	Variação de ε_p	Variação de T_p
90S10C	574	4,32	13,54	-	-	-
90S10C0.50F12	442	19,99	73,92	-23,0%	+362,7%	+445,9%
90S10C0.75F12	468	17,78	59,87	-18,5%	+311,6%	+342,2%
90S10C1.25F12	566	21,24	78,57	-1,4%	+391,7%	+480,3%
80S20C	341	4,51	7,80	-	-	-
80S20C0.50F12	586	13,12	63,11	+71,8%	+190,9%	+709,1%
80S20C0.75F12	484	19,87	81,03	+41,9%	+340,6%	+938,8%
80S20C1.25F12	842	21,65	116,06	+146,9%	+380,0%	+1.387,9%
70S30C	338	2,27	3,72	-	-	-
70S30C0.50F12	358	19,26	51,50	+5,9%	+748,5%	+1.284,4%
70S30C0.75F12	330	9,95	22,18	-2,4%	+338,3%	+496,2%
70S30C1.25F12	623	20,81	79,20	+84,3%	+816,7%	+2.029,0%

Fonte: Autor (2026).

Os resultados apresentados na tabela evidenciam que a principal contribuição das fibras ocorreu sobre a deformabilidade e a capacidade de absorção de energia das misturas.

Independentemente do teor de cinza, todas as composições reforçadas apresentaram aumentos expressivos da deformação axial no pico e da tenacidade, enquanto os incrementos de resistência à compressão simples foram mais dependentes da composição da matriz e da dosagem de fibras. Na matriz 90S10C, o reforço promoveu principalmente ganhos de ductilidade, mantendo resistência próxima à da matriz original no teor de 1,25% de fibras. Na série 80S20C, observaram-se incrementos simultâneos de resistência, deformabilidade e tenacidade, com destaque para a mistura 80S20C1.25F12, enquanto a composição 80S20C0.75F12 apresentou comportamento mais equilibrado, conciliando bom desempenho mecânico e menor consumo de fibras. Já na matriz 70S30C, as fibras atuaram predominantemente na recuperação da ductilidade, compensando parte da rigidez introduzida pelo maior teor de cinza.

Esse comportamento é compatível com o mecanismo de reforço descrito para solos reforçados com fibras distribuídas aleatoriamente. Durante o carregamento, as fibras mobilizam tensões por aderência, atrito e resistência ao arrancamento, funcionando como elementos de ponte entre regiões da matriz e retardando a propagação das superfícies de ruptura, o que resulta em maior ductilidade e capacidade de absorção de energia (Tang *et al.*, 2007; Tang; Shi; Zhao, 2010; Plé; Lê, 2012). Entretanto, a eficiência do reforço não depende exclusivamente da dosagem adicionada. Estudos de Tang *et al.* (2007), Yilmaz (2015) e Yazici e Keskin (2024) demonstram que a resposta mecânica é condicionada simultaneamente pelo comprimento das fibras, pela sua distribuição na matriz, pelas condições de compactação e pela interação entre solo, cinza e fibras, justificando o comportamento não monotônico observado em algumas misturas.

Do ponto de vista da aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários, os resultados indicam que a avaliação do desempenho mecânico deve considerar não apenas a resistência de pico, mas também a capacidade do material de suportar deformações sem perda de continuidade estrutural. Nesse contexto, a tenacidade assume papel particularmente relevante, por estar associada à absorção de energia e ao potencial de resistência à propagação de fissuras. Falamaki *et al.* (2023) verificaram que fibras de polipropileno reduzem a fissuração de camadas argilosas compactadas, enquanto Ehrlich, Almeida e Curcio (2019) observaram que compósitos solo-fibra podem apresentar comportamento hidromecânico adequado para sistemas de contenção de resíduos, desde que a dosagem de fibras seja compatibilizada com os requisitos mecânicos, hidráulicos e executivos.

A classificação apresentada no quadro 6 evidencia que os diferentes materiais incorporados ao solo atuam de formas distintas no comportamento mecânico das misturas.

Quadro 6 - Classificação interpretativa do comportamento mecânico das misturas nos ensaios UCS. (Continua)

Amostra/ Mistura	Resistência de pico	Deformação	Tenacidade	Classificação do comportamento	Interpretação
Solo Natural	Referência	Referência	Referência	Moderadamente frágil	Apresenta resistência e deformabilidade limitadas, com menor capacidade de absorção de energia em comparação às misturas reforçadas
Cinza (C)	Baixa	Baixa e variável	Baixa	Rígido e pouco tenaz	A cinza pura não apresenta desempenho adequado como material estrutural isolado, sendo mais indicada como componente de incorporação parcial
S0.25F6	Sem ganho expressivo	Moderada	Moderada	Transição inicial	Baixo teor de fibra curta promove pequena melhoria na deformabilidade, mas sem ganho mecânico expressivo
S0.50F6	Alta	Moderada	Alta	Reforçado com bom ganho de resistência	Mistura com melhor desempenho entre as fibras de 6 mm, associando aumento de resistência e energia absorvida
S0.75F6	Alta	Moderada	Alta	Reforçado, porém com base experimental reduzida	Indica ganho mecânico relevante, mas deve ser interpretada com cautela devido ao número reduzido de corpos de prova mantidos
S1.00F6	Baixa	Alta	Moderada	Dúctil, porém pouco resistente	Aumenta a deformação no pico, mas reduz a resistência em relação ao solo natural, indicando baixa eficiência mecânica do teor adotado
S1.25F6	Moderada	Alta	Moderada a alta	Dúctil com ganho limitado de resistência	Melhora a deformabilidade, mas não apresenta desempenho equivalente às misturas com fibras de 12 mm
S0.25F12	Alta	Moderada	Alta	Reforçado e mais tenaz	O aumento do comprimento da fibra melhora a resposta mecânica mesmo em baixo teor
S0.50F12	Moderada	Alta	Alta	Dúctil e tenaz	Apresenta maior deformabilidade e boa tenacidade, apesar do ganho moderado de resistência
S0.75F12	Muito alta	Muito alta	Muito alta	Dúctil e altamente tenaz	Mistura com excelente equilíbrio entre resistência, deformabilidade e absorção de energia
S1.00F12	Alta	Muito alta	Alta	Dúctil, com base experimental reduzida	Apresenta elevada deformabilidade e tenacidade, mas deve ser interpretada com cautela pelo número reduzido de réplicas
S1.25F12	Muito alta	Muito alta	Muito alta	Altamente resistente, dúctil e tenaz	Apresenta o melhor desempenho mecânico entre as misturas solo-fibra, embora possa demandar atenção quanto à homogeneização e trabalhabilidade
90S10C	Muito alta	Baixa	Próxima ao solo	Rígido e resistente	A cinza aumenta a resistência e a rigidez, mas reduz a deformabilidade, indicando comportamento menos dúctil

Quadro 6 - Classificação interpretativa do comportamento mecânico das misturas nos ensaios UCS. (Conclusão)

Amostra/ Mistura	Resistência de pico	Deformação	Tenacidade	Classificação do comportamento	Interpretação
80S20C	Moderada	Baixa	Baixa	Rígido com ganho moderado de resistência	Apresenta aumento de resistência, mas menor capacidade de deformação e absorção de energia
70S30C	Moderada	Muito baixa	Baixa	Rígido e pouco tenaz	O aumento do teor de cinza reduz a deformabilidade e a tenacidade A fibra compensa a perda de deformabilidade da matriz com cinza, aumentando a energia absorvida
90S10C0.50F12	Alta	Muito alta	Alta	Dúctil e tenaz	Apresenta ganhos relevantes, mas com maior dispersão na deformação e na tenacidade Combina alta resistência com boa deformabilidade, embora a tenacidade padronizada seja moderada
90S10C0.75F12	Alta	Alta, porém variável	Alta	Dúctil com variabilidade	Apresenta excelente desempenho em tenacidade padronizada, com bom equilíbrio entre resistência e energia absorvida
90S10C1.25F12	Muito alta	Muito alta	Alta	Resistente e dúctil	Mistura equilibrada, com elevada deformabilidade e boa capacidade de absorção de energia
80S20C0.50F12	Muito alta	Alta	Muito alta	Dúctil e altamente eficiente	Apresenta o maior ganho de resistência do conjunto e elevada tenacidade, sendo uma das misturas mecanicamente mais promissoras A fibra aumenta a deformabilidade, mas o ganho de resistência e tenacidade é inferior ao das misturas com 20% de cinza
80S20C0.75F12	Alta	Muito alta	Muito alta	Dúctil e tenaz	Apresenta elevada variabilidade, sugerindo menor consistência mecânica para teor de cinza e fibra O maior teor de fibra melhora o desempenho da matriz com 30% de cinza, mas a tenacidade padronizada permanece inferior às melhores misturas com 20% de cinza
80S20C1.25F12	Muito alta	Muito alta	Muito alta	Altamente resistente e tenaz	
70S30C0.50F12	Moderada	Muito alta	Moderada	Dúctil com ganho mecânico limitado	
70S30C0.75F12	Moderada	Variável	Moderada	Comportamento instável	
70S30C1.25F12	Muito alta	Muito alta	Alta	Resistente e dúctil	

Fonte: Autor (2026).

Nota: (1) A classificação foi realizada de forma comparativa em relação ao solo natural, considerando conjuntamente resistência máxima, deformação no pico, módulo secante, tenacidade até o pico e variabilidade experimental. (2) Os critérios utilizados para as classificações qualitativas encontram-se apresentados no Apêndice D.

O Quadro 7 apresenta a classificação multicritério das misturas avaliadas nos ensaios UCS, considerando o desempenho relativo em resistência, deformabilidade, rigidez, tenacidade e potencial de aplicação em camada de cobertura. Essa classificação tem caráter interpretativo e foi construída a partir dos resultados médios e das tendências observadas nas curvas tensão–deformação.

Quadro 7 - Síntese multicritério do desempenho das misturas nos ensaios UCS. (Continua)

Amostra/ Mistura	Resistência	Deformab- ilidade	Rigidez E50	Tenacidade	Potencial de aplicação em cobertura
Solo Natural	Referência	Referência	Referência	Referência	Material de referência, porém com menor capacidade de absorção de energia
Cinza (C)	Baixa	Baixa	Alta e variável	Baixa	Não recomendada como material isolado
S0.25F6	Baixa a moderada	Moderada	Baixa	Moderada	Melhoria limitada em relação ao solo natural
S0.50F6	Alta	Moderada	Alta	Alta	Bom ganho mecânico com fibra curta
S0.75F6	Alta	Moderada	Alta	Alta	Potencial favorável, mas necessita cautela estatística
S1.00F6	Baixa	Alta	Baixa	Moderada	Aumento de ductilidade sem ganho de resistência
S1.25F6	Moderada	Alta	Baixa a moderada	Moderada a alta	Boa deformabilidade, mas desempenho inferior às fibras de 12 mm
S0.25F12	Alta	Moderada	Moderada	Alta	Bom desempenho mesmo com baixo teor de fibra longa
S0.50F12	Moderada	Alta	Baixa a moderada	Alta	Boa ductilidade, mas resistência moderada
S0.75F12	Muito alta	Muito alta	Alta	Muito alta	Excelente equilíbrio entre resistência, deformabilidade e energia absorvida
S1.00F12	Alta	Muito alta	Moderada	Alta	Bom comportamento mecânico, mas com menor robustez experimental
S1.25F12	Muito alta	Muito alta	Moderada	Muito alta	Melhor desempenho mecânico solo-fibra, porém pode apresentar dificuldade de homogeneização
90S10C	Muito alta	Baixa	Muito alta	Próxima ao solo	Ganho de resistência, mas com perda de ductilidade
80S20C	Moderada	Baixa	Moderada	Baixa	Ganho mecânico limitado e baixa tenacidade
70S30C	Moderada	Muito baixa	Alta	Baixa	Comportamento rígido e pouco tenaz
90S10C0.50F12	Alta	Muito alta	Alta	Alta	Boa recuperação da ductilidade com fibra
90S10C0.75F12	Alta	Alta, porém variável	Moderada	Alta	Ganho relevante, mas com maior variabilidade
90S10C1.25F12	Muito alta	Muito alta	Moderada	Alta	Boa resistência e ductilidade, porém T10% moderada
80S20C0.50F12	Muito alta	Alta	Alta	Muito alta	Melhor desempenho em tenacidade padronizada; bom equilíbrio global
80S20C0.75F12	Alta	Muito alta	Alta	Muito alta	Excelente equilíbrio entre resistência, deformabilidade e tenacidade
80S20C1.25F12	Muito alta	Muito alta	Moderada	Muito alta	Maior resistência global e elevada tenacidade; atenção à trabalhabilidade
70S30C0.50F12	Moderada	Muito alta	Baixa a moderada	Moderada	Boa deformabilidade, mas ganho mecânico limitado

Quadro 7 - Síntese multicritério do desempenho das misturas nos ensaios UCS. (Conclusão)

Amostra/ Mistura	Resistência	Deformab- ilidade	Rigidez E50	Tenacidade	Potencial de aplicação em cobertura
70S30C0.75F12	Moderada	Variável	Moderada	Moderada	Elevada variabilidade e desempenho menos consistente
70S30C1.25F12	Muito alta	Muito alta	Moderada	Alta	Bom desempenho, mas inferior às melhores misturas com 20% de cinza

Fonte: Autor (2026).

Nota: (1) A classificação foi realizada de forma comparativa, considerando os resultados de resistência máxima, deformação no pico, módulo secante E50, tenacidade até o pico, tenacidade padronizada, variabilidade experimental e possíveis implicações práticas de homogeneização e aplicação em campo. (2) Os critérios utilizados para as classificações qualitativas encontram-se apresentados no Apêndice D.

4.8 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração desempenha papel fundamental em camadas de cobertura de aterros sanitários, uma vez que retração por secagem, variações térmicas e recalques diferenciais podem induzir tensões de tração capazes de iniciar processos de fissuração. A formação dessas fissuras compromete a integridade da camada, favorecendo a infiltração de água e a migração de gases.

A resistência à tração foi avaliada por meio do ensaio de compressão diametral, que fornece uma estimativa indireta da resistência do material à abertura de fissuras. Embora a solução teórica do ensaio pressuponha material homogêneo, isotrópico e distribuição ideal de tensões, condições que não são plenamente atendidas por solos compactados e compósitos fibrosos, o método é amplamente empregado para análises comparativas. Conforme destacado por Navidtehrani *et al.* (2022), a interpretação dos resultados deve considerar as características do material e o modo de ruptura desenvolvido durante o ensaio.

Dessa forma, a análise foi baseada na resistência máxima à tração indireta ($R_{t,cd}$), no deslocamento vertical correspondente à resistência máxima (δ_p) e na energia absorvida até a resistência máxima (E_p). Também foi calculada a energia padronizada até 0,75 mm, $E_{0,75}$, permitindo comparar as misturas em um mesmo nível de deslocamento. Para as misturas reforçadas que alcançaram deslocamentos mais elevados, considerou-se adicionalmente a energia até 4,5 mm, $E_{4,5}$, como indicador da resposta após o desenvolvimento da fissura principal. A energia total registrada até o término do ensaio foi utilizada apenas como informação complementar, uma vez que os deslocamentos finais não foram uniformes entre os corpos de prova.

O quadro 8 apresenta os parâmetros utilizados na análise dos ensaios de tração por compressão diametral, suas formas de obtenção, unidades e respectivas finalidades na interpretação do comportamento mecânico das misturas.

Quadro 8 - Parâmetros avaliados nos ensaios de tração por compressão diametral.

Parâmetro	Símbolo	Forma de obtenção	Unidade	Finalidade da análise
Resistência máxima à tração indireta	$R_{t,cd}$	Calculada a partir da solicitação máxima suportada registrada no ensaio.	kPa	Avaliar a solicitação máxima suportada pela mistura e sua capacidade de retardar o início da fissuração.
Deslocamento vertical no pico	δ_p	Deslocamento vertical correspondente à mobilização da resistência máxima.	mm	Avaliar a deformabilidade e o deslocamento mobilizado pela mistura até o pico (início da fissuração principal).
Energia absorvida até o pico	E_p	Representa o trabalho realizado pela força durante o carregamento até a mobilização da resistência máxima (área sob a curva carga–deslocamento).	J	Constituir um parâmetro comparativo da capacidade de absorção de energia dos corpos de prova antes da fissuração principal.
Energia padronizada	$E_{0,75}$ e $E_{4,5}$	Trabalho realizado pela força (área sob a curva) até atingir os deslocamentos verticais específicos de 0,75 mm e 4,5 mm.	J	Comparar as misturas em um nível de deslocamento comum ($E_{0,75}$) e indicar a resposta de manutenção de carga e absorção de energia em estágios avançados, após o desenvolvimento da fissura principal ($E_{4,5}$).

Fonte: Autor (2026).

A Tabela 32 apresenta os valores médios obtidos dos ensaios.

Tabela 32 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral. (Continua)

Mistura	n	$R_{t,cd}$ (kPa)	δ_p (mm)	E_p (J)	$E_{0,75}$ (J)
Solo (S)	3	35,43	0,778	0,133	0,126
Cinza (C)	2	11,43	0,268	0,008	—
S0.25F6	2	37,22	0,811	0,143	0,127
S0.50F6	2	49,70	0,856	0,192	0,155
S0.75F6	2	39,61	2,005	0,452	0,106
S1.00F6	2	29,08	2,075	0,341	0,083
S1.25F6	2	36,72	2,814	0,607	0,090
S0.25F12	2	38,38	0,878	0,163	0,128
S0.50F12	2	35,07	2,812	0,568	0,088
S0.75F12	2	56,23	2,468	0,823	0,172
S1.00F12	2	48,52	3,242	0,917	0,103
S1.25F12	2	71,07	5,453	2,323	0,135

Tabela 32 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral. (Conclusão)

Mistura	<i>n</i>	$R_{t,cd}$ (kPa)	δ_p (mm)	E_p (J)	$E_{0,75}$ (J)
90S10C	2	18,29	1,319	0,143	0,078
80S20C	2	39,34	0,336	0,056	0,150
70S30C	2	89,50	0,272	0,088	0,324
90S10C0.50F12	2	62,13	3,064	1,074	0,149
90S10C0.75F12	3	59,12	4,586	1,651	0,141
90S10C1.25F12	3	86,56	5,735	3,056	0,190
80S20C0.50F12	3	95,82	2,319	1,273	0,252
80S20C0.75F12	3	86,34	2,330	1,206	0,231
80S20C1.25F12	3	90,19	3,624	1,850	0,166
70S30C0.50F12	3	39,41	4,123	1,053	0,083
70S30C0.75F12	3	45,05	2,491	0,696	0,120
70S30C1.25F12	3	45,68	5,022	1,299	0,092

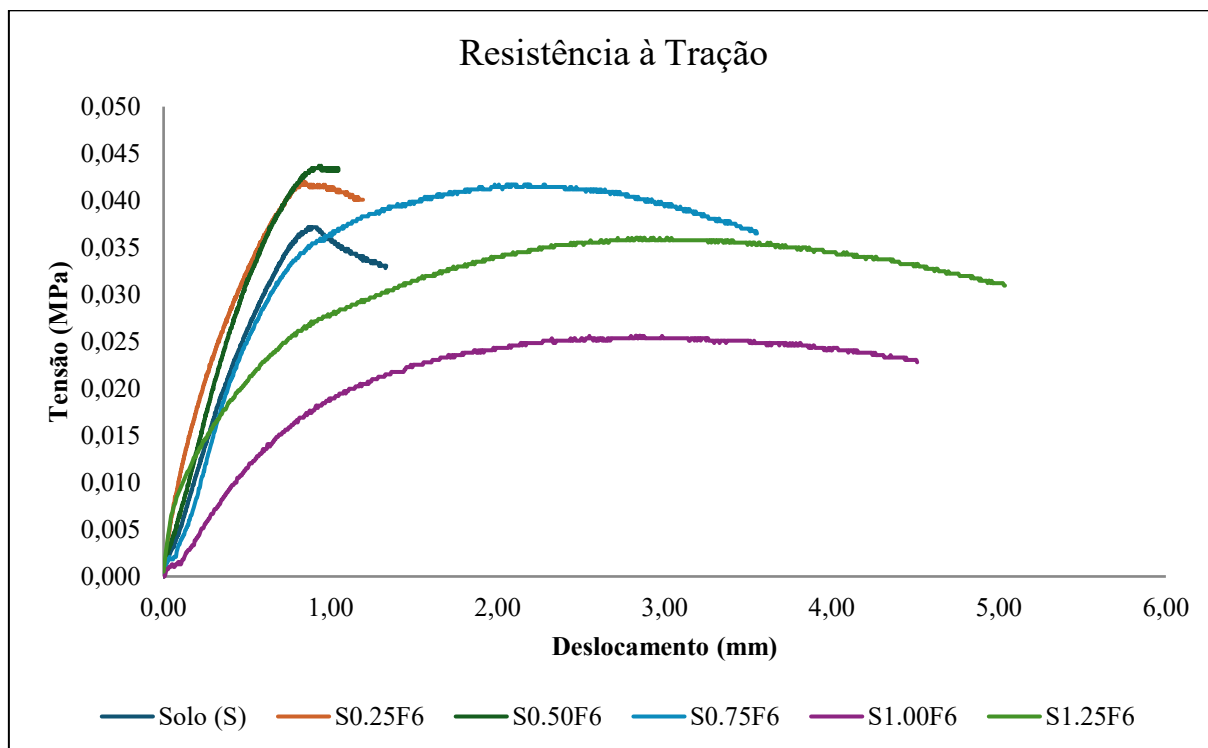
Fonte: Autor (2026).

Os resultados mostram que as misturas apresentaram respostas distintas quanto à resistência máxima e à capacidade de deformação. Algumas composições, como 70S30C, desenvolveram elevada resistência em deslocamentos reduzidos. Outras, como S1.25F12 e as misturas solo–cinza–fibra, combinaram resistência elevada com maiores deslocamentos e energias absorvidas.

A distinção entre esses comportamentos é relevante porque a resistência máxima isolada não descreve completamente o desempenho de um material sujeito à fissuração. Para uma camada de cobertura, interessa não apenas retardar o início da fissura, mas também limitar sua abertura e conservar alguma capacidade de transferência de esforços após sua formação.

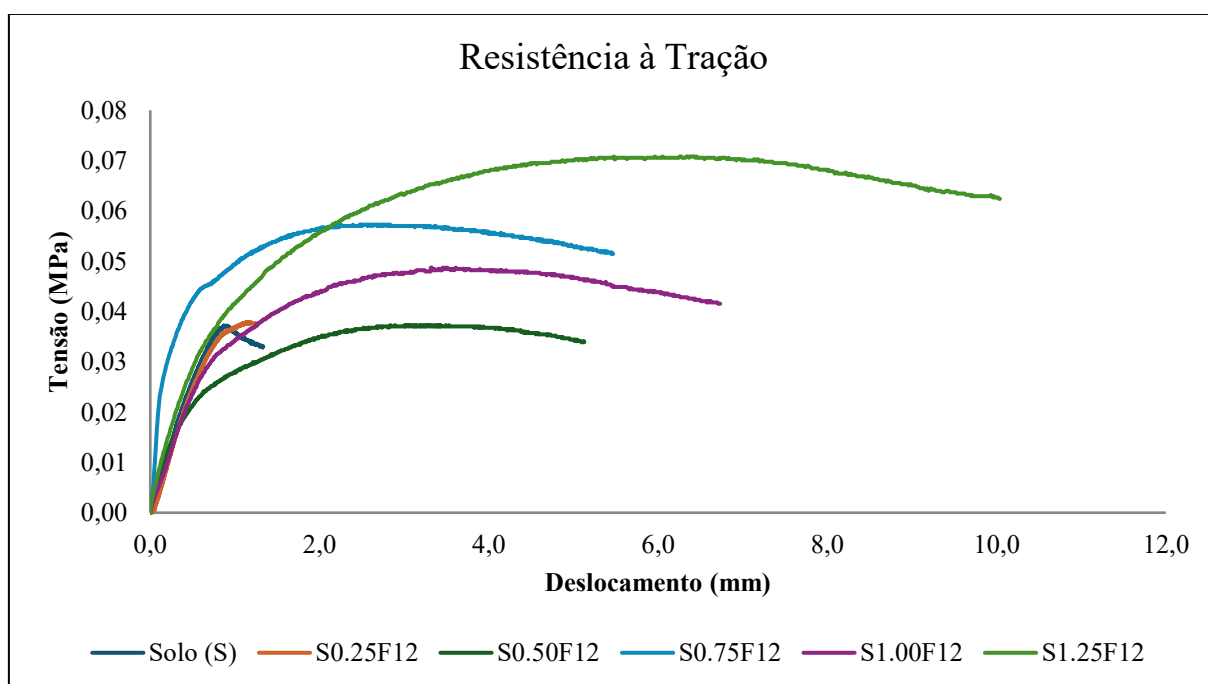
Os Gráficos 15 e 16 apresentam as curvas carga–deslocamento obtidas nos ensaios de tração por compressão diametral do solo natural e das misturas reforçadas com fibras de 6 mm e 12 mm, respectivamente. As curvas permitem avaliar qualitativamente a influência do comprimento e da dosagem das fibras sobre a resistência à tração indireta, a deformabilidade e a capacidade de absorção de energia das misturas.

Gráfico 15 - Curva tensão-deslocamento para os ensaios de TCD da amostra de solo (puro) e para as amostras com os diferentes teores da fibra F6.



Fonte: Autor (2026).

Gráfico 16 - Curva tensão-deslocamento para os ensaios de TCD da amostra de solo (puro) e para as amostras com os diferentes teores da fibra F12.



Fonte: Autor (2026).

A incorporação das fibras modificou principalmente o deslocamento no pico e a energia absorvida, enquanto a resistência à tração apresentou resposta dependente da dosagem e do comprimento das fibras. Tendência semelhante foi observada por Tang *et al.* (2016), que verificaram que o reforço fibroso aumenta a capacidade resistente e altera a resposta pós-fissuração dos solos, sendo sua eficiência influenciada pelas condições de compactação, umidade e interação solo-fibra.

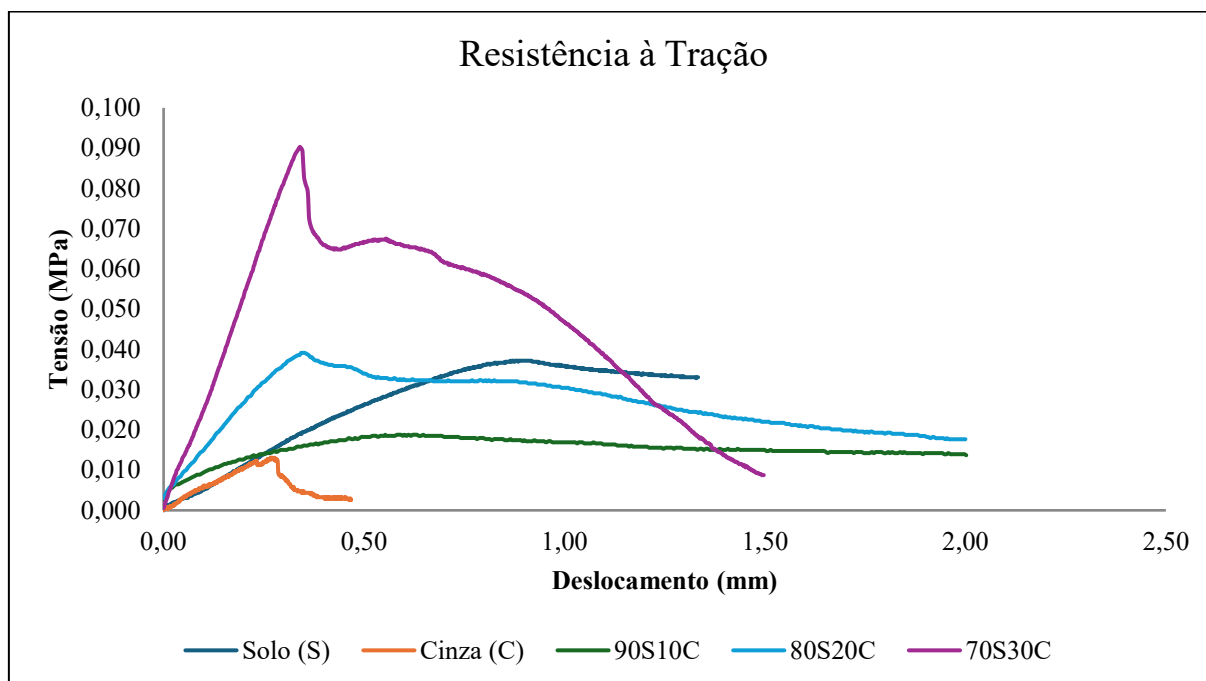
Nas misturas reforçadas com fibras de 6 mm, a maior resistência foi obtida para S0.50F6, com incremento aproximado de 40% em relação ao solo natural. Entretanto, o aumento da dosagem não produziu crescimento contínuo da resistência. Em contrapartida, o deslocamento correspondente ao pico e a energia absorvida aumentaram progressivamente, alcançando seus maiores valores em S1.25F6. Esses resultados indicam que, para fibras curtas, o principal benefício do reforço esteve associado ao aumento da capacidade de deformação e da energia dissipada durante a propagação da fissura, mais do que ao incremento da resistência máxima. Esse comportamento também foi observado por Divya, Viswanadham e Gourc (2014), Tang *et al.* (2016) e He *et al.* (2021), que relacionam respostas não monotônicas à dispersão das fibras e à eficiência de mobilização do reforço.

As misturas contendo fibras de 12 mm apresentaram comportamento mais favorável. Embora os menores teores tenham produzido ganhos limitados de resistência, observou-se aumento expressivo do deslocamento no pico e da energia absorvida. A partir do teor de 0,75%, verificaram-se incrementos simultâneos desses três parâmetros, destacando-se a mistura S1.25F12, que apresentou aumentos de aproximadamente 101% na resistência, 601% no deslocamento correspondente ao pico e 1.650% na energia absorvida em relação ao solo natural. Esses resultados evidenciam a maior eficiência das fibras mais longas na modificação do comportamento mecânico do compósito.

O melhor desempenho das fibras de 12 mm está associado ao maior comprimento de ancoragem, que amplia a superfície de contato e favorece a mobilização da aderência e do atrito na interface solo-fibra. Durante a abertura da fissura, as fibras que atravessam seu plano transferem tensões entre as faces da descontinuidade, retardando sua propagação e aumentando a energia necessária para a ruptura, mecanismo também descrito por Plé e Lê (2012), Tang *et al.* (2016) e He *et al.* (2021).

O Gráfico 17 apresenta as curvas tensão-deslocamento obtidas nos ensaios de tração por compressão diametral da cinza e das misturas solo-cinza. A curva do solo também foi mantida para permitir comparar os comportamentos.

Gráfico 17 - Curva tensão-deslocamento para os ensaios de TCD da amostra de solo, cinza, e misturas binárias solo-cinza.

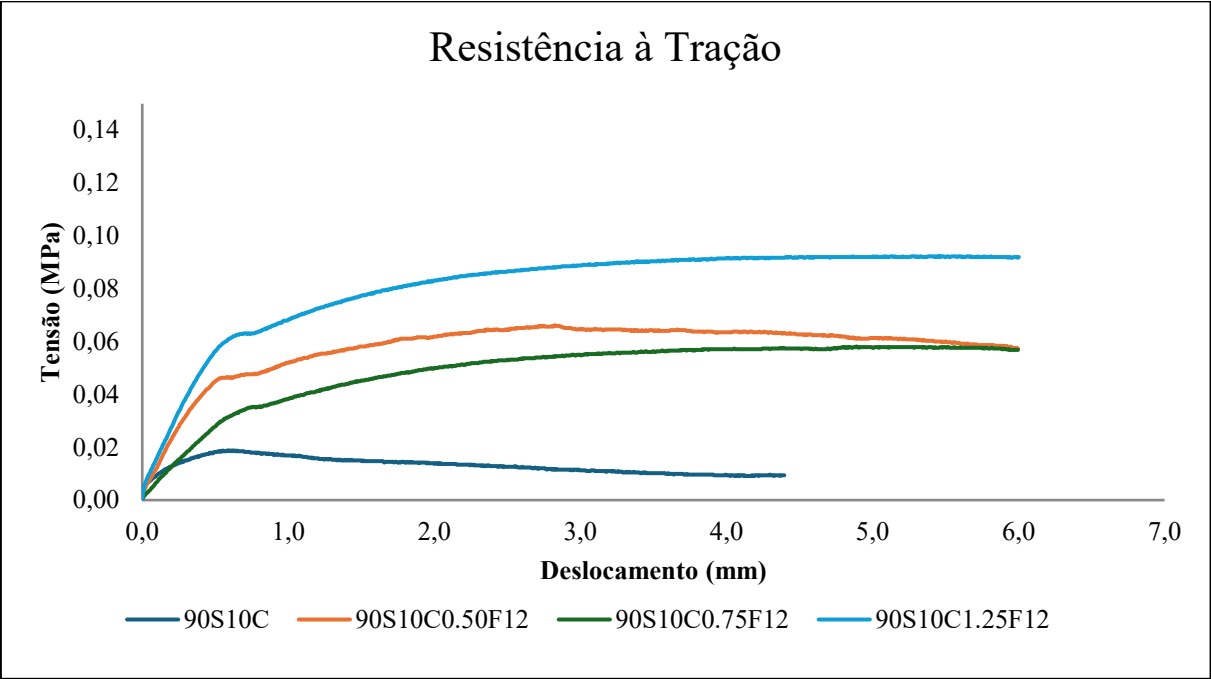


Fonte: Autor (2026).

A cinza leve, quando utilizada isoladamente, apresentou baixa resistência à tração e reduzida capacidade de absorção de energia. Nas matrizes solo-cinza, entretanto, o comportamento variou com o teor incorporado. A mistura 70S30C apresentou a maior resistência entre as matrizes sem fibras, porém mobilizada em pequeno deslocamento, evidenciando resposta mais rígida. Em contrapartida, a matriz 90S10C apresentou menor resistência, porém maior capacidade de deformação antes da ruptura. Esses resultados indicam que a resposta à tração decorre da interação entre composição granulométrica, compactação, sucção e possíveis interações físico-químicas, não podendo ser atribuída exclusivamente à ocorrência de reações cimentantes.

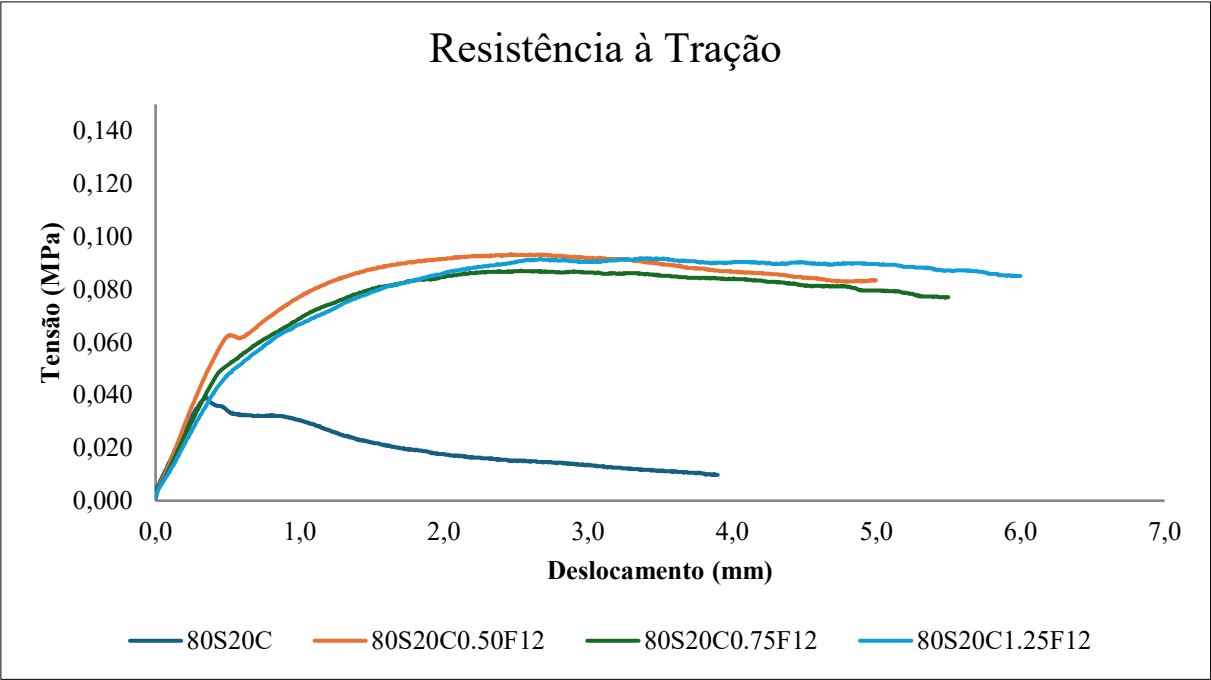
Os Gráficos 18 a 20 apresentam as curvas tensão-deslocamento das misturas solo-cinza 90S10C, 80S20C e 70S30C com adição de fibra 12mm, obtidas nos ensaios de tração por compressão diametral. As curvas das respectivas matrizes foram mantidas para permitir comparar os comportamentos.

Gráfico 18 - Curva tensão-deslocamento dos ensaios de TCD da série de amostras da matriz 90S10C.



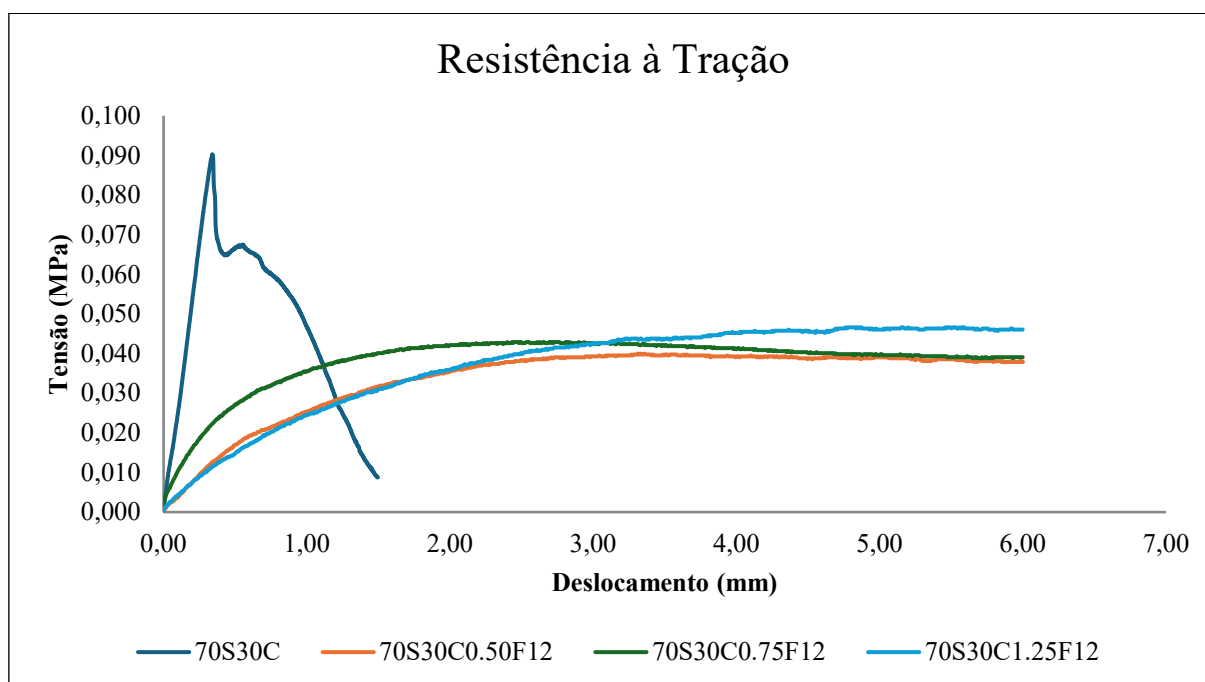
Fonte: Autor (2026).

Gráfico 19 - Curva tensão-deslocamento para os ensaios de TCD da série de amostras da matriz 80S20C.



Fonte: Autor (2026).

Gráfico 20 - Curva tensão-deslocamento para os ensaios de TCD da série de amostras da matriz 70S30C.



Fonte: Autor (2026).

A incorporação de fibras de 12 mm modificou substancialmente o comportamento das matrizes contendo cinza. Na série 90S10C, observaram-se ganhos simultâneos de resistência, deslocamento e energia, destacando-se a composição 90S10C1.25F12, cuja resistência foi aproximadamente 4,7 vezes superior à da matriz sem reforço. Na série 80S20C, foram obtidos os resultados mais equilibrados, com aumentos expressivos da resistência e da capacidade de absorção de energia para todas as dosagens avaliadas, sendo 80S20C0.50F12 a mistura de maior resistência e 80S20C1.25F12 a de maior deformabilidade.

Na série 70S30C, por outro lado, a incorporação das fibras reduziu a resistência máxima, mas promoveu aumentos significativos do deslocamento correspondente ao pico e da energia absorvida. Esse comportamento sugere que, nessa matriz, o reforço fibroso favoreceu principalmente o controle da propagação da fissura, compensando parcialmente o caráter rígido introduzido pelo elevado teor de cinza. Tendência semelhante foi observada por He *et al.* (2021), que demonstraram que a eficiência do reforço depende da compatibilidade entre a matriz e a distribuição das fibras.

Em conjunto, os resultados evidenciam que a combinação entre 20% de cinza e fibras de 12 mm proporcionou o comportamento mais equilibrado, conciliando elevada resistência à tração indireta, maior capacidade de deformação e elevada absorção de energia.

Para camadas de cobertura de aterros sanitários, essa resposta é particularmente relevante, pois materiais capazes de dissipar maiores quantidades de energia durante a abertura das fissuras tendem a apresentar maior integridade estrutural quando submetidos à retração e aos ciclos de umedecimento e secagem.

A resistência máxima indica o início da formação da fissura predominante, mas não representa, isoladamente, a capacidade do compósito de continuar transferindo tensões após a perda de continuidade da matriz. Para avaliar esse comportamento, foram comparadas as energias absorvidas até o pico e em deslocamentos padronizados.

O solo natural apresentou energia até o pico de 0,133 J e energia total de 0,221 J, indicando que apenas pequena parcela da energia foi dissipada após a mobilização da resistência máxima. Nas misturas reforçadas, entretanto, o aumento da energia total foi significativamente superior ao observado para $E_{0,75}$, evidenciando que a contribuição das fibras se tornou mais pronunciada após o início da fissuração, quando passaram a atuar como elementos de ponte entre as faces da descontinuidade. A mistura S1.25F12 apresentou energia de 2,323 J até o pico e 4,647 J ao final do ensaio, enquanto S0.75F12 atingiu 0,823 J e 1,924 J, respectivamente, demonstrando elevada capacidade de absorção de energia durante a propagação da fissura.

Nas misturas ternárias, a energia padronizada até 4,5 mm permitiu comparar a capacidade de manutenção da carga em estágios mais avançados de abertura da fissura. Os maiores valores foram obtidos para as composições com 20% de cinza, conforme apresentado na Tabela 33.

Tabela 33 - Misturas ternárias com maiores energias até o deslocamento de 4,5 mm.

Mistura	$E_{4,5}(\text{J})$
80S20C0.75F12	2,505
80S20C1.25F12	2,454
80S20C0.50F12	2,303
90S10C1.25F12	2,265
90S10C0.50F12	1,718
90S10C0.75F12	1,608

Fonte: Autor (2026).

Observa-se que as misturas contendo 20% de cinza apresentaram as maiores energias padronizadas, confirmando a interação favorável entre essa matriz e o reforço fibroso.

Nas composições com 30% de cinza, os valores de $E_{4,5}$ variaram entre 1,143 e 1,363 J, indicando menor capacidade de dissipação de energia durante a propagação da fissura.

Esse comportamento é compatível com os mecanismos descritos por Tang *et al.* (2016), Divya, Viswanadham e Gourc (2014) e He *et al.* (2021), segundo os quais a abertura da fissura promove a mobilização progressiva das fibras, aumentando o trabalho necessário para seu deslizamento e arrancamento e, conseqüentemente, a energia dissipada pelo compósito. Para comparações entre misturas, entretanto, as energias padronizadas ($E_{0,75}$ e $E_{4,5}$) são mais representativas que a energia total, uma vez que os ensaios foram encerrados em deslocamentos finais distintos.

Sob o ponto de vista da aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários, esses resultados indicam que a resistência à tração é importante para retardar o início da fissuração, enquanto a capacidade de deformação e de absorção de energia controla sua evolução após a ruptura inicial. Nesse sentido, Miller e Rifai (2004) verificaram que fibras de polipropileno reduzem a fissuração por dessecação em barreiras compactadas, enquanto Viswanadham, Jha e Sengupta (2009) e Divya, Viswanadham e Gourc (2011) demonstraram que o reforço fibroso aumenta a capacidade dessas camadas acomodarem deformações sem perda abrupta de integridade.

Entre as misturas avaliadas, S0.75F12 destacou-se pelo equilíbrio entre desempenho mecânico, e comportamento hidráulico mais favorável, enquanto S1.25F12 apresentou os maiores valores de resistência, deslocamento no pico e energia absorvida. Nas misturas ternárias, os melhores resultados foram obtidos para as composições com 20% de cinza, especialmente 80S20C0.50F12, 80S20C0.75F12 e 80S20C1.25F12, embora a seleção da composição mais adequada deva considerar conjuntamente os resultados de permeabilidade, retração e fissuração. A resposta da matriz 70S30C reforça essa necessidade, pois, apesar da elevada resistência inicial, apresentou comportamento mais frágil, parcialmente compensado pelo aumento da deformabilidade proporcionado pelas fibras.

Por fim, ressalta-se que os resultados do ensaio de tração por compressão diametral devem ser interpretados principalmente de forma comparativa. A extrapolação direta para condições de campo deve considerar as diferenças de estado de tensões, umidade, orientação das fibras e condições de confinamento existentes nas camadas de cobertura construídas.

Com base nos resultados de resistência à tração indireta, deslocamento vertical no pico e energia absorvida, elaborou-se uma classificação interpretativa do comportamento mecânico das misturas. O quadro 9 permite identificar, de forma comparativa, os materiais mais

resistentes, deformáveis e capazes de absorver energia antes e após o desenvolvimento da fissura principal, destacando também eventuais comportamentos rígidos, frágeis ou de maior ductilidade.

Quadro 9 - Classificação interpretativa do comportamento mecânico das misturas nos ensaios de tração por compressão diametral. (Continua)

Mistura	Resistência à tração no pico	Deslocamento no pico	Energia até o pico	Classificação do comportamento	Interpretação
Solo natural	Referência	Referência	Referência	Moderadamente frágil	Mobiliza a resistência máxima com pequeno deslocamento e apresenta capacidade de absorção de energia inferior à das misturas reforçadas.
Cinza (C)	Muito baixa	Muito baixo	(Miller; Rifai, 2004)	Frágil e pouco resistente	A cinza isolada apresenta baixa capacidade de retardar o início e a evolução da fissuração, não sendo adequada como material estrutural isolado.
S0.25F6	Próxima à referência	Próximo à referência	Próxima à referência	Efeito inicial do reforço	O baixo teor de fibra curta produz alteração pequena, sem ganho mecânico expressivo em relação ao solo natural.
S0.50F6	Alta	Próximo à referência	Moderada	Resistente, porém pouco deformável	Apresenta a maior resistência da série F6, mas o pico ainda ocorre com deslocamento próximo ao do solo.
S0.75F6	Próxima à referência	Alta	Alta	Deformável e mais absorvente	A contribuição da fibra ocorre principalmente no aumento do deslocamento e da energia, com ganho limitado de resistência.
S1.00F6	Baixa	Alta	Moderada	Deformável, porém pouco resistente	Aumenta a capacidade de deslocamento, mas reduz a resistência à tração em relação ao solo natural.
S1.25F6	Próxima à referência	Alta	Alta	Dúctil com ganho energético	Mantém resistência próxima à referência e amplia significativamente o deslocamento no pico e a energia absorvida.
S0.25F12	Próxima à referência	Próximo à referência	Próxima à referência	Efeito inicial da fibra longa	O baixo teor de fibra de 12 mm ainda produz alteração limitada da resposta mecânica.
S0.50F12	Próxima à referência	Alta	Alta	Dúctil sem ganho resistente	A resistência permanece próxima à do solo, mas o deslocamento e a energia aumentam de forma relevante.
S0.75F12	Alta	Alta	Muito alta	Resistente, dúctil e tenaz	Apresenta excelente equilíbrio entre resistência, deslocamento e energia, com menor consumo de fibras que as maiores dosagens.
S1.00F12	Alta	Muito alto	Muito alta	Dúctil e altamente absorvente	Combina ganho de resistência com grande deslocamento no pico e elevada energia absorvida.
S1.25F12	Muito alta	Muito alto	Muito alta	Altamente resistente e dúctil	Apresenta o melhor desempenho da série solo-fibra, com os maiores valores de resistência, deslocamento e energia.
90S10C	Baixa	Mo(Costa; Kodikara; Shannon, 2013; Bu <i>et al.</i> , 2023)	Próxima à referência	Pouco resistente	A matriz apresenta baixa resistência, embora mobilize o pico com deslocamento superior ao do solo.
80S20C	Próxima à referência	Muito baixo	Baixa	Rígido e frágil	A resistência é semelhante à do solo, porém mobilizada rapidamente, com baixa energia até o pico.
70S30C	Muito alta	Muito baixo	Baixa; alta em 0,75 mm	Muito resistente, porém frágil	A elevada resistência é atingida com deslocamento muito pequeno. A energia em 0,75 mm indica carga residual, mas não equivale à ductilidade dos compós(Tang <i>et al.</i> , 2011; Vogel; Hoffmann; Roth, 2005)

Quadro 9 - Classificação interpretativa do comportamento mecânico das misturas nos ensaios de tração por compressão diametral. (Conclusão)

Mistura	Resistência à tração no pico	Deslocamento no pico	Energia até o pico	Classificação do comportamento	Interpretação
90S10C0.50F12	Alta	Alta	Muito alta	Resistente, dúctil e tenaz	As fibras recuperam a resistência da matriz e aumentam expressivamente o deslocamento e a energia, inclusive após o início da fissuração.
90S10C0.75F12	Alta	Muito alto	Muito alta	Muito dúctil e tenaz	Apresenta grande capacidade de acomodar deslocamentos e elevada absorção de energia, com resistência superior à do solo.
90S10C1.25F12	Muito alta	Muito alto	Muito alta	Altamente resistente e tenaz	É a melhor composição da matriz 90S10C, combinando elevado pico, grande deslocamento e alta manutenção de carga.
80S20C0.50F12	Muito alta	Alta	Muito alta	Altamente resistente e eficiente	Apresenta a maior resistência à tração do conjunto e elevada energia em deslocamentos padronizados.
80S20C0.75F12	Muito alta	Alta	Muito alta	Equilibrado e altamente tenaz	Combina elevada resistência com a maior energia em 4,5 mm, destacando-se no controle da abertura da fissura.
80S20C1.25F12	Muito alta	Muito alto	Muito alta	Altamente resistente, dúctil e tenaz	Reúne elevada resistência, maior deslocamento do grupo e alta capacidade de absorção de energia.
70S30C0.50F12	Próxima à referência	Muito alto	Muito alta	Muito dúctil, com perda de pico	A fibra reduz fortemente a resistência da matriz 70S30C, mas transforma a resposta em comportamento mais deformável e energético.
70S30C0.75F12	Moderada	Alta	Alta	Dúctil, com desempenho intermediário	Apresenta ganho de deslocamento e energia, porém resistência e resposta padronizada inferiores às misturas com 20% de cinza.
70S30C1.25F12	Moderada	Muito alto	Muito alta	Muito dúctil, com resistência moderada	O maior teor de fibras amplia intensamente o deslocamento e a energia, mas a resistência permanece muito inferior à da matriz 70S30C.

Fonte: Autor (2026).

Nota: (1) A classificação é comparativa e não normativa, tendo o solo natural como referência. A energia absorvida refere-se principalmente à energia até o pico; quando necessário, a interpretação também considera a energia em 0,75 mm, a energia em 4,5 mm e a forma das curvas carga-deslocamento. A energia total não foi utilizada isoladamente, porque os ensaios foram encerrados em deslocamentos finais diferentes. (2) Os critérios utilizados para as classificações qualitativas encontram-se apresentados no Apêndice D.

O quadro 10 da síntese multicritério reúne os principais parâmetros avaliados no ensaio TCD e incorpora o potencial de aplicação das misturas em camadas de cobertura de aterros sanitários.

Quadro 10 - Síntese multicritério do desempenho das misturas nos ensaios de tração por compressão diametral. (Continua)

Amostra/Mistura	Resistência à tração	Deformabilidade	Energia até o pico	Resposta em deslocamento padronizado	Potencial de aplicação em cobertura
Solo natural	Referência	Referência	Referência	Referência; resposta pós-pico limitada	Material de controle, porém com capacidade limitada de acomodar e controlar a abertura de fissuras.
Cinza (C)	Muito baixa	Muito baixa	Muito baixa	Não atingiu base comparável em 0,75 mm	Não recomendada como material isolado; pode ser considerada apenas como componente de misturas.

Quadro 10 - Síntese multicritério do desempenho das misturas nos ensaios de tração por compressão diametral. (Continuação)

Amostra/ Mistura	Resistência à tração	Deformabi- lidade	Energia até o pico	Resposta em deslocamento padronizado	Potencial de aplicação em cobertura
S0.25F6	Próxima à referência	Próxima à referência	Próxima à referência	Próxima à referência em 0,75 mm	Melhoria mecânica limitada em relação ao solo natural.
S0.50F6	Alta	Próxima à referência	Moderada	Superior à referência em 0,75 mm	Favorável para retardar o início da fissura, mas com ganho reduzido de deformabilidade.
S0.75F6	Próxima à referência	Alta	Alta	Mobilização mais tardia; E0,75 inferior à referência	Boa capacidade de acomodação e absorção de energia, com ganho resistente limitado.
S1.00F6	Baixa	Alta	Moderada	Mobilização tardia; E0,75 baixa	Aumenta a ductilidade, mas a menor resistência limita a aplicação como solução prioritária.
S1.25F6	Próxima à referência	Alta	Alta	Mobilização tardia; manutenção de carga relevante	Favorável ao controle da abertura de fissuras, embora sem ganho expressivo de resistência e com maior consumo de fibras.
S0.25F12	Próxima à referência	Próxima à referência	Próxima à referência	Próxima à referência em 0,75 mm	Baixo teor ainda produz benefício limitado.
S0.50F12	Próxima à referência	Alta	Alta	Mobilização tardia; E0,75 baixa	Boa deformabilidade e energia, mas sem aumento da resistência máxima.
S0.75F12	Alta	Alta	Muito alta	Alta em 0,75 mm e boa energia total	Excelente equilíbrio mecânico com teor de fibras inferior ao máximo e compatibilidade hidráulica mais favorável.
S1.00F12	Alta	Muito alta	Muito alta	Mobilização tardia; elevada energia global	Boa capacidade de resistir e acomodar a fissuração, com desempenho superior às fibras curtas.
S1.25F12	Muito alta	Muito alta	Muito alta	Muito alta energia total e manutenção após o pico	Melhor desempenho mecânico solo-fibra; requer cautela quanto à homogeneização, trabalhabilidade e efeito hidráulico.
90S10C	Baixa	Moderada	Próxima à referência	Baixa em 0,75 mm	Baixo potencial sem reforço, devido à resistência reduzida e à limitada manutenção de carga.
80S20C	Próxima à referência	Muito baixa	Baixa	Alta em 0,75 mm por mobilização rápida da carga	A elevada resposta inicial não compensa o pequeno deslocamento no pico e o caráter frágil.
70S30C	Muito alta	Muito baixa	Baixa	Muito alta em 0,75 mm, porém com pico precoce	Pode retardar o início da fissuração, mas apresenta baixa capacidade de acomodar deformações antes do pico.
90S10C0.50F12	Alta	Alta	Muito alta	Alta em 0,75 e 4,5 mm	Boa recuperação da matriz, com resistência, deslocamento e dissipação de energia favoráveis.
90S10C0.75F12	Alta	Muito alta	Muito alta	Alta em 0,75 e 4,5 mm	Muito favorável ao controle da abertura de fissuras, pela elevada deformabilidade e energia.

Quadro 10 - Síntese multicritério do desempenho das misturas nos ensaios de tração por compressão diametral. (Conclusão)

Amostra/ Mistura	Resistência à tração	Deformabi- lidade	Energia até o pico	Resposta em deslocamento padronizado	Potencial de aplicação em cobertura
90S10C1.25F12	Muito alta	Muito alta	Muito alta	Muito alta em 0,75 e 4,5 mm	Excelente desempenho mecânico; o alto teor de fibras exige avaliação executiva e hidráulica.
80S20C0.50F12	Muito alta	Alta	Muito alta	Muito alta em 0,75 e 4,5 mm	Maior resistência do conjunto e elevada manutenção de carga; solução mecanicamente muito favorável.
80S20C0.75F12	Muito alta	Alta	Muito alta	Melhor resposta em 4,5 mm	Apresenta o melhor equilíbrio entre resistência e controle da abertura da fissura; requer avaliação hidráulica integrada.
80S20C1.25F12	Muito alta	Muito alta	Muito alta	Muito alta em 0,75 e 4,5 mm	Elevada resistência, deslocamento e energia, com cautela quanto ao maior consumo de fibras e à trabalhabilidade.
70S30C0.50F12	Próxima à referência	Muito alta	Muito alta	Moderada em 4,5 mm; baixa em 0,75 mm	Aumenta fortemente a deformabilidade, mas reduz a resistência da matriz; desempenho inferior ao grupo 80S20C.
70S30C0.75F12	Moderada	Alta	Alta	Moderada em 4,5 mm	Benefício mecânico intermediário, sem o equilíbrio observado nas misturas com 20% de cinza.
70S30C1.25F12	Moderada	Muito alta	Muito alta	Moderada em 4,5 mm; baixa em 0,75 mm	Boa capacidade de acomodar fissuras, porém com perda de resistência em relação à matriz e maior teor de fibras.

Fonte: Autor (2026).

Nota: (1) A resposta em deslocamento padronizado considera E0,75 para todas as misturas com dados disponíveis e E4,5 para as composições reforçadas avaliadas em estágios avançados de abertura. A classificação global tem caráter interpretativo e deve ser integrada aos resultados hidráulicos, de retração, fissuração, trabalhabilidade e homogeneização. (2) os critérios utilizados para as classificações qualitativas encontram-se apresentados no Apêndice D.

4.9 Retração e fissuração por ressecamento (análise digital de imagens)

Esta seção analisa a retração global e a fissuração superficial observadas durante a secagem das composições estudadas. A retração foi expressa pelo recuo do contorno dos corpos de prova, enquanto a fissuração foi representada pelo *Crack Intensity Factor (CIF)* e por descritores morfológicos. A análise conjunta dessas respostas permite avaliar a manutenção da continuidade superficial, aspecto relevante ao desempenho de barreiras compactadas (Albrecht; Benson, 2001; Yesiller *et al.*, 2000).

Foram avaliadas 13 composições, totalizando 444 imagens válidas. A Tabela 34 apresenta as séries analisadas e a duração efetiva de cada monitoramento. Todas as séries tiveram monitoramento contínuo por, no mínimo, 24 horas. Após essa etapa, os corpos de prova permaneceram em acompanhamento até aproximadamente 72 horas, com registros pontuais em torno de 24, 48 e 72 horas e, em algumas séries, em instantes intermediários. Todavia, como nem todas as séries tiveram todas medições e imagens válidas durante as 24 horas, identificou-

se o período de imagens válidas para cada amostra, e estabeleceu-se o menor período comum a todas, adotando-se o intervalo de 14,0 h para as comparações quantitativas diretas. Os registros posteriores foram utilizados para verificar a continuidade ou a estabilização do comportamento, sem constituir a base principal de ordenação das misturas.

Tabela 34 - Programa da campanha de retração e fissuração por análise digital de imagens.

Composição	Solo (%)	Cinza (%)	Fibra F12 (%)	Duração monitorada continua com imagens válidas (h)
Solo (S)	100	0	0	22,7
Cinza (C)	0	100	0	57,3
S0.50F12	100	0	0,50	22,6
S0.75F12	100	0	0,75	65,0
90S10C	90	10	0	15,8
90S10C0.50F12	90	10	0,50	16,3
90S10C0.75F12	90	10	0,75	16,3
80S20C	80	20	0	14,8
80S20C0.50F12	80	20	0,50	40,0
80S20C0.75F12	80	20	0,75	23,5
70S30C	70	30	0	14,8
70S30C0.50F12	70	30	0,50	17,3
70S30C0.75F12	70	30	0,75	17,3

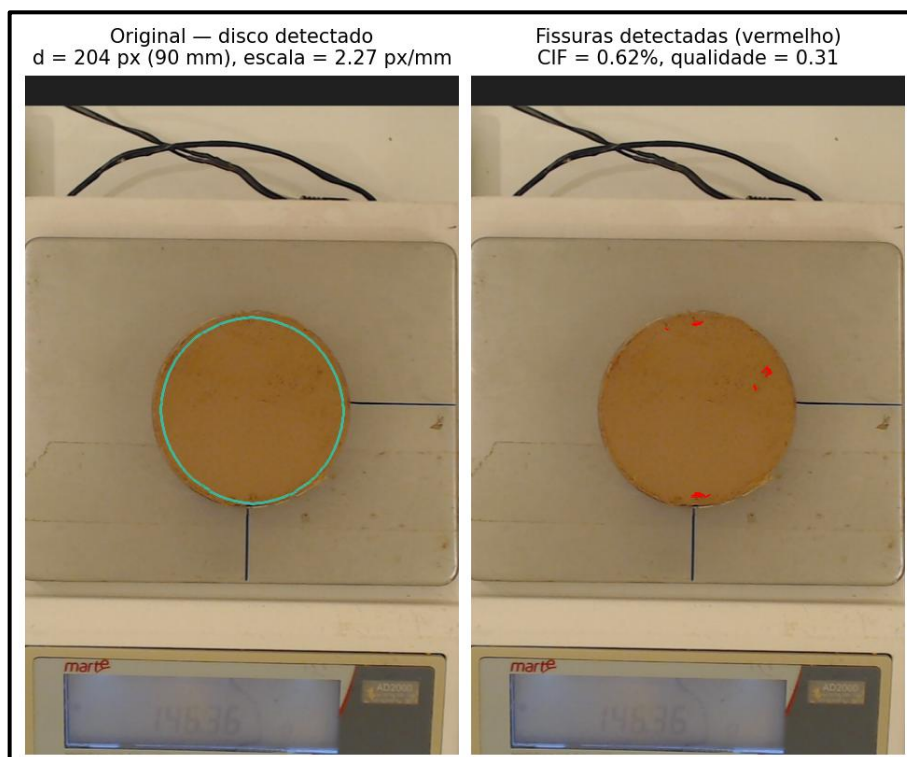
Fonte: Autor (2026).

4.9.1 Confiabilidade e limitações da análise digital

Os painéis de validação permitiram confrontar a superfície original com a máscara segmentada e o esqueleto da rede. A Figura 33 ilustra uma série com sinal em desenvolvimento e outra com fissuração incipiente e retração de contorno.

Para caracterizar a rede, também foram considerados o comprimento total, a largura equivalente, os componentes conexos, as interseções, a densidade linear e a tortuosidade, descritores associados à extensão, abertura aparente, fragmentação, ramificação, concentração e sinuosidade das feições

Figura 33 - Painéis de validação gerados pela rotina automatizada:
S0.50F12 em $t = 3,5$ h.



Fonte: Autor (2026)

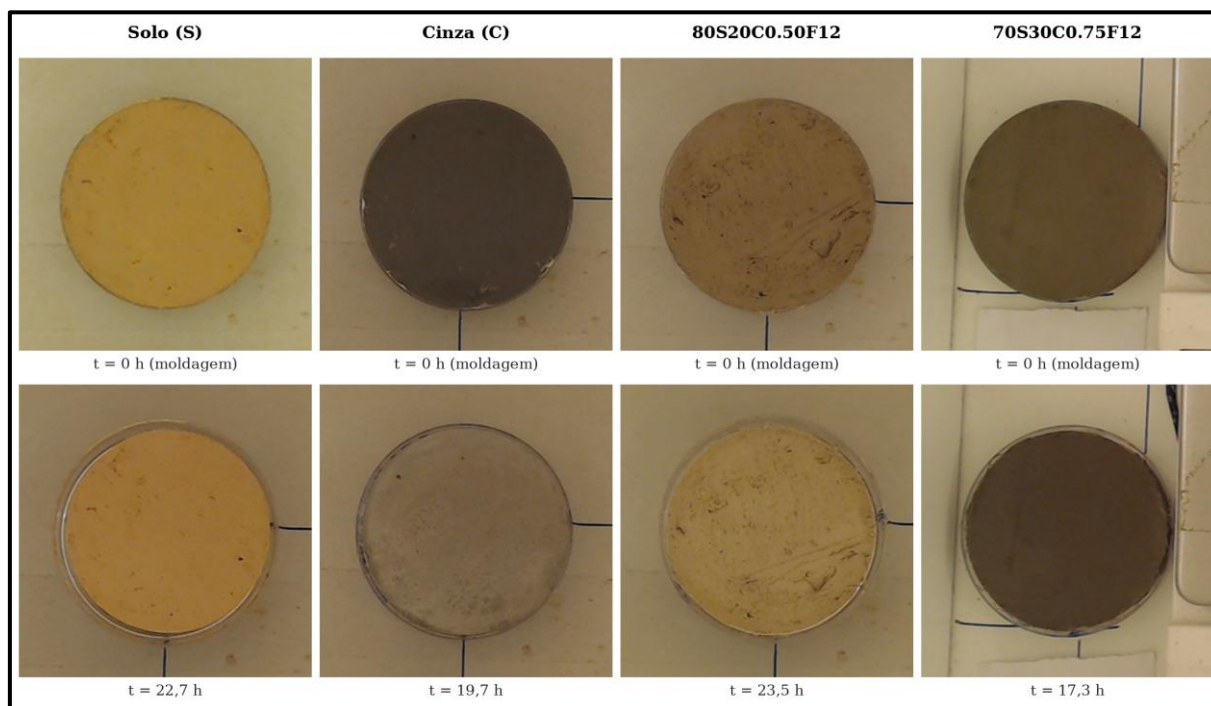
A escala das imagens variou entre 1,5 e 5,0 pixels/mm; por isso, aberturas próximas de 1 mm ocuparam poucos pixels e a largura equivalente deve ser interpretada apenas qualitativamente. Os escores de contraste variaram de 0,003 a 0,285, indicando que parte da variabilidade do sinal decorreu das condições de aquisição.

A inspeção dos painéis não revelou falhas sistemáticas na detecção do disco ou na calibração geométrica. Entretanto, como não houve comparação com delimitação manual independente, os resultados demonstram consistência interna do processamento, mas não permitem quantificar seu viés ou sua exatidão.

4.9.2 Comportamento geral das amostras durante a secagem

A resposta predominante nas análises realizadas foi a retração global. Nas composições com solo, o contorno recuou progressivamente em relação à parede da cápsula, formando um vazio anelar periférico, enquanto a fissuração permaneceu limitada. A Figura 34 compara o estado inicial e o final de quatro composições representativas.

Figura 34 - Superfície dos corpos de prova na moldagem e ao final do monitoramento contínuo: Solo (S), Cinza (C), 80S20C0.50F12 e 70S30C0.75F12.



Fonte: Autor (2026).

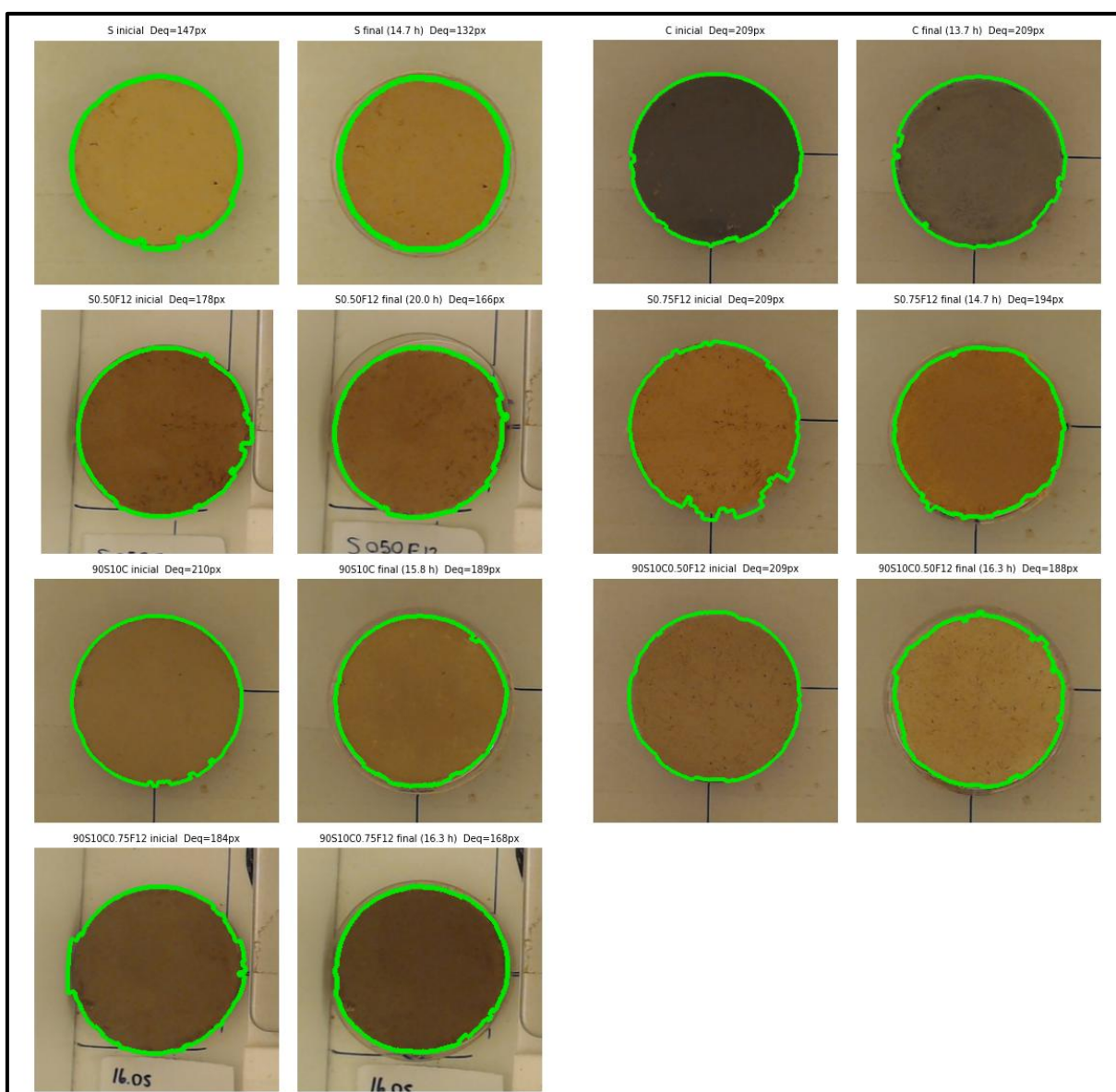
A predominância da retração global está associada à baixa restrição proporcionada pela pequena espessura dos corpos de prova e pela superfície lisa das cápsulas. Nessas condições, a matriz pôde contrair-se em direção ao centro. A menor restrição reduz a mobilização de tensões de tração e, conseqüentemente, a formação de fissuras abertas. Esse efeito é compatível com a literatura, que identifica a aderência à base, a espessura, o estado inicial e a velocidade de secagem como fatores determinantes da retração e da fissuração (Costa; Kodikara; Shannon, 2013; Bu *et al.*, 2023).

O solo natural manteve a superfície praticamente íntegra, com fissuração incipiente e sem conectividade. Na cinza, foram identificadas marcas escuras transitórias entre aproximadamente 2 e 4 horas, todavia, não foi possível caracterizá-las inequivocamente como fissuras. As misturas apresentaram feições curtas e esparsas, mais evidentes em 80S20C0.50F12 e 70S30C0.75F12. Em nenhuma composição se formou a rede poligonal típica de argilas de alta plasticidade submetidas a forte restrição (Tang *et al.*, 2011; Vogel; Hoffmann; Roth, 2005).

4.9.3 Quantificação da retração

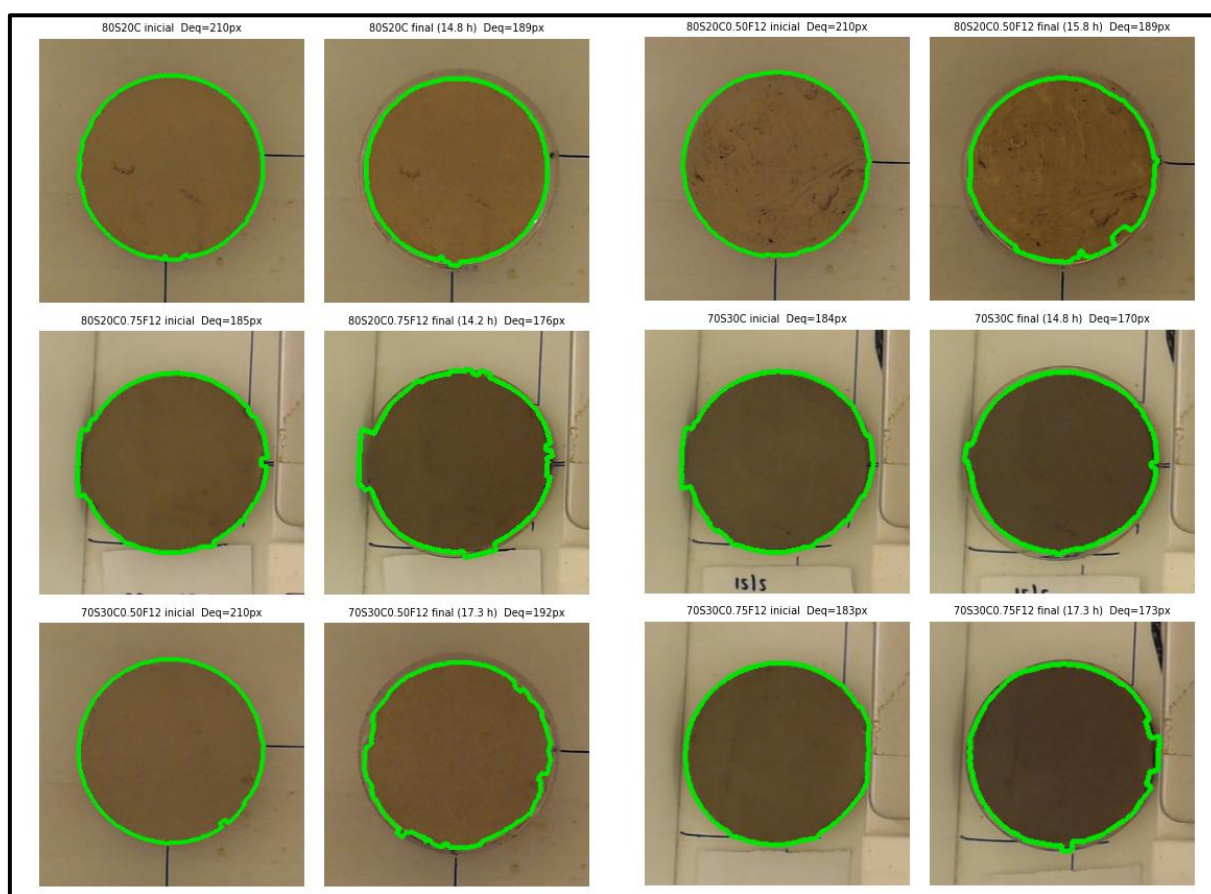
A retração foi expressa pela redução do diâmetro equivalente, pela redução de área, pela largura do vazio anelar e pela anisotropia do contorno. As Figuras 35 e 36 mostram a correspondência entre o contorno identificado e a superfície das amostras no início e no final das séries.

Figura 35 - Verificação operacional e visual da detecção do contorno: primeiro e último quadro válido das séries S, C, S0.50F12, S0.75F12, 90S10C, 90S10C0.50F12 e 90S10C0.75F12



Fonte: Autor (2026).

Figura 36 - Verificação operacional e visual da detecção do contorno: séries 80S20C, 80S20C0.50F12, 80S20C0.75F12, 70S30C, 70S30C0.50F12 e 70S30C0.75F12



Fonte: Autor (2026).

Os valores da Tabela 35 correspondem ao final da janela válida de cada série. A sensibilidade da deformação à localização da borda foi estimada entre 0,95 e 1,37 ponto percentual; assim, diferenças dessa ordem entre composições não devem ser interpretadas como efeito material.

Tabela 35 - Quantificação da retração pelo recuo do contorno: deformação radial acumulada, redução de área, vazio anelar e anisotropia ao fim da janela válida. (Continua)

Composição	ε_r (%)	$\Delta A/A_0$ (%)	Vazio anelar (mm)	Anisotropia (%)	t_f (h)	t_{est} (h)
Solo (S)	9,5	18,1	4,3	2,3	14,7	n.e.
Cinza (C)	0,1	0,3	0,1	1,3	13,7	n.a.
S0.50F12	6,9	13,3	3,1	3,0	20,1	19,5
S0.75F12	6,8	13,1	3,1	3,1	14,7	n.e.
90S10C	9,7	18,4	4,3	1,5	15,8	n.e.

Tabela 35 - Quantificação da retração pelo recuo do contorno: deformação radial acumulada, redução de área, vazio anelar e anisotropia ao fim da janela válida. (Conclusão)

Composição	ε_r (%)	$\Delta A/A_0$ (%)	Vazio anelar (mm)	Anisotropia (%)	t_f (h)	t_{est} (h)
90S10C0.50F12	9,6	18,3	4,3	2,7	16,3	13,8
90S10C0.75F12	7,8	14,9	3,5	5,4	16,3	n.e.
80S20C	8,7	16,6	3,9	1,1	14,8	n.e.
80S20C0.50F12	8,6	16,5	3,9	1,4	15,8	n.e.
80S20C0.75F12	4,8	9,4	2,2	4,5	14,2	n.e.
70S30C	7,6	14,6	3,4	5,0	14,8	n.e.
70S30C0.50F12	7,5	14,4	3,4	2,6	17,3	n.e.
70S30C0.75F12	5,2	10,0	2,3	3,1	17,3	14,7

Fonte: Autor (2026).

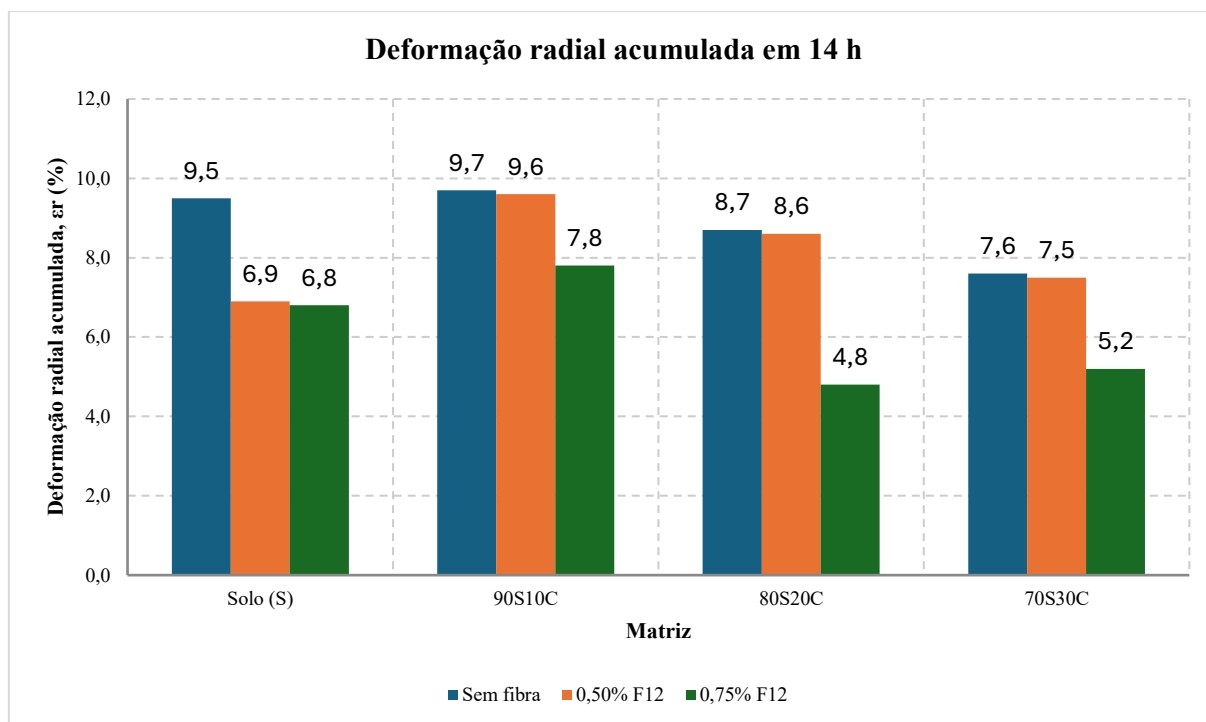
Nota: ε_r = redução relativa do diâmetro equivalente; $\Delta A/A_0$ = redução relativa de área; t_f = fim da janela válida; t_{est} = tempo para atingir 95% do valor final; n.e. = não estimável; n.a. = não aplicável.

A deformação radial acumulada, ε_r , foi calculada a partir da redução relativa do diâmetro equivalente. A comparação em um mesmo intervalo de tempo reduz a influência das diferenças de duração das séries, embora não assegure que todas as amostras apresentassem o mesmo teor de água em 14,0 h. A velocidade de secagem depende da composição, da umidade inicial e das condições específicas de cada corpo de prova. Portanto, os valores devem ser interpretados como deformações acumuladas no mesmo intervalo temporal, e não como retrações correspondentes ao mesmo estado hídrico.

A cinza isolada apresentou retração desprezível, de aproximadamente 0,1%, enquanto o solo natural atingiu deformação radial de 9,5% e formou vazio anelar médio de 4,3 mm. Nas matrizes solo-cinza sem fibras, os valores de 9,7%, 8,7% e 7,6% para 90S10C, 80S20C e 70S30C, respectivamente, indicaram redução progressiva da retração radial com o aumento do teor de cinza (Gráfico 21).

Esses resultados indicaram que a cinza exerceu influência mais acentuada sobre a estabilidade dimensional global. Esse comportamento é compatível com a redução da fração plástica e da quantidade de material argiloso suscetível à contração, conforme também observado em solos estabilizados com cinzas por Phanikumar e Sharma (2007). Contudo, a proximidade dos valores entre o solo e 90S10C mostra que a incorporação de 10% de cinza não foi suficiente para produzir alteração significativa da deformação radial no instante analisado.

Gráfico 21 - Deformação radial acumulada em 14,0 h, organizada por matriz e teor de fibra.



Fonte: Autor (2026).

A incorporação de fibras também contribuiu para reduzir a retração radial, embora com intensidade distinta entre os teores avaliados. O teor de 0,50% promoveu reduções moderadas em relação às respectivas matrizes, com valores de 6,9% para S0.50F12, 8,7% para 80S20C0.50F12 e 7,6% para 70S30C0.50F12. Para a 90S10C0.50F12 o valor praticamente permaneceu inalterado, com 9,6%. Essa resposta indica efeito favorável da fibra, mas ainda pouco expressivo nas matrizes solo–cinza, para este teor.

O efeito mais evidente foi observado nas composições com 0,75% de fibra, que apresentaram retração inferior à de suas respectivas matrizes em todas as comparações. As reduções foram de 2,7 pontos percentuais no solo natural passando para uma deformação radial de 6,8%, 1,9 pontos em 90S10C, 3,9 pontos em 80S20C e 2,4 pontos em 70S30C, com média de aproximadamente 3,6 pontos percentuais de redução. Esse padrão sugere que o teor de 0,75% de fibras foi mais eficiente na restrição da contração radial dos corpos de prova, possivelmente pela formação de uma rede interna de reforço capaz de limitar a movimentação relativa das partículas durante a perda de água.

4.9.4 Relação com o limite de contração e as retrações volumétrica e linear

A Tabela 36 integra a deformação radial obtida por imagens com o limite de contração (LC), a retração volumétrica (VS) e a retração linear equivalente (LS) determinados nos ensaios anteriores. As grandezas não são diretamente equivalentes. O ensaio de determinação dos fatores de contração (LC, VS e LS) compara o estado úmido com o estado seco e representa a variação tridimensional da pastilha, enquanto a fotografia zenital registra a contração no plano horizontal em um tempo específico de secagem.

Tabela 36 - Comparação entre limite de contração, retrações convencionais e deformação radial por imagem

Composição	LC (%)	VS (%)	LS (%)	ε_r em 14 h (%)
Solo (S)	16,99	35,55	9,64	9,5
S0.50F12	17,51	34,04	9,30	6,9
S0.75F12	17,80	32,88	9,04	6,8
90S10C	17,30	31,24	8,66	9,7
90S10C0.50F12	17,70	30,19	8,42	9,6
90S10C0.75F12	17,99	29,30	8,21	7,8
80S20C	17,81	27,10	7,68	8,7
80S20C0.50F12	18,19	26,40	7,51	8,6
80S20C0.75F12	18,50	25,82	7,37	4,8
70S30C	18,39	20,90	6,13	7,6
70S30C0.50F12	18,79	21,04	6,17	7,5
70S30C0.75F12	19,01	20,62	6,06	5,2

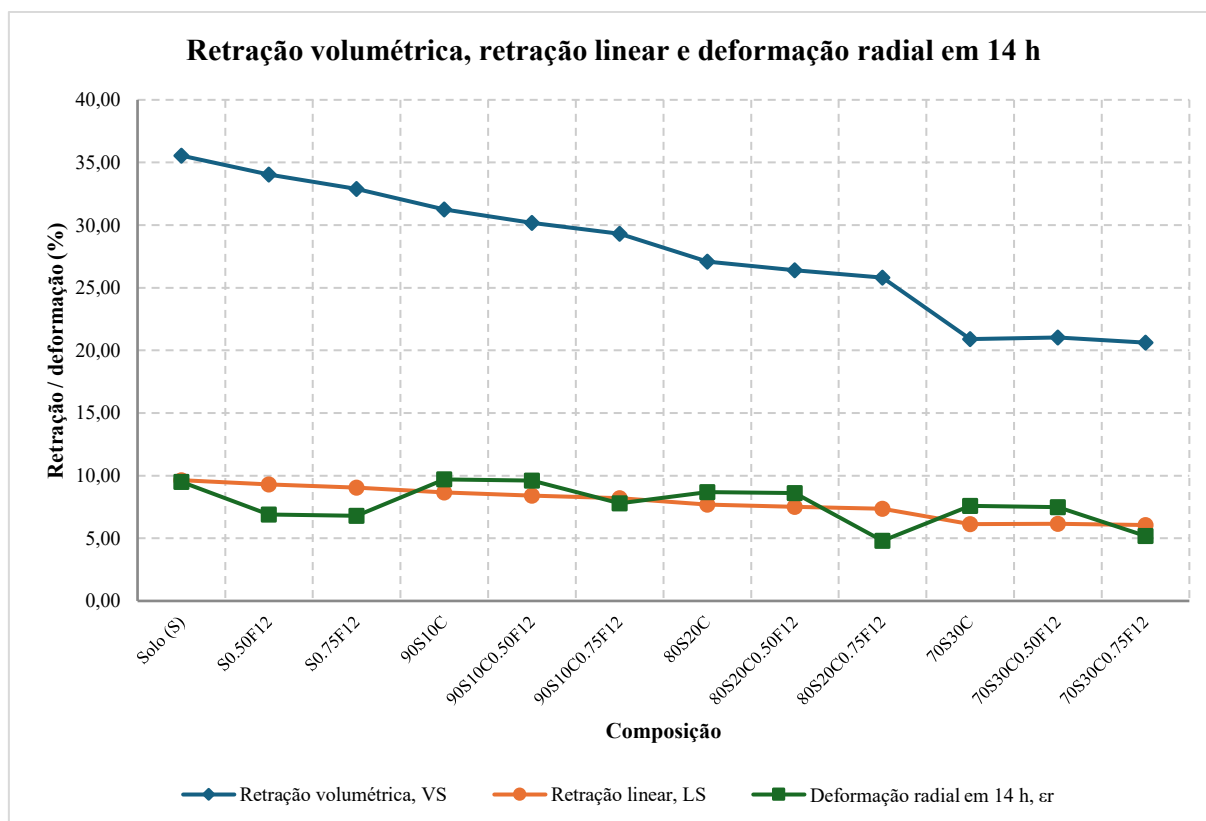
Fonte: Autor (2026).

Nota: VS = retração volumétrica; LS = retração linear equivalente; ε_r = deformação radial acumulada por imagem.

A avaliação da estabilidade dimensional revelou uma correlação positiva entre os resultados dos ensaios de Limite de Contração e de retração e fissuração por Análise de Imagem Digital (DIA) (Gráfico 22). Ambos os métodos convergem ao demonstrar que a substituição da fração argilosa plástica por partículas não plásticas de cinza, contribuiu para atenuar a contração da amostra, com a retração volumétrica caindo de 35,55% no solo puro para até 20,90% na matriz 70S30C, e a deformação radial caindo de 9,5% no solo para 7,6% na mistura 70S30C.

Esse comportamento é diretamente corroborado por Phanikumar e Sharma (2007) que demonstraram que a incorporação de cinzas estabiliza argilas ao reduzir o índice de plasticidade e restringir o intervalo de umidade suscetível à contração.

Gráfico 22 - Comparação entre retração linear e deformação radial em 14,0 h.



Fonte: Autor (2026).

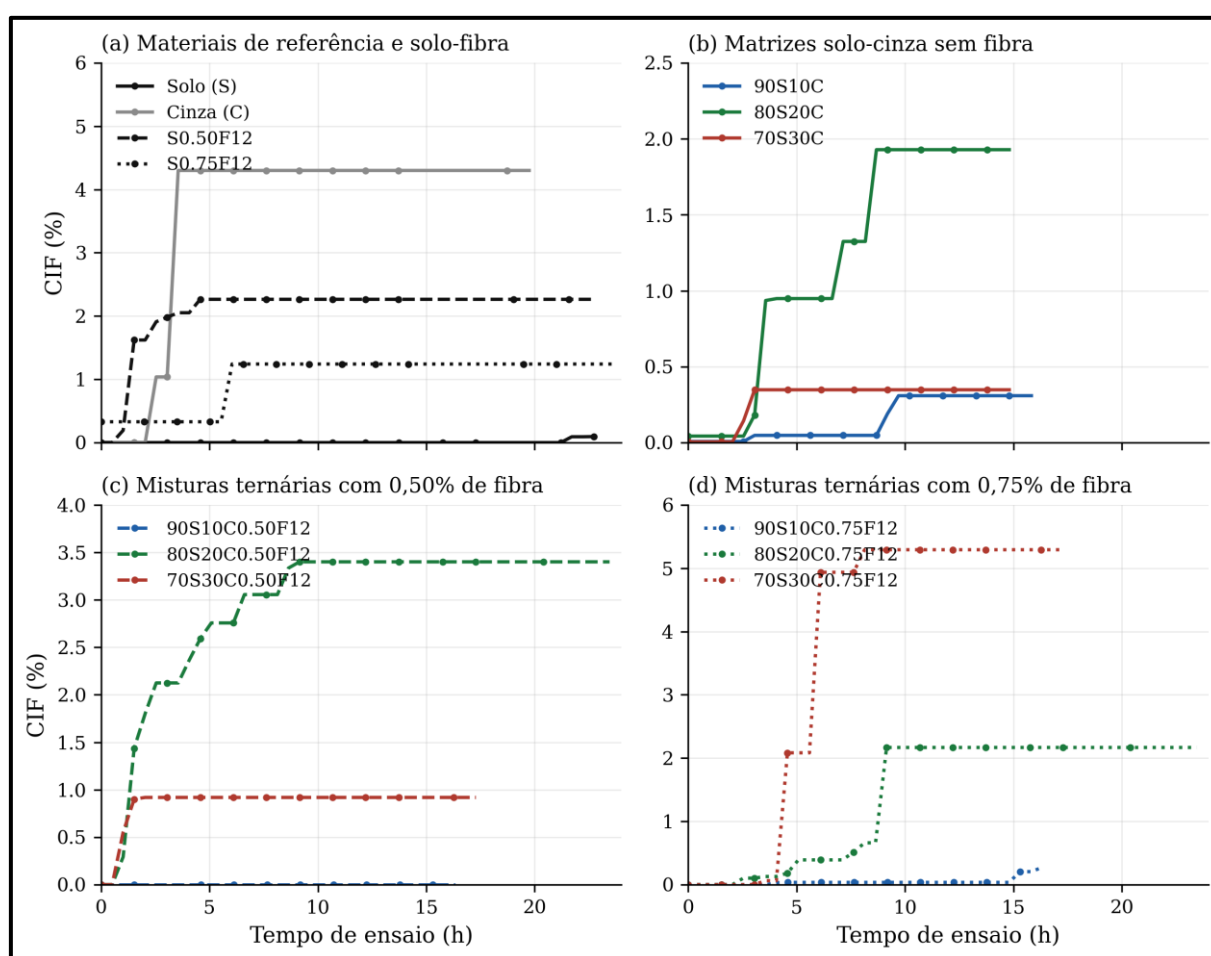
Ambas as análises também evidenciam a interação micromecânica promovida pela adição de fibras. O desempenho ótimo foi atingido com 0,75% de fibras, teor no qual as matrizes (tanto no solo puro como nas misturas solo-cinza) apresentaram as menores retrações finais (VS e LS) e, simultaneamente, as menores deformações radiais contínuas ϵ_r no monitoramento digital (4,8% e 5,2% para as matrizes 80S20C e 70S30C). A dosagem de 0,50% apresentou o mesmo padrão de redução observado para as amostras com teor de 0,75% com percentual de redução da retração ligeiramente maiores.

Amparada pela convergência dessas metodologias de avaliação, as composições S0.75F12 e 80S20C0.75F12 apresentaram os melhores resultados, contribuindo para atenuar as retrações radiais, lineares e volumétricas durante todo o processo de secagem. Dessa maneira o comportamento observado pode influenciar o comportamento hidráulico da cobertura a longo prazo.

4.9.5 Evolução temporal da fissuração superficial

O Gráfico 23 apresenta a evolução do CIF durante o período de monitoramento contínuo. As curvas mostram que a manifestação superficial ocorreu em momentos e intensidades distintos entre as composições.

Gráfico 23 - Evolução do CIF durante o monitoramento contínuo, organizada por grupo de composição.



Fonte: Autor (2026).

Como o descritor temporal pós-processado é acumulativo, ele é adequado para localizar episódios de crescimento, mas não deve ser interpretado isoladamente como condição final da superfície. Para a avaliação das amostras, adotou-se como indicador representativo a mediana dos valores brutos de CIF dentro da janela válida (Tabela 37), por ser menos sensível a valores isolados produzidos por sombras, reflexos ou pequenas variações de segmentação. Portanto, o CIF mediano não corresponde necessariamente ao valor final ou máximo da

fissuração, mas a um descritor da manifestação superficial registrada durante o intervalo analisado.

Tabela 37 - CIF mediano das composições avaliadas.

Composição	CIF mediano (%)
Solo (S)	0,000
Cinza (C)	1,385
S0.50F12	1,079
S0.75F12	0,678
90S10C	0,029
90S10C0.50F12	0,677
90S10C0.75F12	0,178
80S20C	1,586
80S20C0.50F12	5,395
80S20C0.75F12	0,319
70S30C	0,294
70S30C0.50F12	0,410
70S30C0.75F12	1,708

Fonte: Autor (2026).

O CIF representa a fração da área útil identificada como fissuração superficial; não descreve conectividade ou geometria da rede. O CIF mediano variou de 0,000% no solo natural a 5,395% em 80S20C0.50F12. Também foram observados valores relativamente elevados em 70S30C0.75F12 (1,708%), 80S20C (1,586%) e na cinza isolada (1,385%). Os menores valores entre as matrizes solo-cinza e suas misturas ocorreram em 90S10C (0,029%), 90S10C0.75F12 (0,178%), 70S30C (0,294%) e 80S20C0.75F12 (0,319%). A leitura conjunta destaca comportamentos distintos. Em 80S20C0.75F12, a baixa deformação radial de 4,8% coincidiu com CIF mediano reduzido, de 0,319%, configurando resposta favorável nos dois parâmetros. Em 90S10C0.75F12, o CIF e a deformação radial também foram inferiores aos da matriz sem fibras. Em contraste, 70S30C0.75F12 apresentou uma das menores deformações radiais, mas CIF mediano de 1,708%.

Destaca-se que a ausência de uma tendência única é compatível com estudos que demonstram a influência simultânea do teor e do comprimento das fibras, do estado de compactação, da espessura, da aderência à base, da velocidade de perda de água e dos ciclos de umedecimento e secagem (CHADUVULA *et al.*, 2022; BU *et al.*, 2023). Esses resultados mostram que o CIF deve complementar, e não substituir, os parâmetros de retração. Como cada

composição foi representada por um único corpo de prova, os valores permitem comparação descritiva, mas não sustentam inferência causal ou superioridade estatística.

É importante ressaltar que a geometria das amostras ensaiadas deve ser considerada na interpretação. Os corpos de prova possuíam pequena espessura e foram moldados em recipientes de acrílico com superfície relativamente lisa. Essa configuração permitiu que parte da variação dimensional fosse acomodada pelo recuo global do contorno, com deslocamento da amostra em direção ao centro, reduzindo a restrição necessária para o desenvolvimento de tensões de tração elevadas.

Em uma camada extensa de campo, a retração de uma região é parcialmente restringida pela continuidade e pela massa do material adjacente. Essa restrição pode favorecer o desenvolvimento de tensões de tração e a abertura de fissuras. No ensaio em cápsula, por outro lado, a retração ocorreu de forma relativamente livre, de modo que uma parcela significativa da perda de volume pôde se manifestar pela formação do vazio anelar, sem necessariamente produzir uma rede interna de fissuras bem desenvolvida.

A análise digital confirmou que a secagem ocorreu predominantemente por retração do contorno. A padronização em 14,0 h permitiu comparar todas as composições no mesmo tempo de monitoramento contínuo. A cinza isolada apresentou deformação desprezível, e as matrizes sem fibras mostraram redução progressiva de ε_r com o aumento do teor de cinza. O efeito mais consistente das fibras ocorreu com 0,75%, teor que reduziu a deformação radial nas quatro matrizes avaliadas.

A integração com o ensaio de limite de contração mostrou que a cinza exerceu influência mais acentuada sobre a retração volumétrica e linear que as fibras. O teor de 0,75% produziu reduções adicionais e forneceu os melhores resultados de estabilidade dimensional nas matrizes 80S20C e 70S30C.

O CIF permitiu comparar quantitativamente a intensidade da manifestação superficial da fissuração, mas não forneceu base para caracterizar conectividade, orientação ou padrão geométrico completo. Assim, a avaliação do desempenho deve permanecer integrada: LC, VS e LS caracterizam a estabilidade dimensional global; ε_r descreve a contração planimétrica durante a secagem.

4.10 Modelagem numérica (Vadose®)

A modelagem numérica foi empregada como ferramenta complementar para comparar a resposta hidráulica de camadas de cobertura constituídas por solo natural, S0.50F12 e S0.75F12 quando submetidas à mesma geometria, às mesmas condições de contorno e a uma sequência climática anual. A análise foi direcionada à evolução do grau de saturação e, indiretamente, da sucção ao longo da camada de cobertura.

A escolha dessas três composições não teve como objetivo representar todo o programa experimental. O solo natural foi adotado como referência, enquanto S0.50F12 representou uma condição de menor teor de reforço, com desempenho hidráulico relativamente favorável, e S0.75F12 foi selecionada pelo melhor equilíbrio global entre resistência, deformabilidade, estabilidade dimensional e propriedades de transporte.

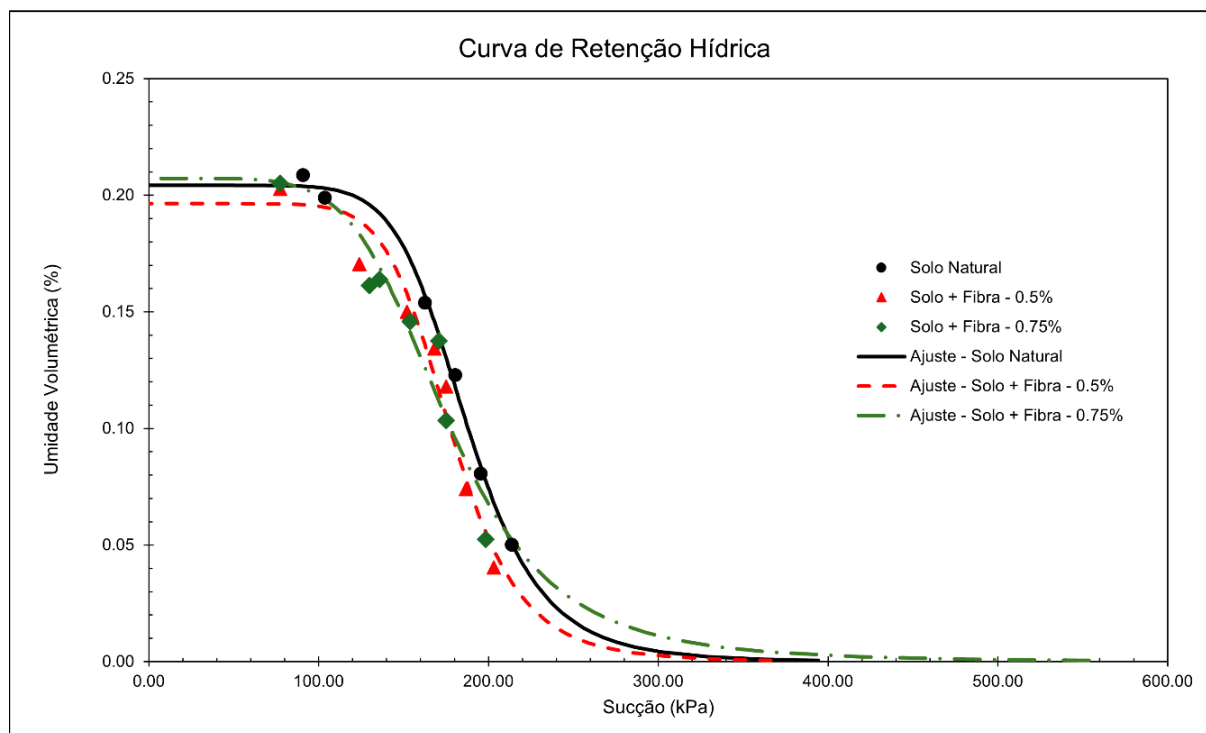
O modelo numérico representou os materiais como meios contínuos, homogêneos e inicialmente íntegros. Portanto, não foram simulados o desenvolvimento de tensões de tração, a formação ou propagação de fissuras, a alteração das propriedades hidráulicas após o dano nem o fluxo preferencial através de descontinuidades. Os resultados devem, assim, ser interpretados como uma comparação entre as matrizes não fissuradas.

4.10.1 Curvas de retenção e de condutividade hidráulica não saturada

As curvas de retenção obtidas para o solo, S0.50F12 e S0.75F12 são apresentadas no Gráfico 24. Os três materiais apresentaram comportamento semelhante, com curvas próximas ao longo da faixa de sucção analisada. A principal redução do teor de umidade volumétrica ocorreu em intervalo relativamente concentrado de sucção, aproximadamente entre 100 e 250 kPa.

A proximidade entre as curvas indica que a incorporação de 0,50% e 0,75% de fibras de 12 mm não modificou de forma acentuada a capacidade de retenção de água da matriz. Dessa forma, esperavam-se respostas numéricas também próximas entre os três modelos, uma vez que a geometria, as condições climáticas, a camada inferior e as demais condições de contorno foram mantidas constantes.

Gráfico 24 - Curvas de retenção.



Fonte: Autor (2026).

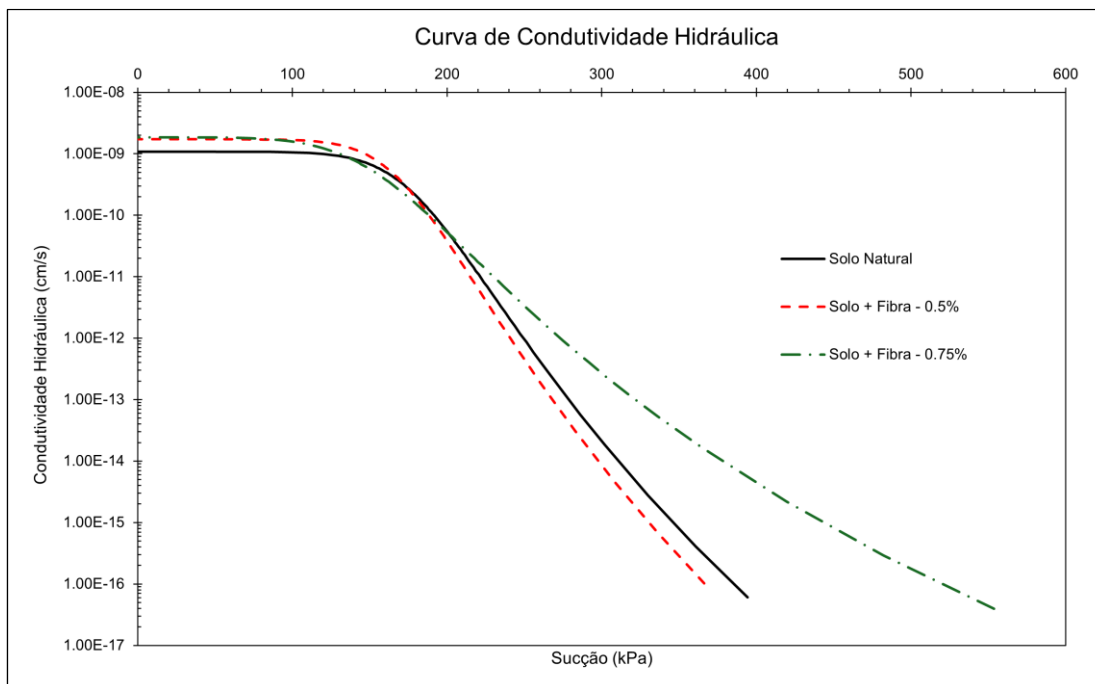
Pelos gráficos, é possível observar que existe pouca variação na capacidade de retenção do solo ao se introduzir a fibra, em que se pode dizer que as curvas características foram praticamente coincidentes. Destaca-se também que os materiais atingem valores relativamente baixos de sucção, onde, para uma umidade volumétrica próxima a zero, não são superiores a 500 kPa. Também se observa as baixas umidades volumétricas atingidas pelos materiais, que sofrem uma variação brusca de umidade para um pequeno intervalo de sucção, o que pode indicar uma baixa capacidade de retenção.

As curvas estimadas de condutividade hidráulica não saturada são apresentadas no Gráfico 25. Próximo da condição saturada, os três materiais apresentaram curvas muito próximas confirmando o comportamento já observado nos ensaios de condutividade hidráulica.

Verifica-se que os comportamentos do solo puro e da amostra S0.50F12 foram comparáveis, com curvas relativamente coincidentes. A amostra S0.75F12 apresentou um comportamento distinto a partir dos 200 kPa de sucção, em que o material tem uma queda menos acentuada da condutividade hidráulica. Isso pode indicar que a adição de fibra de 12 mm no teor de 0,75%, para valores de sucções mais elevadas e sob as mesmas condições das demais amostras, favorece a uma redução da condutividade hidráulica. Esse comportamento pode

impactar diretamente a capacidade da cobertura de mitigar a infiltração de água para o interior do maciço.

Gráfico 25 - Curvas de condutividade hidráulica.



Fonte: Autor (2026).

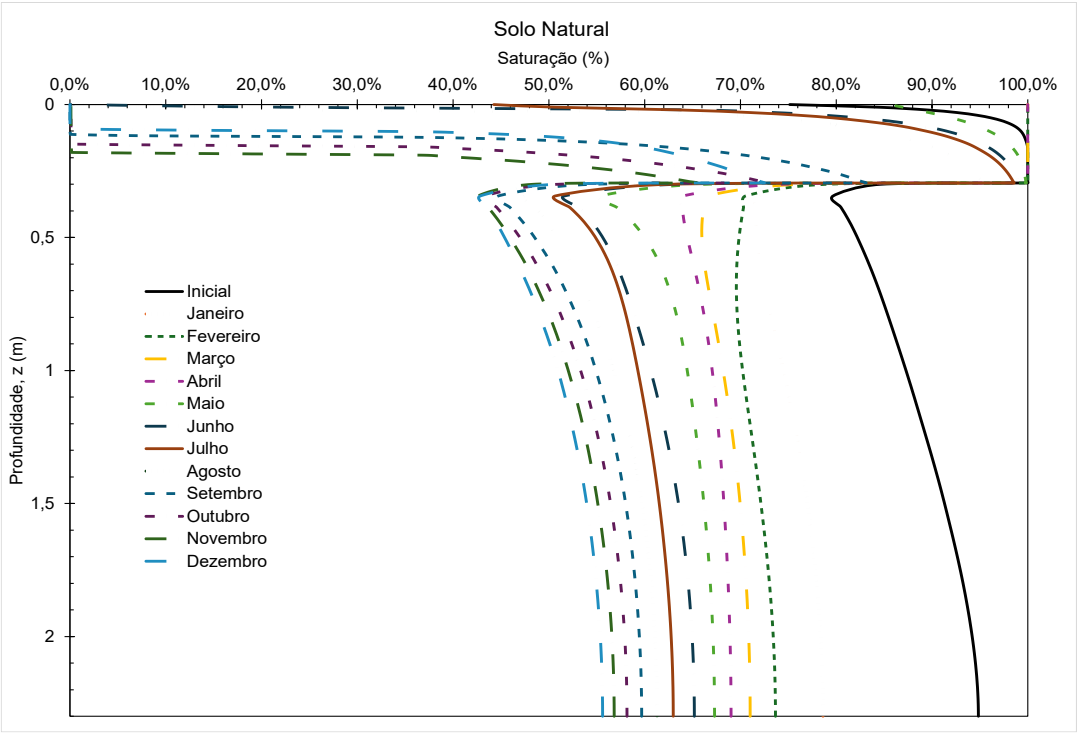
Espera-se que, em longo prazo, esse comportamento contribua, ainda mais, para melhorar o desempenho da camada de cobertura. Sob valores elevados de sucção e condições equivalentes às das demais amostras, a incorporação de 0,75% de fibras de 12 mm pode favorecer a manutenção da integridade da matriz e, conseqüentemente, limitar o aumento da condutividade hidráulica efetiva. Esse benefício tende a se tornar mais relevante após sucessivos ciclos de umedecimento e secagem, quando a atuação das fibras no controle da abertura e da conectividade das fissuras pode reduzir a formação de caminhos preferenciais de fluxo e, assim, diminuir a infiltração de água para o interior do maciço.

4.10.2 Evolução do grau de saturação da camada de cobertura

Os primeiros dados avaliados são as condições de saturação ao longo do ano de estudo. Nesse caso, para o último dia de cada mês, foram obtidas as condições de saturação das camadas de materiais ao longo da profundidade para os três modelos estudados. Os Gráficos

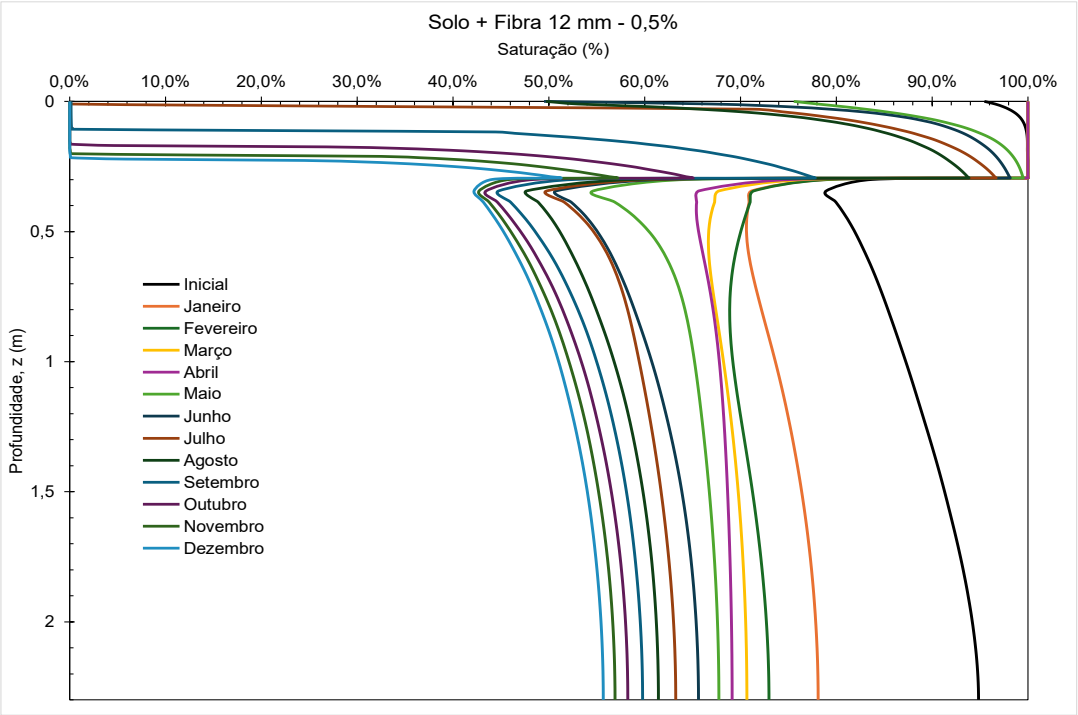
26 a 28 apresentam os perfis de grau de saturação obtidos no último dia de cada mês para os três modelos.

Gráfico 26 - Variação da saturação com a profundidade – solo (puro).



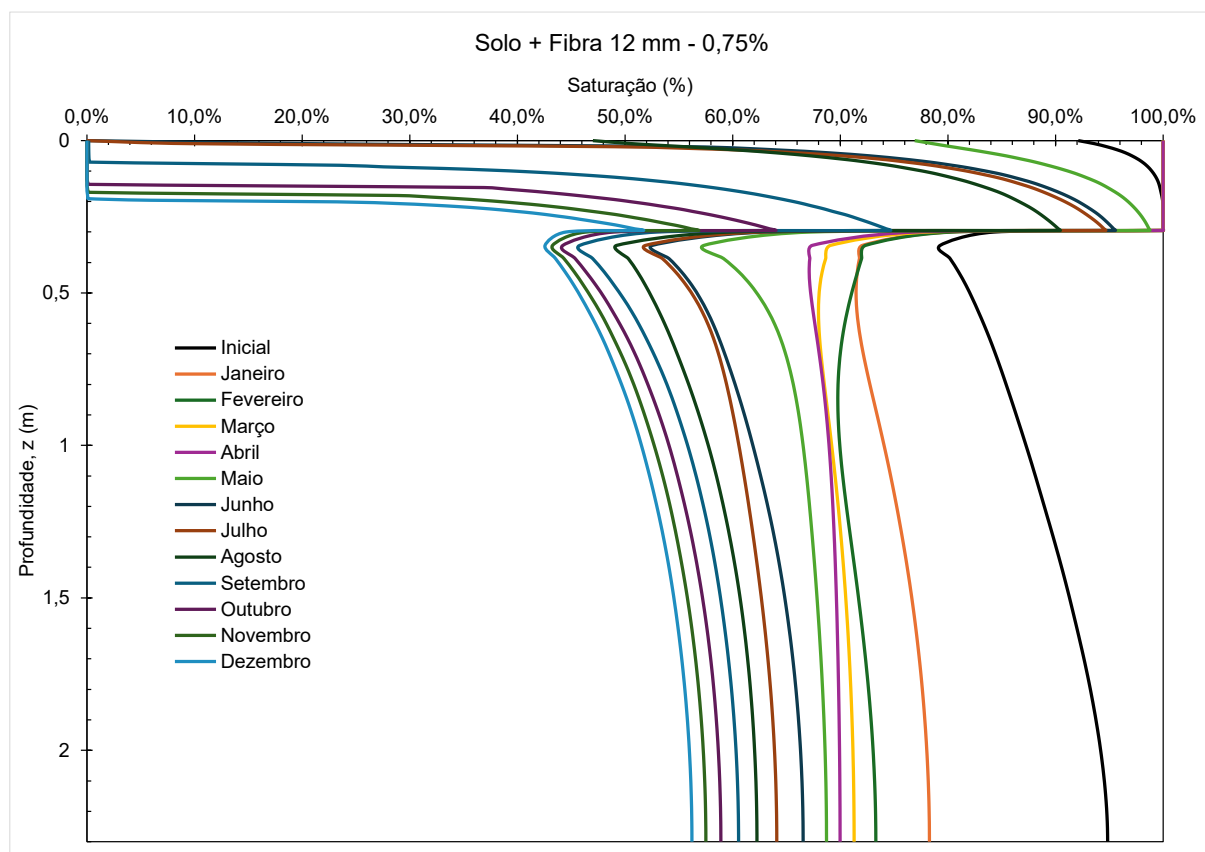
Fonte: Autor (2026).

Gráfico 27 - Variação da saturação com a profundidade – S0.50F12.



Fonte: Autor (2026).

Gráfico 28 - Variação da saturação com a profundidade – S0.75F12.



Fonte: Autor (2026).

Para os três casos, observa-se que as condições iniciais foram muito semelhantes, comportamento coerente com a proximidade entre as curvas de retenção e de condutividade hidráulica do solo puro, da S0.50F12 e da S0.75F12. A camada de cobertura apresentou grau de saturação elevado em praticamente toda a sua espessura, com valores ligeiramente inferiores a 100% na porção superior, diretamente exposta às condições atmosféricas. Nessa região, o solo puro apresentou saturação inicial discretamente inferior à observada nas misturas reforçadas. A camada representativa de RSU apresentou resposta praticamente coincidente nos três modelos, com grau de saturação médio próximo de 85%, indicando que a condição inicial do material subjacente não introduziu diferenças relevantes na comparação entre as coberturas.

Com o aumento das precipitações entre janeiro e abril, a camada de cobertura permaneceu próxima da saturação total nos três modelos. Nessa condição, as sucções tenderam a valores reduzidos e a condutividade hidráulica tendem a se aproximar dos valores correspondentes ao estado saturado. A similaridade entre os perfis mostra que a incorporação de 0,50% e 0,75% de fibras de 12 mm não alterou a dinâmica de saturação/sucção da camada durante o período chuvoso. Portanto, sob elevada disponibilidade hídrica, o solo puro e as duas

misturas reforçadas apresentaram respostas hidráulicas equivalentes. Durante esse período, também ocorreu redistribuição da umidade na camada subjacente.

Durante esse período, também ocorreu redistribuição da umidade na camada subjacente. Ao final da fase de maior umedecimento, o grau de saturação do material representativo de RSU ficou próximo de 65% nos modelos com solo puro e S0.50F12 e de aproximadamente 68% no modelo com S0.75F12.

O grau de saturação elevado (próximo a 100%), nos períodos de maior pluviosidade, tendem a aumentar a condutividade hidráulica, propiciando uma maior percolação de lixiviado. Todavia, os resultados evidenciam que adição de fibra não alterou de forma significativa o perfil de saturação, com os valores próximos para os três modelos, indicando, que assim como no ensaio de condutividade hidráulica, as fibras favorecem a um leve aumento desse parâmetro, mas o mantendo próximo aos patamares do solo, estando dentro de um limite aceitável.

Com a redução das precipitações, iniciada a partir de maio e intensificada no segundo semestre, ocorreu perda progressiva de saturação, inicialmente na superfície e posteriormente em maiores profundidades. Formou-se, assim, um gradiente vertical de umidade, com menores graus de saturação na parte superior e manutenção de condições relativamente mais úmidas na porção inferior da cobertura. Esse comportamento é compatível com uma camada exposta à atmosfera, na qual a secagem se inicia na interface solo-ar e avança gradualmente em direção ao interior da camada.

Durante a maior parte do ano, os perfis do solo, da S0.50F12 e da S0.75F12 permaneceram próximos, mostrando que os teores intermediários de fibras não modificaram substancialmente a resposta hidráulica global da camada intacta. Em particular, a S0.75F12 atingiu graus de saturação próximos de 100% durante o período chuvoso e manteve comportamento comparável ao solo e à S0.50F12 ao longo da maior parte da profundidade e do período analisado.

Esses resultados indicam, assim como nas avaliações hidráulicas realizadas, a inclusão de fibras, em baixos teores, apesar de aumentar levemente a condutividade hidráulica, não descaracteriza a aplicação das amostras com adição de fibra como material de cobertura. Isso associado aos ganhos mecânicos e a maior estabilidade dimensional, identificada nas demais etapas experimentais, favorecem a incorporação das fibras.

A principal contribuição da modelagem foi, portanto, identificar a evolução espacial e temporal da solicitação hidráulica imposta às coberturas. A dessaturação da superfície

representa, de acordo com as curvas de retenção, o aumento progressivo da sucção. Esse processo intensifica as forças capilares, promove a aproximação entre as partículas e induz a tendência de retração da matriz. Em uma camada contínua de campo, a retração da região superficial pode ser restringida pelas áreas adjacentes e pelas porções inferiores ainda mais úmidas, produzindo deformações diferenciais e tensões de tração. Nesse contexto, os resultados numéricos corroboram a seleção da S0.75F12 não por indicar menor permeabilidade ou maior saturação em todas as condições, mas por mostrar que essa composição permaneceu hidraulicamente próxima ao solo mesmo sob um ciclo anual de umedecimento e secagem, sem anular as vantagens mecânicas e dimensionais verificadas experimentalmente.

4.11 Síntese integrada dos resultados e definição da composição de referência

Os resultados reunidos neste capítulo demonstram que a seleção de um material para camada de cobertura de aterro sanitário não pode ser conduzida a partir de uma propriedade isolada. A função de barreira exige baixa transmissão de água e gases, estabilidade volumétrica, resistência suficiente para suportar solicitações de serviço e deformabilidade capaz de acomodar retrações e recalques sem perda de continuidade. Os materiais constituintes utilizados na presente pesquisa exerceram funções complementares. O solo, além de material de referência, foi o principal componente das matrizes de todas as amostras, conferindo a elas baixa condutividade inicial; a cinza reduziu a participação da fração argilosa e a retração; e as fibras ampliaram a deformabilidade, a absorção de energia e a transferência de tensões após a fissuração. O desempenho global decorreu, portanto, do equilíbrio entre esses efeitos, e não da maximização isolada da resistência, da retração ou da permeabilidade.

O solo apresentou composição silicoaluminosa, mineralogia predominantemente quartzosa e caulinítica e plasticidade moderada, características compatíveis com o seu emprego como camada de cobertura de baixa condutividade, mas também apresentou susceptibilidade à retração durante a secagem. A cinza, de natureza não plástica e granulometria predominantemente siltosa, reduziu progressivamente o índice de plasticidade e as retrações volumétrica e linear. Esse benefício foi acompanhado, entretanto, pela redução da massa específica seca máxima e pelo aumento da condutividade hidráulica e da permeabilidade aparente ao ar. Além disso, as não conformidades verificadas no extrato solubilizado caracterizam a cinza como material não inerte. Seu emprego mostrou-se tecnicamente possível,

mas condicionado à dosagem, ao confinamento da camada e à prevenção de contato hídrico contínuo.

A incorporação das fibras produziu uma modificação distinta. Os ensaios mecânicos e as observações microestruturais indicaram atuação por aderência, atrito e arrancamento progressivo, com os filamentos atravessando regiões de deformação localizada e mantendo a transferência de esforços entre as faces das descontinuidades. Esse mecanismo foi mais eficiente para as fibras de 12 mm. Os maiores teores produziram os melhores desempenhos mecânicos absolutos, mas também ampliaram a dificuldade de dispersão, reduziram a massa específica seca máxima e aumentaram as propriedades de transporte da matriz intacta. S1.25F12, por exemplo, apresentou os maiores resultados mecânicos entre as misturas solo-fibra, porém associou esses ganhos a maior consumo, risco de aglomeração e condutividades superiores às dos teores intermediários. Nas misturas ternárias, a matriz com 20% de cinza proporcionou a interação mecânica mais favorável, mas as composições desse grupo apresentaram condutividades hidráulicas da ordem de 10^{-6} cm/s e permeabilidades ao ar da ordem de 10^{-13} m². Assim, mostraram-se promissoras em sistemas multicamadas ou em situações nas quais resistência e estabilidade dimensional recebam maior peso, mas não como melhor opção isolada de baixa permeabilidade.

A avaliação multicritério posiciona S0.75F12 como a composição mais equilibrada do programa experimental. A mistura atingiu resistência à compressão simples de 544 ± 66 kPa, aproximadamente 95% superior à do solo natural, com deformação axial no pico de 26,12% e tenacidade até o pico de 119,35 kJ/m³. No ensaio de tração por compressão diametral, apresentou resistência de 56,23 kPa, deslocamento no pico de 2,468 mm e energia de 0,823 J até o pico. Na secagem, o limite de contração aumentou para 17,80%, a retração volumétrica foi reduzida de 35,55% para 32,88%, a retração linear diminuiu de 9,64% para 9,04% e a deformação radial acumulada em 14 h caiu de 9,5% para 6,7%. Embora a redução volumétrica tenha sido moderada, o conjunto de resultados indica maior capacidade de redistribuir tensões e limitar a abertura progressiva das descontinuidades, que constitui a principal função do reforço fibroso.

O desempenho hidráulico de S0.75F12 permaneceu relativamente próximo ao da matriz de referência. Sua condutividade hidráulica saturada foi de $1,86 \times 10^{-7}$ cm/s, frente a $1,08 \times 10^{-7}$ cm/s no solo, e sua permeabilidade intrínseca aparente ao ar foi de $2,80 \times 10^{-14}$ m². Ainda assim, a resposta foi mais favorável que a das misturas com maior teor de fibras e das composições com 20% ou 30% de cinza. A modelagem numérica também mostrou respostas

muito próximas entre o solo, S0.50F12 e S0.75F12. Como o modelo não representou fissuras, o possível benefício de longo prazo permanece associado à manutenção da integridade física, hipótese que deve ser confirmada sob ciclos de umedecimento e secagem e em escala piloto.

A seleção de S0.75F12 não significa que essa mistura tenha apresentado o maior valor em todos os ensaios. S0.50F12 mostrou condutividade hidráulica ligeiramente menor; S1.25F12 alcançou os maiores resultados mecânicos; as composições com 30% de cinza apresentaram as menores retrações convencionais; e as misturas baseadas em 80S20C reuniram os melhores desempenhos do grupo ternário. A vantagem de S0.75F12 reside no caráter multicritério de sua resposta, proporcionando ganhos mecânicos expressivos sem o consumo, a dificuldade executiva e o aumento de permeabilidade associados ao teor de 1,25%; melhora a estabilidade dimensional sem introduzir o aumento acentuado das propriedades de transporte observado nas matrizes com maiores teores de cinza; e evita as restrições ambientais específicas do resíduo. Por essa razão, pode ser considerada a composição de referência da pesquisa e a candidata prioritária para validação em escala ampliada, mantendo-se S0.50F12 como alternativa quando o desempenho hidráulico inicial receber peso superior na decisão de projeto.

A dimensão do programa experimental confere consistência a essa avaliação. Foram investigadas 24 composições, compreendendo materiais de referência, dez misturas solo-fibra, três matrizes solo-cinza e nove misturas ternárias. Aproximadamente 250 corpos de prova e unidades moldadas nos ensaios mecânicos, hidráulicos, de permeabilidade ao ar, retração e análise de imagens, além de 48 determinações de compactação em duplicata (Figura 37)

Figura 37 - Parte dos corpos de prova e unidades moldadas durante a pesquisa.



Fonte: Autor (2026).

O programa supera 350 execuções laboratoriais e mais de 600 registros experimentais consolidados, incluindo 444 imagens válidas. O desenvolvimento envolveu a coleta de mais de duas toneladas de materiais, a construção de uma câmara de secagem associada a uma rotina automatizada em Python, e de uma célula para avaliação da permeabilidade intrínseca ao ar, além do processamento de três modelos numéricos em regimes estacionário e transiente.

Embora permaneçam limitações relacionadas aos ensaios em parede rígida, à célula adaptada de fluxo de ar, à retração relativamente livre nas cápsulas e à reprodução das condições de campo, o conjunto experimental fornece base ampla para subsidiar as discussões dessa pesquisa e embasar os resultados encontrados. Nesse contexto, S0.75F12 representa o melhor desempenho global identificado nas condições desta pesquisa (Quadro 11).

Quadro 11 - Ficha técnica da composição de referência S0.75F12. (Continua)

MATERIAL	S0.75F12
Enquadramento	Compósito solo-fibra.

Propriedade	Especificação / resultado experimental
IDENTIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO	
Designação	S0.75F12.
Tipo de material	Compósito binário de solo compactado reforçado com fibras discretas de polipropileno de comprimento de 12 mm
Composição	100% de matriz de solo seco, acrescida de 0,75% de fibras de polipropileno de 12 mm em relação à massa seca da matriz; 0% de cinza.
Porcentagem de solo	100% da matriz mineral.
Porcentagem de cinza	0%.
Teor de fibras	0,75% em massa seca da matriz.
Geometria das fibras	Comprimento nominal de 12 mm; diâmetro nominal de 18 µm; monofilamento de seção circular.
Classificação do material	Compósito solo-fibra com matriz areno-argilosa. A matriz é classificada como SC (areia argilosa); a fração fina situa-se no campo CL da Carta de Plasticidade.
PROPRIEDADES DOS CONSTITUINTES E COMPACTAÇÃO	
Origem da matriz	Solo empregado na cobertura do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), coletado em área de estoque/jazida da operação.
Fibra	Polipropileno FibroMac®; massa específica de 0,91 g/cm³; resistência à tração de 300 MPa; alongamento de 80%; módulo de Young de 3.000 MPa.

Quadro 11 - Ficha técnica da composição de referência S0.75F12. (Continuação)

MATERIAL	S0.75F12
Enquadramento	Compósito solo-fibra.

Propriedade	Especificação / resultado experimental
PROPRIEDADES DOS CONSTITUINTES E PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO	
Massa específica real dos grãos	Não determinada especificamente para o compósito. Valor da matriz de solo: 2,66 g/cm ³ . A massa específica da fibra é 0,91 g/cm ³ .
Umidade ótima	12,975% (Energia <i>Proctor Normal</i>)
Massa específica seca máxima	1,804 g/cm ³ (Energia <i>Proctor Normal</i>)
Limites de consistência	Não determinados especificamente para S0.75F12. Valores da matriz de solo: LL = 33,3%; LP = 19,8%; IP = 13,5%.
ESTABILIDADE DIMENSIONAL E SECAGEM	
Limite de contração	17,80%.
Retração volumétrica	32,88%, correspondendo a redução aproximada de 7,5% em relação ao solo natural.
Retração linear equivalente	9,04%, correspondendo a redução aproximada de 6,2% em relação ao solo natural.
Deformação radial acumulada	6,7% em 14 h na comparação padronizada; 6,8% ao final da janela válida da série.
Redução de área e vazio anelar	Redução de área de 13,1% e vazio anelar de 3,1 mm ao final da janela válida.
CIF mediano	0,678%. O valor deve ser interpretado de forma comparativa, pois a geometria do ensaio permitiu retração relativamente livre e produziu fissuração superficial pouco expressiva.
DESEMPENHO MECÂNICO	
Resistência à compressão simples	544 ± 66 kPa; deformação axial no pico de 26,12%; tenacidade até o pico de 119,35 kJ/m ³ .
Resistência à tração por compressão diametral	56,23 kPa; deslocamento vertical no pico de 2,468 mm; energia até o pico de 0,823 J; energia total registrada de 1,924 J; energia até 0,75 mm de 0,172 J.
Comportamento mecânico	Resposta resistente, altamente deformável e tenaz, com capacidade de manter a transferência de esforços durante a formação e a abertura de descontinuidades.
PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MODELAGEM	
Condutividade hidráulica saturada	1,86 × 10 ⁻⁷ cm/s. Valor na mesma ordem de grandeza do solo (1,08 × 10 ⁻⁷ cm/s)
Permeabilidade intrínseca aparente ao ar	2,80 × 10 ⁻¹⁴ m ² , equivalente a 2,8 vezes o valor do solo natural nas condições do ensaio adaptado.
Curva de retenção e condição não saturada	Curva de retenção próxima à do solo e de S0.50F12; acima de aproximadamente 200 kPa de sucção, apresentou redução menos acentuada da condutividade hidráulica estimada.

Quadro 11 - Ficha técnica da composição de referência S0.75F12. (Conclusão)

MATERIAL	S0.75F12
Enquadramento	Compósito solo-fibra.

Propriedade	Especificação / resultado experimental
AVALIAÇÃO PARA APLICAÇÃO	
Principais vantagens	Equilíbrio entre resistência, deformabilidade, energia absorvida, estabilidade dimensional e propriedades de transporte; menor consumo e menor risco de aglomeração que o teor de 1,25%; ausência de cinza e, portanto, das restrições ambientais específicas do resíduo.
Limitações	Condutividade hidráulica e permeabilidade ao ar superiores às do solo; necessidade de controle rigoroso da dispersão e compactação; ausência de parâmetros de cisalhamento consolidados; ensaios de secagem com retração relativamente livre; necessidade de validação sob ciclos, escala piloto e condições de campo.
Aplicações potenciais	Camada compactada de cobertura final de aterros sanitários e outras barreiras de solo sujeitas a secagem, recalques diferenciais e solicitações que exijam maior ductilidade, condicionada à verificação dos critérios hidráulicos do projeto e ao controle tecnológico da execução.
Status na pesquisa	Composição de referência e candidata prioritária para validação em escala ampliada. S0.50F12 permanece como alternativa de menor teor quando se atribui maior peso ao desempenho hidráulico inicial.

Fonte: Autor (2026).

Nota: os valores caracterizam o material nas condições laboratoriais da pesquisa e não constituem, por si sós, especificação executiva para aplicação em campo.

Embora a análise multicritério tenha conduzido à seleção de um compósito de referência, outras formulações também apresentaram resultados promissores para aplicação em camadas de cobertura, ainda que com variações em parâmetros hidráulicos, mecânicos e de estabilidade dimensional. Dessa forma, a escolha da composição de melhor equilíbrio global não exclui a viabilidade das demais misturas. Ensaio complementares, incluindo modelos físicos reduzidos, ciclos ambientais controlados e trechos experimentais em campo, poderão demonstrar que outras formulações também são capazes de melhorar o desempenho da cobertura, especialmente quando avaliadas em condições mais próximas das solicitações reais.

Ressalta-se, ainda, que os materiais e compósitos desta pesquisa foram avaliados predominantemente em laboratório, com ensaios realizados imediatamente ou em períodos relativamente curtos após sua preparação. Há, portanto, indícios de que avaliações em longo prazo possam revelar benefícios mais expressivos, decorrentes da acomodação da estrutura interna, da estabilização das interfaces entre fibras e matriz e da atuação progressiva do reforço durante sucessivos ciclos de umedecimento e secagem. Assim, o desempenho observado nesta tese pode representar uma condição inicial ou conservadora, sendo possível que a eficiência das

misturas na preservação da integridade e na redução de caminhos preferenciais se torne ainda mais evidente ao longo do tempo.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

A presente tese permitiu avançar da avaliação isolada de propriedades geotécnicas para uma compreensão funcional do desempenho de materiais destinados a camadas de cobertura de aterros sanitários. A questão central deixou de ser apenas a obtenção de baixa permeabilidade inicial e passou a envolver a capacidade de a camada conservar sua continuidade quando submetida à secagem, às variações de umidade e às deformações impostas pelo maciço de resíduos. Essa perspectiva integra transporte de fluidos, estabilidade dimensional, resistência, deformabilidade, condição ambiental e exequibilidade, oferecendo uma base mais consistente para a seleção de materiais de cobertura.

A proposta central da pesquisa foi atingida através do escopo laboratorial, analítico e numérico definido. A caracterização dos constituintes, a comparação entre o solo de referência, as misturas binárias e as composições ternárias, a avaliação mecânica e hidráulica, o acompanhamento da secagem e a modelagem permitiram identificar os mecanismos predominantes e estabelecer critérios para a escolha de uma composição de referência. A viabilidade demonstrada deve, contudo, ser entendida como evidência técnica nas condições investigadas, e não como uma solução definitiva e pronta. A confirmação do desempenho em escala de obra, sob ciclos climáticos prolongados e em contato com as demais camadas do sistema de cobertura, constitui a etapa subsequente necessária para a transposição dos resultados ao campo.

A principal contribuição científica da tese consiste em demonstrar que os efeitos da cinza leve e das fibras de polipropileno são complementares, mas não necessariamente sinérgicos em qualquer dosagem. A cinza atua principalmente na modificação da plasticidade e da resposta volumétrica da matriz, enquanto as fibras alteram o processo de ruptura, a redistribuição de tensões e a capacidade de sustentação após o início de uma descontinuidade. Entretanto, o aumento do teor de qualquer um desses constituintes pode produzir efeitos desfavoráveis sobre a compactação, a conectividade dos vazios e as propriedades de transporte. A pesquisa evidencia, portanto, que o desenvolvimento de um material mais adequado depende da compatibilização entre funções concorrentes, e não da maximização de um único indicador.

Deve-se destacar que a seleção de materiais para barreiras deve considerar não apenas as condições iniciais, mas a possibilidade de manutenção da função de contenção ao longo do tempo. O reforço fibroso mostrou-se particularmente importante por modificar a

forma de mobilização da resistência e ampliar a tolerância do material às deformações. Em termos de aplicação, essa resposta pode ser mais significativa do que um ganho isolado de resistência de pico, pois a integridade da camada depende da capacidade de acomodar movimentações sem formação de caminhos preferenciais amplamente conectados. A pesquisa, entretanto, não permite afirmar que houve redução direta das emissões de biogás em campo; ela demonstra um mecanismo potencial de preservação da continuidade da barreira, que ainda deve ser validado em condições representativas *in situ*.

No plano metodológico, a tese reuniu procedimentos convencionais e ferramentas desenvolvidas especificamente para o programa experimental. A associação entre os ensaios de caracterização, os parâmetros mecânicos e hidráulicos, o monitoramento temporal da secagem, a análise digital de imagens e a modelagem possibilitou interpretar o material em diferentes escalas. A câmara experimental, a rotina automatizada de processamento de imagens e a célula adaptada para comparação da permeabilidade intrínseca aparente ao ar ampliaram a capacidade de acompanhar fenômenos que não seriam adequadamente descritos apenas por medições iniciais e finais.

À luz desse conjunto de evidências, a composição S0.75F12 apresentou-se como o material de melhor desempenho global nas condições da pesquisa. Sua escolha não decorre de superioridade absoluta em todos os ensaios, mas da ausência de uma deficiência dominante e do equilíbrio entre resposta mecânica, estabilidade dimensional, comportamento hidráulico e viabilidade de preparação. O teor de 0,75% de fibras de polipropileno com 12 mm de comprimento mostrou-se suficiente para mobilizar mecanismos de ancoragem, ponteamto e transferência de esforços de forma significativa, sem impor, na mesma intensidade observada nos maiores teores, dificuldades de dispersão, perda de homogeneidade e aumento das propriedades de transporte. Além disso, a composição preserva uma resposta hidráulica relativamente próxima à do solo de referência e não incorpora as condicionantes ambientais associadas à cinza.

A definição de S0.75F12 como composição de referência não elimina a relevância das demais formulações. S0.50F12 permanece tecnicamente pertinente em situações nas quais o desempenho hidráulico inicial receba maior peso, enquanto as misturas baseadas na matriz 80S20C demonstram potencial quando resistência, deformabilidade e estabilidade dimensional forem prioritárias, especialmente em soluções multicamadas. A cinza leve, embora não integre a composição globalmente mais equilibrada, mostrou capacidade de reduzir a suscetibilidade volumétrica do solo e representa uma possibilidade de aproveitamento de resíduo industrial.

Seu emprego, contudo, deve ser condicionado à dosagem, ao confinamento, ao controle do contato hídrico e à verificação ambiental das misturas finais, uma vez que a avaliação realizada se concentrou no resíduo isolado.

As conclusões alcançadas devem ser interpretadas dentro das condições de contorno do estudo. Os ensaios de condutividade hidráulica em parede rígida podem sofrer influência de interfaces; a célula de fluxo de ar possui finalidade predominantemente comparativa; a retração nas cápsulas ocorreu com liberdade de movimentação superior à esperada em uma camada contínua; e a análise de imagens descreveu adequadamente o contorno e a manifestação superficial, mas não a geometria tridimensional das fissuras. Da mesma forma, a modelagem representou o fluxo de água em meios contínuos e não incorporou explicitamente dano, abertura de fissuras ou transporte de gás por descontinuidades. Essas limitações não comprometem a comparação entre as formulações, mas delimitam o alcance das inferências e impedem que os resultados sejam tratados, sem validação adicional, como especificação de projeto ou procedimento executivo definitivo.

Em síntese, a tese atingiu sua finalidade ao produzir uma interpretação integrada do comportamento de misturas de solo, cinza leve de carvão mineral e fibras de polipropileno, identificar os benefícios e as restrições de cada constituinte e selecionar uma composição prioritária para etapas de validação subsequentes. A contribuição mais ampla está na demonstração de que uma barreira mais confiável deve combinar baixa transmissão de fluidos com capacidade de conservar sua integridade diante de deformações e processos de secagem. Ao estabelecer uma abordagem multicritério de seleção, desenvolver procedimentos experimentais complementares e indicar a S0.75F12 como composição de referência, a pesquisa fornece uma base consistente para o desenvolvimento de coberturas de aterros mais tolerantes à retração e potencialmente mais duráveis, sem extrapolar os limites impostos pela escala laboratorial e pela ausência de monitoramento de campo.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A continuidade da pesquisa deve ser organizada em etapas progressivas de validação. Inicialmente, recomenda-se a execução de modelos físicos em escala reduzida com condições de contorno que reproduzam, de forma controlada, a restrição à retração existente em uma camada contínua. Esses modelos devem comparar o solo de referência, S0.50F12, S0.75F12 e ao menos uma composição ternária representativa, submetendo-os a ciclos de

umedecimento e secagem. O monitoramento integrado de umidade, sucção, temperatura, deslocamentos, abertura de fissuras, condutividade hidráulica e fluxo de gás permitirá relacionar diretamente a evolução do dano às mudanças das propriedades de transporte.

Em uma etapa posterior, devem ser construídos protótipos em escala real e trechos experimentais instrumentados, preferencialmente em aterro sanitário ou instalação com condições operacionais equivalentes. A execução de faixas independentes, com controle de teor de umidade, homogeneização, espalhamento, espessura e energia de compactação, possibilitará avaliar efeitos de escala e variabilidade construtiva. O acompanhamento deverá abranger períodos secos e chuvosos, ciclos sazonais, recalques, infiltração, sucção, erosão, comportamento da vegetação, evolução das fissuras e migração de gases. Essa etapa é essencial para verificar se os ganhos observados nos corpos de prova se traduzem em manutenção efetiva da continuidade e da função de barreira.

O comportamento em longo prazo deve ser investigado por programas de durabilidade que incluam ciclos repetidos de umedecimento e secagem, variações térmicas, exposição à radiação ultravioleta e contato com lixiviado e gases típicos do ambiente de aterro. Devem ser avaliadas a permanência das propriedades das fibras, a estabilidade da interface fibra-matriz, a alteração da estrutura porosa e a evolução das respostas mecânicas e hidráulicas. A permanência dessas respostas também deve ser verificada sob condições climáticas contrastantes, especialmente em ambientes semiáridos e tropicais úmidos. A caracterização ambiental deve ser estendida às misturas contendo cinza após cura, envelhecimento e ciclos climáticos, permitindo verificar a mobilidade dos constituintes no material efetivamente aplicado, e não apenas no resíduo isolado.

A metodologia de análise da secagem pode ser aperfeiçoada com técnicas capazes de representar a geometria das discontinuidades em três dimensões. Correlação digital de imagens, fotogrametria tridimensional, varredura a laser ou tomografia podem complementar o procedimento desenvolvido e fornecer informações sobre profundidade, orientação e conectividade das fissuras. Paralelamente, a modelagem numérica deve evoluir para formulações acopladas de fluxo de água e gás, transferência de calor, deformação e dano, com propriedades de transporte dependentes da abertura das discontinuidades. Os dados dos modelos físicos e dos trechos de campo deverão ser utilizados na calibração e na validação desses modelos.

O processo executivo das misturas requer investigação específica. Recomenda-se avaliar diferentes sequências de incorporação, equipamentos de mistura, tamanhos de lote,

faixas de umidade e tempos de homogeneização, com ênfase na dispersão uniforme das fibras. A adição gradual dos filamentos, a preparação prévia da matriz, o controle da umidade durante a mistura e a inspeção sistemática de aglomerados devem ser estudados para reduzir a formação de ninhos de fibras e a variabilidade local. Também devem ser definidos critérios de controle tecnológico para aceitação da mistura, incluindo teor efetivo de fibras, grau de compactação, uniformidade, espessura de camada e propriedades hidráulicas e mecânicas mínimas.

Em paralelo, análises econômicas e logísticas devem considerar custo e disponibilidade dos materiais, transporte e preparação da cinza, produtividade de mistura, controle tecnológico e manutenção da cobertura. Com base nessas investigações, recomenda-se a elaboração de um manual ou procedimento executivo para produção e aplicação de misturas solo-cinza-fibra em camadas de cobertura. O documento deverá estabelecer requisitos para seleção e preparação dos materiais, dosagem, sequência de mistura, transporte, espalhamento, compactação, proteção da camada e controle de qualidade, além de orientar o tratamento da cinza e as medidas de segurança e confinamento. A definição de faixas operacionais, em vez de valores únicos, poderá acomodar a variabilidade dos materiais disponíveis em campo sem perder o desempenho requerido. Essas etapas permitirão converter a composição de referência em uma tecnologia construtiva verificável e estabelecer critérios consistentes de projeto, execução e uso.

REFERÊNCIAS

ABDI, M. R.; PARSAPAJOUH, A.; ARJOMAND, M. A. Effects of random fiber inclusion on consolidation, hydraulic conductivity, swelling, shrinkage limit and desiccation cracking of clays. **International Journal of Civil Engineering**, v. 6, n. 4, p. 284-292, 2008.

ADRIANO, D. C.; PAGE, A. L.; ELSEEWI, A. A.; CHANG, A. C.; STRAUGHAN, I. Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: a review. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 9, n. 3, p. 333-344, 1980. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq1980.00472425000900030001x>.

AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, p. 327-363, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>.

AITA, R. A. A.; FACCO, R.; WERLANG, A. P.; WERLANG, M. K. Método alternativo para a determinação do limite de contração a partir de pastilha parafinada em um Argissolo Vermelho Distrófico Arênico. **Geografia, Ensino e Pesquisa**, v. 20, n. 1, p. 156-165, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236499415712>.

ALBRECHT, B. A.; BENSON, C. H. Effect of desiccation on compacted natural clays. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 1, p. 67-75, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:1\(67\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:1(67)).

ALBRIGHT, W. H. *et al.* Field water balance of landfill final covers. **Journal of Environmental Quality**, v. 33, n. 6, p. 2317-2332, 2004. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2004.2317>.

AL-JEZNAWI, D.; AL-JANABI, M. A. Q.; BERNARDO, L. F. A. *et al.* Modeling and mechanisms of desiccation-induced cracking and curling in clay soils: a state-of-the-art review. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 43, art. 342, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-025-03283-z>.

ALLEN, T. M.; ELIAS, V. Durability of geosynthetics for highway applications: interim report. McLean, **Virginia: Federal Highway Administration**, 1996. 59 p. Publication No. FHWA-RD-95-016.

ALMEIDA, J. R. **Estudo do comportamento de barreira capilar em aterros de resíduos**. 2011. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

AL-WAHAB, R. M.; EL-KEDRAH, M. A. Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay. In: GEOENVIRONMENT 2000: CHARACTERIZATION, CONTAINMENT, REMEDIATION, AND PERFORMANCE IN ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 1995. **Proceedings [...]**. Reston: ASCE, 1995. (Geotechnical Special Publication, n. 46), v. 1, p. 791-805.

AMINI, H. R.; REINHART, D. R.; NISAR, K. Comparison of first-order decay models for landfill gas prediction. **Waste Management**, v. 32, n. 4, p. 764-775, 2012.

ARDOLINO, F. *et al.* Biogas-to-biomethane upgrading: A comparative review and assessment in a life cycle perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, art. 110588, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110588>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004-1: resíduos sólidos: classificação: Parte 1: requisitos de classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004-2: resíduos sólidos: classificação: Parte 2: Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10005: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10006: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12024: solo-cimento: moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos: procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12025: solo-cimento: ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12770: solo coesivo: determinação da resistência à compressão não confinada**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13600: solo: determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 °C**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13896: aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14545: solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15849: resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários de pequeno porte: diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17212: solos: determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm.** Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17229: minérios de ferro: determinação da composição química por espectrometria de fluorescência de raios X: método de pastilha fundida.** Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457: solos: preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade.** Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459: solo: determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502: rochas e solos: terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180: solo: determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181: solo: análise granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182: solo: ensaio de compactação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7183: determinação do limite e relação de contração dos solos.** Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos: procedimento.** Versão corrigida: 1996. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB-55: determinação do limite de contração e relação de contração de solos: método brasileiro.** Rio de Janeiro: ABNT, 1948. 2 p.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C618-25A: standard specification for coal ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.** West Conshohocken: ASTM International, 2025.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D2166/D2166M-24: standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil.** West Conshohocken: ASTM International, 2024.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3967-23: standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens with flat loading platens.** West Conshohocken: ASTM International, 2023.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D427-04: standard test method for shrinkage factors of soils by the mercury method.** West Conshohocken: ASTM International, 2004. Norma retirada em 2008.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D4874-95(2014): standard test method for leaching solid material in a column apparatus.** West Conshohocken: ASTM International, 2014. Norma retirada em 2021.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D4943-08(2018): standard test method for shrinkage factors of cohesive soils by the water submersion method.** West Conshohocken: ASTM International, 2018.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D4943-25: standard test method for shrinkage factors of cohesive soils by the water submersion method.** West Conshohocken: ASTM International, 2025.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D4972-19(2024)e1: standard test methods for pH of soils.** West Conshohocken: ASTM International, 2024.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D5298-16: standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper.** West Conshohocken: ASTM International, 2016. Norma retirada em 2025.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D6539-00(2017): standard test method for measurement of the permeability of unsaturated porous materials by flowing air.** West Conshohocken: ASTM International, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D6539-13: standard test method for measurement of the permeability of unsaturated porous materials by flowing air.** West Conshohocken: ASTM International, 2013. Norma retirada em 2022.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E1382-97(2023): standard test methods for determining average grain size using semiautomatic and automatic image analysis.** West Conshohocken: ASTM International, 2023.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E3294-23: standard guide for forensic analysis of geological materials by powder X-ray diffraction.** West Conshohocken: ASTM International, 2023.

AZEVEDO, V. B. **Estudo e caracterização de solos expansivos tropicais**. 2025. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, 2025.

BARROS, K. S. **Estudo de cinzas volantes de uma termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza-CE para aplicação em camadas granulares de pavimentos**. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

BARROSO, S. H. A. **Estudo dos solos da Região Metropolitana de Fortaleza para aplicação na engenharia rodoviária**. 2002. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.18.2016.tde-01062016-112348>.

BASTOS, I. J. F. S. **Análise da compatibilidade de mistura de solo argiloso com cinzas volantes de carvão mineral sujeita à percolação por diferentes fluidos**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

BELLEZZA, I.; PASQUALINI, E. Experimental analysis of the influence of cement addition on the permeability of soils. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 14., 1997, Hamburg. **Proceedings** [...]. Hamburg: [s. n.], 1997. v. 2, p. 925-928.

BENSON, C. H.; ZHAI, H.; WANG, X. Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 120, n. 2, p. 366-387, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:2\(366\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:2(366)).

BEZERRA, I. M. L. **Análise da interação interpartículas e do processo de fissuração de um solo expansivo tratado com areia, cal e cinza de casca de arroz**. 2020. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

BHATT, A. *et al.* A review on the characteristics and chemical stabilization of fly ash for geotechnical applications. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, Article ID 7509329, 2019.

BIANCHINI, M. K. **Estudo da resistência ao cisalhamento de um solo argilo-arenoso com a inclusão de fibras de polipropileno**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2013.

BIN-SHAFIQUE, S.; RAHMAN, K.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H. Case study of roadway embankment constructed using fly ash: performance and environmental monitoring. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 7, p. 956-965, 2010.

BISHOP, A. W. The principle of effective stress. **Teknisk Ukeblad**, v. 106, n. 39, p. 859-863, 1959.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.

BOUAZZA, A. Geosynthetic clay liners. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 20, n. 1, p. 3-17, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(01\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(01)00025-5).

BOUAZZA, A.; VANGPAISAL, T. Laboratory investigation of gas permeability of a geosynthetic clay liner under unconsolidated and unstressed conditions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 21, n. 2, p. 87-106, 2003.

BOUHICHA, M.; AOURA, A.; BELFERRAG, A. Effects of date palm fibres on the physical and mechanical properties of air-dried earth bricks. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 7, p. 494-501, 2005.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 605-614, 2006.

BRANDL, H. Durability of geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 19, n. 1-2, p. 1-28, 2001.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 17 jul. 2002.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 404, de 11 de novembro de 2008**. Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 12 nov. 2008.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1377-2:1990: methods of test for soils for civil engineering purposes: Part 2: classification tests**. London: BSI, 1990.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1377-2:2022: methods of test for soils for civil engineering purposes: Part 2: classification tests and determination of geometrical properties**. London: BSI, 2022.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 15309:2007: characterization of waste and soil: determination of elemental composition by X-ray fluorescence**. London: BSI, 2007.

BROOKS, R. M. Soil modification with fly ash and lime sludge. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 13, n. 6, p. 401-407, 2009.

BU, F.; LIU, J.; MEI, H.; SONG, Z.; WANG, Z.; DAI, C.; QIAN, W. Cracking behavior of sisal fiber-reinforced clayey soil under wetting-drying cycles. **Soil and Tillage Research**, v. 227, art. 105596, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105596>.

BUENO, B. S. *et al.* Avaliação do uso de solo reforçado com fibras em camadas de cobertura de resíduos sólidos urbanos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL (REGEO), 1996, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: [s. n.], 1996. v. 1, p. 151-160.

CARTER, D. L.; HEILMAN, M. D.; GONZALEZ, C. L. Ethylene glycol monoethyl ether for determining surface area of silicate minerals. **Soil Science**, v. 100, n. 5, p. 356-360, 1965.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CASSINI, S. T.; COELHO, S. T.; PECORA, V. Biogás. *In*: PERLINGEIRO, C. A. G. (org.). **Biocombustíveis no Brasil: fundamentos, aplicações e perspectivas**. Rio de Janeiro: Synergia, 2014. v. 1, p. 136-167.

CERATO, A. B.; LUTENEGGER, A. J. Determination of surface area of fine-grained soils by the EGME method. **Geotechnical Testing Journal**, v. 25, n. 3, p. 315-321, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ11087J>.

CHADUVULA, U.; VISWANADHAM, B. V. S.; KODIKARA, J. A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced expansive clay. **Applied Clay Science**, v. 142, p. 163-172, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.008>.

CHADUVULA, U.; VISWANADHAM, B. V. S.; KODIKARA, J. Centrifuge model studies on desiccation cracking behaviour of fiber-reinforced expansive clay. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 50, n. 3, p. 480-497, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.02.001>.

CHRISTENSEN, T. H. (ed.). **Solid Waste Technology e Management**. Chichester: Wiley, 2011. 2 v.

COLLIN, F. **Couplages thermo-hydro-mécaniques dans les milieux poreux non saturés avec changement de phase**. 2004. Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas) – Université de Liège, Liège, Bélgica, 2004.

CONSOLI, N. C.; BASSANI, M. A. A.; FESTUGATO, L. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 4, p. 344-351, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.01.005>.

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R. Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. **Géotechnique**, v. 57, n. 9, p. 751-756, 2007.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 5, p. 759-763, 2010. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000278](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000278).

CONSOLI, N. C.; MONTARDO, J. P.; PRIETTO, P. D. M.; PIRES, L. F. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 128, n. 6, p. 462-472, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:6\(462\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(462)).

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. The behavior of a fibre-reinforced cement soil. **Ground Improvement**, v. 3, n. 1, p. 21-30, 1999.

CONSOLI, N. C.; THOMÉ, A.; GIRARDELLO, R.; FESTUGATO, L. Effect of type and amount of fibre on the compressive strength of sandy soil–cement mixtures. **Geosynthetics International**, v. 18, n. 1, p. 1-8, 2011.

CORNELIS, J. T.; CORNELIS, W. M.; HARTMANN, R.; DE CLERCQ, W. P. A numerical approach to modelling soil cracking and preferential flow. **European Journal of Soil Science**, v. 57, n. 5, p. 692-701, 2006.

CORNELIS, W. M.; CORLUY, J.; MEDINA, H.; DÍAZ, J.; HARTMANN, R.; VAN MEIRVENNE, M.; RUIZ, M. E. Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve. **Geoderma**, v. 137, n. 1-2, p. 179-191, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.022>.

COSTA, S.; KODIKARA, J.; SHANNON, B. Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments. **Géotechnique**, v. 63, n. 1, p. 18-29, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.105>.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-ray diffraction**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

DANIEL, D. E. **Geotechnical Practice for Waste Disposal**. London: Chapman e Hall, 1993.

DANIEL, D. E.; BENSON, C. H. Water content-density criteria for compacted soil liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 12, p. 1811-1830, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:12\(1811\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:12(1811)).

DANIEL, D. E.; WU, Y. K. Compacted clay liners and covers for arid sites. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v. 119, n. 2, p. 223-237, 1993.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Principles of geotechnical engineering**. 9. ed. Boston: Cengage Learning, 2017.

DE GIOANNIS, G.; MUNTONI, A.; CAPPAL, G.; MILIA, S. Landfill gas generation after mechanical biological treatment of municipal solid waste: estimation of gas generation rate constants. **Waste Management**, v. 29, n. 3, p. 1026-1034, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.016>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 041/94: solos: preparação de amostras para ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 087/94: solos: determinação dos fatores de contração**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093/94: solos: determinação da densidade real**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 181/94: solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada: determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPOI, F. S.; POZEBON, D.; KALKREUTH, W. D. Chemical characterization of feed coals and combustion-by-products from Brazilian power plants. **International Journal of Coal Geology**, v. 76, n. 3, p. 227-236, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.07.013>.

DHAR, S.; HUSSAIN, M. The strength behaviour of lime-stabilised plastic fibre-reinforced clayey soil. **Road Materials and Pavement Design**, v. 20, n. 8, p. 1757-1778, 2018.

DIATTA, J.; FOJCIK, E.; DROBEK, L.; SPIŻEWSKI, T.; KRZESIŃSKI, W. Assessment of heavy metals inactivation in contaminated soil by coal fly and bottom ashes. **Mineralogia**, v. 48, n. 1-4, p. 127-143, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1515/mipo-2017-0016>.

DIVYA, P. V.; VISWANADHAM, B. V. S.; GOURC, J. P. Evaluation of tensile strength-strain characteristics of fiber-reinforced soil through laboratory tests. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 1, p. 14-23, 2014. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000772](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000772).

DIVYA, P. V.; VISWANADHAM, B. V. S.; GOURC, J. P. Influence of geofibers on the performance of landfill cap covers: centrifuge study. *In: GEO-FRONTIERS, 2011, Dallas. Proceedings [...]*. Reston: ASCE, 2011.

DOMONE, P. L.; ILLSTON, J. M. (ed.). **Construction materials: their nature and behaviour**. 4. ed. [S. l.]: CRC Press, 2010.

DONG, A.; TANG, C.-S.; ZHU, C.; XU, J.-J.; SUN, C.; FANG, K.; CHENG, Q.; SHI, B. 3D reconstruction and characterization of soil desiccation cracks using smartphone photogrammetry method. **Computers and Geotechnics**, art. 107384, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107384>.

EDIL, T. B.; ACOSTA, H. A.; BENSON, C. H. Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, n. 2, p. 283-294, 2006.

EHRlich, M.; ALMEIDA, M. S. S.; CURCIO, D. Hydro-mechanical behavior of a lateritic fiber-soil composite as a waste containment liner. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 47, n. 1, p. 42-47, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2018.09.005>.

ELIAS, D. S. **Aproveitamento de resíduos sólidos: estudo experimental de misturas de solo e cinza volante de carvão mineral**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

ELIAS, D. S. **Caracterização de cinzas de carvão mineral e sua aplicação como barreira impermeabilizante**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Geotecnia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

ERARSLAN, N.; WILLIAMS, D. J. Experimental, numerical and analytical studies on the tensile strength of rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 49, p. 21-30, 2012.

ESTABRAGH, A. R.; BORDBAR, A. T.; JAVADI, A. A. Mechanical behavior of a clay soil reinforced with polypropylene fibers. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 29, n. 5, p. 883-890, 2011.

EUROPEAN UNION. **Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste**. Official Journal of the European Communities, L 182, p. 1-19, 16 July 1999.

EVANGELOU, E. D. *et al.* Mechanical behavior of fiber-reinforced soils under undrained triaxial loading conditions. **Geotechnics**, v. 3, n. 3, p. 842-862, 2023.

FALAMAKI, A.; SALIMI, M.; VAKILI, A. H. *et al.* Experimental investigation of the effect of landfill leachate on the mechanical and cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced compacted clay liner. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 77517-77534, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27512-1>.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Fly Ash Facts for Highway Engineers**. Publication No. FHWA-IF-03-019. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 2003.

FENG, S. *et al.* Effects of pore-size distribution on the gas diffusion coefficient and gas permeability of compacted manufactured sand tailing-bentonite mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 149, n. 11, art. 04023101, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-11303>.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices de aspecto**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FESTUGATO, L.; CONSOLI, N. C.; FOURIE, A. Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 45, n. 1, p. 77-82, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.09.001>.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GIRESH, S.; CYRUS, S.; ABRAHAM, B. M. Cracking behavior and hydraulic conductivity of amended soils used in landfill cover under wetting-drying cycles. **Indian Geotechnical Journal**, v. 54, p. 1032-1042, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40098-023-00854-w>.

GIRIJA, K. M. BEHAVIOUR OF RANDOMLY DISTRIBUTED FIBER-REINFORCED SOIL. **International Journal of Research In Engineering And Technology**, v. 02, n. 13, p. 456-458, 2013.

GOLDSTEIN, J. I.; NEWBURY, D. E.; MICHAEL, J. R.; RITCHIE, N. W. M.; SCOTT, J. H. J.; JOY, D. C. **Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis**. 4. ed. New York: Springer, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>.

GRAY, D. H.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v. 109, n. 3, p. 335-353, 1983.

GÜLLÜ, H.; KHUDIR, A. Effect of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber and lime. **Cold Regions Science and Technology**, v. 106, p. 55-65, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.06.008>.

HAIDER, I. *et al.* A comprehensive review on coal fly ash and its application in the construction industry. **Cogent Engineering**, v. 9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2114201>.

HAUSMANN, M. R. **Engineering Principles of Ground Modification**. [S. l.]: McGraw-Hill, 1990.

HE, S.; WANG, X.; BAI, H.; XU, Z.; MA, D. Effect of fiber dispersion, content and aspect ratio on tensile strength of PP fiber reinforced soil. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 1613-1621, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.128>.

HEBIB, S.; FARRELL, E. R. Some experiences on the stabilization of Irish peats. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 40, n. 1, p. 107-120, 2003.

HEIDRICH, C.; FEUERBORN, H.-J.; WEIR, A. Coal Combustion Products: a Global Perspective. In: WORLD OF COAL ASH (WOCA), 2013, Lexington. **Proceedings [...]**. Lexington: [s. n.], 2013.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HEJAZI, S. M. *et al.* A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 100-116, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>.

HEMALATHA, T.; RAMASWAMY, A. A review on fly ash characteristics: towards promoting high-volume utilization in developing sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 147, p. 546-559, 2017.

HOARE, D. J. Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL REINFORCEMENT, 1979, Paris. **Proceedings [...]**. Paris: [s. n.], 1979. v. 1, p. 47-52.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D.; SHEAHAN, T. C. **An introduction to geotechnical engineering**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2011.

HSUAN, Y. G.; SCHROEDER, H. F.; ROWE, K.; MÜLLER, W.; GREENWOOD, J.; CAZZUFFI, D.; KOERNER, R. M. Long-term performance and lifetime prediction of geosynthetics. In: **EUROGEO 4 – 4th European Geosynthetics Conference**, 2008,

Edinburgh. Proceedings [...]. Edinburgh: International Geosynthetics Society, 2008. p. 327–366.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Hayama: IGES, 2006. v. 5: Waste.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Geneva: IPCC, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/>. Acesso em: 12 jul. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: synthesis report**. Geneva: IPCC, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2022: mitigation of climate change**. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157926>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Outlook for biogas and biomethane: prospects for organic growth**. Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>. Acesso em: 12 jul. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9277:2022: determination of the specific surface area of solids by gas adsorption: BET method**. Geneva: ISO, 2022.

ISAIAS, A. F. **Permeabilidade de misturas de solo argiloso e fibras de polipropileno**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

IZQUIERDO, M.; QUEROL, X. Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview. **International Journal of Coal Geology**, v. 94, p. 54-66, 2012.

JENKINS, R. **X-ray fluorescence spectrometry**. 2. ed. New York: Wiley, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118521014>.

JO, H. Y.; KATSUTA, T.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 7, p. 557-567, 2001.

JONES, D. R. V.; DIXON, N. Landfill lining stability and integrity: the role of waste settlement. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, n. 1, p. 27-53, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2004.08.001>.

JULINA, M.; THYAGARAJ, T. Combined effects of wet-dry cycles and interacting fluid on desiccation cracks and hydraulic conductivity of compacted clay. **Engineering Geology**, v. 267, p. 105505, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105505>.

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

JÚNIOR, A. I. de O.; JUCÁ, J. F. T.; FERREIRA, J. A.; GUILHERME, L. C. Comportamento Geotécnico de Misturas Compactadas de Solos Argilosos com Fibras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), 20., 2020, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: [s. n.], 2020.

KANIRAJ, S. R.; GAYATHRI, V. Permeability and consolidation characteristics of compacted fly ash. **Journal of Energy Engineering**, v. 130, n. 1, p. 18-43, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9402\(2004\)130:1\(18\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9402(2004)130:1(18)).

KAR, R.; PRADHAN, P. Strength and compressibility characteristics of randomly distributed fiber-reinforced soil. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 5, n. 2, p. 235-243, 2011.

KIM, J. H.; BORYSENKO, V. V. Direct tensile testing of compacted soil. **Geotechnical Testing Journal**, v. 23, n. 3, p. 354-364, 2000.

KIM, J. K.; OH, B. R.; CHUN, Y. N.; KIM, S. W. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 102, n. 4, p. 328-332, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1263/jbb.102.328>.

KIM, Y. S.; DEMPSEY, J. P. Strain localization analysis of indirect tension tests on transversely isotropic rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 41, n. 5, p. 809-825, 2004.

KJELDSEN, P.; BARLAZ, M. A.; ROOKER, A. P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T. H. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 32, n. 4, p. 297-336, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643380290813462>.

KLUG, H. P.; ALEXANDER, L. E. **X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials**. 2. ed. New York: Wiley, 1974.

KNOP, A. **Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

KOERNER, R. M. **Designing with geosynthetics**. 4. ed. [S. l.]: Prentice Hall, 1998.

KOERNER, R. M. **Designing with geosynthetics**. 6. ed. Bloomington: Xlibris, 2012.

KOERNER, R. M.; DANIEL, D. E. **Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps**. Reston: ASCE Press, 1997.

KOLIAS, S.; KASSOPI-TRAGAKES, S.; SARGENT, P. Experimental investigation of the behaviour of clayey soils stabilised with high calcium fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 301-308, 2005.

KONG, D.; WU, T.; XU, H.; JIANG, P.; ZHOU, A.; LV, Y. Variation and correlation between water retention capacity and gas permeability of compacted loess overburden during wetting-drying cycles. **Environmental Research**, v. 252, pt. 2, art. 118895, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118895>.

KRISNANTO, S.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, D. G.; LEONG, E. C. Water content of soil matrix during lateral water flow through cracked soil. **Engineering Geology**, v. 210, p. 168-179, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.012>.

KUMAR, A. Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. In: PANDEY, B. B.; KUMAR, A.; SINGH, D. N. (ed.). **Advances in Computer Methods and Geomechanics**. Singapore: Springer, 2019. p. 169-178.

KUMAR, S. Fly ash utilization: A state-of-the-art review. **Journal of Building Engineering**, v. 4, p. 101-112, 2002.

LAKSHMIKANTA, M. R.; PRAT, P. C.; LLORET, A. Experimental evidence of size effect in soil desiccation cracking. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 49, n. 3, p. 264-284, 2012.

LEOCÁDIO, G. A. S. **Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado**. 2005. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

LEONG, E. C.; HE, L.; RAHARDJO, H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. **Geotechnical Testing Journal**, v. 25, n. 3, p. 322-333, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ11094J>.

LI, C.; SHI, B.; TANG, C.; GAO, L.; GONG, J. Experimental investigation on the effect of fiber type on engineering properties of fiber reinforced soil. **Advances in Materials Science and Engineering**, New York, v. 2016, Article ID 5491349, 2016.

LI, C.; ZORNBERG, J. G. Interface shear strength in fiber-reinforced soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 16., 2005, Osaka. **Proceedings [...]**. Rotterdam: Millpress, 2005. v. 3, p. 1373-1376.

LI, D.; WONG, L. N. Y. The Brazilian test: rock fracture toughness testing under valid conditions. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 46, n. 2, p. 307-321, 2013.

LI, J. H.; ZHANG, L. M.; LI, X. Soil-pillar-based image analysis method for soil cracking description. **Geotechnical Testing Journal**, v. 34, n. 6, p. 567-576, 2011.

LITTLE, D. N.; NAIR, S. **Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials**. NCHRP Web-Only Document 144. Washington, DC: Transportation Research Board, 2009.

LIU, J.; LI, X.; LI, G.; ZHANG, J. Investigation of the mechanical behavior of polypropylene fiber-reinforced red clay. **Applied Sciences**, v. 11, n. 22, art. 10521, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112210521>.

LOPES, M. I. D. **Caracterização e avaliação da atividade pozolânica de cinzas de carvão mineral da região de Candiota-RS**. 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

LU, N.; GODT, J. W.; WU, D. T. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. **Water Resources Research**, v. 43, n. 10, W10415, 2007.

LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated Soil Mechanics**. Hoboken: John Wiley e Sons, 2004.

LU, S.-F.; HAN, Z.-J.; XU, L.; LAN, T.-G.; WEI, X.; ZHAO, T.-Y. On measuring methods and influencing factors of air permeability of soils: an overview and a preliminary database. **Geoderma**, art. 116509, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116509>.

MAHER, M. H.; GRAY, D. H. Static and cyclic response of sand reinforced with randomly distributed fibers. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 11, p. 1661-1677, 1990.

MAHER, M. H.; HO, Y. C. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v. 120, n. 8, p. 1381-1393, 1994.

MAHVASH, S.; LÓPEZ-QUEROL, S.; BAHADORI-JAHROMI, A. Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization. **Heliyon**, v. 3, n. 3, art. e00274, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00274>.

MALEKZADEH, M.; BILSEL, H. Hydro-mechanical behavior of polypropylene fiber-reinforced expansive soils. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 7, p. 2028-2033, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0384-3>.

MANHEIM, D. C.; YEŞİLLER, N.; HANSON, J. L. Gas emissions from municipal solid waste landfills: a comprehensive review and analysis of global data. **Journal of the Indian Institute of Science**, v. 101, n. 4, p. 625-657, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41745-021-00234-4>.

MARÇAL, R. **Avaliação de parâmetros de resistência de solos com fibras de polipropileno reciclado**. 2019. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.

MEEGODA, J. N. *et al.* A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 10, art. 2224, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>.

MEHTA, P. K. Natural pozzolans: supplementary cementing materials for concrete. **Can. J. Civ. Eng.**, v. 14, n. 6, p. 795-802, 1987.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

MERRY, S. M.; FRITZ, W. U.; BUDHU, M. Effect of gas on pore pressures in wet landfills. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 132, n. 5, p. 553-561, 2006. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:5\(553\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(553)).

MERVILLE, A. K. F. **Estudo do comportamento hidromecânico de misturas de solo areno argiloso com fibras de polipropileno**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Geotecnia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

MICHALOWSKI, R. L.; ČERMÁK, J. Triaxial compression of sand reinforced with fibers. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 2, p. 125-136, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:2\(125\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:2(125)).

MICHALOWSKI, R. L.; ZHAO, A. Failure of fiber-reinforced granular soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 122, n. 3, p. 226-234, 1996.

MILLER, C. J.; RIFAI, S. Fiber Reinforcement for Waste Containment Soil Liners. **Journal of Environmental Engineering**, ASCE, v. 130, n. 8, p. 891-895, 2004.

MIRZABABAEI, M. *et al.* Shear strength of fibre-reinforced clay at large displacement. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 45, p. 54-62, 2017.

MITCHELL, J. K.; KATTI, R. K. Soil improvement: state-of-the-art report. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., 1981, Stockholm. **Proceedings [...]**. Stockholm: [s. n.], 1981. v. 4, p. 509-565.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3. ed. Hoboken: John Wiley e Sons, 2005.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. (ed.). **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites**. [S. l.]: CRC Press, 2005.

MOHANTY, S. K.; PATRA, K. C. Effect of fly ash and lime on index and engineering properties of expansive soil. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 4, n. 1, p. 195-208, 2015.

MORENO, N.; QUEROL, X.; ANDRÉS, J. M.; STANTON, K.; TOWLER, M.; NUGTEREN, H.; JANSSEN-JURKOVICOVÁ, M.; JONES, R. Physico-chemical characteristics of European pulverized coal combustion fly ashes. **Fuel**, v. 84, n. 11, p. 1351-1363, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.06.038>.

NALBANTOGLU, Z.; TUNCER, E. R. Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 38, n. 1, p. 154-160, 2001.

NARDI, J. V. **Estabilização de areia com cinza volante e cal: efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura**. 1975. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1975.

NAVIDTEHRANI, Y.; BETEGÓN, C.; ZIMMERMAN, R. W.; MARTÍNEZ-PAÑEDA, E. Griffith-based analysis of crack initiation location in a Brazilian test. **International Journal**

of **Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 159, art. 105227, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105227>.

NG, C. W. W. *et al.* A novel vegetated three-layer landfill cover system using recycled construction wastes without geomembrane. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 56, n. 12, p. 1863-1875, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0728>.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995.

NORRISH, K.; HUTTON, J. T. An accurate X-ray spectrographic method for the analysis of a wide range of geological samples. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 33, n. 4, p. 431-453, 1969. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(69\)90126-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(69)90126-4).

OLGUN, M. Effects of polypropylene fiber inclusion on the strength and volume change characteristics of cement-fly ash stabilized clay soil. **Geosynthetics International**, v. 20, n. 4, p. 263-275, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1680/gein.13.00016>.

PANDIAN, N. S. Fly ash characterization with reference to geotechnical applications. **Journal of the Indian Institute of Science**, v. 84, p. 189-216, 2004.

PARK, S. S. Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. **Geotextiles and Geomembranes**, Oxford, v. 27, n. 2, p. 158-162, 2009.

PARSONS, R. L.; MILBURN, J. P. Engineering behavior of stabilized soils. **Transportation Research Record**, n. 1837, p. 20-29, 2003.

PENG, X.; HORN, R. Modelling simultaneous shrinkage and water retention for deformable soils. **Soil e Tillage Research**, v. 81, n. 1, p. 31-45, 2005.

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.

PHANIKUMAR, B. R.; SHARMA, R. S. Effect of fly ash on engineering properties of expansive soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 7, p. 764-767, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:7\(764\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(764)).

PHANIKUMAR, B. R.; SHARMA, R. S. Volume change behavior of fly ash-stabilized clays. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 1, p. 67-74, 2007. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:1\(67\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:1(67)).

PINTO, C. M. T.; MACHADO, S. L. Comportamento mecânico de uma areia aluvionar reforçada com fibras poliméricas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2022, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: ABMS, 2022.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Soil structure changes assessed by computed tomography using the watershed segmentation algorithm. **Soil e Tillage Research**, v. 104, n. 1, p. 178-182, 2009.

PLÉ, O.; LÊ, T. N. H. Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 32, p. 111-116, 2012.

PRABAKAR, J.; DENDORKAR, N.; MORCHHALE, R. K. Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 4, p. 263-267, 2004.

PRAHARAJ, T.; POWELL, M. A.; HART, B. R.; TRIPATHY, S. Leachability of elements from sub-bituminous coal fly ash from India. **Environment International**, v. 27, n. 8, p. 609-615, 2002.

PUPPALA, A. J.; MUSENDA, C. Effects of Fiber Reinforcement on Strength and Volume Change in Expansive Soils. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1736, p. 134-140, 2000.

QUEROL, X. *et al.* Environmental characterization of coal fly ash from Spanish power stations. **Energy Sources**, v. 24, n. 9, p. 827-841, 2002.

RAMPRASAD, C. *et al.* Quantification of landfill gas emissions and energy production potential in Tirupati municipal solid waste disposal site by LandGEM mathematical model. **MethodsX**, v. 9, art. 101869, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101869>.

RANJAN, G.; VASAN, R. M.; CHARAN, H. D. Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122, n. 6, p. 419-426, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:6\(419\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:6(419)).

RAYHANI, M. T.; YANFUL, E. K.; FAKHER, A. Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 44, n. 3, p. 276-283, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1139/t06-125>.

REIMER, L. **Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis**. 2. ed. Berlin: Springer, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-38967-5>.

RODRIGO-ILARRI, J.; RODRIGO-CLAVERO, M.-E. Mathematical modeling of the biogas production in MSW landfills: impact of the implementation of organic matter and food waste selective collection systems. **Atmosphere**, v. 11, n. 12, art. 1306, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11121306>.

ROHDE, G. M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N. I. W. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil: aspectos técnicos e ambientais**. Porto Alegre: CIENTEC, 2006.

ROLLINGS, M. P.; ROLLINGS, R. S.; BURKES, J. P. Evaluation of chemical modifiers for sulfate soils. **Transportation Research Record**, n. 1652, p. 14-21, 1999.

ROWE, R. K. Long-term performance of contaminant barrier systems. **Géotechnique**, London, v. 55, n. 9, p. 631-678, 2005.

ROWE, R. K.; QUIGLEY, R. M.; BRANSHY, R. W.; BOOKER, J. R. **Barrier systems for waste disposal facilities**. 2. ed. London: Taylor e Francis, 2004.

RUHL, J. L.; DANIEL, D. E. Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 4, p. 369-381, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:4\(369\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:4(369)).

SALAGER, S.; EL YOUSSEFI, M. S.; PORCHERON, F.; DUC, M. Shrinkage of unsaturated compacted clay: experimental results and macroscopic modelling. **Applied Clay Science**, v. 40, n. 1-4, p. 1-12, 2008.

SANTONI, R. L.; TINGLE, J. S.; WEBSTER, S. L. Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 3, p. 258-268, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:3\(258\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:3(258)).

SAYEED, M. A.; SHAH, K. Compaction-induced anisotropy in fiber-reinforced soils. **Geotechnical Testing Journal**, v. 38, n. 6, p. 921-932, 2015.

SEAR, L. K. A. **Properties and Use of Coal Fly Ash: A Valuable Industrial Byproduct**. London: Thomas Telford, 2001.

SENA, T. S. **Permeabilidade ao ar e à água em misturas de solo e composto orgânico para uso em sistemas de cobertura de aterro sanitário**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

SENL, A. *et al.* Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 46, n. 4, p. 365-376, 2006.

SHACKELFORD, C. D. *et al.* Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 18, n. 2-4, p. 133-161, 2000.

SHACKELFORD, C. D. Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity. *In*: DANIEL, D. E.; TRAUTWEIN, S. J. (ed.). **Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil**. Philadelphia: ASTM, 1994. p. 111-168. (ASTM STP 1142).

SHAHEEN, S. M.; HOODA, P. S.; TSADILAS, C. D. Opportunities and challenges in the use of coal fly ash for soil improvements – A review. **Journal of Environmental Management**, v. 145, p. 249-267, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.005>.

SHARMA, H. D.; REDDY, K. R. **Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment, and Emerging Waste Management Technologies**. Hoboken: John Wiley e Sons, 2004.

SIDDIQUE, R.; IQBAL KHAN, M. **Supplementary cementing materials**. Berlin: Springer, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17866-5>.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S.; FIDALSKI, J. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1535-1545, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600003>.

SILVA, B. G. *et al.* Crack formation and propagation in clayey soils submitted to drying: analysis of shrinkage process using PIV and DIC techniques. **Acta Geotechnica**, v. 12, n. 2, p. 373-389, 2017.

SILVEIRA, M. V. **Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. DOI: 10.17771/PUCRio.acad.34723.

SILVEIRA, M. V.; CASAGRANDE, M. D. T. Effects of degradation of vegetal fibers on the mechanical behavior of reinforced sand. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 39, p. 3875–3887, 2021. DOI: 10.1007/s10706-021-01733-y.

SILVEIRA, M. V.; FERREIRA, J. W. S.; CASAGRANDE, M. D. T. Effect of surface treatment on natural aging and mechanical behavior of sisal fiber–reinforced sand composite. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n. 6, art. 06022001, 2022. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004237.

SIMATUPANG, M.; EDWIN, R. S.; SULHA; MUSTIKA, W.; PUTRA, H.; YANTO, D. H. Y. Splitting tensile strength of fly ash-modified sand at various saturations and curing times. **Infrastructures**, v. 7, n. 10, art. 126, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7100126>.

SIVAPULLAIAH, P. V.; SREEDHARAN, V. N.; RAJU, K. V. B. Consolidation and permeability characteristics of lime treated fly ash. **Geotechnical Engineering**, v. 31, n. 2, p. 111-123, 2000.

SMART, P.; TOVEY, N. K. **Electron microscopy of soils and sediments: techniques**. Oxford: Clarendon Press, 1982.

SOUZA, H. P. **Uso de cinza de carvão mineral da termelétrica do Pecém como material de cobertura seca de depósitos de resíduos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

STAMS, A. J. M.; PLUGGE, C. M. Electron transfer in syntrophic communities of anaerobic bacteria and archaea. **Nature Reviews Microbiology**, v. 7, n. 8, p. 568-577, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro2166>.

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J. B.; VILAR, O. M. **Aterros Sanitários**. São Paulo: CETESB, 1981.

SUTTON, M. A.; ORR, J. J.; HELM, J. D. **Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications**. [S. l.]: Springer, 2009.

TAHA, M. M. M.; FENG, C. P.; AHMED, S. H. S. Influence of Polypropylene Fibre (PF) Reinforcement on Mechanical Properties of Clay Soil. **Advances in Polymer Technology**, v. 2020, Article ID 9512839, 2020.

TANG, A. M.; GRAHAM, J. Tensile strength of compacted lightly overconsolidated specimens of artificial Lake Agassiz clay. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, n. 3, p. 558-571, 2000.

TANG, C. S. *et al.* Desiccation cracking behavior of expansive soil during drying. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 48, n. 3, p. 380-388, 2011.

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

TANG, C. S.; SHI, B.; GAO, W.; CHEN, F.; CAI, Y. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber-reinforced and cement-stabilized clayey soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 25, n. 3, p. 194-202, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.11.002>.

TANG, C. S.; SHI, B.; ZHAO, L. Z. Interfacial shear strength of fiber-reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 1, p. 54-62, 2010a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.001>.

TANG, C. S.; SHI, B.; ZHAO, L.; WANG, B.; LI, H. Effect of drying-wetting cycles on the shrinkage behavior of polypropylene fiber-reinforced expansive soil. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 47, n. 10, p. 1082-1091, 2010b.

TARIQ, A.; MILLER, C. J. Application of shrinkage concepts to coal combustion product landfill covers. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 665-675, 2009.

TAYLOR, G. D. **Materials in construction**. 2. ed. Harlow: Longman Scientific e Technical, 1994.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. (ed.). **Handbook of solid waste management**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

TIKALSKY, P. J.; BAHMANZAD, F.; MALHOTRA, V. M. Properties of concrete containing high volumes of ASTM class C fly ash. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 4, p. 449-455, 2000.

TIWARI, N.; SATYAM, N. Experimental study on the influence of polypropylene fiber on the swelling pressure expansion attributes of silica fume stabilized clayey soil. **Geosciences**, v. 9, n. 9, art. 377, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences9090377>.

TRINDADE, T. P.; IVO, W. M. P. M.; LIMA, D. C.; BARBOSA, P. S. A.; MACHADO, C. C. Estudos laboratoriais do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 215-222, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000200008>.

TURAN, C.; JAVADI, A. A.; VINAI, R.; ABBASSIPOUR, H. Geotechnical characteristics of a soil stabilized with fly ash and polypropylene fibers. **Soils and Foundations**, v. 52, n. 5, p. 893-903, 2012.

UBALDO, M. O. **Uso de cinzas de carvão na composição de uma cobertura de rejeitos de mineração**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Global Waste Management Outlook 2024**. Nairobi: UNEP, 2024.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **Resource Conservation and Recovery Act, Subtitle D: criteria for municipal solid waste landfills**. 40 CFR Part 258. Washington, DC: U.S. EPA, [s. d.].

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VASCONCELOS, S. D. **Avaliação da heterogeneidade de cinzas de carvão mineral advindas da Termelétrica Energia Pecém e sua aplicação em camadas granulares de pavimentos**. 2016. Projeto de Graduação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

VASSILEV, S. V.; VASSILEVA, C. G. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour. **Fuel**, v. 86, n. 10-11, p. 1490-1512, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.11.020>.

VIDAL, H. The principle of reinforced earth. **Highway Research Record**, n. 282, p. 1-16, 1969.

VISWANADHAM, B. V. S.; JHA, B. K.; SENGUPTA, S. S. Centrifuge testing of fiber-reinforced soil liners for waste containment systems. **Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management**, v. 13, n. 1, p. 45-58, 2009. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-025X\(2009\)13:1\(45\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(2009)13:1(45)).

VOGEL, H. J.; HOFFMANN, H.; ROTH, K. Studies of crack dynamics in clay soil: I. Experimental methods, results, and morphological quantification. **Geoderma**, v. 125, n. 3-4, p. 203-211, 2005.

WANGYAO, K.; YAMADA, M.; ENDO, K.; ISHIGAKI, T.; NARUOKA, T. Methane generation rate constant in tropical landfill. **Journal of Sustainable Energy e Environment**, v. 1, p. 181-184, 2010.

WASIL, M.; ZABIELSKA-ADAMSKA, K. Tensile strength of Class F fly ash and fly ash with bentonite addition as a material for earth structures. **Materials**, v. 15, n. 8, art. 2887, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15082887>.

WEN, S.; CHENG, W.-C.; LI, D.; HU, W. Evaluating gas breakthrough pressure and gas permeability in a landfill cover layer for mitigation of hazardous gas emissions. **Journal of Environmental Management**, v. 336, art. 117617, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117617>.

WINBURN, R. S.; KUSS, H. D.; RATHBONE, R. F. Characterization of fly ash concrete using impedance spectroscopy. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 2, p. 247-252, 2000.

WU, T. H.; McOMBER, R. M.; ERB, R. T.; BEAL, P. E. Study of soil-root interaction. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 114, n. 12, p. 1351-1375, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1988\)114:12\(1351\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:12(1351)).

YAO, Z. T. *et al.* A comprehensive review on the applications of coal fly ash. **Earth-Science Reviews**, v. 141, p. 105-121, 2015.

YAZICI, M. F.; KESKIN, S. N. Experimental investigation of the mechanical properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Clay Soil and development of predictive models: effects of Fiber Length and Fiber Content. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 49, n. 10, p. 13593-13611, 2024.

YESILLER, N.; MILLER, C. J.; INCI, G.; YALDO, K. Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils. **Engineering Geology**, v. 57, n. 1-2, p. 105-121, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00022-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00022-3).

YESILLER, N.; MILLER, C. J.; INCI, G.; YALDO, K. Ultrasonic testing for compacted clay liners. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 3, p. 285-295, 2005.

YILMAZ, Y. Compaction and strength characteristics of fly ash and fiber amended clayey soil. **Engineering Geology**, v. 188, p. 168-177, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.01.018>.

ZABIELSKA-ADAMSKA, K. Characteristics of compacted fly ash as a transitional soil. **Materials**, v. 13, n. 6, art. 1387, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13061387>.

ZAIMOGLU, A. S.; YETIMOGLU, T. Strength behavior of fine grained soil reinforced with randomly distributed polypropylene fibers. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 30, p. 197-203, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9462-5>.

ZANG, M.; CHEN, Z.; LI, X.; CHEN, F. Experimental study on desiccation cracking behavior of clayey soil using digital image correlation. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 78, n. 8, p. 5495-5509, 2019.

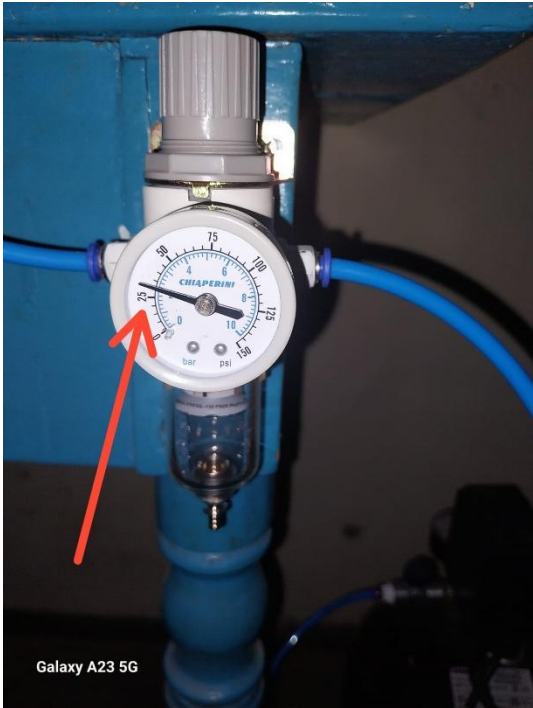
ZENG, H.; TANG, C. S.; FRACCICA, A.; ZHU, C.; TIAN, B. G.; SHI, B. Multi-scale investigation on dynamic characteristics of clayey soil evaporation and cracking. **Computers and Geotechnics**, v. 171, art. 106312, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106312>.

ZHANG, C. *et al.* Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 383-392, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>.

ZORNBERG, J. G. Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. **Géotechnique**, v. 52, n. 8, p. 593-604, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2002.52.8.593>.

**APÊNDICE A - FOTOS DA CÉLULA ADAPTADA PARA O ENSAIO DE
PERMEABILIDADE INTRÍNSECA AO AR**





APÊNDICE B - TRECHOS REPRESENTATIVOS DO CÓDIGO-FONTE DA ROTINA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE FISSURAÇÃO

Este apêndice apresenta trechos representativos da rotina desenvolvida em Python para o processamento de imagens e a quantificação da fissuração por ressecamento. A seleção evidencia as bibliotecas e os parâmetros essenciais, o núcleo da segmentação e o cálculo das métricas geométricas. Os marcadores “# [...]” indicam as supressões; as linhas reproduzidas preservam a lógica do arquivo original, com apenas padronização editorial dos comentários.

Listagem B.1 - Bibliotecas e parâmetros essenciais da rotina

```

0012 from _future_ import annotations
0020 from dataclasses import dataclass, asdict
0021 from datetime import datetime, timedelta
0022 from pathlib import Path
0023 from typing import Optional, Tuple, List, Dict
0025 import numpy as np
0026 import pandas as pd
0027 import matplotlib
0028 matplotlib.use("Agg") # backend não interativo, adequado ao processamento em lote
0029 import matplotlib.pyplot as plt
0030 from PIL import Image, ExifTags
0032 import cv2
0033 from skimage import filters, measure, morphology
0034 from skimage.draw import disk as skdisk
0035 from scipy import ndimage as ndi
0037 warnings.filterwarnings("ignore")
.... # [...] Importações auxiliares de interface, registro e organização de arquivos foram suprimidas.
0044 @dataclass
0045 class Config:
0046     """Configuração do ensaio e do pipeline.
0047
0048     Os valores padrão são adequados para o ensaio adaptado de 24 h
0049     empregado na tese de Deyvid de Souza Elias (PPGEC/UFC). O detector é automático
0050     e robusto a variações de aparato, iluminação e tonalidade, com foco
0051     em geometria/contraste (sem depender de faixa de cor específica).
0052     """
0053     # Ensaio
0054     diametro_amostra_mm: float = 90.0 # diâmetro real da cápsula
0055     duracao_ensaio_h: float = 24.0 # duração do ensaio
0056     intervalo_fotos_min: int = 30 # intervalo de captura

```

```

0057
0058  # Detecção do disco (geométrica, sem dependência de cor)
0059  raio_px_min: int = 25
0060  raio_px_max: int = 400
0061
0062  # Segmentação de fissuras
0063  sauvola_window: int = 31      # ímpar; vizinhança um pouco maior = mais estável
0064  sauvola_k: float = 0.17      # equilíbrio: fissuras tênues vs sombra local
0065  min_size_segmento: int = 14  # preserva fragmentos finos (fissura estreita)
0066  frangi_sigmas_min: int = 1
0067  frangi_sigmas_max: int = 6    # fissuras mais grossas / baixo zoom
0068  # Realce de estruturas escuras finas (black-hat) antes do limiar — restrito à ROI
0069  fissura_blackhat_kernel: int = 7
0070  fissura_blackhat_weight: float = 0.28
0071  # Estabilização temporal da segmentação (série temporal da mesma amostra).
0072  usar_estabilizacao_temporal_segmentacao: bool = True
0073  alpha_limiar_temporal: float = 0.70
0074  persistencia_vizinhanca_px: int = 2
0075  usar_monotonia_mascara_temporal: bool = True
0076  # Limiar Frangi: fração do máximo na ROI + mistura com percentil (adapta por imagem)
0077  frangi_frac_nucleo: float = 0.048
0078  frangi_frac_relax: float = 0.028
0079  frangi_percentil_nucleo: float = 90.0
0080  # Canal extra para solo de baixo contraste (fissuras quase invisíveis ao olho nu).
0081  usar_canal_fissuras_tenuas: bool = True
0082  frangi_tenue_frac_max: float = 0.55 # fração do limiar Frangi principal
0083  interior_frac_raio_roi: float = 0.055 # aplicado apenas longe da borda da cápsula
0084  usar_threshold_imagej: bool = True
0085  threshold_fixo: Optional[int] = None
0086  cif_max_esperado: float = 0.30
0087  margem_borda_capsula_mm: float = 4.0
....  # [...] Demais parâmetros de detecção, rastreamento, estabilização temporal e saída foram suprimidos.

```

Fonte: arquivo da rotina computacional utilizada na pesquisa.

Listagem B.2 - Núcleo do procedimento de segmentação das fissuras

```

1274  def segmentar_fissuras(
1275      self, cinza: np.ndarray, mascara_disco: np.ndarray
1276  ) -> Tuple[np.ndarray, float]:
1299      m_roi = (mascara_disco > 0)
1300      usar_estab_temp = bool(self.cfg.usar_estabilizacao_temporal_segmentacao)
1301      alpha_temp = float(np.clip(self.cfg.alpha_limiar_temporal, 0.0, 0.95))
1302      viz_px = max(1, int(self.cfg.persistencia_vizinhanca_px))

```

```

.... # [...] Correção de vinheta e preparação da imagem de trabalho.
1325 if self.cfg.usar_threshold_imagej:
1326     # Realce black-hat restrito à ROI: destaca sulcos escuros sem alterar o restante.
1327     k_bh = max(3, int(self.cfg.fissura_blackhat_kernel))
1328     if k_bh % 2 == 0:
1329         k_bh += 1
1330     k_el = cv2.getStructuringElement(cv2.MORPH_ELLIPSE, (k_bh, k_bh))
1331     bh = cv2.morphologyEx(cinza_work, cv2.MORPH_BLACKHAT, k_el)
1332     bh = np.where(m_roi, bh, 0)
1333     mx = float(bh.max())
1334     if mx > 1e-6:
1335         bh_n = (bh.astype(np.float32) / mx * 255.0).astype(np.uint8)
1336     else:
1337         bh_n = bh
1338     wb = float(np.clip(self.cfg.fissura_blackhat_weight, 0.0, 0.45))
1339     cinza_eff = cv2.addWeighted(
1340         cinza_work.astype(np.float32), 1.0 - wb,
1341         bh_n.astype(np.float32), wb, 0.0,
1342     ).astype(np.uint8)
1344     # Fluxo tipo ImageJ sobre cinza_eff (fissura = pixel escuro).
1345     vals = cinza_eff[m_roi]
1346     if len(vals) == 0:
1347         vals = cinza_eff.ravel()
1348     if self.cfg.threshold_fixo is not None:
1349         t = int(np.clip(self.cfg.threshold_fixo, 0, 255))
1350     else:
1351         t_otsu = int(filters.threshold_otsu(vals))
1352         t_p20 = int(np.percentile(vals, 20))
1353         med = float(np.median(vals))
1354         mad = float(np.median(np.abs(vals - med))) + 1e-6
1355         t_mad = int(np.clip(med - 1.8 * 1.4826 * mad, 0, 255))
1356         # Igual ao fluxo original; sensibilidade extra vem do black-hat + halo Frangi.
1357         t = int(min(t_otsu, t_p20, t_mad))
1364     bin_global = (cinza_eff < t) e m_roi
1365     sw = self.cfg.sauvola_window
1366     if sw % 2 == 0:
1367         sw += 1
1368     try:
1369         limiar_sauvola = filters.threshold_sauvola(
1370             cinza_eff,
1371             window_size=sw,
1372             k=self.cfg.sauvola_k,

```

```

1373     )
1374     bin_local = (cinza_eff < limiar_sauvola) e m_roi
1375     except Exception:
1376         bin_local = bin_global.copy()
1382     img_norm = cinza_eff.astype(float) / 255.0
1383     frangi_resp = filters.fragi(
1384         img_norm,
1385         sigmas=range(sig_min, sig_max + 1),
1386         black_ridges=True,
1387     )
....    # [...] Cálculo dos percentis e da resposta máxima do filtro de Frangi.
1399     # Limiar principal: combina escala relativa ao máximo com cauda da distribuição.
1400     thr_n = max(
1401         fmax * self.cfg.fragi_frac_nucleo,
1402         p93 * 0.82,
1403         1e-7,
1404     )
1405     # Teto um pouco mais alto: resposta Frangi global baixa em fissuras muito finas.
1406     thr_n = min(thr_n, fmax * 0.19 + 1e-9)
1407     limiar_fragi = thr_n if fmax > 0 else 1e9
1417     bin_fragi = (frangi_resp > limiar_fragi) e m_roi
1418
1419     thr_r = max(fmax * self.cfg.fragi_frac_relax, 1e-7)
1420     bin_fragi_relax = (frangi_resp > thr_r) e m_roi
1421
1422     bin_sauvola = bin_global | bin_local
1423     nucleo = bin_sauvola e bin_fragi
....    # [...] Limpeza morfológica, controle de saturação e estabilização temporal da máscara.
1609     # Score de qualidade: concordância entre os dois métodos
1610     unificado = (bin_sauvola | bin_fragi)
1611     if unificado.sum() > 0:
1612         qualidade = float(bin_combinado.sum() / unificado.sum())
1613     else:
1614         qualidade = 1.0 # nada detectado por nenhum (amostra intacta)
1616     mascara_fissuras = (bin_limpo.astype(np.uint8)) * 255
1617     if usar_estab_temp:
1618         self.ultimo_threshold_bin = float(t)
1619         self.ultimo_threshold_fragi = float(limiar_fragi)
1620         self.ultima_mascara_fissuras_bool = bin_limpo.copy()
1621     return mascara_fissuras, qualidade

```

Fonte: arquivo da rotina computacional utilizada na pesquisa.

Listagem B.3 - Cálculo das métricas e encadeamento das etapas de processamento

```

....    # [...] Trecho interno da função _calcular_metricas(...).
1738    roi_bool = (mascara_disco > 0)
1739    # Confina rigorosamente a área fissurada à amostra delimitada:
1740    # numerador e denominador compartilham exatamente a mesma região.
1741    fissuras_em_roi = (mascara_fissuras > 0) e roi_bool
1742    area_amostra_px = float(roi_bool.sum())
1743    area_fissurada_px = float(fissuras_em_roi.sum())
1744    cif = (area_fissurada_px / area_amostra_px
1745          if area_amostra_px > 0 else 0.0)
1746    # Salvaguarda numérica: arredondamento ou inputs degenerados não
1747    # devem produzir CIF fora de [0, 1].
1748    cif = float(np.clip(cif, 0.0, 1.0))
1749    area_amostra_mm2 = area_amostra_px / (px_por_mm ** 2)
1750    area_fissurada_mm2 = area_fissurada_px / (px_por_mm ** 2)
1751
1752    skel = self.esqueletizar(mascara_fissuras)
1753    comprimento_total_mm = float(skel.sum()) / px_por_mm
1754    largura_media_mm, largura_dp_mm = self.largura_media(
1755        mascara_fissuras, skel, px_por_mm)
1756    labels_skel = measure.label(skel, connectivity=2)
1757    num_segmentos = int(labels_skel.max())
1758    num_intersecoes = self.contar_intersecoes(skel)
1759
1760    if area_amostra_mm2 > 0:
1761        densidade = (comprimento_total_mm * 1e-3) / (area_amostra_mm2 * 1e-6)
1762    else:
1763        densidade = 0.0
1764    tortuosidade = self.tortuosidade(skel)
1765    dim_fractal = self.dimensao_fractal(mascara_fissuras)
1766    cy, cx = centro
1767
1768    return MetricasFissuracao(
1769        nome_arquivo=nome_arquivo,
1770        cif=cif,
1771        comprimento_total_mm=comprimento_total_mm,
1772        largura_media_mm=largura_media_mm,
1773        largura_dp_mm=largura_dp_mm,
1774        num_segmentos=num_segmentos,
1775        num_intersecoes=num_intersecoes,
1776        densidade_fissura_m_m2=densidade,
1777        tortuosidade_media=tortuosidade,
1778        dimensao_fractal=dim_fractal,
1779        diametro_detectado_px=diagnostico_px,

```

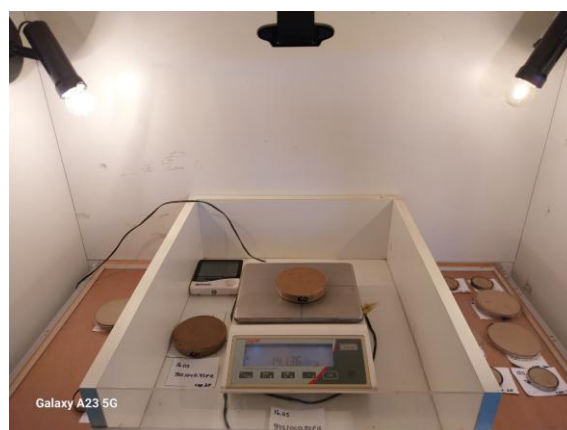
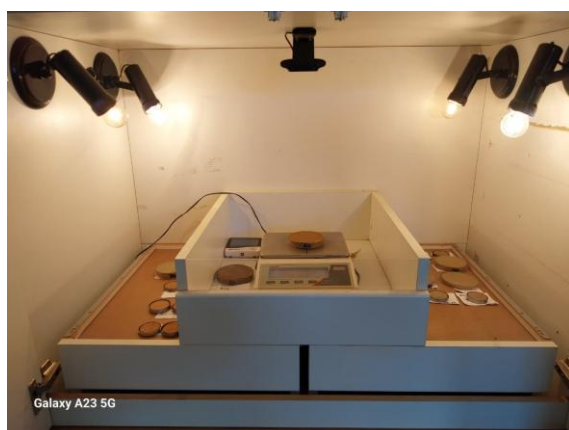
```

1785     area_amostra_mm2=area_amostra_mm2,
1786     area_fissurada_mm2=area_fissurada_mm2,
1787     px_por_mm=px_por_mm,
1788     qualidade_segmentacao=qualidade,
1795 )
.... # [...] Encadeamento central da função analisar_imagem(...).
1937 (cy, cx), r, mascara_disco = self.delimitar_disco(img)
1938 px_por_mm = self.calibrar_escala(r)
1939 mascara_solo = self.mascara_solo_util(mascara_disco, px_por_mm)
1940 cinza = self.preprocessar(img, mascara_solo)
1941 if (
1942     self.ultima_mascara_fissuras_bool is not None
1943     and self.ultima_mascara_fissuras_bool.shape != cinza.shape
1944 ):
1945     self.ultima_mascara_fissuras_bool = None
1946     self.ultimo_threshold_bin = None
1947     self.ultimo_threshold_frangi = None
1948     mascara_fissuras, qualidade = self.segmentar_fissuras(
1949         cinza, mascara_solo)
1950     skel = self.esqueletizar(mascara_fissuras)
.... # [...] Resolução dos metadados temporais e da identificação da captura.
1963     metricas = self.calcular_metricas(
1964         mascara_fissuras, mascara_solo, px_por_mm,
1965         nome_arquivo=caminho_imagem.name,
1966         timestamp=ts.isoformat() if ts else None,
1967         tempo_h=tempo_ensaio_h,
1968         centro=(cy, cx),
1969         diametro_px=2 * r,
1970         qualidade=qualidade,
1971         idade_curagem_dias=idade_curagem_dias,
1972         idade_label=idade_label,
1973         hora_captura=hora_vis,
1974         tempo_ensaio_min=tmin_eff,
1975         delta_minutos_desde_anterior=delta_minutos_desde_anterior,
1976         origem_calculo_tempo=ori_eff,
1977     )
.... # [...] Geração opcional do painel de validação visual.
1993     return metricas

```

Fonte: arquivo da rotina computacional utilizada na pesquisa.

APÊNDICE C - FOTOS DA CÂMARA PARA AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO POR ANÁLISE DE IMAGEM DIGITAL





APÊNDICE D – CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO QUALITATIVA DOS RESULTADOS DE COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os termos qualitativos empregados nos quadros de classificação interpretativa e de síntese multicritério dos ensaios de compressão simples não confinada (UCS) e de tração por compressão diametral (TCD) foram definidos por meio de critérios comparativos, tomando-se o solo natural como material de referência. A finalidade desta sistematização é padronizar expressões como baixa, moderada, alta, muito alta, promissora e melhor, reduzindo a subjetividade da interpretação.

Os critérios têm caráter interpretativo e não normativo. Portanto, as classes não representam limites regulamentares de aceitação, mas faixas relativas de desempenho dentro do programa experimental desta tese. Para cada parâmetro X, foi calculado o índice relativo I_x indicado a seguir:

$$I_x = \frac{\bar{X}_{\text{mistura}}}{\bar{X}_{\text{solo}}} \times 100$$

Um índice igual a 100% indica comportamento equivalente ao solo natural. Valores inferiores a 100% representam redução do parâmetro, enquanto valores superiores indicam aumento. A interpretação de cada parâmetro considerou sua função mecânica: resistência, deformabilidade e energia foram tratadas como grandezas de desempenho; a rigidez foi utilizada como descritor de comportamento, pois valores elevados de E_{50} não significam, isoladamente, melhor adequação para uma camada sujeita à retração e a deformações diferenciais.

Quadro D.1 – Valores de referência adotados para o solo natural.

Ensaio	Parâmetro	Símbolo	Valor de referência	Unidade
UCS	Resistência à compressão simples no pico	q_u	279	kPa
UCS	Deformação axial no pico	ε_p	7,22	%
UCS	Tenacidade até o pico	T_p	12,66	kJ/m ³
UCS	Módulo secante	E_{50}	5,55	MPa
TCD	Resistência à tração indireta no pico	R_t, cd	35,43	kPa
TCD	Deslocamento no pico	δ_p	0,778	mm
TCD	Energia absorvida até o pico	E_p	0,133	J
TCD	Energia em deslocamento padronizado de 0,75 mm	$E_{0,75}$	0,126	J

Fonte: Autor (2026).

D.1 Critérios para os ensaios de compressão simples não confinada

Nos ensaios UCS, a classificação principal foi estabelecida a partir da resistência de pico, da deformação no pico e da tenacidade até o pico. O módulo E50 foi empregado como parâmetro complementar para distinguir respostas mais rígidas ou mais flexíveis. A rigidez elevada somente foi considerada favorável quando acompanhada de deformabilidade e tenacidade adequadas.

Tabela D.1 – Faixas comparativas para a classificação dos parâmetros obtidos nos ensaios UCS.

Classificação	Resistência q_u	Deformabilidade ε_p	Tenacidade T_p	Rigidez E_{50}
Muito baixa	< 50% (< 139,5 kPa)	< 50% (< 3,61%)	< 50% (< 6,33 kJ/m ³)	< 50% (< 2,78 MPa)
Baixa	50% a < 90% (139,5 a < 251,1 kPa)	50% a < 80% (3,61 a < 5,78%)	50% a < 80% (6,33 a < 10,13 kJ/m ³)	50% a < 80% (2,78 a < 4,44 MPa)
Próxima à referência	90% a 110% (251,1 a 306,9 kPa)	80% a 120% (5,78 a 8,66%)	80% a 120% (10,13 a 15,19 kJ/m ³)	80% a 120% (4,44 a 6,66 MPa)
Moderada	> 110% a 130% (> 306,9 a 362,7 kPa)	> 120% a 175% (> 8,66 a 12,64%)	> 120% a 200% (> 15,19 a 25,32 kJ/m ³)	> 120% a 150% (> 6,66 a 8,33 MPa)
Alta	> 130% a 180% (> 362,7 a 502,2 kPa)	> 175% a 250% (> 12,64 a 18,05%)	> 200% a 600% (> 25,32 a 75,96 kJ/m ³)	> 150% a 200% (> 8,33 a 11,10 MPa)
Muito alta	> 180% (> 502,2 kPa)	> 250% (> 18,05%)	> 600% (> 75,96 kJ/m ³)	> 200% (> 11,10 MPa)

Fonte: Autor (2026).

Na coluna de resistência, a expressão “sem ganho expressivo” pode ser utilizada como equivalente a “próxima à referência” quando o resultado permanecer entre 90% e 110% do valor do solo. Expressões compostas, como “baixa a moderada” ou “moderada a alta”, são admitidas quando o índice estiver a até 5 pontos percentuais de um limite de classe ou quando as repetições se distribuírem entre duas classes adjacentes. Termos como “alta e variável” combinam a magnitude média do parâmetro com a classificação de consistência apresentada na Seção B.3.

D.2 Critérios para os ensaios de tração por compressão diametral

Nos ensaios TCD, a classificação principal foi estabelecida a partir da resistência à tração indireta, do deslocamento no pico e da energia absorvida até o pico. A energia em 0,75 mm foi adotada como resposta padronizada complementar, por permitir a comparação em um mesmo nível de deslocamento. A energia total do ensaio não foi utilizada isoladamente na classificação, pois os corpos de prova foram encerrados em deslocamentos finais diferentes.

Tabela D.2 – Faixas comparativas para a classificação dos parâmetros obtidos nos ensaios TCD.

Classificação	Resistência $R_{t,cd}$	Deslocamento δ_p	Energia até o pico E_p
Muito baixa / muito baixo	< 50% (< 17,72 kPa)	< 50% (< 0,389 mm)	< 50% (< 0,0665 J)
Baixa / baixo	50% a < 90% (17,72 a < 31,89 kPa)	50% a < 80% (0,389 a < 0,622 mm)	50% a < 80% (0,0665 a < 0,1064 J)
Próxima à referência	90% a 120% (31,89 a 42,52 kPa)	80% a 120% (0,622 a 0,934 mm)	80% a 125% (0,1064 a 0,1663 J)
Moderada / moderado	> 120% a 140% (> 42,52 a 49,60 kPa)	> 120% a 200% (> 0,934 a 1,556 mm)	> 125% a 300% (> 0,1663 a 0,399 J)
Alta / alto	> 140% a 200% (> 49,60 a 70,86 kPa)	> 200% a 400% (> 1,556 a 3,112 mm)	> 300% a 600% (> 0,399 a 0,798 J)
Muito alta / muito alto	> 200% (> 70,86 kPa)	> 400% (> 3,112 mm)	> 600% (> 0,798 J)

Fonte: Autor (2026).

Tabela D.3 – Classificação complementar da resposta em deslocamento padronizado de 0,75 mm.

Classificação	Faixa relativa a $E_{0,75}$ do solo	Faixa equivalente
Baixa / inferior à referência	< 80%	< 0,101 J
Próxima à referência	80% a 125%	0,101 a 0,158 J
Superior à referência	> 125% a 300%	> 0,158 a 0,378 J
Muito superior	> 300%	> 0,378 J
Não comparável	O corpo de prova não atingiu 0,75 mm	Sem classificação numérica

Fonte: Autor (2026).