

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Dêreck Hummel Becher

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA CELULOSE EM UM SOLO DE
COMPORTAMENTO LATERÍTICO: EFEITOS DE DIFERENTES
TEORES DE ADIÇÃO E PERÍODOS DE CURA NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO**

Santa Maria, RS
2024

Dêreck Hummel Becher

Incorporação de resíduo da celulose em um solo de comportamento laterítico: efeitos de diferentes teores de adição e períodos de cura na resistência ao cisalhamento

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em **Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Magnos Baroni
Coorientadora: Msc. Patricia Rodrigues Falcão

Santa Maria, RS
2024
Dêreck Hummel Becher

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA CELULOSE EM UM SOLO DE
COMPORTAMENTO LATERÍTICO: EFEITOS DE DIFERENTES TEORES DE
ADIÇÃO E PERÍODOS DE CURA NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Especialização em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em **Engenharia Civil**.

Aprovado em 09 de agosto de 2024

Magnos Baroni, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Patricia Rodrigues Falcão, Msc.
(Coorientadora)

Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM)
(Banca)

Leonardo Alberto do Nascimento, Eng.
(Banca)

Santa Maria, RS
2024

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida e pela fé plantada no meu coração. Por sempre me abençoar, proteger e confortar nos momentos mais difíceis, guiando-me aos verdadeiros propósitos da vida com Sua infinita sabedoria e amor.

Aos meus pais, Wolter e Glauca, por serem a base sobre a qual construí a minha vida. Agradeço profundamente por me educarem nos princípios corretos da vida, pelos conselhos dados, por serem meus maiores exemplos de fé, respeito e carinho. Obrigado por sempre apoiarem na minha formação educacional, e por todo o amor incondicional que eu sinto vindo de vocês.

Ao meu irmão, Estevão, meu melhor amigo e companheiro de vida. Agradeço por tantos momentos que compartilhamos e pelo grande amor fraternal sempre demonstrado, principalmente nos momentos que mais precisamos um do outro. Sou profundamente grato a Deus por termos dividido esses anos de vida juntos, crescendo lado a lado, aproveitando as mesmas fases da vida juntos.

A minha namorada, Júlia, por ser a minha melhor amiga e um dos maiores presentes que Deus me deu. Obrigado por estar ao meu lado em todos os momentos, por compartilhar comigo os momentos bons e por me confortar nos momentos ruins. Você revelou em mim um amor que eu ainda não havia experimentado, e sei que ele crescerá a cada dia, até o final de nossas vidas.

Ao Professor Magno Baroni, pela confiança e orientação neste trabalho e pelos conselhos ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Sou profundamente grato pelas inúmeras oportunidades que me foram proporcionadas, pelos momentos de ensinamento em sala de aula, em laboratório, e, inclusive, em campo.

A Patricia Falcão e a Paula Pascoal, por serem meus maiores exemplos de profissionais de engenharia e por serem grandes amigas. Sou muito grato por terem me recepcionado tão calorosamente no laboratório, por sempre estarem dispostas a me orientar e ajudar, tanto em questões técnicas como também de vida. Obrigado pela paciência, pelo carinho, pela dedicação, pela amizade, e por tornar o convívio diário tão leve. Agradeço à Patricia por ter me coorientado neste trabalho, por ter estado todo dia ao meu lado superando os desafios encontrados, agradeço pelo apoio incansável demonstrado, e pelo coração imenso que tens.

Ao Angelo Prior, Luigi Tavares e Luiz Henrique Ben, por me mostrarem que a amizade vai muito além de apenas ser colegas de profissão. Sou grato por terem tido confiança em mim e me proporcionarem o convite de conhecer melhor a área da geotecnia. Obrigado pelo companheirismo, pelos momentos de descontração, e pelos ensinamentos.

Ao Enzo Borin, Gabriel Feyh, José Leonardo, João Gonçalves, Leonardo Alberto e Mariana Cirolini, por terem estado presentes em vários momentos durante essa trajetória. Agradeço o auxílio nos ensaios da pesquisa, pelos conselhos e por toda a ajuda inestimável.

Agradeço aos vários outros amigos que fiz no curso, vocês foram muito importantes na minha trajetória dentro da universidade. Foi com a amizade e a ajuda de vocês que os vários dias de estudo e preocupação com provas tornaram-se mais fáceis de serem enfrentados.

A UFSM e a todos os profissionais desta instituição de ensino, pois esta foi a minha segunda casa nesses últimos anos. Agradeço o acolhimento, os ensinamentos transmitidos, e por toda as experiências de vida que vivi aqui.

“Combati o bom combate, completei a carreira, guardei a fé. Já agora a coroa da justiça me está guardada, a qual o Senhor, reto juiz, me dará naquele Dia; e não somente a mim, mas também a todos quantos amam a sua vinda.”

2 Timóteo 4. 7-8

RESUMO

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DA CELULOSE EM UM SOLO DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO: EFEITOS DE DIFERENTES TEORES DE ADIÇÃO E PERÍODOS DE CURA NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

AUTOR: Dêreck Hummel Becher
ORIENTADOR: Prof. Dr. Magnos Baroni
COORIENTADORA: Msc. Patricia Rodrigues Falcão

A indústria de celulose no Brasil vem apresentando um crescimento substancial nos últimos anos. Com a expansão desse setor, aumentam também as preocupações relacionadas à geração de resíduos e à sua disposição final adequada. Paralelamente, novas pesquisas no campo da Engenharia Civil vêm sendo desenvolvidas com o intuito de promover o reaproveitamento desses materiais, contribuindo para a redução da extração de recursos naturais e proporcionando uma destinação adequada para os resíduos industriais. Este estudo teve como objetivo investigar a viabilidade da incorporação do resíduo grits, proveniente da indústria de celulose, em um solo argiloso de comportamento laterítico do município de Cruz Alta, Rio Grande do Sul, utilizando ensaios de cisalhamento direto. Para atingir esse objetivo, foram preparadas amostras com diferentes teores de resíduo grits (5, 10 e 15 %), e submetidas a diferentes idades de cura (0, 7, 14, 28 e 56 dias). As envoltórias de resistência foram construídas a partir de ensaios de cisalhamento direto realizados sob tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. Além disso, as misturas solo-grits foram caracterizadas fisicamente e analisadas em nível microestrutural por meio do microscópio eletrônico de varredura. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos mostraram aumentos expressivos do intercepto coesivo, especialmente para a mistura com adição de 10% do resíduo de forma gradativa com os diferentes períodos de cura. Os valores do ângulo de atrito interno das misturas, entretanto, foram inferiores ao valor de referência do solo, com cada mistura solo-grits apresentando diferentes tendências ao longo das idades de cura. Em termos microestruturais, a amostra apresentou uma redução dos macroporos com a adição do resíduo, bem como uma orientação das partículas.

Palavras-chave: Grits, Solo compactado, Cisalhamento Direto, Períodos de cura.

ABSTRACT

INCORPORATION OF CELLULOSE WASTE INTO A SOIL WITH LATERITIC BEHAVIOR: EFFECTS OF DIFFERENT LEVELS OF ADDITION AND CURING TIMES ON SHEAR STRENGTH

AUTHOR: Dêreck Hummel Becher
ADVISOR: Prof. Dr. Magnos Baroni
CO-SUPERVISOR: Msc. Patricia Rodrigues Falcão

The pulp mill in Brazil has grown substantially in recent years. Due this sector's expansion, there are also growing concerns about the generation of solid waste and its adequate final destination. In parallel, new research in Civil Engineering has been developed to promote the reuse of these materials, reducing the extraction of natural resources and providing a more adequate destination for industrial waste. This study aimed to investigate the viability of incorporating grits waste from the pulp industry into a lateritic clay soil from Cruz Alta, Rio Grande do Sul, using direct shear tests. To achieve this goal, samples were prepared with different grit residue contents (5, 10 and, 15%) and subjected to different curing ages (0, 7, 14, 28, and 56 days). Resistance envelopes were constructed from direct shear tests under normal stresses of 50, 100 and, 200 kPa. In addition, the soil-grit mixtures were physically characterized and analyzed at a microstructural level using a scanning electron microscope. The shear strength parameters obtained showed significant increases in the cohesive intercept, especially for the mixture with adding 10% of the waste, gradually with the different curing periods. However, the values of the internal friction angle of the mixtures, however, were lower than the reference value for the soil, with each soil-grits mixture showing different trends over the curing ages. In microstructural terms, the sample showed a reduction in macropores with the addition of the waste, as well as an orientation of the particles.

Key words: Grits, Compacted soil, Direct shear, Curing periods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Mercado da celulose no Brasil, 2012 - 2022 (milhões de toneladas)	19
Figura 2.2: Principais países produtores de celulose em 2022 (milhões de toneladas).....	20
Figura 2.3: Fontes de energia usadas na autoprodução das indústrias de celulose.	21
Figura 2.4: Fluxograma do processo <i>Kraft</i> , destacando a geração dos resíduos sólidos.....	23
Figura 2.5: Resíduo grits	24
Figura 2.6: Esquema da caixa de cisalhamento	33
Figura 2.7: Típicas curvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal do ensaio de cisalhamento direto	34
Figura 3.1: Fluxograma da pesquisa.....	36
Figura 3.2: Locais da coleta do solo e destinação para a realização dos ensaios	38
Figura 3.3: Solo usado: (a) escala real em centímetros e (b) escala microscópica	39
Figura 3.4: Resíduo grits usado no estudo.....	41
Figura 3.5: Preparação das amostras	44
Figura 3.6: (a) Equipamento para a realização do ensaio de cisalhamento direto; (b); (c) caixa de cisalhamento bipartida; (d) ensaio em andamento; (e) amostra pós ensaio.....	45
Figura 3.7: (a) microscópio eletrônico de varredora; (b) amostras extraídas; (c) (d) metalização das amostras; (e) obtenção das imagens ampliadas	47
Figura 4.1: Curva granulométrica do grits	48
Figura 4.2: Curvas de termogravimetria para a amostra de grits.....	49
Figura 4.3: Limites de consistência	51
Figura 4.4: Curvas granulométricas das misturas e do solo	51
Figura 4.5: (a) Curvas tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento cisalhante do solo, (b) curvas τ/σ_n <i>versus</i> deslocamento cisalhante, (c) curvas deslocamento normal <i>versus</i> deslocamento cisalhante	54
Figura 4.6: Envoltória de resistência do solo	55
Figura 4.7: Índices físicos para validação dos corpos de prova da mistura S5G	56
Figura 4.8: Curvas tensão cisalhantes <i>versus</i> deslocamento horizontal da mistura com teor de 5% de grits para idade de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias.....	58
Figura 4.9: Curvas τ/σ_n <i>versus</i> deslocamento horizontal da mistura com teor de 5% de grits para idade de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias.....	59

Figura 4.10: Curvas deslocamento normal versus deslocamento horizontal da mistura com teor de 5% de grits para idade de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias	60
Figura 4.11: Compilado das envoltórias de resistência para as misturas com teor de 5% de grits	61
Figura 4.12: Relação do intercepto coesivo e do ângulo de atrito na mistura com adição de 5% de grits para diferentes idades de cura.....	62
Figura 4.13: Amostra da mistura S5G antes do ensaio em (a) e (b); amostra cisalhada em (c) (d) e (e).....	63
Figura 4.14: Índices físicos para validação dos corpos de prova da mistura S10G	63
Figura 4.15: Curvas tensão cisalhantes <i>versus</i> deslocamento horizontal da mistura com teor de 10% de grits para idade de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias	65
Figura 4.16: Curvas τ/σ_n <i>versus</i> deslocamento horizontal da mistura com teor de 10% de grits para idade de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias..	66
Figura 4.17: Curvas deslocamento normal <i>versus</i> deslocamento horizontal da mistura com teor de 15% de grits para idade de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias.....	67
Figura 4.18: Compilado das envoltórias de resistência para as misturas com teor de 10% de grits	68
Figura 4.19: Relação do intercepto coesivo e do ângulo de atrito na mistura com adição de 10% de grits para diferentes idades de cura.....	70
Figura 4.20: Amostra da mistura S10G antes do cisalhamento em (a) (b); amostra pós ensaio de cisalhamento direto em (c), (d) e (e).....	70
Figura 4.21: Índices físicos para validação dos corpos de prova da mistura S15G	71
Figura 4.22: Curvas tensão cisalhantes <i>versus</i> deslocamento horizontal da mistura com teor de 15% de grits para idades de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias	73
Figura 4.23: Curvas τ/σ_n <i>versus</i> deslocamento horizontal da mistura com teor de 15% de grits para (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias.....	74
Figura 4.24: Curvas deslocamento normal <i>versus</i> deslocamento horizontal da mistura com teor de 15% de grits para (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias...	75
Figura 4.25: Compilado das envoltórias de ruptura para a mistura com teor de 15% de grits.	76
Figura 4.26: Relação do intercepto coesivo e do ângulo de atrito na mistura com adição de 15%	

de grits para diferentes idades de cura.....	77
Figura 4.27: Amostra da mistura S15G antes do ensaio em (a), (b) e (c); amostras cisalhada em (d) e (e)	78
Figura 4.28: Regressões polinomiais do intercepto coesivo em função do período de cura das amostras para as diferentes misturas.....	80
Figura 4.29: Influência dos teores de adição do resíduo nas diferentes idades de cura sobre o intercepto coesivo	81
Figura 4.30: Regressões polinomiais do ângulo de atrito interno em função do período de cura das amostras para os diferentes teores das misturas	82
Figura 4.31: Influência dos teores de adição do resíduo nas diferentes idades de cura sobre o ângulo de atrito interno	83
Figura 4.32: Microscopia eletrônica de varredura do solo com ampliação de (a) 100x, (b) 500x e (c) 3000x	84
Figura 4.33: Microscopia eletrônica de varredura da mistura S5G com ampliação de (a) 100x, (b) 500x e (c) 3000x	84
Figura 4.34: Microscopia eletrônica de varredura da mistura S10G com ampliação de (a) 100x, (b) 500x e (c) 3000x	85
Figura 4.35: Microscopia eletrônica de varredura da mistura S15G com ampliação de (a) 100x, (b) 500x e (c) 3000x	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição química do grits	25
Tabela 3.1: Caracterização física, química e mecânica do solo.....	40
Tabela 3.2: Resultados das curvas de compactação do solo e das misturas solo-grits	42
Tabela 3.3: Períodos de aplicações de tensões normais na fase de consolidação das amostras (em minutos).....	45
Tabela 4.1: Características físicas do grits.....	49
Tabela 4.2: Limites de consistência do solo e das misturas solo-grits	50
Tabela 4.3: Frações granulométricas das misturas solo-grits e do solo.....	52
Tabela 4.4: Resultados dos ensaios de cisalhamento direto e os parâmetros de resistência.....	55
Tabela 4.5: Parâmetros de resistência da mistura solo-grits com teor de 5% do resíduo	61
Tabela 4.6 Parâmetros de resistência da mistura solo-grits com teor de 10% do resíduo	69
Tabela 4.7: Parâmetros de resistência da mistura solo-grits com teor de 15% do resíduo	77
Tabela 4.8: Parâmetros de resistência do solo e das misturas solo-grits	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	California Bearing Ratio
cm	Centímetros
CP	Corpo de prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DRX	Difratometria de raios X
e	Índice de Vazios
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
IBÁ	Instituto Brasileiro de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IP	Índice Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
LG'	Solo Argiloso Laterítico
LL	Limite Liquidez
LP	Limite Plasticidade
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MG	Minas Gerais
mm	Milímetros
pH	Potencial Hidrogênio
RCNC	Resistência Compressão Não Confinada
RS	Rio Grande do Sul
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UNICRUZ	Universidade de Cruz Alta
Wót	Umidade Ótima

SUMÁRIO

1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CELULOSE	19
2.2	POTENCIAL DO APROVEITAMENTO DO RESÍDUO GRITS	24
2.3	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS	30
2.4	CRITÉRIO DE RUPTURA DE MOHR-COULOMB	31
2.5	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	33
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA	36
3.2	SOLO EM ESTUDO	37
3.3	RESÍDUO GRITS	40
3.4	MISTURA SOLO-GRITS	41
3.4.1	Ensaio de Limites de Atterberg	42
3.4.2	Ensaio de Análise Granulométrica	42
3.4.3	Ensaio de Cisalhamento Direto	43
3.4.4	Microscopia Eletrônica de Varredura	46
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	48
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	48
4.1.1	Análise do resíduo Grits	48
4.1.2	Mistura solo-grits	50
4.2	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	52
4.2.1	Solo	53
4.2.2	Solo + 5% grits	55
4.2.3	Solo + 10% grits	63
4.2.4	Solo + 15 grits	71

4.2.5	Discussão dos resultados	78
4.3	AVALIAÇÃO DO MICROSCOPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA.....	83
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o constante crescimento urbano das últimas décadas, a geração de resíduos industriais tem se tornado um motivo de grande discussão, especialmente em relação à sua correta disposição final. Diversas linhas de pesquisa vêm surgindo, em nível internacional e nacional, voltadas ao reaproveitamento desses materiais, desenvolvendo novos produtos. Essas pesquisas despertam o interesse tanto dos segmentos geradores, uma vez que a gestão dos resíduos sólidos industriais representa custos significativos ao setor e a adoção de práticas ambientais sustentáveis melhora a imagem das empresas, quanto da população em geral, já que seus resultados podem levar à redução de resíduos sólidos, à diminuição dos riscos ambientais e à melhora da qualidade de vida (BRAHAMI et al., 2022; SILVA, 2023; OLIVEIRA et al., 2023).

A indústria de celulose no Brasil tem apresentado um crescimento expressivo nas últimas décadas, tanto na produção quanto em exportações (IBÁ, 2023). Entre os vários fatores que contribuem para esse destaque estão as vastas dimensões territoriais do país, as condições climáticas favoráveis e os grandes investimentos no setor. A produção de celulose exige uma grande quantidade de matéria-prima, principalmente madeira. Além dos produtos de interesse comercial, essa indústria gera uma quantidade significativa de resíduos sólidos inorgânicos, como cinzas volantes, lama de cal, dregs e grits (RIBEIRO, 2010). Estima-se que, para cada tonelada de celulose produzida, são gerados aproximadamente 480 kg de resíduos sólidos, considerando a base seca (BELLOTE et. al, 2003).

O objeto desta pesquisa foi investigar o potencial do resíduo grits, um subproduto sólido inorgânico da produção da celulose, como agente estabilizante de solos. Este resíduo possui uma coloração acinzentada, e apresenta uma granulometria que varia desde a fração de pedregulho até partículas finas de argila (MAIA et al, 2014). Sua composição química é predominantemente baseada em óxido de cálcio, o que lhe confere um grande potencial como estabilizante químico, reduzindo a expansibilidade dos solos e melhorando suas propriedades de resistência mecânica (PEREIRA, 2005). Assim, o reaproveitamento do resíduo grits como estabilizante de solo pode oferecer não apenas benefícios técnicos, mas também contribuir para a gestão sustentável de resíduos industriais.

Nesse contexto, estudou-se a viabilidade do uso do resíduo grits como agente melhorador da resistência ao cisalhamento de solos. As análises basearam-se em ensaios de cisalhamento direto de um solo argiloso de comportamento laterítico, compactado na energia

normal e na condição não inundada. Justifica-se essa condição pela observação de que, em solos compactados na umidade ótima, a resistência máxima não é atingida; no entanto, a variação da resistência é menor com o aumento do teor de umidade, quando comparado com demais pontos da curva de compactação (LAMB; WHITMAN, 1969). Além disso, essa linha de pesquisa encontra-se em expansão, com estudos em andamento baseados na avaliação da sucção das misturas de solo-grits para posterior correlação com os resultados dos ensaios apresentados neste estudo.

Posto isto, foram empregados diferentes teores de resíduo na mistura solo-grits (5%, 10% e 15%). As amostras foram submetidas a diferentes idades de cura (0, 7, 14, 28 e 56 dias) antes da realização dos ensaios de cisalhamento direto. Adicionalmente, as misturas foram avaliadas por meio de microscopia eletrônica de varredura, análises granulométricas e limites de consistência. O resíduo grits foi avaliado com base nos ensaios de granulometria a laser e termogravimetria.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da presente pesquisa consiste em avaliar a viabilidade da adição do resíduo grits como agente melhorador dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de um solo laterítico.

1.1.2 Objetivos Específicos

- I. Avaliar a magnitude da influência da adição de diferentes teores de resíduo grits na resistência ao cisalhamento de um solo laterítico compactado, considerando também diferentes idades de cura dos corpos de prova;
- II. Analisar a variação da estrutura do material em nível microestrutural com a adição de diferentes teores de grits.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, além das referências bibliográficas. O Capítulo 1 introduz o tema da pesquisa, justificando sua relevância e apresentando os objetivos e a organização do estudo.

O Capítulo 2, intitulado Fundamentação Teórica, oferece uma revisão da literatura. Discute o processo *Kraft*, que é o método predominante para a produção de celulose em nível global, e a geração do resíduo grits. Explora também as tendências de pesquisas sobre o reaproveitamento desse resíduo, além de abordar a resistência ao cisalhamento dos solos, os critérios de ruptura e o ensaio de cisalhamento direto usado para obtenção dos parâmetros de resistência.

No Capítulo 3, são descritos os materiais utilizados na pesquisa e a metodologia aplicada. O capítulo detalha as características do solo em estudo e apresenta o resíduo grits usado. Também são mencionados os ensaios realizados nas misturas solo-grits, incluindo os procedimentos metodológicos adotados.

Os resultados e suas respectivas análises são discutidos no Capítulo 4. Inicia-se com a caracterização do resíduo grits, seguindo pelos resultados dos limites de consistência e da análise granulométrica das misturas solo-grits. Inclui ainda os resultados dos ensaios de cisalhamento direto e as envoltórias de resistência geradas, as análises realizadas por microscopia eletrônica para compreender os efeitos da adição do resíduo grits na escala microscópica.

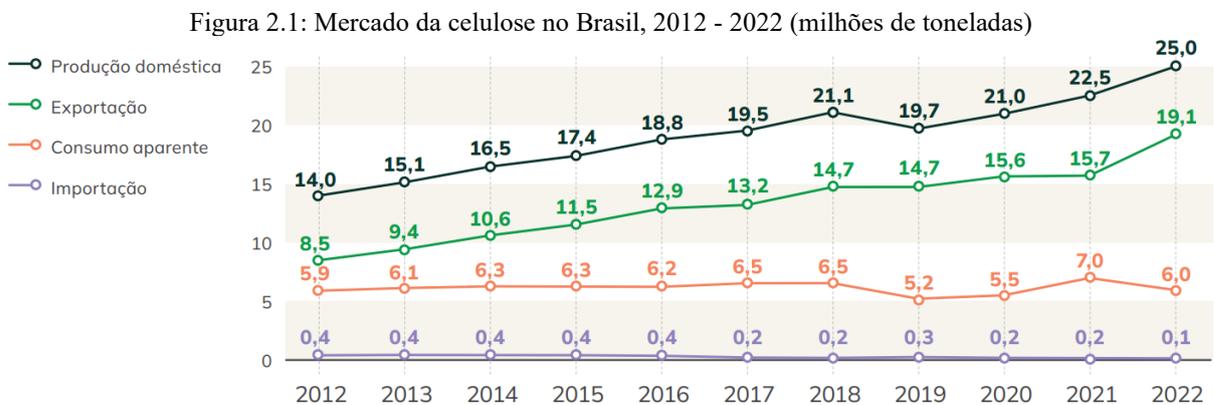
O último capítulo, Considerações Finais, sintetiza as principais conclusões da pesquisa e oferece sugestões para futuras investigações.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CELULOSE

A produção de celulose no Brasil desempenha um papel crucial na indústria nacional, e se destaca no cenário mundial. De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), em 2022, o setor de árvores cultivadas no Brasil atingiu um recorde de exportações, totalizando 14,3 bilhões de dólares, aumento de 21,3% frente ao ano anterior, o que representa 4,3% das exportações nacionais. A celulose é o principal produto dessa indústria, respondendo por aproximadamente 60% do valor total movimentado. O Brasil é reconhecido pela qualidade superior e pela origem sustentável e certificada de sua celulose, fatores essenciais para sua competitividade no mercado internacional. As condições climáticas favoráveis, o tratamento adequado do solo, as técnicas de manejo florestal e décadas de investimento em pesquisas, desenvolvimento e inovações são aspectos que contribuem significativamente para o valor agregado dessa indústria (IBÁ, 2023).

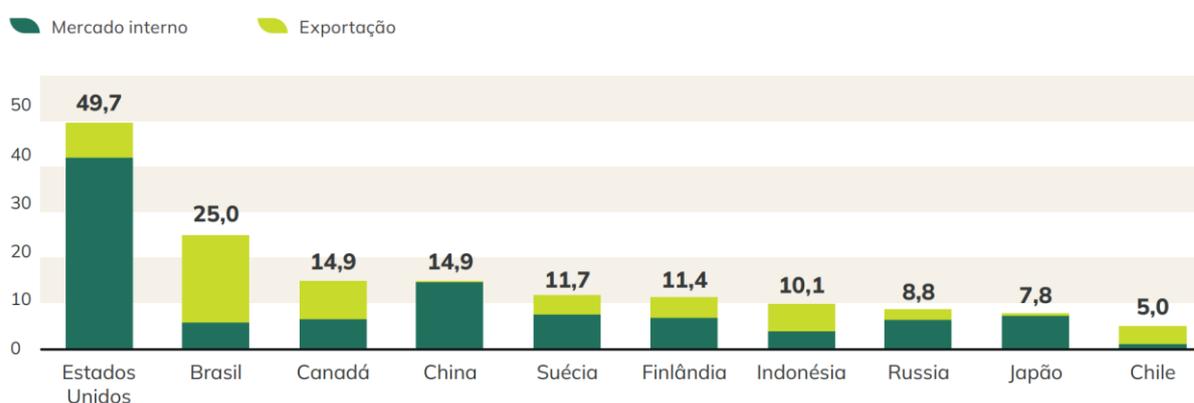
Desde a década de 60, o Brasil tem registrado taxas de crescimento na produção de celulose e papel que superam as de muitos outros países. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021), mesmo com o impacto da pandemia do Covid-19, a produção nacional de celulose aumentou 6,6% entre 2019 e 2020. Este resultado evidencia a resiliência do setor, que se adaptou rapidamente para atender às novas demandas de consumo. A Figura 2.1 ilustra a produção, exportação e o consumo de celulose no Brasil de 2012 a 2022.



Fonte: IBÁ (2023) e FAO (2022)

No relatório anual de 2023, o Instituto Brasileiro de Árvores (IBÁ) destacou o Brasil como o segundo maior produtor mundial de celulose, com uma produção de 25,0 milhões de toneladas em 2022, marcando um crescimento de 10% em relação ao ano anterior. Os Estados Unidos permanecem como maior produtor global de celulose, com 49,7 milhões de toneladas, apesar de uma redução de 3,0% em comparação ao período anterior. Em termos de exportação, o Brasil lidera o ranking mundial em 2022, exportando mais de 19 milhões de toneladas de celulose, o que representa mais de 75% de sua produção (Figura 2.2). O Canadá ocupa a segunda posição em exportações, com 9 milhões de toneladas, seguido pelos Estados Unidos, com 7,8 milhões de toneladas (FAO, 2022; IEA, 2023).

Figura 2.2: Principais países produtores de celulose em 2022 (milhões de toneladas)



Fonte: IBÁ (2023) e FAO (2022)

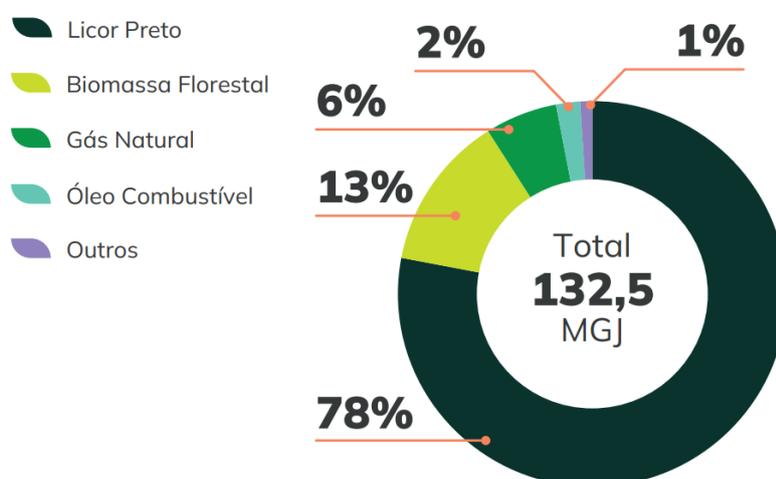
O processo *Kraft*, cujo nome em alemão significa "resistência" ou "força", é o método predominante na produção de celulose em todo o mundo, responsável por aproximadamente 80% da produção global. No Brasil, esse percentual é ainda mais elevado, atingindo cerca de 90% (CORREIA, 2010). Este método é notável por sua capacidade de recuperar a maior parte dos reagentes químicos utilizados, com uma perda máxima de apenas 5% (WOLFF, 2008), além de apresentar uma considerável autossuficiência. Contudo, a crítica sobre o processo *Kraft* repousa na geração de uma quantidade substancial de resíduos sólidos, frequentemente descartados de forma inadequada. Para cada tonelada de celulose e papel produzidos, são gerados cerca de 480 kg de resíduos sólidos, considerando a base seca (BELLOTE et. al, 2003). O processo *Kraft* foi introduzido em escala comercial no final do século XIX na Suécia, onde se destacou pela produção de papéis com resistência superior aos métodos químicos utilizados anteriormente (RIBEIRO, 2010). Este processo envolve o tratamento de cavacos de madeira em um processo de cozimento contínuo, utilizando de uma solução aquosa de hidróxido de

sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S). Este tratamento acelera significativamente as reações químicas, resultando em uma polpa com maior resistência (SMOOK, 1989).

A madeira é a matéria-prima fundamental na produção de celulose, sendo composta predominantemente por lignina, carboidratos e extrativos. No processo *Kraft*, os cavacos de madeira são introduzidos em um digestor, onde são cozidos a altas temperaturas e pressões, em presença de uma solução química (composto por NaOH e Na₂S), conhecida como licor branco. Este procedimento visa a individualização das fibras de celulose, por meio da dissolução da lignina, que é a substância responsável pela união das fibras da madeira. Como resultado dessa etapa, obtém-se uma pasta marrom, constituída por uma suspensão de fibras de celulose e licor negro, que é formado por lignina dissolvida e pelos produtos químicos utilizados no processo. Após esta etapa, a mistura é direcionada para um tanque de descarga do digestor (COSTA & LIMA, 2003).

A massa resultante é então transferida para um sistema de depuração, onde impurezas são removidas das fibras de celulose a partir da filtragem e lavagem com água. A polpa de celulose é armazenada e passa por tratamentos de secagem e branqueamento. O branqueamento é realizado utilizando processos químicos que envolvem oxigênio, peróxido de hidrogênio, soda cáustica e dióxido de cloro (FIGUEIRÊDO, 2009). O licor negro residual do cozimento no digestor, rico em lignina, é direcionado para um processo de recuperação química. Este é um subproduto muito importante dentro do processo *Kraft*, pois serve como a principal fonte de bioenergia autogerada pela indústria (IBÁ, 2023), conforme demonstrado na Figura 2.3.

Figura 2.3: Fontes de energia usadas na autoprodução das indústrias de celulose.



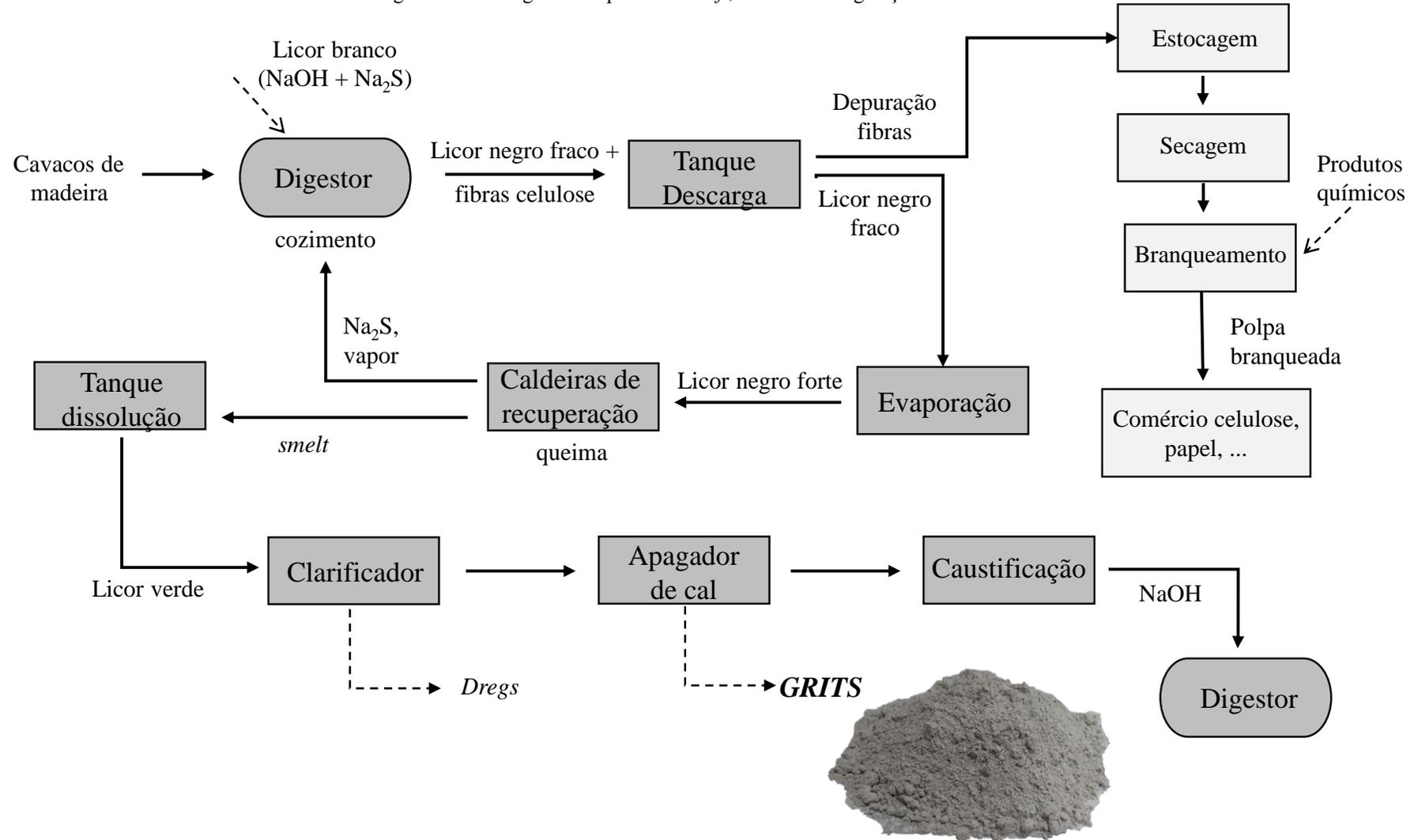
Fonte: IBÁ (2023)

O licor negro gerado pelo digestor, conhecido como licor fraco, é direcionado para a primeira etapa do processo de recuperação química. Nesta fase inicial o licor fraco é evaporado para produzir um licor negro mais concentrado, chamado licor negro forte, que possui um teor de sólidos mais elevado (CORREIA, 2010). Em seguida, esse licor concentrado é queimado em caldeiras de recuperação, gerando não só vapor e energia, mas também permitindo a recuperação do agente químico sulfeto de sódio (Na_2S). Os sais fundidos resultantes desse processo constituem o chamado *smelt* (MARTINS, 2006).

Após a obtenção do *smelt*, este produto é dissolvido para formar uma solução conhecida como licor verde. A solução passa por um processo de clarificação para remover sólidos suspensos, chamados de dregs. Em seguida, cal é adicionada ao licor verde, promovendo uma reação de caustificação que resulta na formação de hidróxido de sódio (NaOH). Este produto finaliza o ciclo de recuperação dos principais reagentes químicos envolvidos no processo *Kraft* (SMOOK, 1989). A Figura 2.4 apresenta um esquema da produção de celulose, destacando especialmente o ciclo de recuperação dos agentes químicos e a geração dos resíduos sólidos.

Além dos impactos associados ao uso da madeira, o processo de produção de celulose gera quantidades significativas de resíduos sólidos inorgânicos, entre os quais se destacam as cinzas volantes, a lama de cal, os dregs e os grits (RIBEIRO, 2010). A disposição final desses resíduos frequentemente não é adequada: apenas 9,2% são destinados a aterros sanitários, 8,9% são reutilizados como matéria-prima para outros setores, e apenas 2% são reciclados (IBÁ, 2023). O resíduo grits é formado durante o processo de caustificação do licor verde, que envolve uma reação química seguida por processos físicos de separação sólido/líquido. Nesta reação, o óxido de cálcio (CaO) é dissolvido em água e reage com o carbonato de sódio (Na_2CO_3) presente no licor verde, produzindo hidróxido de sódio (NaOH) e carbonato de cálcio (CaCO_3), também conhecido como lama de cal. Este último produto é lavado para remover parte do licor residual e, em seguida, calcinado para regenerar o óxido de cálcio (FIGUEIRÊDO, 2009). Durante a caustificação formam-se os grits, elementos inertes resultantes das impurezas não reativas, como carbonatos de cálcio e magnésio, que se precipitam.

Figura 2.4: Fluxograma do processo *Kraft*, destacando a geração dos resíduos sólidos



2.2 POTENCIAL DO APROVEITAMENTO DO RESÍDUO GRITS

O resíduo grits é um material sólido, inodoro, de coloração acinzentada e granulometria variada, que abrange frações de pedregulho até partículas finas semelhantes à argila (MACHADO et al., 2007; FOELKEL, 2011). De acordo com Foelkel (2011), o resíduo é predominantemente composto por cal virgem queimada e por carbonatos inertes não hidratados, contendo altos teores de cálcio, potássio, sódio e alumínio. Devido à ampla granulometria, o grits apresenta aglomerações de partículas distintas, provenientes tanto de materiais calcários quanto de outros materiais presentes nos fornos e tanques do processo *Kraft* da produção de celulose (Ribeiro, 2010). Com base na análise dos extratos de lixiviação e solubilização, conforme NBR 10004 (ABNT, 2004), o resíduo grits foi classificado como classe II A, o que indica um material não perigoso e não inerte (SOUZA; CARDOSO, 2008; MACHADO, 2007; RIBEIRO, 2010).

Figura 2.5: Resíduo grits



Fonte: Autor

A Tabela 2.1 apresenta um resumo da composição química do resíduo grits conforme descrito por diversos autores na literatura. Destaca-se uma alta concentração de óxido de cálcio neste material, além das variações dos teores desse composto entre os diferentes estudos. É relevante destacar a presença de outros elementos, como magnésio, potássio, sódio e alumínio, que podem influenciar nas propriedades do resíduo.

Tabela 2.1: Composição química do grits

	CaO	MgO	K₂O	Na₂O	SiO₂	SO₃	Al₂O₃	Fe₂O₃	PF
Junior (2020)	53,80	0,03	0,20	-	1,00	0,60	0,50	0,20	42,80
Leite (1996)	53,00	1,80	1,20	0,10	-	-	-	-	*
Pereira (2005)	53,5	0,60	0,12	0,70	-	-	-	-	*
	35,38	0,43	0,4	0,22	-	-	-	-	*
Ribeiro (2010)	44,10	1,24	-	8,56	2,42	2,5	2,28	-	37,50
Wolff (2008)	55,60	0,5	0,04	0,45	0,46	-	0,1	0,13	41,67
Torres (2016)	83,36	0,66	0,50	2,77	5,21	0,97	0,29	1,16	#
Souza e Cardoso (2008)	95,40	-	-	-	0,78	-	-	-	#
Maia et al. (2014)	96,80	-	1,37	-	-	1,49	-	-	#
Oliveira et al. (2024)	84,43	1,23	0,21	4,63	4,95	2,11	0,34	-	#
Destefani (2010)	96,80	-	1,37	-	-	1,49	-	0,11	#

*autores não apresentaram a Perda ao Fogo (PF)

autores não consideraram a PF na composição química do grits

Fonte: Autor (2024)

O interesse no uso do resíduo grits para estabilização de solos se deve principalmente à sua composição química, com ênfase para o elevado teor de óxido de cálcio (CaO), que tem um considerável potencial para a estabilização química de solos (PEREIRA, 2005). Lima e Röhm et al. (1993) observaram que solos com granulometria fina reagem de maneira significativa à cal, promovendo trocas catiônicas que favorecem a aglomeração das partículas do solo. Esse processo melhora a trabalhabilidade, reduz a plasticidade e diminui a expansibilidade dos solos. Além disso, a adição de cal pode originar compostos estáveis com propriedades cimentantes. A introdução de cal em quantidades significativas eleva o pH da mistura, aumentando a solubilidade da sílica e da alumina presentes no solo, o que resulta na formação de compostos cimentantes (NÓBREGA, 1985). Outro ponto favorável ao reaproveitamento do resíduo grits é que ele é um subproduto não reutilizável no processo industrial da produção de celulose. Assim, seu uso na estabilização de solos oferece não apenas benefícios técnicos, mas também contribui para a gestão sustentável de resíduos industriais, reduzindo a necessidade de destinação em aterros sanitários e promovendo a economia circular.

O resíduo sólido grits é gerado na proporção de 5 kg para cada tonelada de celulose produzida (TORRES et al., 2020). Com a produção nacional de 25 milhões de toneladas de

celulose em 2022, conforme dados do IBÁ (2023), estima-se uma geração de aproximadamente 125 mil toneladas anuais desse resíduo, cuja disposição final é frequentemente em aterros sanitários. Esses números demonstram a significativa quantidade de grits disponível e evidenciam a necessidade de uma destinação adequada para minimizar os impactos ambientais.

Nesse cenário, o reaproveitamento do resíduo grits se apresenta como uma alternativa promissora para melhorar a resistência mecânica dos solos, devido às reações químicas benéficas que ocorrem na mistura (NÓBREGA, 1985; PEREIRA, 2005). Além disso, seu uso na estabilização de solos oferece uma solução sustentável, reduzindo a quantidade de resíduos destinados a aterros e promovendo uma abordagem mais ecológica e eficiente no gerenciamento de resíduos industriais.

Diversas áreas de estudos têm explorado o uso do resíduo grits em aplicações sustentáveis, como estabilização de solos, correção da acidez do solo, uso em estradas florestais e como material alternativo na construção civil. Devido ao seu elevado teor de cálcio, o grits pode servir como corretivo da acidez do solo. Maciel (2015) avaliou, ao longo de quatro meses e em ciclos de umedecimento, os atributos químicos do solo após a aplicação de uma mistura de grits, dregs e lama de cal. O autor constatou que, em dosagens adequadas, esses resíduos da celulose podem ser uma alternativa viável como fonte de nutrientes ao solo. Essa prática pode resultar no desenvolvimento de culturas com uma menor necessidade de aplicação de fertilizantes, reduzindo assim o custo final da produção sem comprometer a qualidade do solo.

Pereira (2005) investigou a viabilidade técnica do uso de resíduos grits na construção de estradas florestais. O estudo foi realizado com dois diferentes solos da Zona da Mata, MG: um solo argilo-areno-siltoso, com comportamento laterítico, e um solo areno-silto-argiloso com comportamento saprolítico. Ambos os solos são considerados inadequados para obras rodoviárias. Foram testados diferentes teores de resíduo nas misturas, variando de 0 a 28%. Os resultados mostraram que a reatividade dos solos com o resíduo grits variava conforme suas texturas granulométricas. No ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) realizado na energia Proctor intermediária e sem períodos de cura, observou-se um aumento significativo de resistência mecânica, especialmente nas misturas com o solo predominantemente arenoso. As melhores misturas para esse tipo de solo foram encontradas com adições na faixa de 12 a 28%. A resistência mecânica à compressão aumentou de forma proporcional com teores de resíduo de 4%, 8% e 12%, se mantendo estável entre os teores de 12% a 28%. Os resultados mostraram incrementos de até 190% de resistência (valores de CBR em torno de 60%) em comparação ao solo em sua forma natural (CBR=20%) para o solo arenoso. Para o solo argiloso,

os ganhos de resistência foram da ordem de 120%, especialmente com teores de 12% e 28% de grits, em comparação ao solo original (CBR=14%). Foi observado um aumento proporcional na resistência mecânica com o aumento do teor de grits até adições 12%, acima desse percentual houve pequenas diminuições no CBR. A resistência teve novamente valores superiores ao da referência com o teor de 28% de grits na mistura.

Pereira (2005) investigou o efeito do tempo de cura das misturas solo-grits na resistência mecânica. Amostras compactadas foram submetidas a diferentes períodos de cura (0, 7 e 28 dias), armazenadas em sacos plásticos dentro de uma câmara úmida, e avaliadas por ensaios de CBR e compressão não confinada (RCNC). Para o solo argiloso, os resultados de CBR mostraram que as melhores respostas foram obtidas nas misturas não curadas em câmara úmida, com valores de CBR acima de 20%. As amostras armazenadas apresentaram perdas significativas de resistência. Entretanto, houve aumentos de resistência entre os períodos de cura de 7 dias (CBR cerca 5%) e 28 dias (CBR próximos de 10%). No caso do solo arenoso, as variações dos resultados de CBR entre os diferentes períodos de cura foram menos significativos. Para o ensaio de RCNC, foram testados teores de 16%, 20% e 28% de grits nas misturas. No solo argiloso, a adição do resíduo levou a uma redução significativa na resistência. O solo original apresentou RCNC de 400 kPa para a cura de 0 dias, e as misturas com teores de resíduo de 16%, 20% e 28% obtiveram resultados na faixa de 400kPa, 280kPa e 200 kPa, respectivamente. Diferentes períodos de cura também resultaram em reduções na resistência mecânica, especialmente para o teor de 16% de grits. No entanto, para o solo arenoso, a adição do resíduo se mostrou eficaz. O solo original apresentou RCNC de 180 kPa, e as misturas de 16%, 20% e 28% de grits alcançaram resultados de 220kPa, 320kPa e 340 kPa, respectivamente, para as amostras não submetidas à câmara úmida. As amostras com 7 dias de cura apresentaram pequenas quedas na RCNC, e as amostras com maiores tempos de cura apresentaram quedas mais expressivas, porém com resultados ainda superiores ou próximos à RCNC do solo original. Ainda, o autor avaliou dois diferentes lotes do resíduo grits, com composições químicas distintas. O lote com maior teor de óxido de cálcio demonstrou maior capacidade de estabilização dos solos, resultando em maior resistência mecânica pelo CBR e menor expansão.

Machado (2003) também avaliou a viabilidade de misturas solo-grits para pavimentos de estradas florestais, incorporando 10% do resíduo em um Latossolo Vermelho-Amarelo da região de Viçosa, MG. O solo escolhido era poroso, com granulometria argilo-areno-siltosa. O estudo visava analisar a influência da incorporação do grits nas características mecânicas das misturas, considerando tratamentos térmicos do grits a 200, 300, 400, 500 e 600 °C em uma

mufla, para aumentar sua reatividade. As amostras foram compactadas na energia Proctor normal, na umidade ótima, e não foram submetidos a processos de cura. Os resultados dos ensaios de RCNC mostraram modificações significativas na resistência mecânica para todos os tratamentos térmicos analisados. O grits tratado a 600 °C destacou-se com uma resistência de 872 kPa, representando um ganho substancial em relação ao solo natural (241 kPa) e à mistura sem tratamento térmico (489 kPa). Machado (2003) comparou o resultado para o grits tratado a 600 °C com valores da literatura para estabilizantes tradicionais: 2% de cal (356 kPa) e 2% de cimento (448 kPa), evidenciando os resultados obtidos.

Machado et al. (2007) investigaram a adição de 24% de grits em dois tipos de solo: um argilo-arenoso e outro areno-siltoso, submetidos a períodos de cura de 7 e 28 dias. O resíduo grits foi tratado termicamente a 600, 700, 800 e 900 °C, e as amostras foram compactadas na energia Proctor intermediária. Os autores avaliaram a resistência mecânica dessas misturas em ensaios de RCNC. Para o período de cura de 7 dias, todas as misturas do solo argilo-arenoso com grits tratado termicamente apresentaram valores de RCNC superiores ao valor na mistura sem tratamento (189,26 kPa). Porém, somente a partir da mistura com o grits tratado a 700°C foram notados ganhos de resistência mecânica (14,57%) em relação ao solo em sua forma natural, sendo o maior incremento com o tratamento de 800°C (39%). No solo predominantemente arenoso, a RCNC do material em sua forma original (68 kPa) foi melhorada em todas as adições do resíduo. A mistura com o gris sem tratamento térmico teve resultado de 276,04 kPa, um aumento de 64,47% ao solo original. As demais amostras que envolveram grits com processos térmicos apresentaram incremento na resistência de forma proporcional ao aumento da temperatura do tratamento, destacando-se a mistura com grits processado a 800°C, na qual a RCNC foi de 828,14 kPa, aumento na ordem de 400% quando comparado ao solo em sua forma original. Quando analisado a influência do período de cura, por meio das amostras curadas a 28 dias, notou-se resposta diferentes entre os dois solos. A mistura com o solo argiloso apresentou, na maior parte dos casos, reduções em sua resistência devido ao aumento do período de cura de 7 para 28 dias, de forma mais significativa para o grits tratado a 600°C (40%). Apenas a mistura com o grits tratado a 900°C apresentou incremento na resistência mecânica quando curada a 28 dias, de cerca de 180%. A misturas com o solo areno-siltoso com cura de 28 dias, quando comparadas as misturas curadas por 7 dias, apresentaram incremento nos resultados de RCNC somente a partir da mistura com grits tratado a 700°C, sendo os maiores valores para o tratamento a 800°C (1330 kPa).

O estudo da estabilização de um solo predominantemente arenoso com adição de grits em teores de 5%, 10% e 20% foi estudado por Maia et al. (2014), por meio de ensaios de CBR e limites de consistência. O solo natural apresentou CBR de 7,07% e expansibilidade de 2,65%, sendo notado incremento nos valores de CBR e diminuição na expansão conforme o aumento do teor da adição do resíduo. A mistura de solo com 5% de grits resultou num CBR de 10,7% e expansão de 20,20%. As misturas com 10 e 20% de grits resultaram em CBR de 16,93 e 26,98%, respectivamente, enquanto a expansibilidade observada foi 1,13 e 0,9%, respectivamente. Com relação aos limites de consistência, o solo natural teve um Índice de Plasticidade (IP) de 16,90, a mistura com 5% de resíduo resultou em um aumento de IP para 20,28, enquanto as misturas com 10 e 20% de grits resultaram em 14,15 e 8,85, respectivamente.

O uso dos resíduos sólidos dregs e grits em materiais cerâmicos foi estudado por Ribeiro (2010). O autor concluiu que é possível incorporar esses resíduos em argilas comuns utilizadas para a fabricação de produtos de cerâmica vermelha ou estrutural, como tijolos, blocos e telhas cerâmicas. A adição de 10% de resíduo foi a mais eficiente, promovendo a diminuição da porosidade, aumento da massa específica aparente, formação de uma maior quantidade de fase vítrea no material queimado, redução na absorção de água, assim como no aumento na resistência mecânica. O autor destacou que o potencial uso desses resíduos em massas cerâmicas deve-se aos elevados teores de elementos fundentes, particularmente o cálcio, e pequenos teores de outros metais (inclusive o ferro).

Siqueira (2013) concluiu que a incorporação do resíduo sólido grits em tijolos de solo-cimento pode ser utilizada como alternativa de matéria-prima de baixo custo, substituindo parcialmente o cimento em até 25%. As misturas desenvolvidas pelo autor demonstraram valores de resistência à compressão e absorção de água dentro das faixas estabelecidas pelas normas pertinentes à produção de tijolos de solo-cimento.

Zanella et al. (2019) estudaram a viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso do composto dregs-grits como substituto parcial do agregado miúdo na produção de argamassas de revestimento. As argamassas demonstraram potencial de uso com substituições de até 20%, apresentando pequenas perdas de resistência à compressão, especialmente nas misturas com maiores teores de dregs-grits. No entanto, a resistência à aderência das argamassas contendo o composto foi superior à da referência analisada.

2.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS

Lambe e Whitman (1969) definem a resistência ao cisalhamento dos solos como sendo a máxima tensão cisalhante (τ) que esses materiais podem suportar antes da ruptura, ou ainda como a tensão de cisalhante no plano de ruptura no momento da ruptura. A ruptura de um solo pode ser caracterizada como um deslocamento relativo excessivo entre as partículas. Na ausência de um plano de ruptura definido, a ruptura pode ser compreendida em termos de uma máxima deformação admissível (GERSCOVICH, 2016). Embora existam diferentes tipos de ruptura, o solo geralmente é superado em sua resistência ao cisalhamento, e rupturas por tensões de tração ocorrem apenas em condições especiais (PINTO, 2006).

A compreensão do fenômeno do cisalhamento é essencial para a análise de problemas em engenharia de solos e fundações, tais como a estabilidade de taludes, estruturas de contenção de solo e a capacidade de carga de uma fundação. De acordo com Gerscovich (2016), a capacidade dos solos em resistir aos esforços de cisalhamento deriva da interação entre os grãos e da interferência do arranjo estrutural do solo, conhecida como imbricamento. A resistência pela interação entre as partículas é atribuída ao atrito e à coesão entre os grãos, sendo esta última resultado das ligações físico-químicas entre as partículas.

A resistência por atrito entre os grãos está vinculada ao contato físico entre eles, às características friccionais e ao atrito nas superfícies de contato, que dificultam o deslocamento relativo entre as partículas. Essa resistência é diretamente proporcional ao ângulo de atrito interno do solo (ϕ) e ao esforço normal ao plano de ruptura (σ) (BOSZCZOWSKI, 2023). Portanto, quanto maior o esforço normal ao plano, maior será o esforço cisalhante necessário para causar a ruptura. O ângulo de atrito é definido como o maior ângulo que a força cisalhante pode formar com a força normal à superfície de contato sem que ocorra um plano de ruptura (FIORI; CARMIGNANI, 2009). Este ângulo é um parâmetro que depende da densidade do solo, da forma e tamanho dos grãos, bem como do tipo de argilomineral constituinte.

A coesão no solo pode originar-se da atração química entre as partículas, da cimentação entre os grãos (proporcionada por carbonatos, sílica e óxidos presentes no contato entre as partículas), das tensões superficiais geradas pelos meniscos capilares e das tensões residuais da rocha matriz (PINTO, 2006). A coesão é uma parcela da resistência que independe da tensão normal atuante no plano. É esse parâmetro que permite a formação de torrões e blocos de solo, bem como a execução de taludes verticais.

Caputo (1996) salienta a diferença entre coesão aparente e coesão real. A coesão aparente é atribuída aos solos não saturados e baseia-se na tensão superficial da água nos poros do solo (meniscos capilares). Este parâmetro está vinculado à sucção matricial e depende do grau de saturação do material, desaparecendo em estado de saturação, sendo um aspecto de grande importância na mecânica de solos não saturados. Por outro lado, a coesão real (ou específica) está vinculada às forças eletroquímicas de atração entre as partículas. Dessa forma, é possível diferenciar os solos em coesivos, que apresentam valores de coesão (geralmente solos argilosos e solos cimentados), e solos não coesivos, geralmente solos arenosos não cimentados, nos quais toda a resistência pode ser atribuída ao atrito.

O imbricamento, conforme definido por Gerscovich (2016), refere-se ao esforço adicional necessário para mover uma partícula de forma ascendente sobre outra durante um deslocamento relativo entre partículas. Em solos mais densos, com menor número de vazios, é necessária mais energia para provocar um deslizamento horizontal entre as partículas. Isso ocorre porque há uma tendência de expansão volumétrica durante o cisalhamento, resultante do movimento ascendente de uma partícula sobre outra, o que aumenta a resistência do solo.

O estudo da resistência ao cisalhamento de areias e argilas apresenta diversas distinções. Ao contrário das areias, a análise de forças cisalhantes em solos argilosos é mais complexa. Conforme Pinto (2006), as forças transmitidas nos contatos entre os grãos de areia são geralmente suficientemente grandes para expulsar a água da superfície das partículas, permitindo um contato real entre os grãos. Entretanto, nas argilas, as partículas são muito menores e mais numerosas, resultando em uma força de contato extremamente reduzidas. As partículas de argila possuem uma película de água quimicamente adsorvida, e a tensão de contato não é suficiente para remover essa película. Segundo Caputo (1996), essa característica implica que a resistência das argilas dependa de fatores como a velocidade de carregamento, as condições de drenagem e o estado de adensamento do solo.

2.4 CRITÉRIO DE RUPTURA DE MOHR-COULOMB

Segundo Pinto (2006), os critérios de ruptura são formulações destinadas a descrever as condições de ruptura dos materiais. Existem diversas metodologias para estabelecer cenários de ruptura, baseadas em critérios de tensões máximas, deformações máximas ou energias de deformação. Cada cenário requer uma abordagem específica que seja capaz de representar com

precisão o comportamento real dos materiais. De acordo com Gerscovich (2016), independentemente do critério adotado, o conceito central reside na utilização de uma envoltória de resistência. Esta envoltória é definida como um lugar geométrico dos estados de tensão na condição de ruptura. Assim, estados de tensão abaixo da envoltória representam condições de estabilidade, enquanto um estado de tensão que coincidem com a envoltória caracterizam um cenário de ruptura.

Na geotecnia, o critério de Mohr-Coulomb é o mais comumente adotado, pois lineariza a envoltória de Mohr, que originalmente tem uma forma curva. Nesse critério, a ruptura é determinada pela combinação das tensões normal e cisalhante, sendo definida pelo valor máximo da tensão cisalhante do material (GERSCOVICH, 2016). A envoltória de resistência é estabelecida a partir de resultados de ensaios experimentais, como ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais.

No caso dos ensaios de cisalhamento direto, foco deste estudo, a curva de Mohr-Coulomb é construída a partir dos pontos coordenados $(\sigma, \tau_{\text{máx}})$, ajustando-se uma função linear que melhor envolva as tensões de rupturas determinadas experimentalmente. O coeficiente angular dessa função linear representa o ângulo de atrito e o termo independente caracteriza o intercepto coesivo (c) do solo analisado, conforme Equação 01 (BOSZCZOWSKI, 2023).

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (01)$$

Em um solo saturado, o critério de ruptura de Mohr-Coulomb é expresso em termos de tensões efetivas (Equação 02), uma vez que a tensão normal em um ponto é dada pelo somatório da tensão efetivo (σ') e da poropressão (μ).

$$\tau = c' + \sigma' \tan' \phi \quad (02)$$

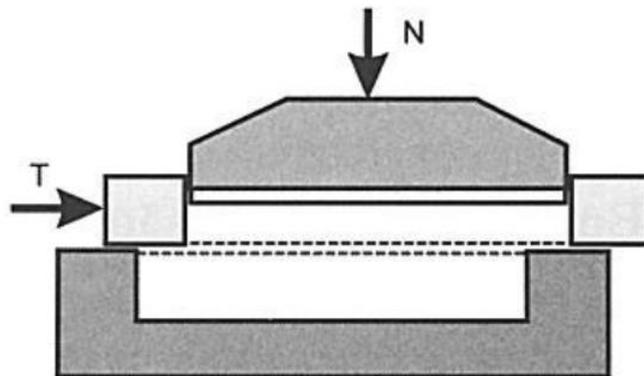
Assim, as Equações 01 e 02 expressam a resistência ao cisalhamento do solo com base em tensões totais e tensões efetivas, respectivamente. Os parâmetros estimados pela envoltória de Mohr-Coulomb variam conforme as condições de drenagem, a velocidade de ensaio (especialmente relevante para argilas), a direção do ensaio (solos anisotrópicos), a trajetória de tensões e a compacidade da amostra (GERSCOVICH, 2016). Para determinar a envoltória de

resistência com base em ensaios de cisalhamento direto são necessários pelo menos três resultados com distintas tensões normais.

2.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de cisalhamento direto é uma das metodologias mais antigas e simples para estimar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, tais como a coesão e o ângulo de atrito, conforme o critério de Coulomb (BOSZCZOWSKI, 2023; PINTO, 2006). Neste ensaio, uma amostra de dimensões conhecidas é confinada lateralmente dentro de uma caixa de cisalhamento quadrada e bipartida, cujas metades superior e inferior são independentes e sobrepostas. Aplica-se uma tensão cisalhante a uma das partes da caixa, enquanto a outra metade é mantida fixa, provocando um deslocamento no conjunto e impondo um plano de ruptura horizontal predefinido. Durante o ensaio, a amostra é submetida a uma tensão normal constante neste plano, como representa Figura 2.6.

Figura 2.6: Esquema da caixa de cisalhamento

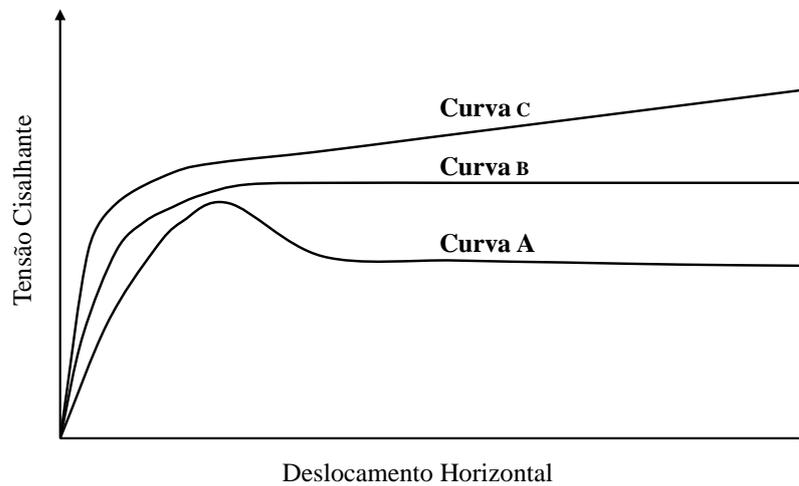


Fonte: Pinto (2006)

Abramsom et al. (2002) afirmam que a resistência mobilizada no ensaio de cisalhamento direto representa a média entre os ensaios de compressão triaxial e a extensão triaxial desenvolvidos em uma superfície potencial de ruptura. A resistência ao cisalhamento do solo é medida em intervalos de deformação horizontal, resultando em valores de τ em função do deslocamento. Assim, é possível construir uma curva de tensão cisalhante *versus* deslocamento

horizontal. Nestas curvas, há diferentes variações típicas de ruptura que um solo pode apresentar após ensaio de cisalhamento direto, conforme ilustra a Figura 2.7.

Figura 2.7: Típicas curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal do ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Adaptado de Cheng et al. (2019)

A curva “A” apresenta a ruptura quando o solo atinge a tensão máxima que pode suportar, a tensão de pico ($\tau_{\text{máx}}$). Após a resistência máxima, há uma queda drástica da tensão cisalhante (ruptura frágil), chamada de pós pico. Esta tensão tende a se estabilizar, até atingir uma tensão cisalhante residual (τ_{res}). A resistência residual, ou última, é o valor mínimo de resistência ao cisalhamento que o solo apresenta na condição drenada, ocorrendo após longos deslocamentos, condição não alcançado em ensaios de cisalhamento direto convencionais. Diferentemente da resistência de pico, a resistência residual é uma propriedade inerente do solo, pois está relacionada às suas características de composição e origem, e não às condições impostas (BOSZCZOWSKI, 2023).

Outra curva típica de solos obtida no ensaio de cisalhamento direto é ilustrada pela curva “B”, um material com comportamento do tipo dúctil, uma vez que o solo atinge uma tensão cisalhante máxima e essa se mantém constante frente ao deslocamento (CHENG et al., 2019).

A curva “C”, entretanto, não apresenta uma tensão cisalhante máxima definida, sendo caracterizada por rupturas plásticas. A curva apresenta crescimentos dos valores de resistência mesmo após uma suposta ruptura. Este comportamento é chamado de *strain hardening*, uma vez que existe um enrijecimento do material. Como não há um valor definido de ruptura, usam-

se métodos de adaptação da curva tensão de cisalhamento *versus* deslocamento para definir os valores a serem usados na construção da envoltória de resistência (FEUERHARMEL, 2006).

O conhecimento das propriedades da resistência residual é fundamental para análises de taludes com rupturas preexistentes e na avaliação de depósitos sedimentares que apresentam fissuras e/ou falhas. A resistência de pico é representativa de solos que não sofreram grandes deformações, sendo geralmente mobilizada na primeira ruptura de um maciço. Ademais, o deslocamento vertical durante o ensaio é uma informação importante, pois permite avaliar se houve dilatação ou contração do volume da amostra.

O ensaio de cisalhamento direto é realizado sempre em condições drenadas. Quando a amostra está inundada, deve-se garantir a drenagem por meio da aplicação de velocidades de cisalhamento baixas, a fim de evitar a ocorrência de excessos de poropressão durante o cisalhamento, obtendo, assim, parâmetros de resistência efetivos. Segundo Boszczowski (2023), o ensaio de cisalhamento direto se destaca pela sua simplicidade em termos de preparo, execução e estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo. Entretanto, a autora também aponta que uma limitação do ensaio é a imposição de um plano de ruptura horizontal predefinido, que pode não coincidir com o plano de maior fraqueza, especialmente em solos não homogêneos e anisotrópicos.

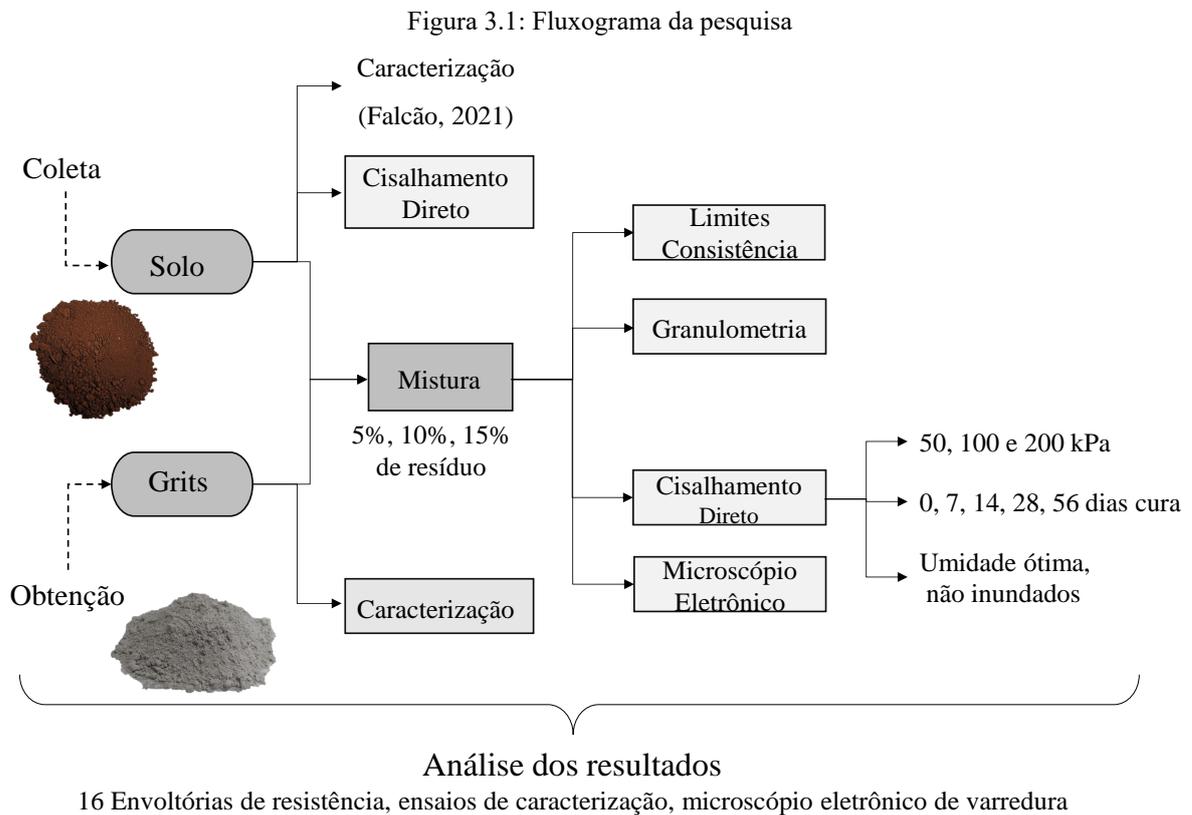
O ensaio de cisalhamento direto não possui normas brasileiras. Assim, as referências são buscadas em normativas internacionais, como a *American Society for Testing and Materials* - ASTM, especificamente a norma D3080 (ASTM, 2023), e a norma britânica BS 1377-7 (BS, 1990). A partir da realização de ensaios de cisalhamento direto com variadas tensões normais, obtêm-se a envoltória de resistência e a estimativa dos parâmetros de resistência do solo, sempre em condições drenadas, tanto para a resistência de pico quanto para a resistência residual (BOSZCZOWSKI, 2023).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo aborda as informações sobre os materiais e os equipamentos que foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Ademais, engloba a etapa de laboratório, com a preparação dos corpos de prova e os ensaios realizados.

3.1 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

A organização da pesquisa está esquematizada no fluxograma apresentado na Figura 3.1.



Fonte: Autor (2024)

A primeira parte da pesquisa consiste na definição do tema e dos materiais a serem utilizados. Assim, a partir do solo e do resíduo industrial escolhidos, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais ou a busca na literatura por caracterizações existentes.

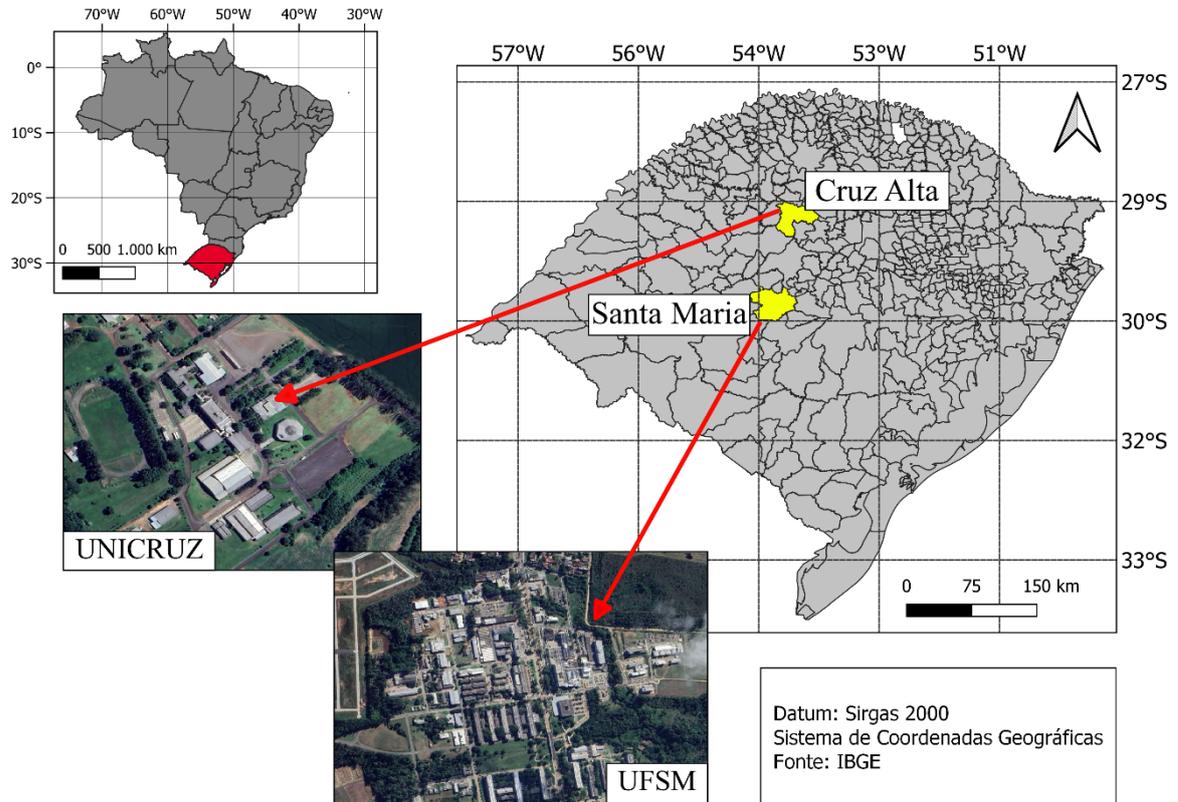
A segunda etapa refere-se aos ensaios de cisalhamento direto. Nestes, foram estudadas as diferentes porcentagens da mistura solo-grits (5,10 e 15% de resíduo), como também as variadas idades de cura das amostras (0, 7, 14, 28 e 56 dias), obtendo as envoltórias de resistência para cada cenário criado. Os ensaios foram realizados na condição de umidade ótima, não inundados, para as tensões normais de 50,100 e 200 kPa. Salienta-se que o material compactado na umidade ótima não apresenta a maior resistência, mas sim a maior estabilidade frente as variações de umidade (LAMBE; WHITMAN, 1969). Com isso, buscou-se entender o comportamento de materiais compactados na umidade ótima e ensaiados com esta umidade constante frente a resistência ao cisalhamento. Também foram realizadas análises das misturas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o intuito de analisar em nível microscópico os efeitos da adição do resíduo ao solo.

Por final, foi elaborada a etapa referente a comparação entre os resultados obtidos. Foram identificados os principais fatores que exerceram influência sobre a resistência ao cisalhamento da mistura, avaliando a viabilidade do emprego do resíduo grits como estabilizante para o solo em estudo.

3.2 SOLO EM ESTUDO

O material escolhido para a realização deste estudo é um solo proveniente do município de Cruz Alta, na região centro-oeste do estado do Rio Grande do Sul. A coleta foi realizada no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica no campus da Universidade de Cruz Alta (UNICRUZ). Foram coletadas amostras deformadas no primeiro metro de profundidade abaixo da superfície do terreno, as quais foram transportadas até as dependências do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria (LMCC/UFSM), onde foram acondicionadas em local adequado, protegidas de intempéries. A Figura 3.2 representa os locais de coleta e da realização dos ensaios.

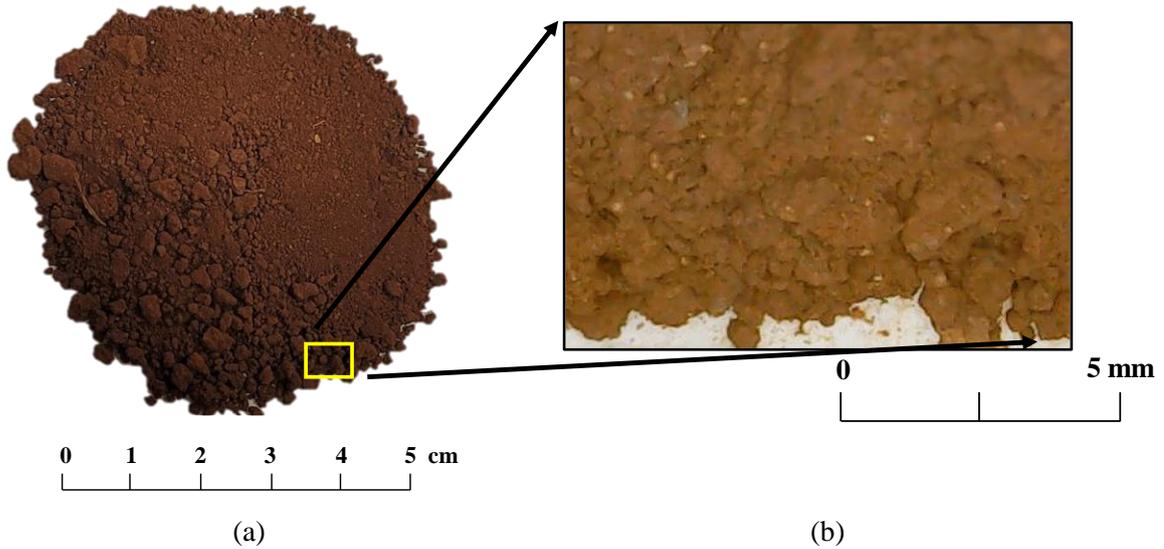
Figura 3.2: Locais da coleta do solo e destinação para a realização dos ensaios



Fonte: Autor (2024)

A caracterização geotécnica do solo foi realizada previamente por Falcão (2021; 2023). A análise granulométrica seguiu a NBR 7181 (ABNT, 2016), e a determinação do peso específico real dos grãos foi baseada na NBR 6458 (ABNT, 2016). Para os limites de Atterberg, os procedimentos adotados foram conforme as descrições da NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016). Também foram realizados ensaios de compactação na energia Proctor normal, visando obter a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo, conforme NBR 7182 (ABNT, 2016). Adicionalmente, foi feita uma análise química, uma análise por Difração de Raio X (DRX) e a classificação pela metodologia MCT, conforme normas ME 256 (DNER, 1994) e ME 258 (DNER, 1994). A Figura 3.3 apresenta o solo em estudo.

Figura 3.3: Solo usado: (a) escala real em centímetros e (b) escala microscópica



Fonte: Autor (2024)

A Tabela 2 apresenta a síntese das características físicas e químicas do solo, bem como a classificação pela metodologia analisada. O material possui uma textura argilosa de coloração vermelha, comportamento laterítico e alta porosidade, com um peso específico *in situ* médio de $14,16 \text{ kN/m}^3$. De acordo com a granulometria, o solo é classificado como argila areno-siltosa, apresentando alta plasticidade (Índice de Plasticidade: $IP=16,0\%$), conforme resultados dos limites de Atterberg. Essa elevada plasticidade está em concordância com a alta porcentagem de finos, contendo aproximadamente $65,0\%$ de argila e $16,0\%$ de silte. O peso específico real dos grãos ($27,32 \text{ kN/m}^3$) e sua coloração vermelha são explicados pela presença significativa de óxidos de silício ($34,73\%$), óxidos de ferro ($26,71\%$) e óxidos de alumínio ($19,68\%$), conforme análise química.

A classificação pela metodologia MCT identificou o solo como pertencente ao grupo LG' (argila com comportamento laterítico), indicando boa capacidade de suporte e baixo coeficiente de permeabilidade quando compactado. A análise química, juntamente com a análise de difração e raios-x, indicou que o material é constituído pelos argilominerais caulinita e gipsita. Essa composição revela que o solo possui agregações cimentícias devido ao revestimento das partículas por óxidos, conferindo características como boa resistência quando compactado, mas susceptibilidade à presença de água.

Tabela 3.1: Caracterização física, química e mecânica do solo

Distribuição granulométrica (%)	
Areia (>0,075 mm)	19,0
Silte (0,075-0,005 mm)	16,0
Argila (<0,005 mm)	65,0
Limites de Atterberg (%)	
Limite de Liquidez (LL)	46
Limite de Plasticidade (LP)	30
Índice de Plasticidade (IP)	16
Curva de Compactação	
Peso Específico aparente seco máximo (kN/m ³)	15,70
Umidade ótima (%)	23,27
Metodologia MCT	
Classificação	LG'
Difração Raio-X	
Minerais	Caulinita e Gipsita
Composição Química (%)	
SiO ₂	34,73
Fe ₂ O ₃	26,71
Al ₂ O ₃	19,68
Na ₂ O	8,70
Outros	10,18

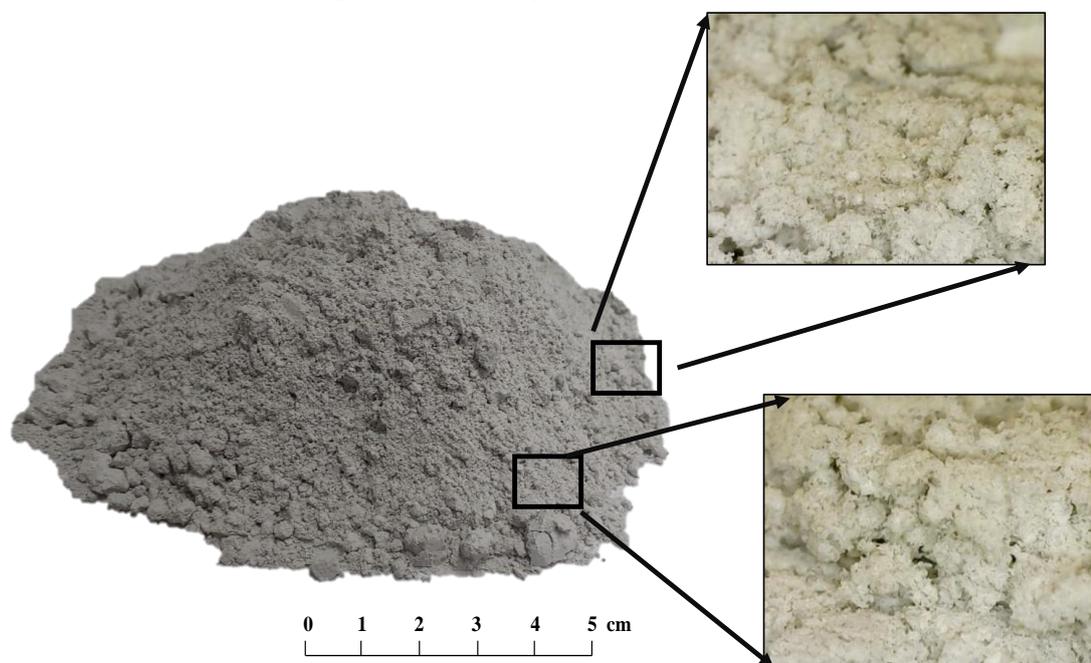
Fonte: Adaptado de Falcão (2021; 2023)

3.3 RESÍDUO GRITS

O resíduo utilizado nessa pesquisa foi proveniente de uma fábrica de celulose da região sul do Brasil. A coleta do material foi realizada pelos funcionários da fábrica, sendo este armazenado em sacos plásticos e encaminhado para o LMCC/UFSM. As amostras do resíduo foram homogeneizadas e moídas em um moinho de bolas por 1 hora. As bolas selecionadas foram de tamanhos diferentes a fim de preencher os vazios entre elas. Após este processo, a fração usada do grits foi a passante na peneira n° 100 (abertura de 0,15 mm). Em função do tamanho das partículas, e para uma análise detalhada da distribuição destas, foi realizado ensaio de granulometria a laser. Também foi avaliado as características térmicas da composição

química do material por meio do ensaio por termogravimetria. Essas avaliações foram essenciais para determinar a adequação do grits como agente estabilizante e para auxiliar na compreensão de sua influência nas propriedades mecânicas do solo.

Figura 3.4: Resíduo grits usado no estudo



Fonte: Autor (2024)

3.4 MISTURA SOLO-GRITS

O solo foi preparado inicialmente de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016), sendo previamente secado ao ar até atingir a umidade higroscópica. Em seguida, o material foi destorroado, peneirado (passante na peneira nº 10, abertura de 2 mm) e homogeneizado, conforme as recomendações de cada ensaio em específico. O resíduo grits, após peneirado, foi acondicionado em sacos plásticos e mantido em ambiente protegido.

Como forma de padronização para este estudo, a mistura solo-grits foi realizada aguardando-se 1 hora antes de prosseguir com a realização dos ensaios em questão. Visando uma melhor identificação das diferentes misturas, será adotado as seguintes nomenclaturas: solo com adição de 5% de grits (S5G), solo com adição de 10% de grits (S10G) e solo com adição de 15% de grits (S15G).

As misturas solo-grits foram compactadas na energia Proctor normal. A obtenção dos resultados das curvas de compactação baseou-se nos estudos de Prior (2025, no prelo). O autor

avaliou as curvas de compactação do solo em questão com adições de grits de 5%, 10% e 15%. Os valores da umidade ótima ($W_{ót}$) e do peso específico aparente seco máximo para cada mistura estão reunidas na Tabela 3.2, juntamente com os resultados da curva de compactação do solo obtido por Falcão (2023). A partir desses valores, foram calculadas as quantidades de materiais necessários para as moldagens dos corpos de prova compactados necessários para a presente pesquisa.

Tabela 3.2: Resultados das curvas de compactação do solo e das misturas solo-grits

	Solo	S5G	S10G	S15G
Peso específico aparente seco máximo (kN/m^3)	1570	1630	1625	1620
Umidade ótima (%)	23,27	21,90	22,10	22,5

Fonte: Adaptado de Falcão (2023) e Prior (2025, no prelo)

3.4.1 Ensaios de Limites de Atterberg

Os ensaios de limites de Atterberg, compostos pelo Limite de Liquidez (LL) e pelo Limite de Plasticidade (LP), proporcionam um maior conhecimento sobre o comportamento dos finos presentes no material. Estes métodos buscam determinar os limites de consistência dos solos, ou seja, indicam os limites do seu estado físico, que estão diretamente relacionados ao teor de umidade. O LL está vinculado com o valor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico, descrito pela NBR 6459 (ABNT, 2016). O LP representa o teor de umidade com que o solo passa do seu estado plástico para o semi-sólido, normatizado pela NBR 7180 (ABNT, 2016). O IP é dado pela diferença entre os valores de LL e LP. Para a presente pesquisa, realizou-se os ensaios de limites de Atterberg para os três teores das misturas.

3.4.2 Ensaios de Análise Granulométrica

A análise granulométrica das misturas solo-grits foi executada tendo como base a NBR 7181 (ABNT, 2016). Devido as dimensões dos grãos presentes, o ensaio foi realizado por

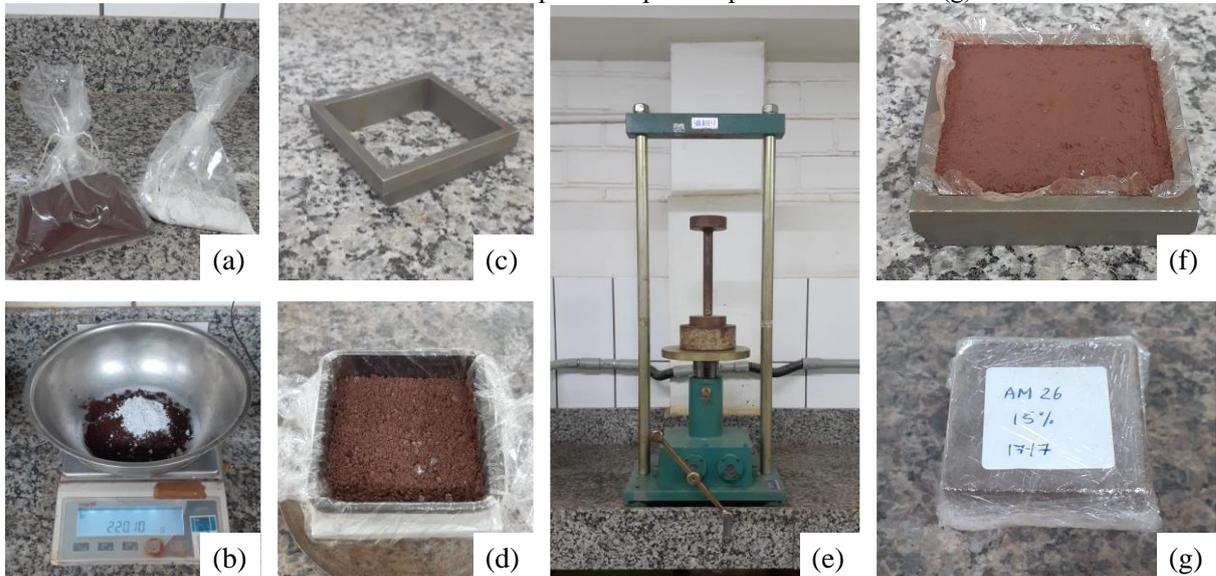
peneiramento e sedimentação. Após a execução dos ensaios das três porcentagens de solo-grits, foram geradas as curvas granulométricas representando graficamente as frações das misturas.

3.4.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

Para a compactação das amostras dos ensaios de cisalhamento direto, o solo, após peneirado, foi previamente homogeneizado com um teor de umidade próximo da umidade ótima das misturas, obtida a partir das curvas de compactação, e mantido em sacos plásticos por um período mínimo de 24 horas, para garantir sua homogeneização. Após, a mistura solo-grits foi realizada, sendo adicionado o restante de água até que fosse atingido o teor de umidade ótima previamente calculada. As porções das misturas foram acondicionadas em sacos plásticos, respeitando o tempo de 1 hora antes da compactação das amostras, e de cada porção era aferida a umidade para garantir o controle da compactação. Para os corpos de prova apenas de solo, seguiu-se com a mesma metodologia, apenas sem o acréscimo do resíduo e sem o tempo de cura antes da compactação.

As amostras foram compactadas sob a energia Proctor normal, diretamente no molde do equipamento de cisalhamento, com dimensões 6 cm x 6 cm x 2 cm (comprimento x largura x altura), com auxílio de um compactador semi-estático. Após a compactação, as amostras eram removidas do molde, sendo pesadas e anotadas suas dimensões (para controle de compactação) embrulhadas em plásticos filme, e guardadas dentro de uma caixa de isopor durante os determinados períodos de cura, a fim de se evitar a perda ou ganho de umidade das misturas

Figura 3.5: Preparação do material a ser compactado em (a) e (b), molde para compactação em (c), mistura solo-grits no molde em (d), compactador semi-estático em (e), amostra compacta no molde em (f), amostra identificada e embrulhada para o respectivo período de cura em (g)

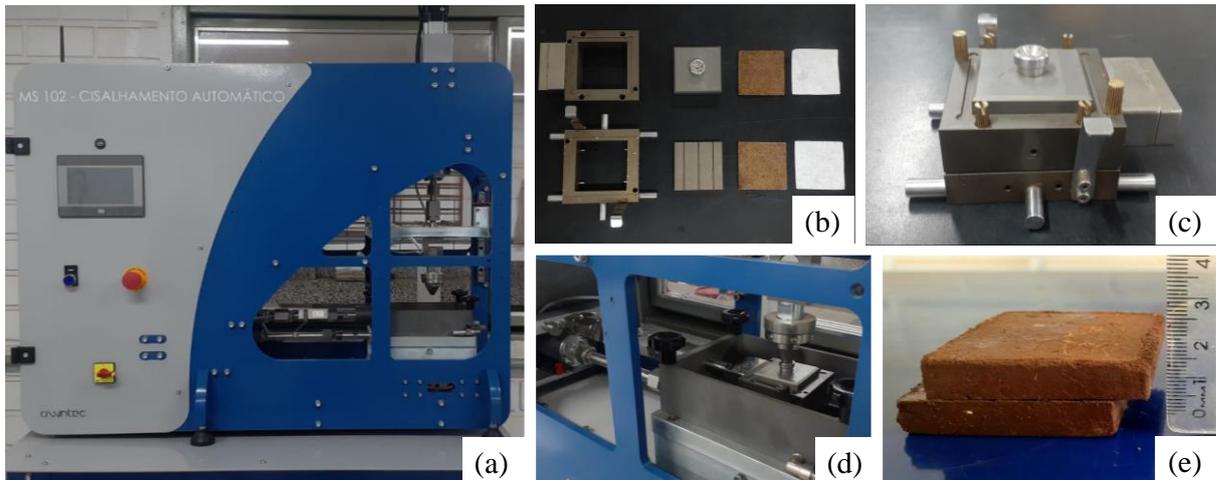


Fonte: Autor (2024)

Os ensaios de cisalhamento direto foram executados conforme procedimento da D3080 (ASTM, 2023). O equipamento utilizado para a execução dos ensaios foi o Cisalhamento Automático MS102, produzido pela empresa Owntec Soluções para Geotecnia e Engenharia, apresentado na Figura 3.6. As envoltórias de resistência foram definidas a partir de ensaios de tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, em condições não inundadas. A velocidade de cisalhamento foi de 0,2 mm/min, o que corresponde a uma taxa de deformação constante de 0,333 %/min, com uma deformação cisalhante total de 12 mm (20% do tamanho do corpo de prova).

A definição da envoltória de resistência foi com base nas tensões cisalhantes máximas observadas e, para as curvas que não apresentaram uma ruptura frágil, ou seja, com tensão cisalhante de pico evidente, foi definido a utilização da tensão cisalhante correspondente ao deslocamento horizontal de 3 mm, comumente adotada para essas condições (VANAPALLI; FREDLUND, 2002).

Figura 3.6: (a) Equipamento para a realização do ensaio de cisalhamento direto; (b); (c) caixa de cisalhamento bipartida; (d) ensaio em andamento; (e) amostra pós ensaio



Fonte: Autor (2024)

Com relação às tensões normais dos ensaios, foi definido que essas seriam aplicadas em estágios de incremento de carga até atingir a tensão normal requerida, conforme demonstra a Tabela 3.3. Após o último incremento de carga, a amostra era submetida a um período de adensamento mínimo de 40 minutos sob a tensão normal de ensaio, sendo também respeitado até que a altura do corpo de prova estabilizasse. Após verificada essa estabilização, avançava-se finalmente para o estágio de cisalhamento. Esta abordagem teve o intuito de não causar amolgamentos nas amostras com incrementos abruptos de tensões nos níveis mais elevados.

Tabela 3.3: Períodos de aplicações de tensões normais na fase de consolidação das amostras

Estágios de tensões (kPa)	Tensão normal do ensaio (kPa)		
	50	100	200
	Tempo de consolidação (minutos)		
12,5	20	20	20
25	20	20	20
50	40	20	20
100	-	40	20
200	-	-	40

Fonte: Autor (2024)

3.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

O comportamento dos solos está diretamente influenciado pela estrutura que este apresenta. A resistência, a deformabilidade e a permeabilidade são exemplos das consequências do arranjo das partículas presentes no material. O processo de compactação é causador de uma reordenação intensa da estrutura do solo, tornando-a muito complexa. Todo esse processo é dependente de fatores como a origem do solo, o método e a energia de compactação, o teor de umidade do solo, entre outros. Com base nisso, para um melhor estudo e entendimento da estrutura microscópicas da mistura solo-grits compactada foram realizadas análises por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

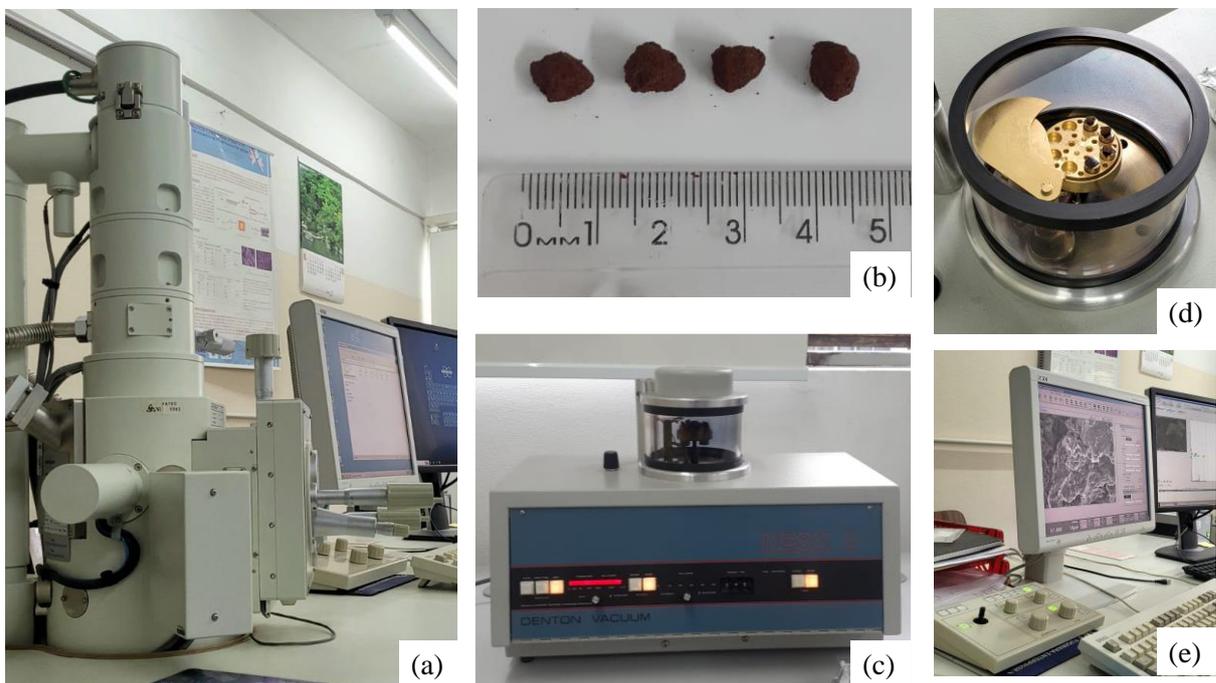
O uso do microscópio eletrônico de varredura permite a obtenção de imagens de alta resolução e amplificação da superfície de uma amostra, mantendo a aparência tridimensional característica. Assim, este equipamento permite uma avaliação valiosa sobre a estrutura superficial do solo, possibilitando o estudo de minerais específicos presentes e suas aglomerações com as partículas do solo. Com a análise dessas aglomerações, é possível correlacionar os resultados com propriedades encontradas em ensaios de resistência, deformabilidade e permeabilidade, por exemplo. O princípio de funcionamento do MEV se dá na utilização de um feixe de elétrons que incide sobre a amostra, sendo detectadas e captadas as respostas desse feixe e convertidas em imagens. As amostras analisadas por este microscópio recebem previamente uma camada fina de um material condutor (ouro) que irá facilitar a interação do feixe de elétrons sobre as partículas do material.

Para a realização dessas análises, foi compactado um CP para cada teor de solo-grits, além de um CP de solo. As condições de compactação seguiram as mesmas descritas no item 3.4. A partir dessas amostras compactadas foram extraídas porções com dimensões de aproximadamente 5 mm x 5 mm x 5mm, as quais foram reservadas em local protegido para não entrarem em contato com outros materiais. O período compreendido entre a compactação e a análise microscópica foi de 7 dias, sendo que nas 24 horas antecedentes ao MEV as amostras foram deixadas numa estufa a 60°C. Ressalta-se que durante a extração dos fragmentos do solo dos CPs compactados foram tomados os devidos cuidados para que se evitasse que as faces destes fossem lapidadas, buscando que se mantivesse a estrutura natural do solo compactado quando quebrado.

As análises do MEV foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSM, com o microscópio eletrônico JEOL JSM-

6360. As amostras de solo-grits e a amostra de solo foram fixadas numa base metálica e levadas para uma câmara de vácuo, onde foram submetidas à metalização com ouro. Em seguida, elas foram postas dentro do microscópio eletrônico e capturadas diferentes imagens com ampliações de 100x, 500x, 1000 e 3000x. Em posse desses resultados, buscou-se a análise da microestrutura das amostras, com foco nos microporos e nos macroporos, no rearranjo das partículas, e nas aglomerações formadas pela mistura solo-grits com diferentes teores de resíduo.

Figura 3.7: (a) microscópio eletrônico de varredora; (b) amostras extraídas; (c) (d) metalização das amostras; (e) obtenção das imagens ampliadas



Fonte: Autor (2024)

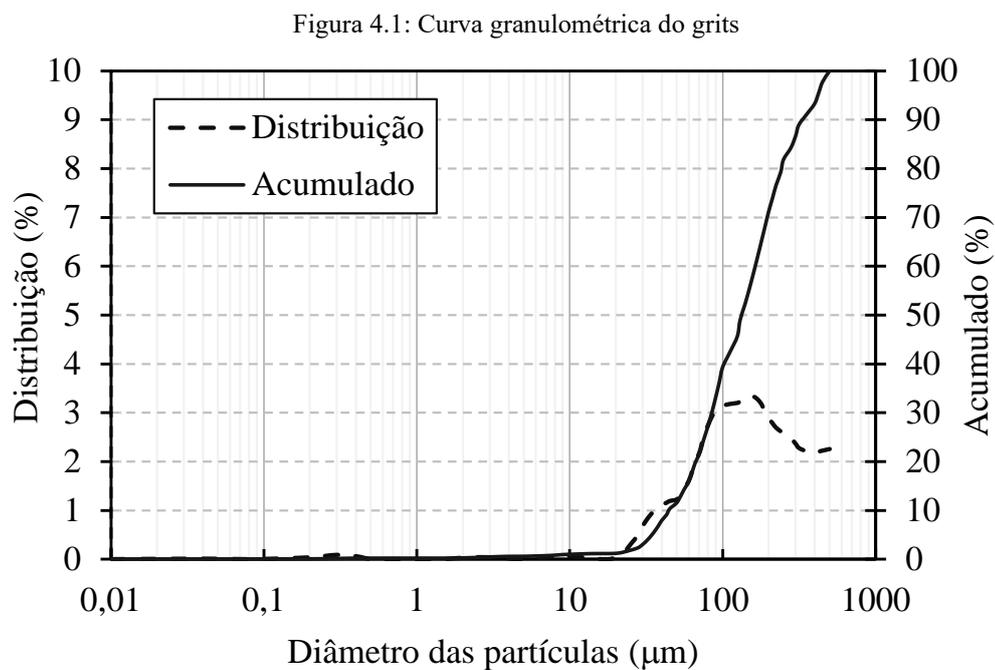
4. RESULTADOS E ANÁLISES

Esta seção apresenta todos os resultados deste estudo, conforme metodologias descritas no Capítulo 3. Inicialmente, serão apresentados os componentes referentes aos resultados da caracterização dos materiais. Posteriormente são expostos os resultados dos ensaios de cisalhamento direto e as análises de microscopia eletrônica de varredura das misturas solo-grits.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.1.1 Análise do resíduo Grits

A Figura 4.1 ilustra o resultado da curva granulométrica do resíduo grits, por meio do ensaio de granulometria a laser, sendo possível observar as distribuições dos tamanhos das partículas, destacando as frações finas dessas ($<1000 \mu\text{m}$). Na Tabela 4.1 está apresentado os parâmetros físicos do resíduo, sendo que o diâmetro equivalente médio ($D_{\text{médio}}$) das partículas de grits foi de $176,83 \mu\text{m}$.



Fonte: Autor (2024)

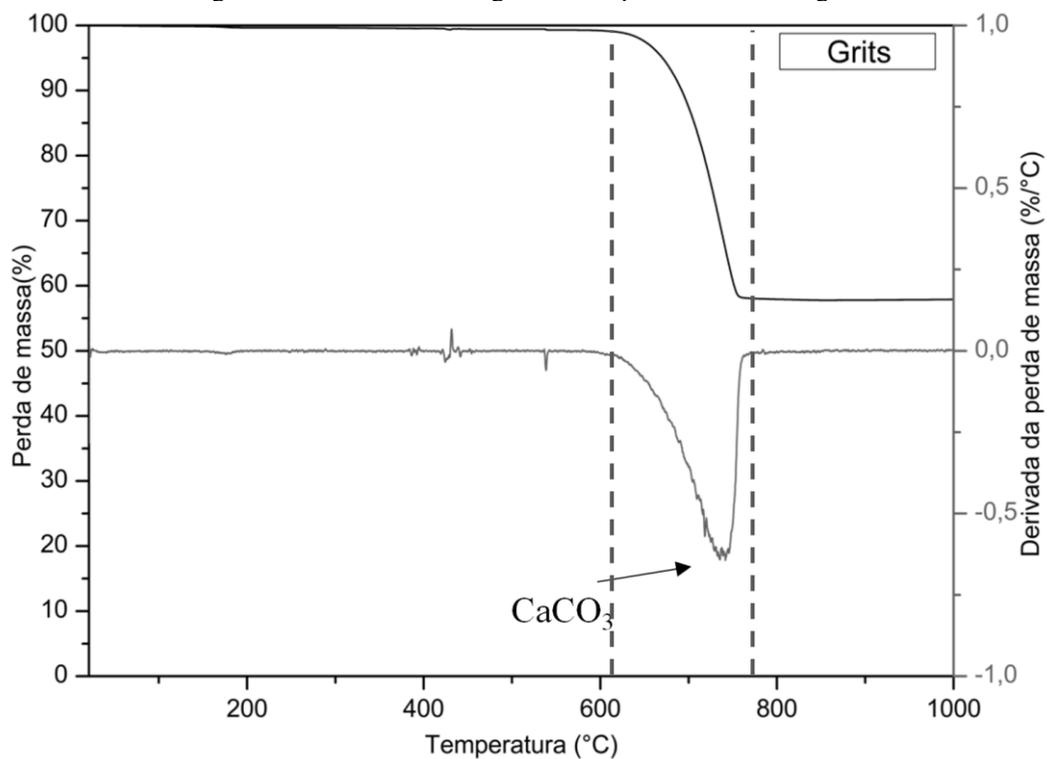
Tabela 4.1: Características físicas do grits

Grits		
Granulometria a laser	D ₁₀ (μm)	45,91
	D ₅₀ (μm)	133,87
	D ₉₀ (μm)	364,81
	D _{médio} (μm)	176,83

Fonte: Autor (2024)

A Figura 4.2 apresenta o resultado da curva termogravimétrica do grits. Os resultados indicaram que ocorreu uma perda de massa de alta magnitude entre as temperaturas de 600 a 800 °C. Estima-se que essa seja oriunda da decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃), já que o resíduo é composto majoritariamente por CaO (TORRES, 2016; SOUZA; CARDOSO, 2008; MAIA et al., 2014; OLIVEIRA,2024; DESTEFANI, 2010). Posto isso a perda de massa do carbonato de cálcio se situou-se em torno de 93,0%.

Figura 4.2: Curvas de termogravimetria para a amostra de grits



Fonte: Autor (2024)

4.1.2 Mistura solo-grits

Na Tabela 4.2 encontram-se os valores dos limites de consistência do solo e das misturas com diferentes teores de grits. Observa-se que a adição de 5% do resíduo aumentou significativamente o LL em relação ao solo natural, 28,3% em termos percentuais. Entretanto, as misturas S10G e S15G apresentaram LL menores que a referência (solo). O LP se manteve constante com a adição de 5% de grits, mas diminuiu com os maiores teores de adição. Em relação ao IP, notou-se um aumento significativo para o teor de 5% do resíduo, ao passo que maiores teores de adição resultaram num IP pouco acima da referência.

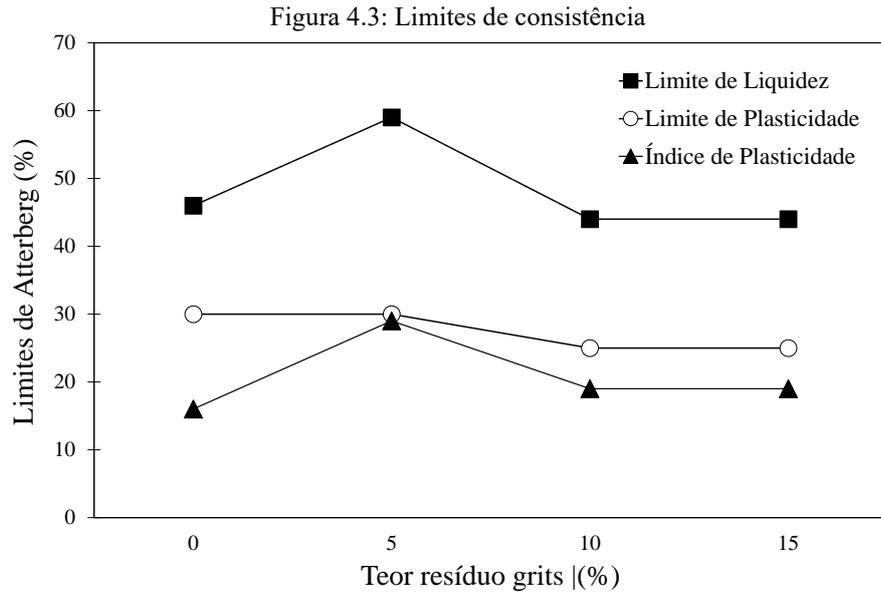
Tabela 4.2: Limites de consistência do solo e das misturas solo-grits

	Solo	S5G	S10G	S15G
Limite de Liquidez (%)	46	59	44	44
Limite de Plasticidade (%)	30	30	25	25
Índice de Plasticidade (%)	16	29	19	19

Fonte: Autor (2024)

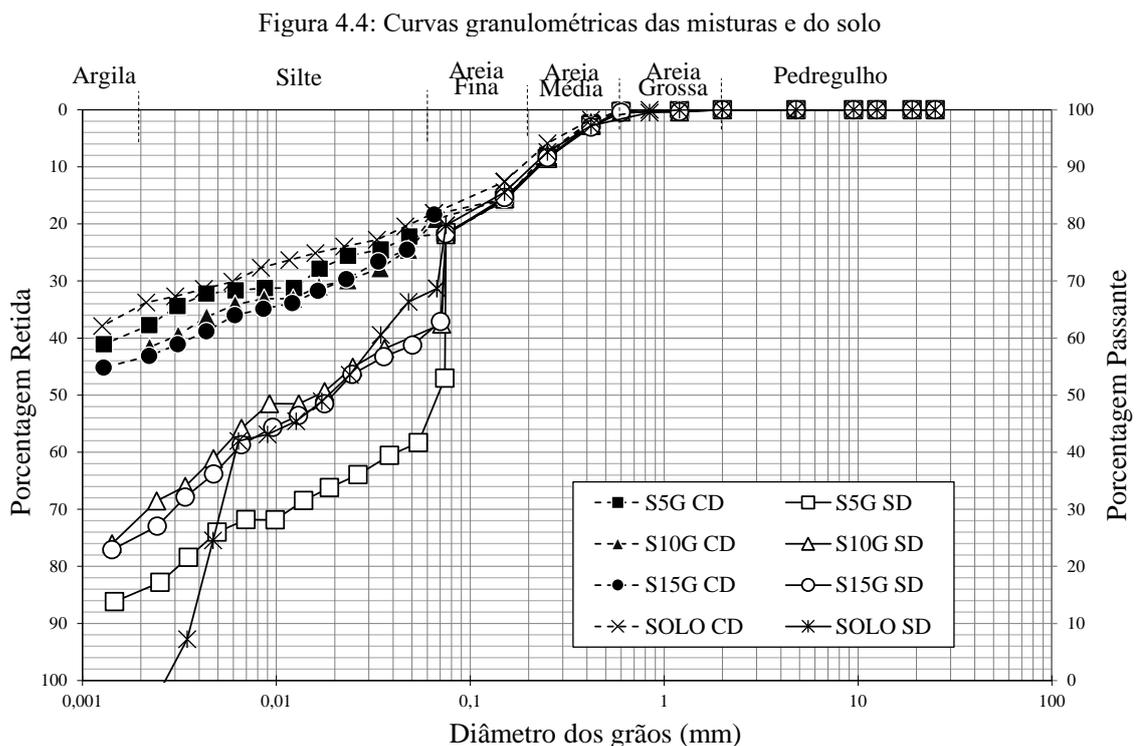
Para melhor visualização dos efeitos da adição do resíduo no solo em termos de limites de consistência, a Figura 4.3 retrata os resultados obtidos em forma gráfica. O maior efeito sobre os limites de consistência ocorreu no aumento do LL na adição de 5% de resíduo, o que repercutiu em um maior valor do IP nesta mistura. Além disso, observa-se uma constância nos valores dos limites de Atterberg em relação as adições de 10 e 15%.

Na pesquisa de Pereira (2005), o autor avaliou os limites de consistência de um solo argiloso com adição de grits com teores entre 4 a 28%. As diferentes adições de resíduo não influenciaram significativamente os valores de LP, os quais se mantiveram regulares, comportamento semelhante ao apresentado na Figura 4.3. Com relação ao LL, os resultados de Pereira (2005) mostraram diminuição no LL entre os teores de 4 a 8% de resíduo, e uma constância para maiores porcentagens de adição. Nos resultados das misturas em questão, também foi notado uma constância nos índices de consistência para maiores porcentagens, entretanto houve um aumento do LL e do IP para o teor de 5% de grits.



Fonte: Autor (2024)

As análises granulométricas para as misturas solo-grits, bem como para o solo estudado, foram realizadas com o auxílio do defloculante hexametáfosfato de sódio e sem o auxílio do mesmo, conforme ilustrada na Figura 4.4. Verifica-se que o resultado das curvas granulométricas sem o uso do defloculante (SD) apresentam um decréscimo das frações de argila se comparando aos ensaios realizados com o uso de hexametáfosfato de sódio (CD).



Fonte: Autor (2024)

A Tabela 4.3 apresenta as frações granulométricas obtidas pelos ensaios realizados. Observa-se, em relação ao solo, uma variação significativa entre as curvas CD e SD. Na ausência de dispersante, evidencia-se a presença de agregações entre as partículas, características de latossolos, os quais foram submetidos a intensos processos de lixiviação que resultaram no enriquecimento em óxidos de ferro e/ou alumínio. Nota-se que o teor da fração argila diminuiu gradativamente conforme o aumento da adição de grits para as curvas realizadas com o uso do defloculante. Entretanto, nas curvas realizadas sem o uso do hexametáfosfato de sódio, as frações de argila aumentaram em comparação ao solo de referência, sendo a mistura S10G com o maior teor de argila (29%), e a mistura S5G com o menor teor (16%).

As maiores frações de silte foram observadas nas curvas granulométricas realizadas sem o uso do hexametáfosfato de sódio, além de ser notado uma diminuição dessa fração em relação à referência com as adições de grits. A curva correspondente a mistura S5G sem o uso do defloculante se destacou das demais misturas, apresentando as menores frações de argilas entre as misturas, e porcentagens de frações de areia significativamente maiores.

Tabela 4.3: Frações granulométricas das misturas solo-grits e do solo

	% Argila	% Silte	% Areia	% Pedregulho
Solo SD	0	68	32	0
Solo CD	65	16	18	0
S5G SD	16	30	54	0
S5G CD	62	16	22	0
S10G SD	29	30	41	0
S10G CD	58	21	21	0
S15G SD	25	36	39	0
S15G CD	56	24	20	0

Fonte: Autor (2024)

4.2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Conforme descrito anteriormente, a resistência ao cisalhamento foi avaliada mediante aos ensaios de cisalhamento direto. As amostras a serem ensaiadas foram moldadas conforme a metodologia apresentada no item 3.4.3. Ressalta-se que os critérios para validação dos corpos de prova se deram pelo seu teor de umidade e pelo grau de compactação: amostras com

umidades entre $W_{ót}-1\%$ e $W_{ót}+1\%$, e com variações menores que 1% em relação ao γ_d conferiam um caráter de validação.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto serão inicialmente apresentados separadamente para cada teor da mistura solo-grits. Inicialmente serão expostos os dados referentes ao solo de referência, sem adição de resíduo, e em seguida será apresentado os resultados referentes à cada teor da mistura solo-grits.

4.2.1 Solo

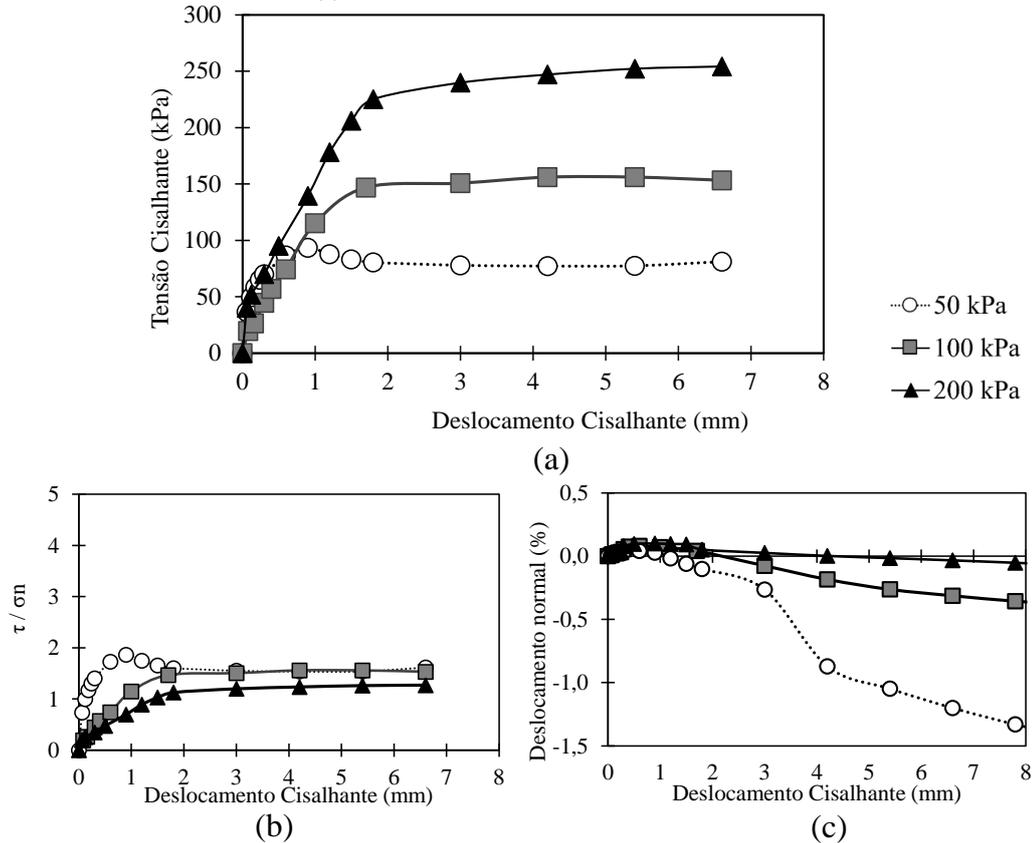
A Figura 4.5 apresenta os gráficos de (a) tensão cisalhante *versus* deslocamento cisalhante, (b) tensão cisalhante normalizada (τ/σ_n) *versus* deslocamento cisalhante e (c) deslocamento normal *versus* deslocamento cisalhante para o solo em estudo.

Na curva tensão cisalhantes *versus* deslocamento horizontal percebe-se uma leve diminuição da tensão cisalhante pós pico para o nível de tensão normal de 50 kPa, a curva referente a tensão normal de 100 kPa apresentou uma constância da tensão cisalhante pós pico e a curva com nível de tensão normal mais elevada apresentou aumento da tensão cisalhante de forma intensa até o deslocamento horizontal de 2 mm, e após esse apresentou uma tendência de crescimento de forma suave.

A curva τ/σ_n para o nível de tensão mais baixo apresentou um pico bem nítido, enquanto nos demais níveis de tensão esse pico desaparece. Estima-se que a tensão de 50 kPa esteja abaixo da tensão de plastificação, enquanto as demais tensões aplicadas (100 e 200 kPa) acima dessa, o que justifica a ruptura frágil e dúctil, respectivamente. Em suma, a tensão normal afeta a compacidade do solo, e, conseqüentemente sua estrutura. Quando uma tensão vertical de 50 kPa é aplicada, não há uma variação significativa na estrutura do corpo de prova. Tal comportamento também foi observado por Shi et al. (2024) em misturas de solo-cal, onde observou que baixas tensões resultam em uma ruptura localizada e uma queda repentina no gráfico de tensão cisalhante *versus* deformação obtidos no ensaio de cisalhamento direto. Sob alta tensão vertical, a estrutura interna da amostra de solo torna-se mais compacta, com fricção e coesão mais fortes entre as partículas do solo. Durante o processo de cisalhamento, a energia é distribuída uniformemente, o que leva a diferentes modos de ruptura do solo.

Em relação às deformações normais, as amostras apresentaram um pequeno nível de compressão no início do cisalhamento, sendo observado no restante do ensaio uma expansão volumétrica de forma inversamente proporcional ao nível da tensão normal aplicada.

Figura 4.5: (a) Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento cisalhante do solo, (b) curvas τ/σ_n *versus* deslocamento cisalhante, (c) curvas deslocamento normal *versus* deslocamento cisalhante



Fonte: Autor (2024)

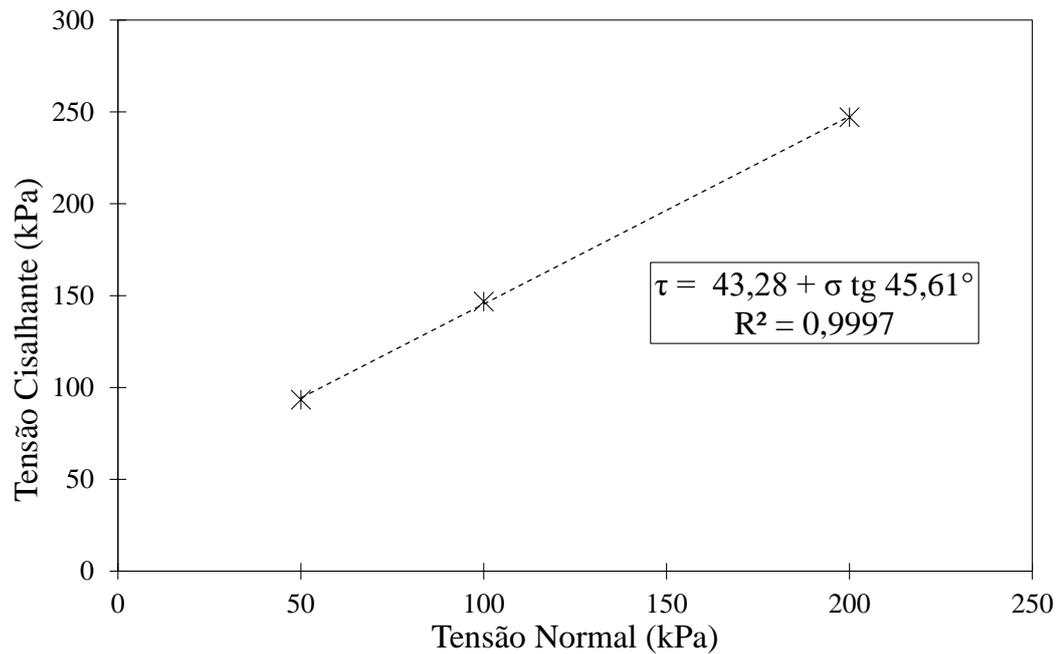
Os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos pelos ensaios de cisalhamento direto, com as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, estão apresentados na Tabela 4.4. A envoltória de ruptura construída pelas tensões cisalhantes correspondentes de cada nível de tensão normal está apresentada na Figura 4.6. O valor do intercepto coesivo obtido foi de 43,28 kPa, e o valor do ângulo de atrito interno do solo obtido foi de 45,61°, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9997. Destaca-se que o valor de R^2 próximo a 1 é um indicativo que os dados são estatisticamente significativos.

Tabela 4.4: Resultados dos ensaios de cisalhamento direto e os parâmetros de resistência.

σ_n (kPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)
50	93,41	43,28	45,61
100	146,83		
200	247,09		

Fonte: Autor (2024)

Figura 4.6: Envoltória de resistência do solo

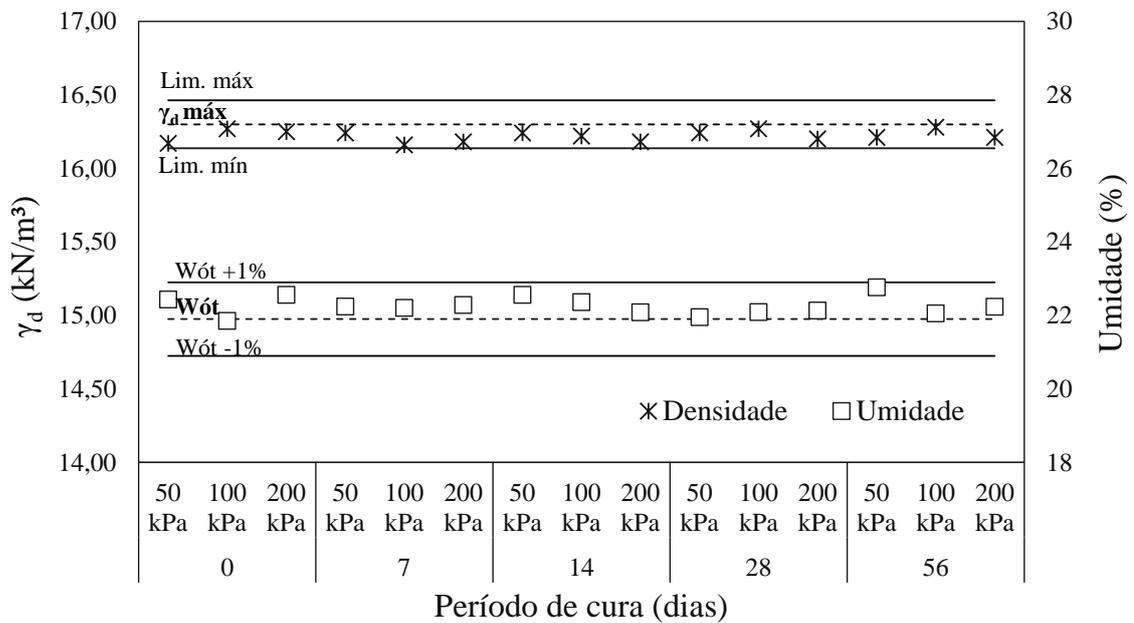


Fonte: Autor (2024)

4.2.2 Solo + 5% grits

A Figura 4.7 apresenta o controle dos índices físicos para validação das moldagens dos corpos de prova, com base no teor de umidade e no peso específico seco. Ressalta-se que esse controle das moldagens das amostras foi necessário para a obtenção de resultados mais confiáveis, minimizando possíveis interferências nos parâmetros de resistência obtidos após os ensaios de cisalhamento direto. Observa-se que os corpos de prova permaneceram na faixa estabelecida, tanto em relação à umidade ótima quanto ao γ_d .

Figura 4.7: Índices físicos para validação dos corpos de prova da mistura S5G



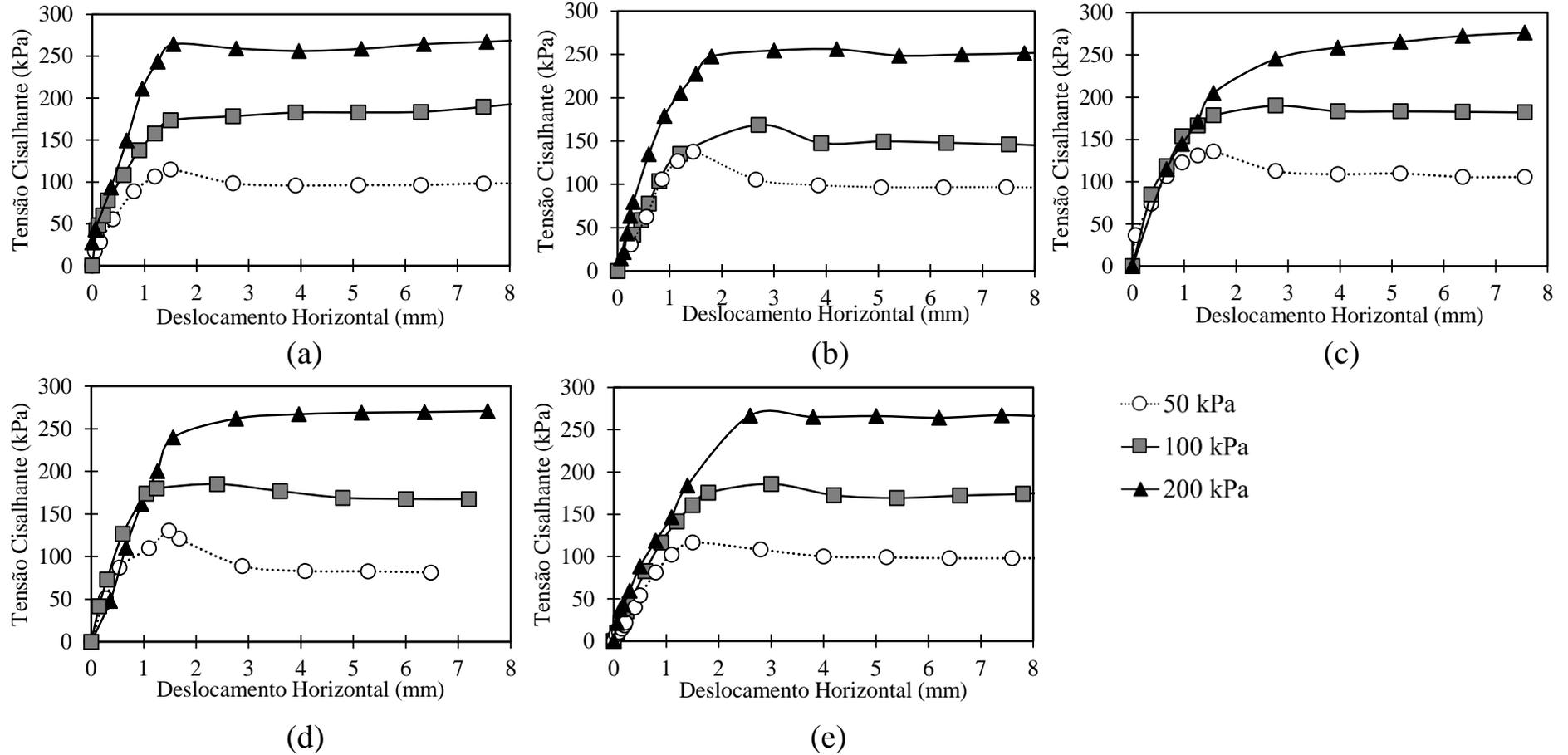
Fonte: Autor (2024)

A Figura 4.8, Figura 4.9 e a Figura 4.10 apresentam os resultados dos ensaios de cisalhamento direto da mistura S5G. Na Figura 4.8 estão reunidas as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal das amostras com diferentes períodos de cura. A tensão cisalhante cresce de maneira proporcional com o aumento da tensão normal aplicada. Nessas curvas, percebe-se que, no geral, ao atingir a tensão cisalhante máxima, essa se manteve em patamares estáveis conforme o aumento do deslocamento horizontal, especialmente para as curvas correspondentes as tensões normais de 100 kPa e 200 kPa.

Na Figura 4.9 estão apresentadas as curvas tensão cisalhante normalizada *versus* deslocamento horizontal. Nota-se uma tendência de convergência entre as tensões normalizadas das amostras para maiores deslocamentos horizontais. O comportamento da amostra de 28 dias de cura submetida a tensão normal de 50 kPa se destoa das demais, apresentando um índice significativamente maior, além de uma ruptura frágil bem definida. De maneira geral, as tensões de 100 kPa e de 200 kPa apresentam um crescimento da tensão normalizada até deslocamento próximos de 3 mm, e após esse estabilizam em valores entre 1 e 2. As curvas correspondentes a tensão e 50 kPa apresentaram uma tensão normalizada de pico, e após uma diminuição nesse índice, tendendo a uma convergência com as demais curvas. De maneira simples, nota-se maiores tensões normalizadas nas amostras com idades de cura de 14 e 28 dias.

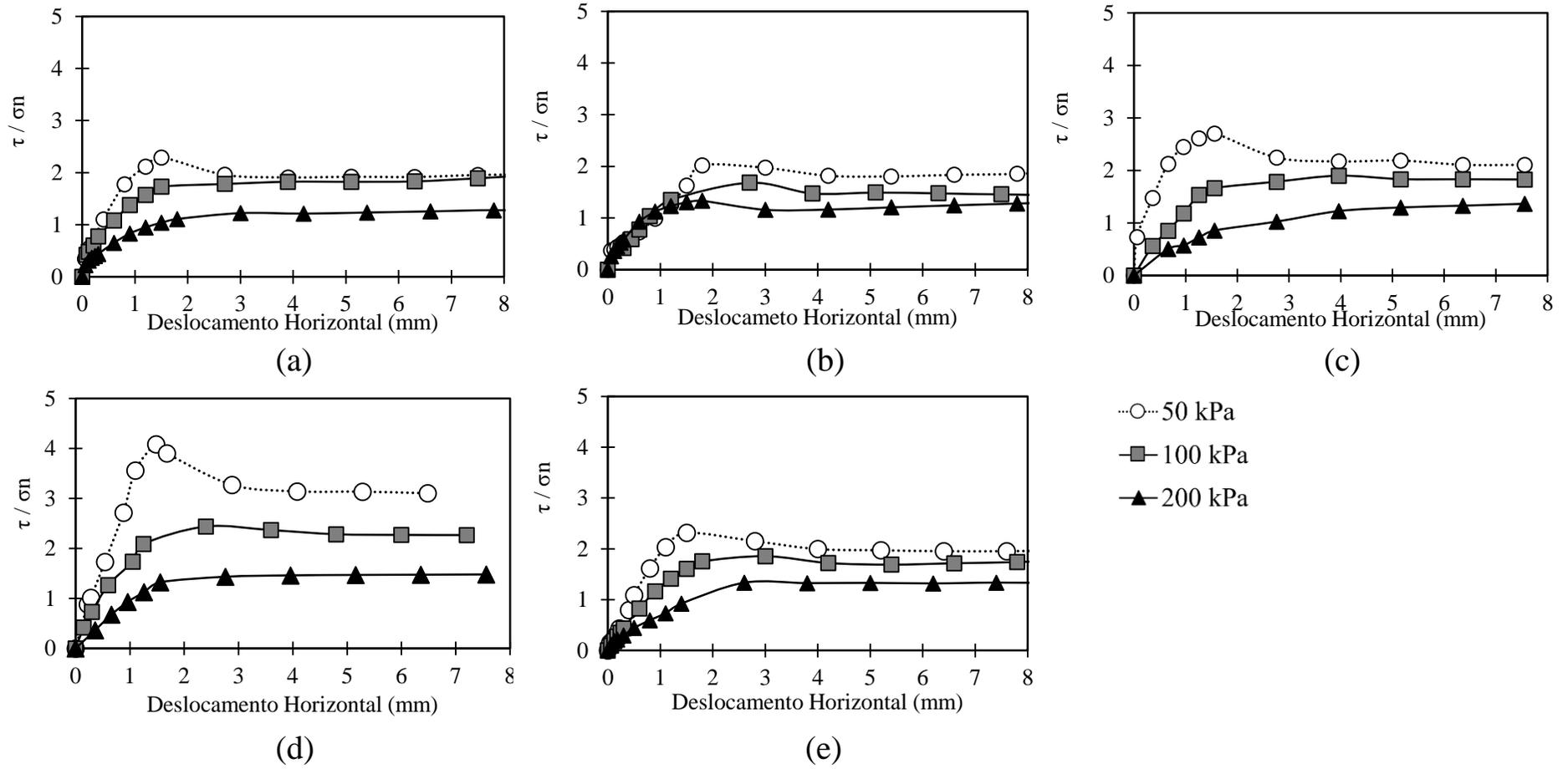
A Figura 4.10 reúne os gráficos do deslocamento normal *versus* deslocamento horizontal. Percebe-se que os menores deslocamentos normais estão condicionados às amostras submetidas aos maiores níveis de tensões normais. No início da etapa de cisalhamento, percebe-se pequenas contrações das amostras para deslocamentos próximos de 2 mm. Entretanto, todas as amostras apresentaram dilatações com o avançar do ensaio, com destaque para as amostras submetidas às idades de cura de 14 dias e de 28 dias, especialmente as curvas correspondentes as tensões normais de 50 kPa e 100 kPa.

Figura 4.8: Curvas tensão cisalhantes versus deslocamento horizontal da mistura com teor de 5% de grits para idade de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias



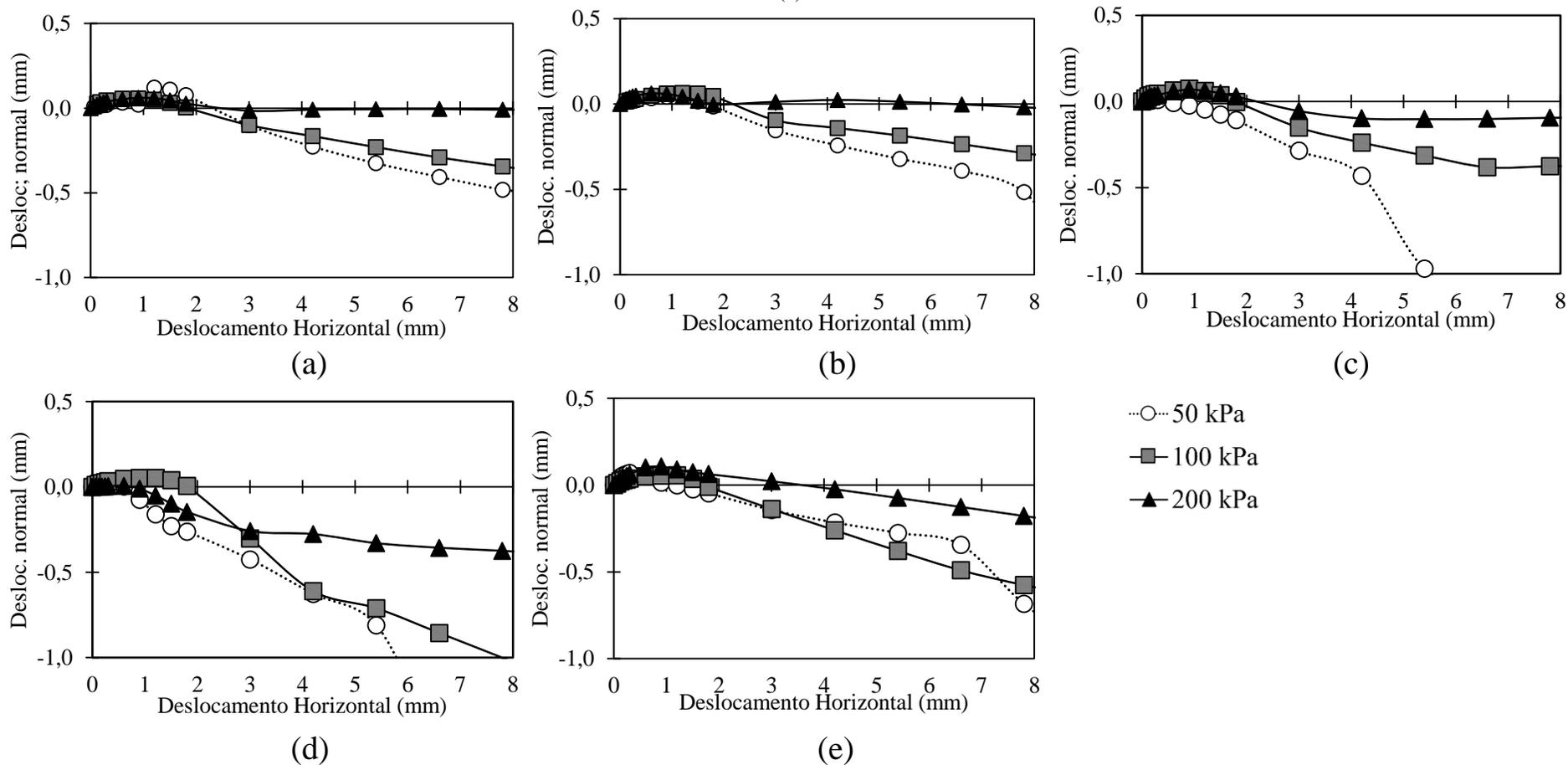
Fonte: Autor (2024)

Figura 4.9: Curvas τ/σ_n versus deslocamento horizontal da mistura com teor de 5% de grits para idade de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias



Fonte: Autor (2024)

Figura 4.10: Curvas deslocamento normal versus deslocamento horizontal da mistura com teor de 5% de grits para idade de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias



Fonte: Autor (2024)

A partir dos resultados das curvas da Figura 4.8, foram construídas as envoltórias de resistência do S5G, ilustradas pela Figura 4.11. Nota-se que não há uma tendência bem definida dos resultados em função das idades de cura das amostras. Os parâmetros de resistência obtidos estão compilados na Tabela 4.5. Do mesmo modo das envoltórias, não se percebe uma tendência aparente dos parâmetros de resistência em função dos períodos de cura. O maior intercepto coesivo observado se dá para a amostra com cura de 7 dias (89,30 kPa), sendo nessa também observada o menor ângulo de atrito interno do solo, de 41,04°. Em relação ao maior ângulo de atrito, esse se deu na amostra com 14 dias de cura, com um valor de 45,44°. Todas as amostras submetidas a idades de cura apresentaram valores do intercepto coesivo superiores à amostra de 0 dias, enquanto que apenas uma amostra curada apresentou maiores valores de ângulo de atrito que a amostra não curada.

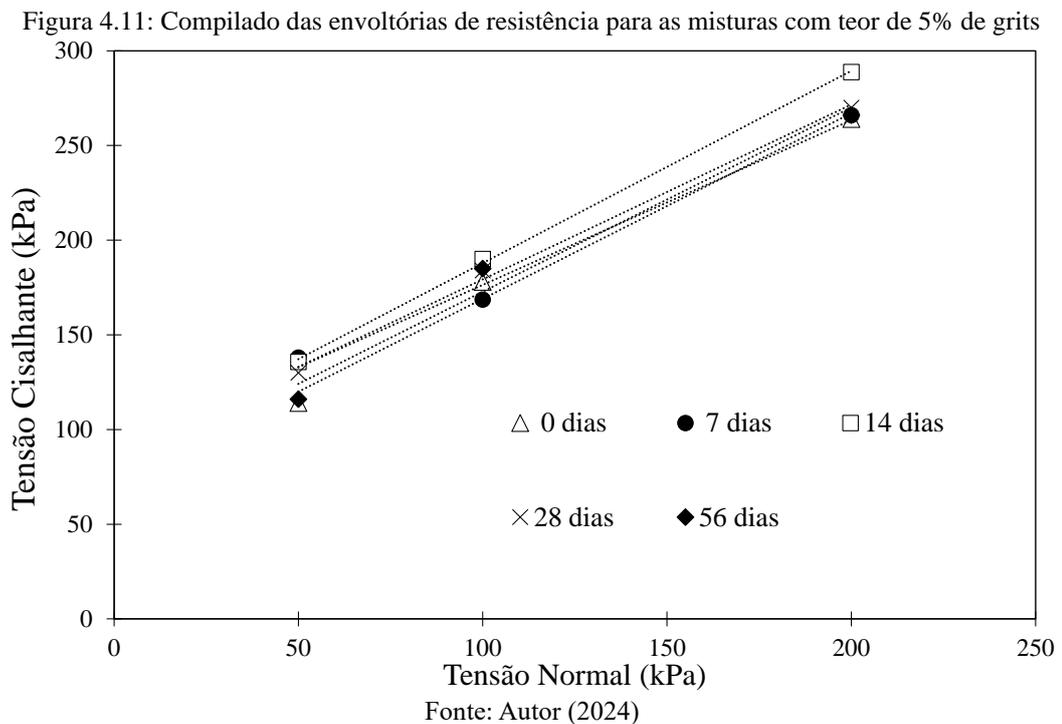


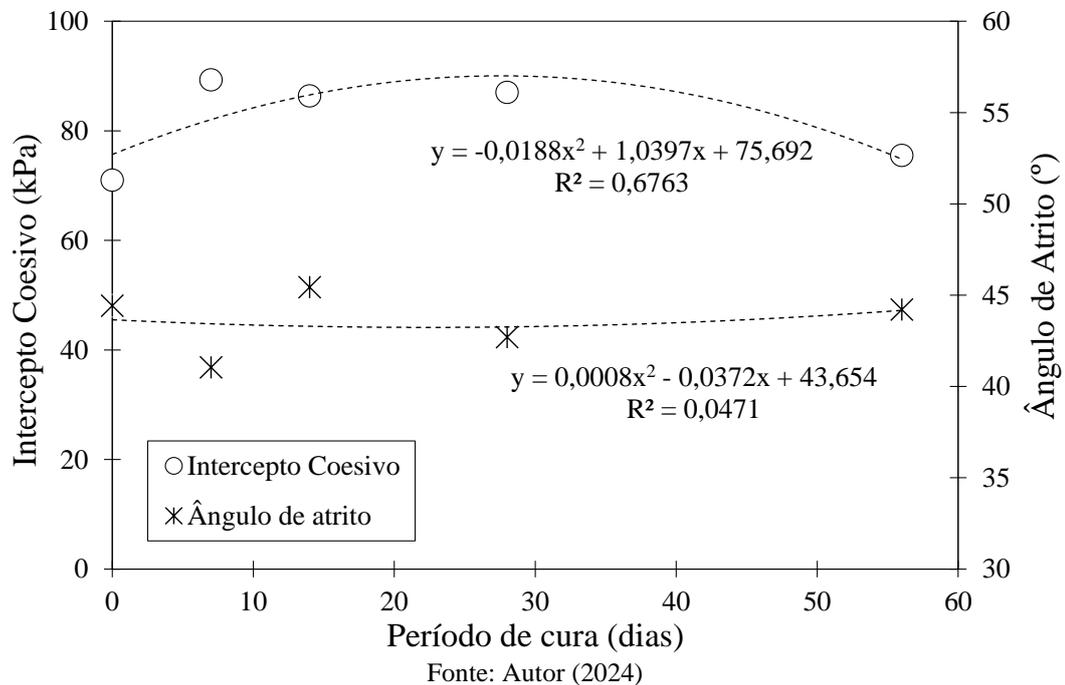
Tabela 4.5: Parâmetros de resistência da mistura solo-grits com teor de 5% do resíduo

	0 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias
Intercepto Coesivo (kPa)	71,00	89,30	86,37	87,00	75,50
Ângulo de Atrito (°)	44,42	41,04	45,44	42,70	44,21

Fonte: Autor (2024)

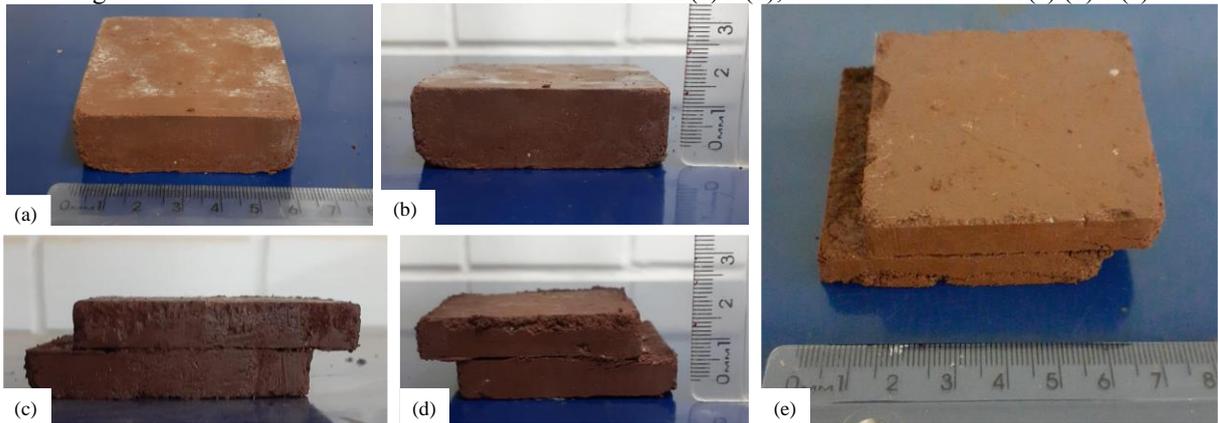
Com o intuito de buscar uma correlação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S5G em função do período de cura em que as amostras foram submetidas, construiu-se a Figura 4.12. Nessa, observa-se que o parâmetro do ângulo de atrito não seguiu uma tendência bem definida, se mantendo em valores dentro do intervalo de 41 e 46°. Não foi possível uma regressão que traduzisse o comportamento do ângulo de atrito de forma satisfatória ($R^2=0,0471$). Dentro das opções de regressões, escolheu-se a função polinomial, pois foi a que melhor se enquadrou em relação aos dois parâmetros em questão (c e ϕ). Em contrapartida, foi possível uma melhor regressão para demonstrar os valores do intercepto coesivo da mistura S5G frente as diferentes idades de cura ($R^2=0,6763$). Observou-se uma tendência de aumento desses valores para as idades de cura de 7 a 28 dias, entretanto observa-se uma diminuição do intercepto coesivo para a idade de cura de 56 dias. Esse comportamento se mostrou destoante, uma vez que se esperava uma tendência de estabilização dos valores para maiores idades de cura.

Figura 4.12: Relação do intercepto coesivo e do ângulo de atrito na mistura com adição de 5% de grits para diferentes idades de cura



A Figura 4.13 ilustra uma amostra da mistura S5G antes e após o ensaio de cisalhamento direto. Pode-se perceber na amostra a adição do resíduo grits, devido a tonalidades acinzentadas na face do corpo de prova. Ademais, é possível visualizar facilmente a zona cisalhada.

Figura 4.13: Amostra da mistura S5G antes do ensaio em (a) e (b); amostra cisalhada em (c) (d) e (e)

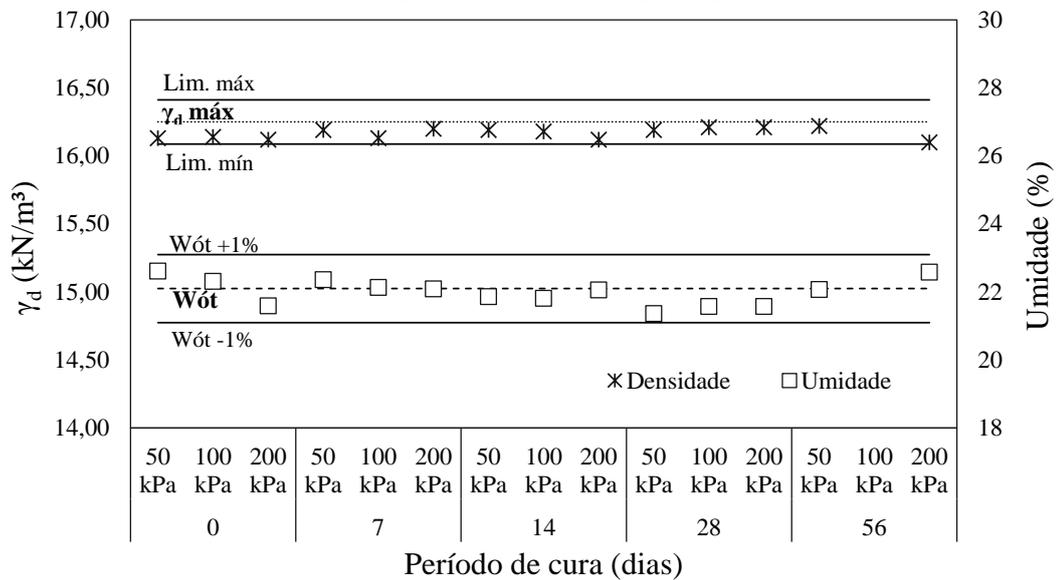


Fonte: Autor (2024)

4.2.3 Solo + 10% grits

A Figura 4.14 apresenta os resultados dos índices físicos das amostras da mistura S10G. Observa-se que os corpos de prova permaneceram na faixa de validação estabelecida, tanto em relação à umidade ótima quanto ao γ_d .

Figura 4.14: Índices físicos para validação dos corpos de prova da mistura S10G



Fonte: Autor (2024)

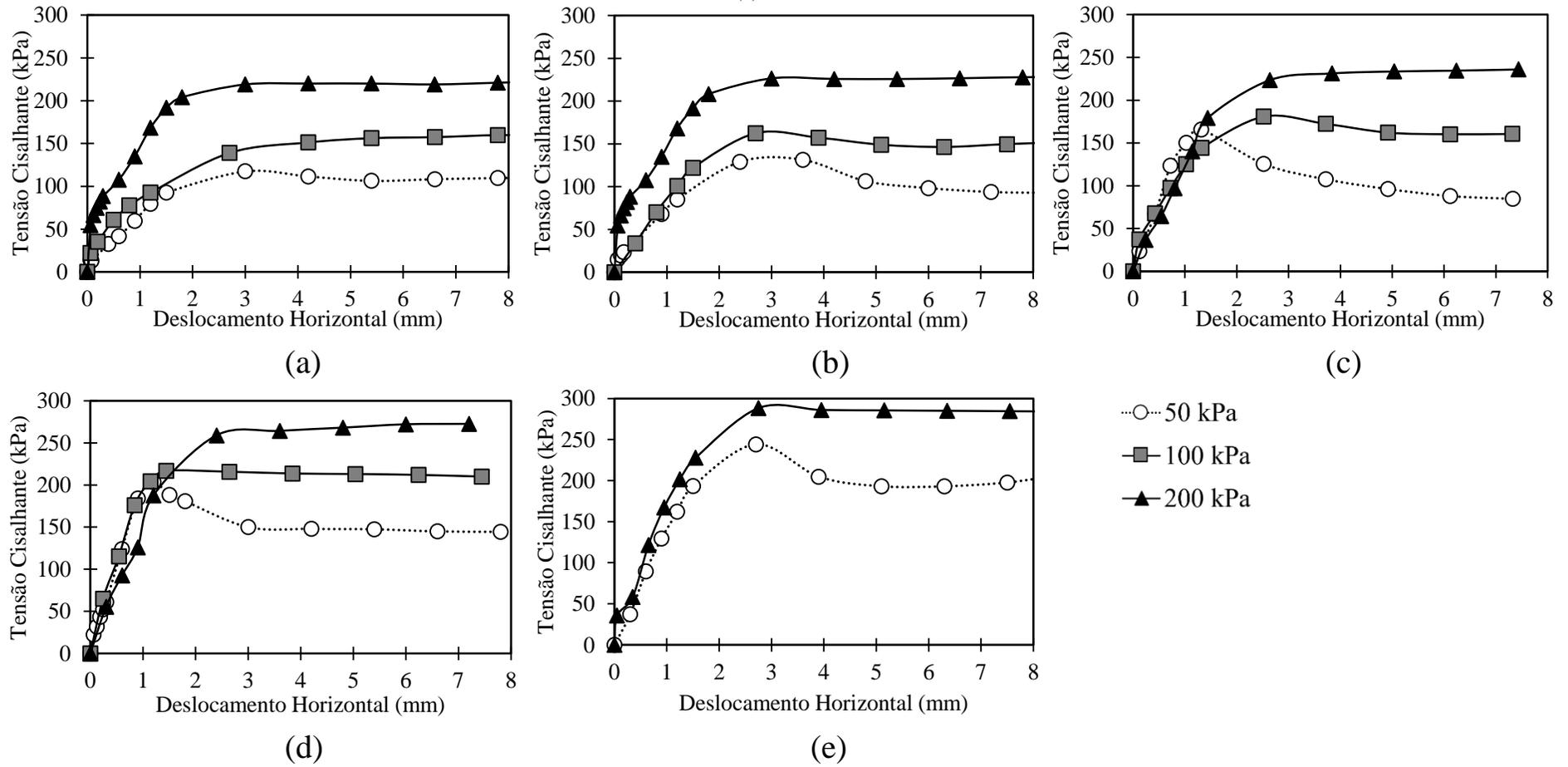
A partir da Figura 4.15 até a Figura 4.17 são apresentados os gráficos dos ensaios de cisalhamento direto para a mistura solo-grits com teor de resíduo de 10%. A Figura 4.15 ilustra

as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para as diferentes idades de cura das amostras analisadas. Ressalta-se que a amostra que seria submetida a tensão normal de 100 kPa com período de cura de 56 dias apresentou avarias durante a realização do ensaio. Em virtude do elevado tempo de cura, não foi possível a moldagem de uma nova amostra com as mesmas condições. Assim, os resultados dos parâmetros de resistência desse cenário se deram com base na envoltória de resistência construída a partir das amostras submetidas às tensões normais de 50 kPa e 200 kPa. É possível notar, a partir da Figura 4.15, que a tensão cisalhante cresce com o aumento da tensão normal aplicada, estabilizando ao longo de maiores deslocamentos da amostra. Para o menor nível de tensão normal aplicada (50 kPa), as amostras apresentaram, no geral, um pico de resistência cisalhante bem definida, enquanto nas demais curvas não foi observado tensões de pico acentuadas. Nessas, a tensão cisalhante apresentou um crescimento até deslocamento próximos de 2 a 3 mm, e manteve-se em patamares de constância, não sendo observados quedas nas tensões pós pico. Observa-se uma tendência do crescimento da tensão cisalhante das curvas conforme o aumento da idade de cura das amostras, para os três níveis de tensão normal estudadas, denotando efeitos de reações da mistura solo-grits com o passar do tempo. Para a construção das envoltórias de resistência, foram usadas as tensões cisalhantes máximas para as curvas que apresentaram um comportamento de resistência de pico bem definida e para as curvas que apresentaram uma resistência máxima constante ao longo do ensaio. Para as curvas que apresentaram tendências de um crescimento da tensão cisalhante ao longo de todo o ensaio, definiu-se o uso da tensão cisalhante correspondente a um deslocamento horizontal de 3 mm para a construção da envoltória de resistência.

Na Figura 4.16 estão ilustradas as curvas de tensão cisalhante normalizada *versus* deslocamento horizontal. É possível identificar uma tensão normalizada de pico acentuada para a menor tensão normal, enquanto as demais apresentaram um comportamento crescente até se estabilizarem em deslocamento próximos a 3 mm. Com relação à idade de cura, nota-se que a tensão normalizada aumenta conforme maiores períodos de cura das amostras, além de a curva normalizada correspondente a 50 kPa alcançar maiores índices, se distanciando das curvas correspondentes a 100 kPa e 200 kPa, um indício da influência de diferentes idades de cura

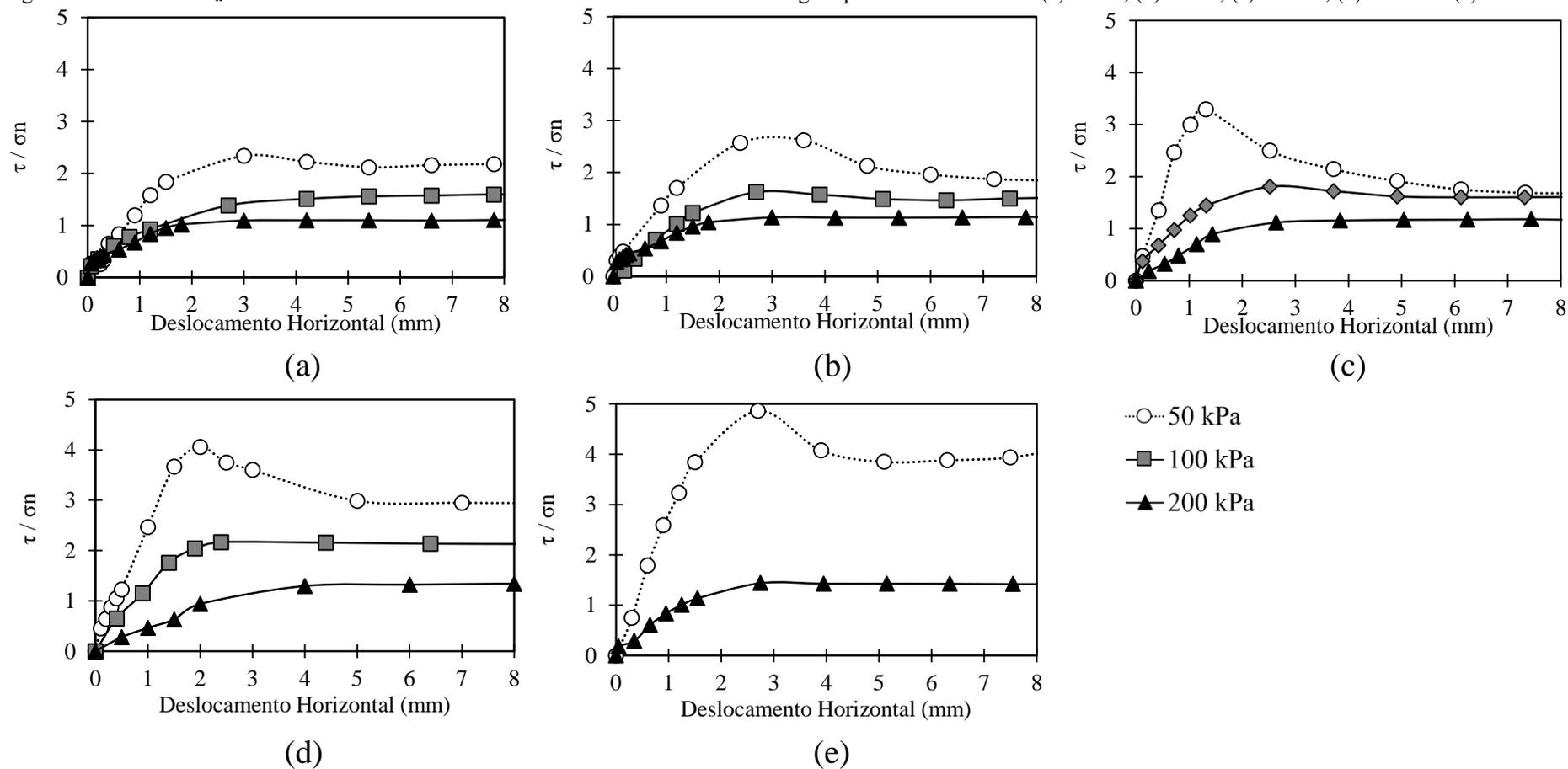
Na Figura 4.17 estão apresentados os gráficos do deslocamento normal *versus* deslocamento horizontal das misturas S5G. As amostras apresentam, de maneira geral, uma contração volumétrica no início do cisalhamento (até deslocamentos horizontais próximos de 1 mm), e logo após apresentam aumento no volume com o avançar do ensaio. Observou-se maiores deslocamentos normais para as amostras submetidas a maiores idades de cura.

Figura 4.15: Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal da mistura com teor de 10% de grits para idade de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias



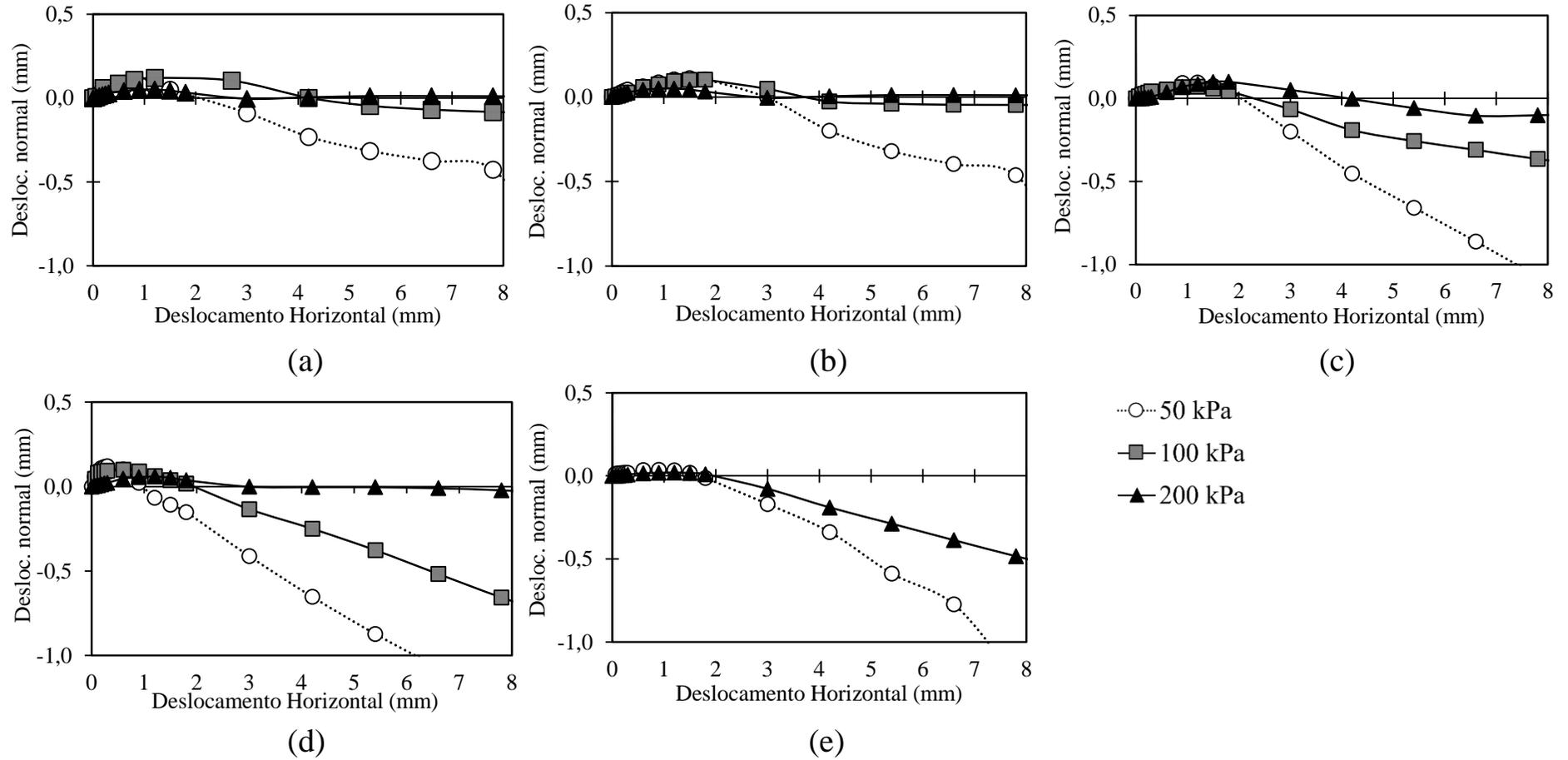
Fonte: Autor (2024)

Figura 4.16: Curvas τ/σ_n versus deslocamento horizontal da mistura com teor de 10% de grits para idade de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias



Fonte: Autor (2024)

Figura 4.17: Curvas deslocamento normal *versus* deslocamento horizontal da mistura com teor de 15% de grits para idade de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias



Fonte: Autor (2024)

A partir das curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Figura 4.15), montou-se as envoltórias de resistência para as amostras da mistura S10G em diferentes idades de cura, conforme Figura 4.18. As envoltórias foram construídas a partir dos máximos valores da tensão cisalhante, com exceção para as curvas que apresentaram uma tendência de crescimento ao longo do ensaio nos quais definiu-se o uso da tensão cisalhante correspondente ao deslizamento horizontal de 3 mm.

Analisando o compilado das envoltórias da mistura S10G, percebe-se algumas tendências de comportamento das misturas frente a diferentes períodos de cura. A tensão cisalhante máxima aumentou para todos os níveis de tensões normais de modo proporcional a idade de cura das amostras, especialmente nas amostras submetidas ao menor nível de tensão. Para as amostras cisalhadas sobre tensão normal de 50 kPa, o aumento da tensão cisalhante ao longo dos períodos de cura foi mais significativo, enquanto os menores incrementos sobre a tensão cisalhante ocorrem nas amostras submetidas a maior tensão normal. Este comportamento resulta na diminuição da inclinação das envoltórias conforme o avanço das idades de cura, resultando em menores valores do ângulo de atrito interno do solo e maiores valores de intercepto coesivo. Este cenário pode ser comprovado conforme a Tabela 4.6, que apresenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para a mistura S10G.

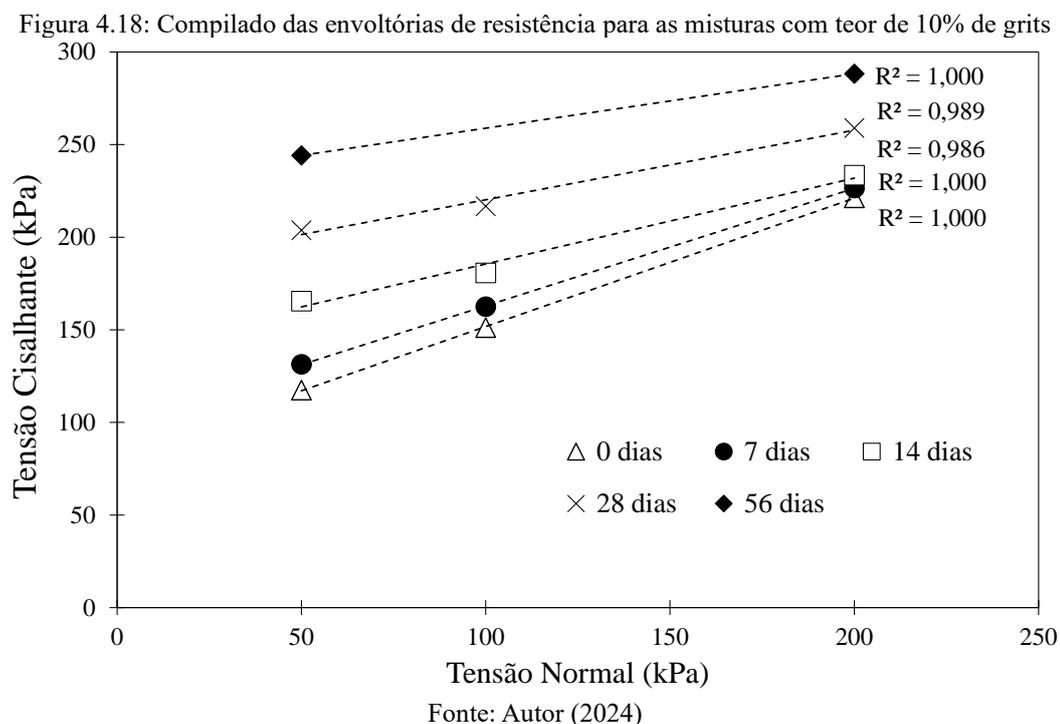


Tabela 4.6 Parâmetros de resistência da mistura solo-grits com teor de 10% do resíduo

	0 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias
Intercepto Coesivo (kPa)	82,41	99,37	139,15	182,66	229,40
Ângulo de Atrito (°)	34,73	32,43	24,89	20,59	16,41

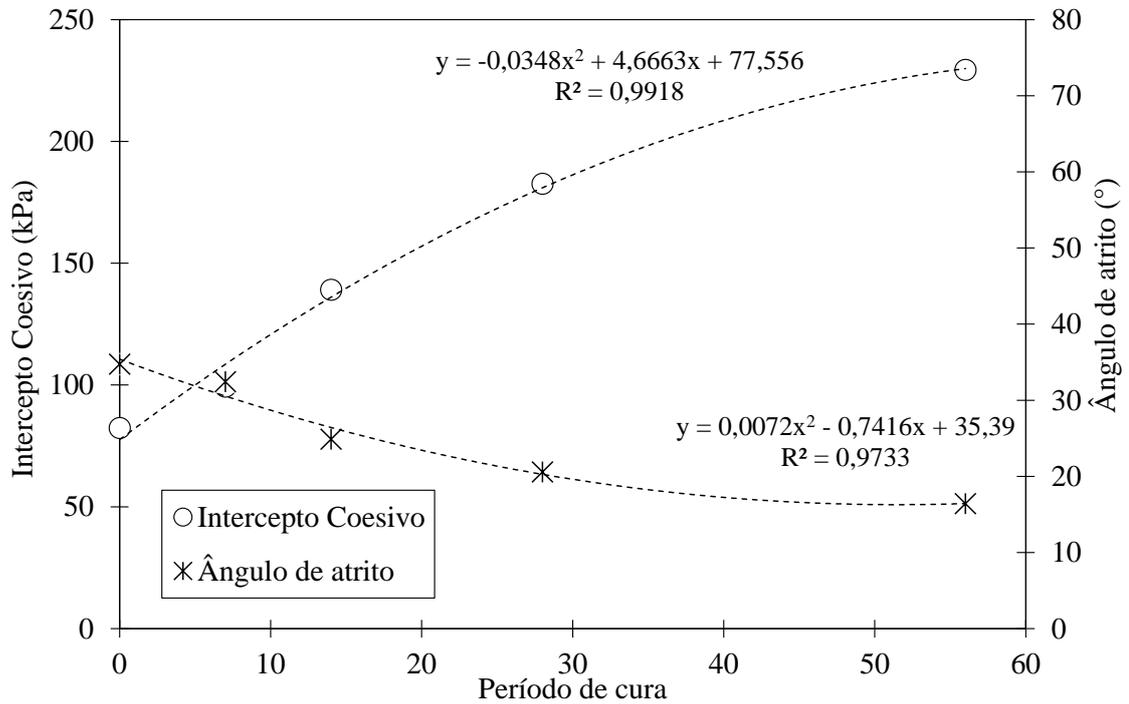
Fonte: Autor

É possível visualizar que, com o aumento das idades de cura das misturas, houve aumentos progressivos do intercepto coesivo, alcançando incremento de 180% para a curas de 56 dias quando comparadas com as amostras não submetidas a idades de cura. Entretanto, foi notado um comportamento contrário sobre o ângulo de atrito, o qual diminuiu progressivamente conforme as amostras eram submetidas à maiores idades de cura, alcançando reduções próximas de 56%.

Buscou-se correlacionar os valores dos parâmetros de resistência encontrados com os diferentes períodos de cura das amostras. Dessa maneira, foi construída Figura 4.19, que realiza uma regressão polinomial dos parâmetros de intercepto coesivo e ângulo de atrito. Escolheu-se como formato de regressão a polinomial, pois foi esta a melhor regressão que se adaptou aos resultados encontrados, tanto para a mistura S10G bem como para os demais teores das misturas.

Nota-se uma tendência de crescimento nos valores do intercepto coesivo conforme o aumento das idades de cura das amostras. Este aumento se dá de forma mais expressiva nas primeiras idades, tendendo a estabilizações em idades de cura maiores. Em relação ao ângulo de atrito, constata-se que este apresentou tendências de diminuição em seus valores, porém de forma menos acentuada que o aumento do intercepto coesivo. Este cenário pode ser observado pelas inclinações de cada trecho da curva de regressão, as quais se tornam menos acentuadas com o avançar das idades de cura. Os valores do ângulo de atrito interno tendem a diminuir com o avanço das idades de cura, apresentando uma tendencia de estabilização para as maiores idades. Para ambos os parâmetros foram realizadas regressões polinomiais de ordem 2, as quais apresentaram valores de R^2 elevados, denotando que estas foram satisfatórias para expressar o comportamento dessa mistura: crescimento do intercepto coesivo com maiores idades de cura das amostras, e uma tendência de diminuição do ângulo de atrito interno.

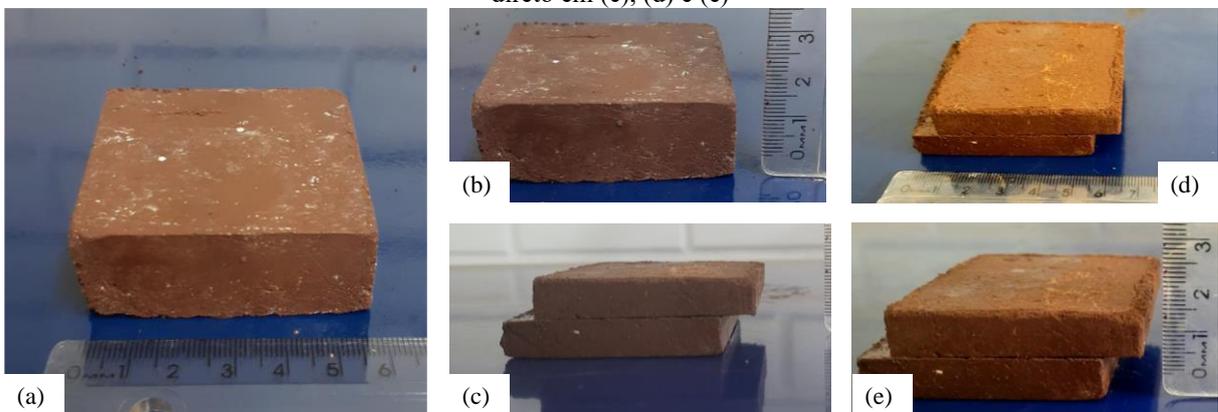
Figura 4.19: Relação do intercepto coesivo e do ângulo de atrito na mistura com adição de 10% de grits para diferentes idades de cura.



Fonte: Autor (2024)

A Figura 4.20 apresenta uma amostra da mistura S10G antes e após o ensaio de cisalhamento direto. Visivelmente é possível avaliar a presença de grits nas amostras pela coloração acinzentada nos corpos de prova. Além disso, é possível visualizar que a amostra apresentou uma superfície de ruptura bem definida, sem a presença de trincas no restante da amostra.

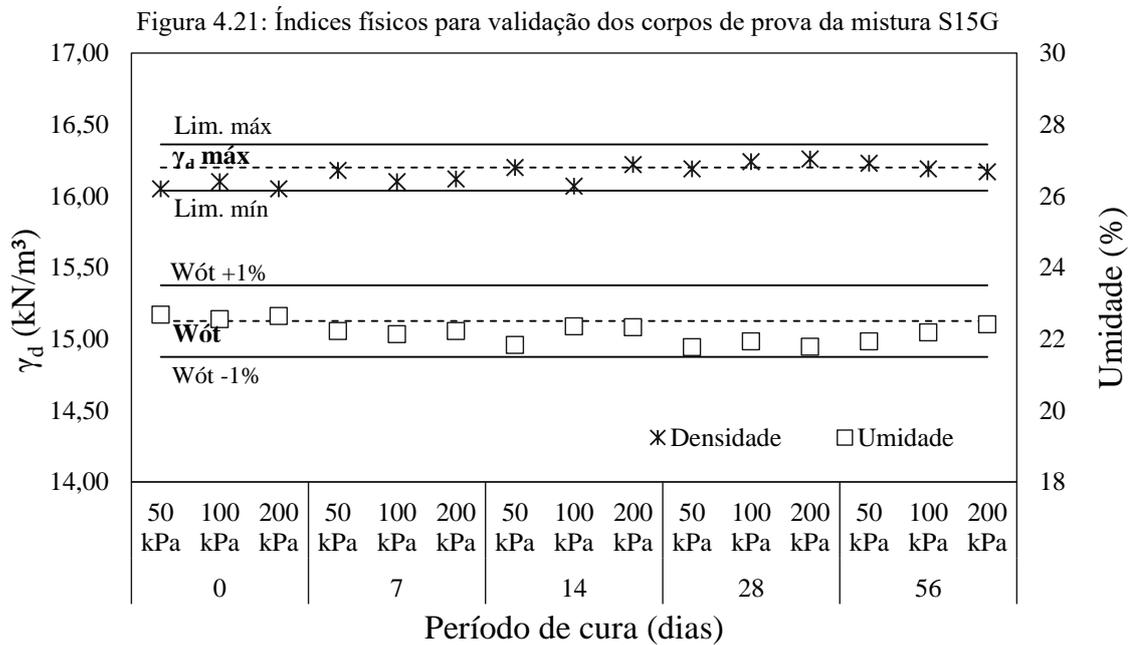
Figura 4.20: Amostra da mistura S10G antes do cisalhamento em (a) (b); amostra pós ensaio de cisalhamento direto em (c), (d) e (e)



Fonte: Autor (2024)

4.2.4 Solo + 15% grits

Os índices físicos das amostras da mistura S15G estão representados na Figura 4.21, os quais serviram para a validação da moldagem dos corpos de prova para serem submetidos aos ensaios de cisalhamento direto. Observa-se que os corpos de prova permaneceram na faixa estabelecida, tanto em relação à umidade ótima quanto ao γ_d .



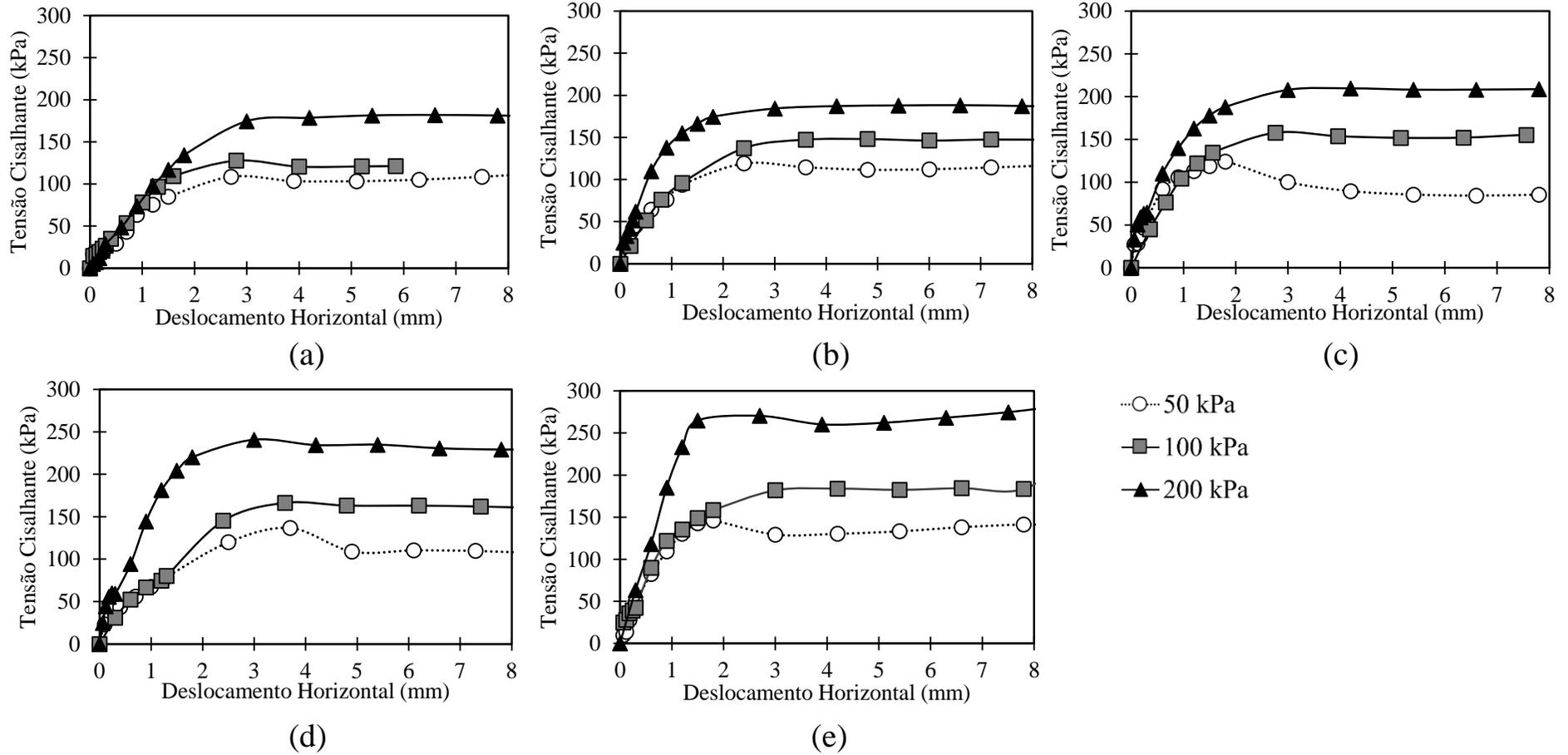
Fonte: Autor (2024)

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto da adição de 15% de grits ao solo estão ilustrados nas Figura 4.22 até a Figura 4.24. A Figura 4.22 reúne as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para as distintas idades de cura. Nota-se que a tensão cisalhante cresce de forma proporcional com o aumento da tensão normal aplicada, atingindo valores estáveis para maiores deslocamentos. De maneira geral, as curvas tiveram crescimento da tensão cisalhante até deslocamentos em torno de 2 a 3 mm, apresentado uma tendência de constância ao longo do restante do ensaio. Ainda, percebe-se que as tensões cisalhantes crescem conforme o aumento das idades de cura das amostras, de forma mais visível nas amostras submetidas a tensão normal de 200 kPa. Neste teor de adição do resíduo, não se notou picos de resistência evidentes, apenas para a tensão normal de 50 kPa nas idades de curas mais elevadas

As curvas de tensão cisalhante normalizada *versus* deslocamento horizontal estão apresentadas na Figura 4.23. Da mesma maneira, identifica-se uma tensão de pico evidente para o menor nível de tensão normal nas amostras submetidas a maiores períodos de cura. As tensões de 100 kPa e de 200 kPa apresentam um crescimento da tensão normalizada até deslocamento próximos de 3 mm, e após se estabilizam. Ademais, nota-se que a tensão normalizada atinge maiores índices à medida que a idade de cura das amostras é maior, especialmente para a tensão normal de 50 kPa.

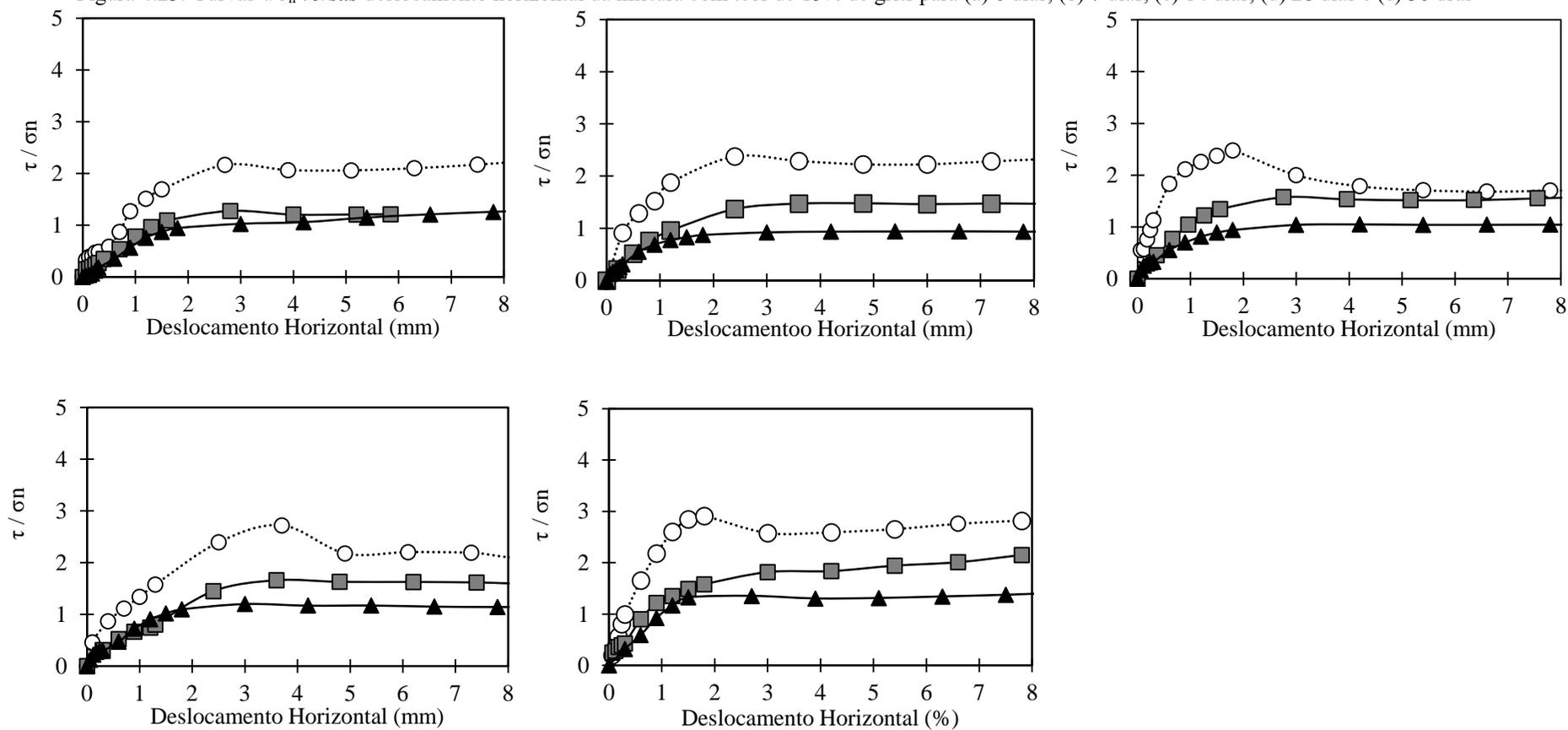
A Figura 4.24 retrata os gráficos do deslocamento normal *versus* deslocamento horizontal. As amostras não submetidas a períodos de cura apresentaram contrações no início do ensaio, de forma mais intensa na amostra submetida à tensão normal de 50 kPa. Entretanto, as amostras terminaram o ensaio com alturas muito próximas às alturas iniciais da etapa de cisalhamento. As demais amostras das diferentes idades de cura apresentaram, de forma geral, uma pequena contração no início da etapa de cisalhamento, sendo seguidas por cenários de dilatação, de forma mais acentuada nas amostras com o menor nível de tensão normal. A expansão volumétrica mostrou-se ser mais intensa nas amostras com maiores idades de cura. Apenas a amostra submetida a 200 kPa com 14 dias de cura apresentou no final do ensaio uma altura menor do que quando iniciou a etapa de cisalhamento, ou seja, a amostra apresentou compressão.

Figura 4.22: Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal da mistura com teor de 15% de grits para idades de cura de (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias



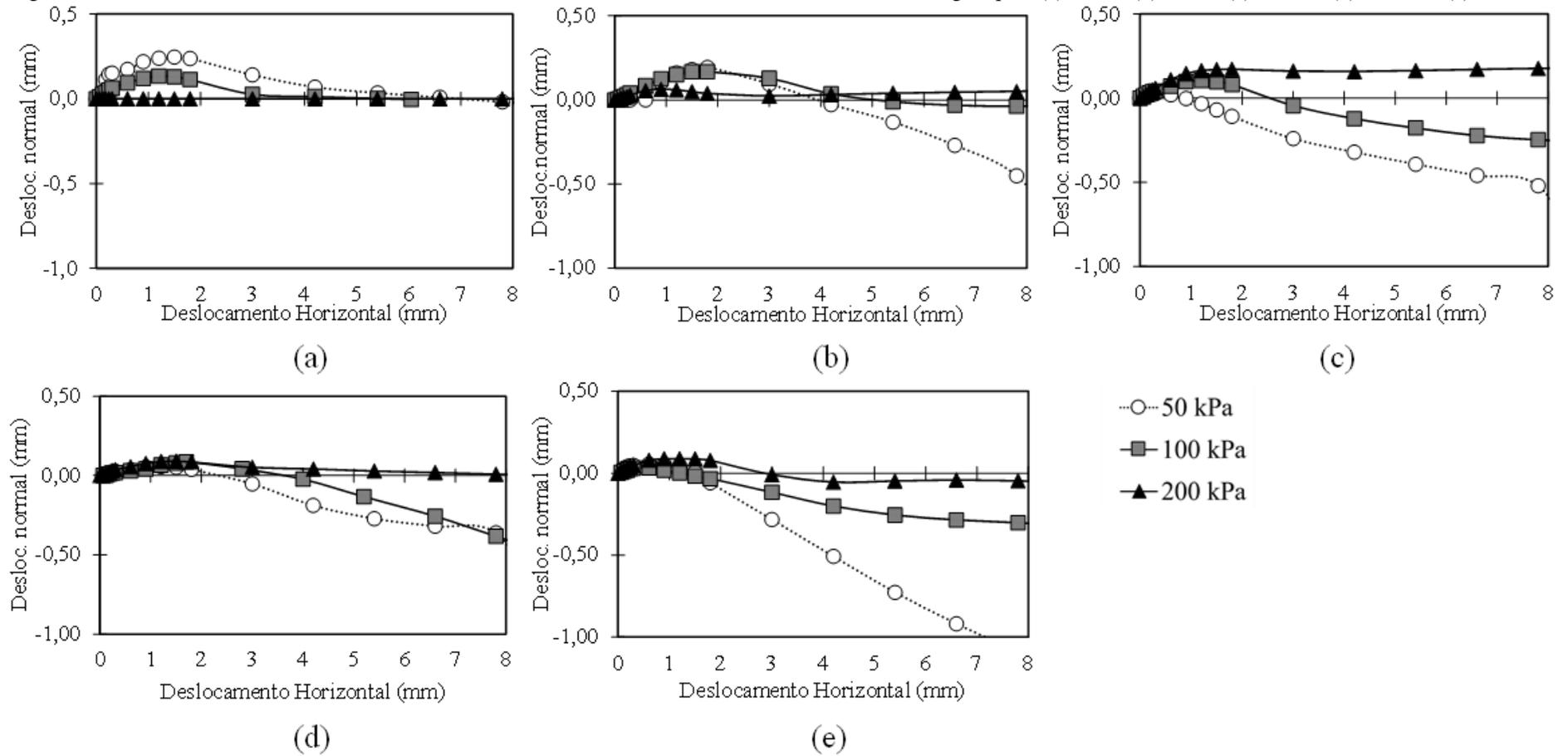
Fonte: Autor (2024)

Figura 4.23: Curvas τ/σ_n versus deslocamento horizontal da mistura com teor de 15% de grits para (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias



Fonte: Autor (2024)

Figura 4.24: Curvas deslocamento normal *versus* deslocamento horizontal da mistura com teor de 15% de grits para (a) 0 dias, (b) 7 dias, (c) 14 dias, (d) 28 dias e (e) 56 dias



Fonte: Autor (2024)

As envoltórias de resistência das misturas S15G estão ilustradas na Figura 4.25. Estas foram construídas com as tensões de cisalhamento máximas visualizadas nos ensaios. Nota-se que as envoltórias apresentaram maiores inclinações nos cenários de idades de cura maiores. Esse aspecto revela que o ângulo de atrito das misturas aumentou de forma proporcional ao tempo de cura das amostras.

Além disso, comparando os resultados de uma mesma tensão normal, percebe-se que os maiores incrementos das tensões máximas de cisalhamento são vistos na tensão normal de 200 kPa. Nessas, a tensão cisalhante máxima aumenta de forma mais significativa entre os períodos de cura, especialmente para as maiores idades de cura. As tensões de 50 kPa e de 100 kPa também apresentaram aumentos da tensão cisalhante com o avanço da idade de cura, porém de forma menos intensa.

A Tabela 4.7 compila os parâmetros de resistência obtidos por meio das envoltórias de resistência para a mistura S15G. Esses valores confirmam o incremento do ângulo de atrito interno da mistura conforme o avanço dos períodos de cura, e demonstram pequenos ganhos em relação ao intercepto coesivo.

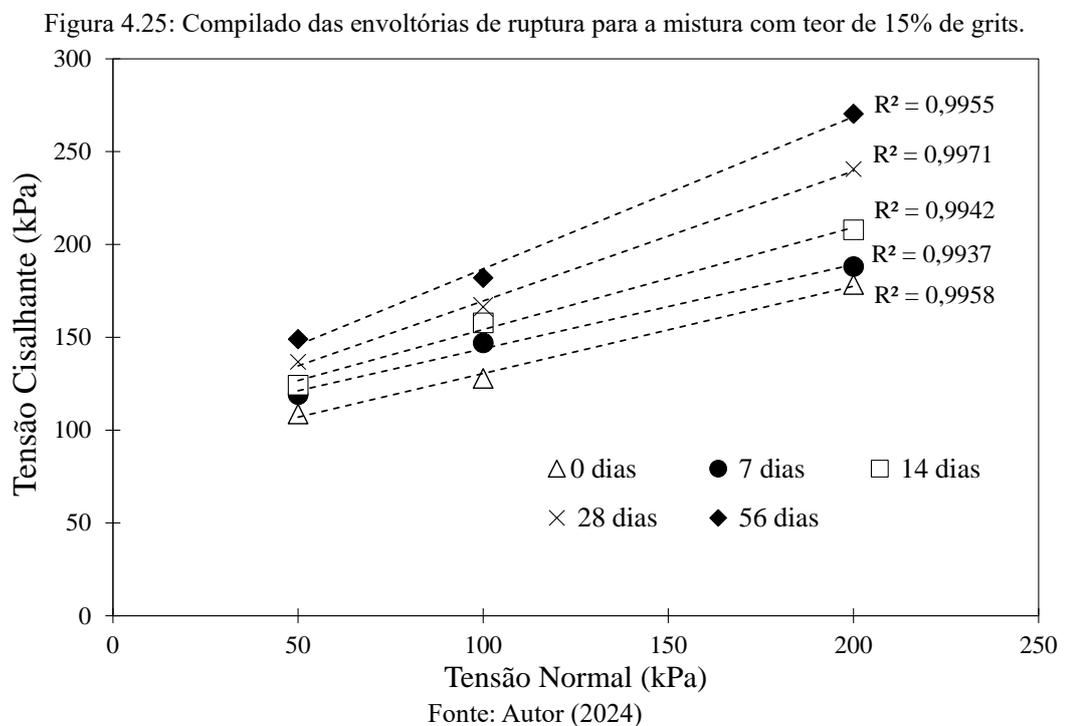


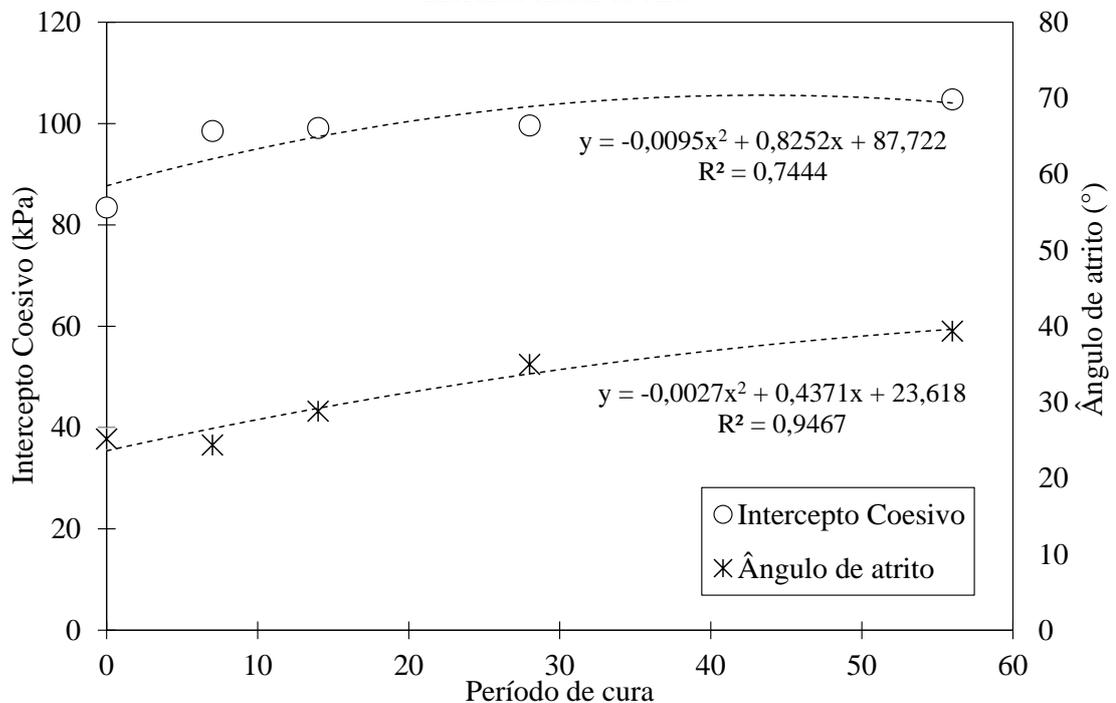
Tabela 4.7: Parâmetros de resistência da mistura solo-grits com teor de 15% do resíduo

	0 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias
Intercepto Coesivo (kPa)	83,45	98,55	99,14	99,65	104,81
Ângulo de Atrito (°)	25,18	24,38	28,82	34,97	39,35

Fonte: Autor (2024)

A partir dos resultados da Tabela 4.7, buscou-se identificar uma tendência de comportamento da mistura em função das diferentes idades de cura. Assim, a Figura 4.26 foi construída, correlacionando os valores de ângulo de atrito e intercepto coesivo com os períodos de cura das amostras. Foram construídas regressões, de modelo polinomial de ordem 2, para esses dois parâmetros de resistência. A escolha desse modelo foi em razão de este ser o que melhor representou os dois parâmetros concomitantemente. Pelo gráfico, é possível observar um crescimento gradativo do intercepto coesivo com os períodos de cura, tendendo a uma estabilização em maiores idades, tendo um ganho pouco acentuado. Ademais, o ângulo de atrito interno também apresentou um crescimento gradativo em função das diferentes idades de cura, não apresentando uma tendência de estabilização evidente.

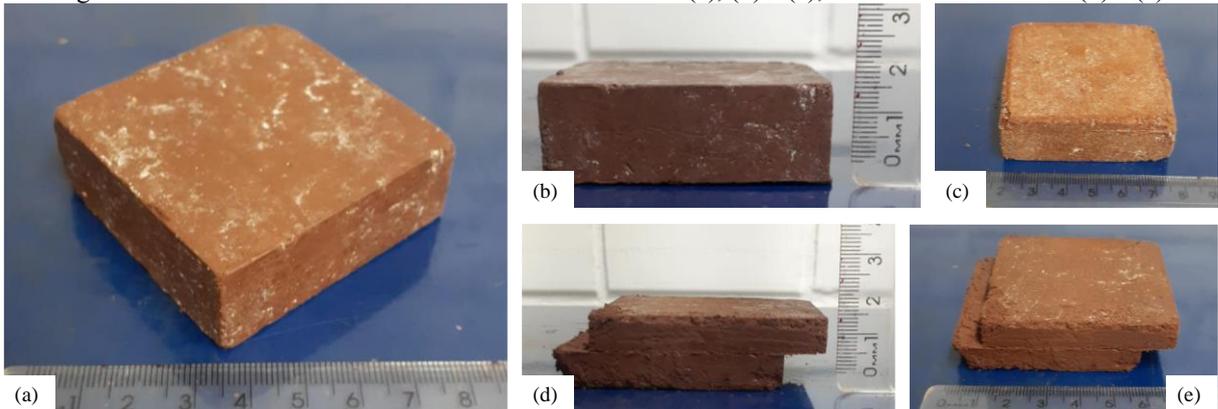
Figura 4.26: Relação do intercepto coesivo e do ângulo de atrito na mistura com adição de 15% de grits para diferentes idades de cura



Fonte: Autor (2024)

Os valores do R^2 para as regressões polinomiais obtidas demonstram que essas conseguiram expressar de forma satisfatória o comportamento das misturas, especialmente em relação ao ângulo de atrito. A Figura 4.27 retrata uma amostra da mistura S15G antes e após o ensaio de cisalhamento. Observa-se a presença do resíduo grits na amostra, bem como a superfície de ruptura do ensaio de cisalhamento.

Figura 4.27: Amostra da mistura S15G antes do ensaio em (a), (b) e (c); amostras cisalhada em (d) e (e)



Fonte: Autor (2024)

4.2.5 Discussão dos resultados

Nas seções 4.2.1 até a seção 4.2.4, foram apresentados os resultados de todos os ensaios de cisalhamentos realizados nesta pesquisa, juntamente com as 16 envoltórias de resistência construídas a partir desses e as regressões polinomiais de cada parâmetro. Porém, as análises anteriormente realizadas se deram de forma individual dentro de cada teor de adição de resíduo. Assim, nesta seção serão confrontados os resultados obtidos entre os diferentes teores da mistura solo-grits. A Tabela 4.8 reúne todos os parâmetros de resistência obtidos das diferentes análises realizadas.

Tabela 4.8: Parâmetros de resistência do solo e das misturas solo-grits

Idades de cura	Solo	S5G	S10G	S15G
0 dias	c 43,28 kPa ϕ 45,61 °	c 71,00 kPa ϕ 44,42 °	c 82,41 kPa Φ 34,73°	c 83,45 kPa ϕ 25,18°
7 dias/	-	c 89,30 kPa ϕ 41,04 °	c 99,37 kPa ϕ 32,43°	c 98,55 kPa ϕ 24,38°
14 dias	-	c 86,37 kPa ϕ 45,44 °	c 139,15 kPa ϕ 24,89°	c 99,14 kPa ϕ 28,82°
28 dias	-	c 87,00 kPa ϕ 42,70 °	c 182,66 kPa ϕ 20,59°	c 99,65 kPa ϕ 34,97°
56 dias	-	c 75,50 kPa ϕ 44,21 °	c 229,40 kPa ϕ 16,41°	c 104,81 kPa ϕ 39,35°

Fonte: Autor (2024)

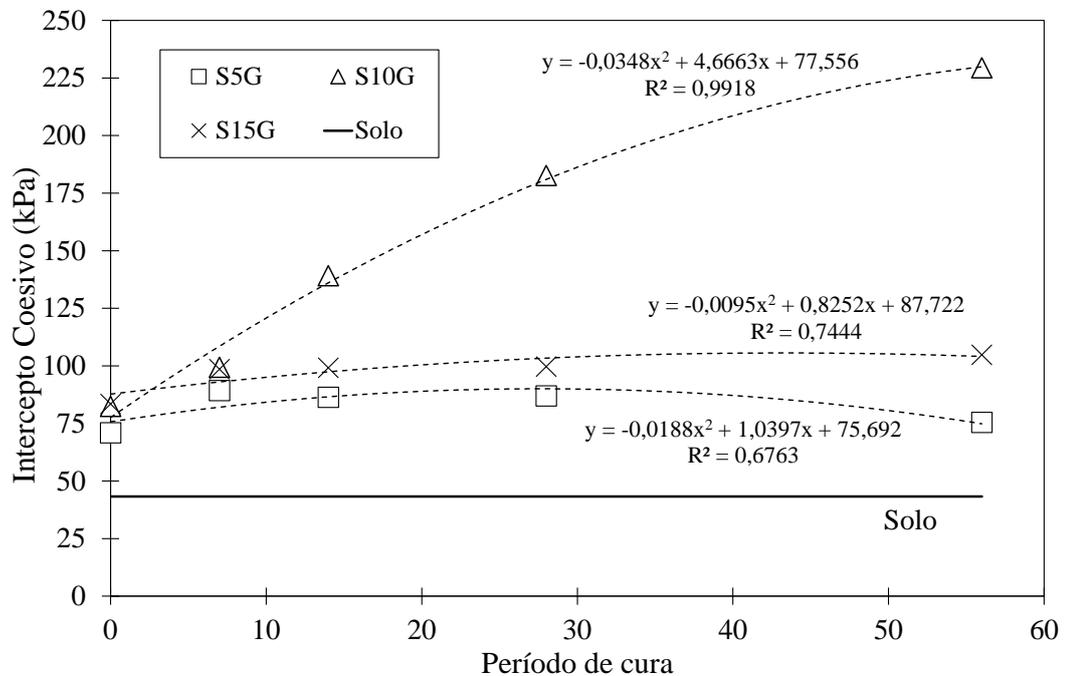
Com relação ao intercepto coesivo, percebe-se que em todas as adições do resíduo grits, para todas as idades de cura analisadas, os resultados mostraram um aumento em comparação ao solo de referência. Os maiores aumentos se deram na mistura S10G para as maiores idades de cura, enquanto os aumentos menos expressivos foram visualizados na mistura S5G. Comparando com o solo de referência, a mistura S5G alcançou aumentos na ordem de 106% para o intercepto coesivo, na idade de cura de 7 dias. A mistura S10G teve aumentos de 430% nesse parâmetro, para a maior idade de cura das amostras. Já a mistura S15G, o maior aumento do intercepto coesivo também foi observado para a maior idade de cura (142%).

Para melhor visualizar os efeitos das diferentes adições do resíduo grits, foi construída a Figura 4.28. Nessa, são representados os interceptos coesivos de cada mistura para as diferentes idades de cura, juntamente com suas regressões polinomiais, além do valor de referência do intercepto coesivo do solo. Sendo o período de cura um fator influente no intercepto coesivo, visto que as reações químicas que ocorrem entre o carbonato de cálcio e as partículas de argila são dependentes do tempo. Em solos argilosos estabilizados com cal, material rico em carbonato de cálcio, as reações químicas são dependentes do tempo de cura, da porcentagem de cal e da quantidade de aglomerados presentes no solo (Reza et al., 2021). Tal fato corrobora o ganho de intercepto coesivo em maiores idades de cura.

Nota-se um comportamento similar entre as misturas S5G e S15G (Figura 4.28), essa última com valores de intercepto coesivo um pouco superiores que a mistura S5G. Ambas as misturas apresentaram uma tendência de crescimento do parâmetro avaliado para as primeiras

idades de cura, a qual tende a uma estabilização nos maiores períodos de cura. Entretanto, a mistura de S5G teve uma leve redução desse parâmetro para o cenário de 56 dias de cura. A mistura S10G se destacou das demais, apresentando crescimentos significativos. Destaca-se um aumento na resistência ao cisalhamento ao comparar a amostra S5G com a amostra S10G, seguido por uma redução na resistência na amostra S15G. Esse comportamento é típico em solos estabilizados, onde se observa um ganho de resistência até uma certa porcentagem do agente estabilizante, após a qual ocorre uma diminuição desses parâmetros com o aumento adicional da quantidade do agente utilizado (Shi et al, 2024).

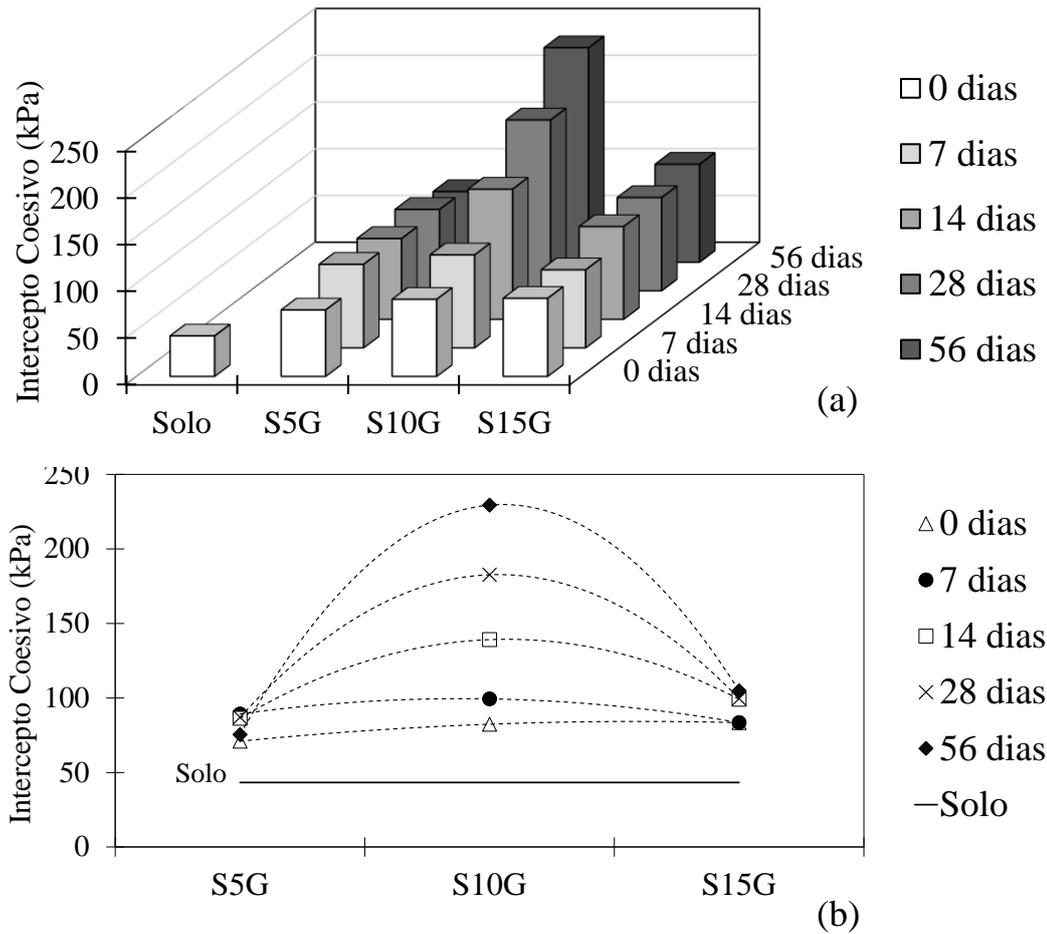
Figura 4.28: Regressões polinomiais do intercepto coesivo em função do período de cura das amostras para as diferentes misturas



Fonte: Autor (2024)

A Figura 4.29 evidencia os ganhos dos valores do intercepto coesivo para as diferentes misturas frente ao solo original. A mistura S10G aparenta estar próximo ao teor ótimo de adição do resíduo, considerando o parâmetro do intercepto coesivo obtido para as envoltórias em questão. Ademais, nota-se a maior influência da idade de cura sobre essa mistura.

Figura 4.29: Influência dos teores de adição do resíduo nas diferentes idades de cura sobre o intercepto coesivo

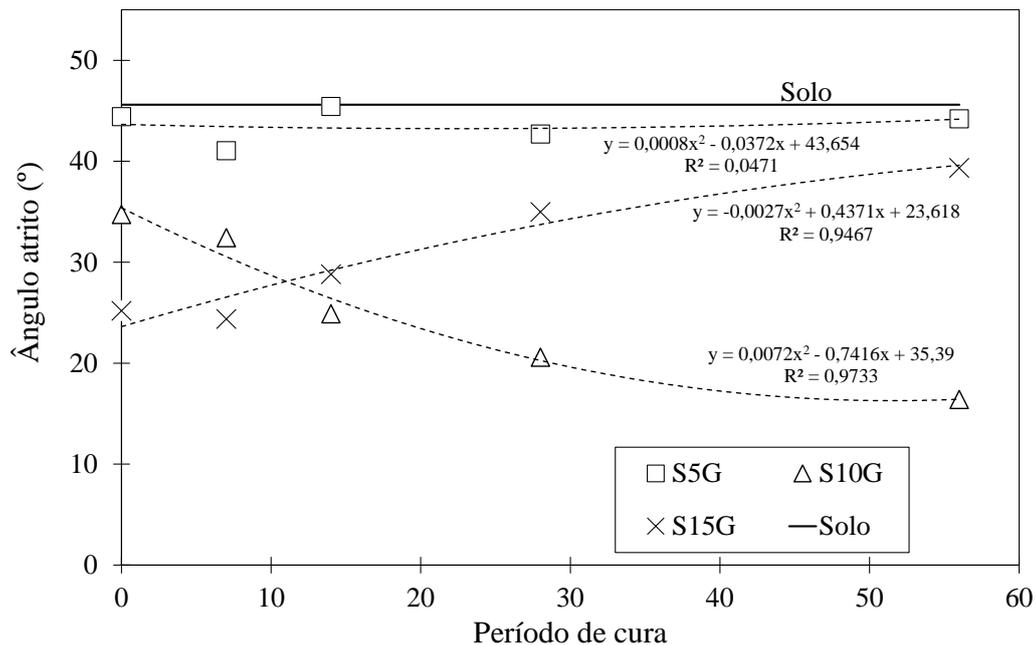


Fonte: Autor (2024)

Com relação ao parâmetro do ângulo de atrito interno das misturas, nota-se uma redução em relação ao valor de referência para todos os cenários estudados. A mistura S5G apresentou os maiores valores desse parâmetro, mas ainda inferiores ao do solo natural. As maiores reduções se deram para a mistura S10G nas maiores idades de cura, nos quais foi observado os maiores valores do intercepto coesivo. Para a mistura S10G, as reduções do ângulo de atrito alcançaram magnitudes de 64%, já para a mistura S5G, as reduções foram na ordem de -0,4% a -10% para as idades de cura de 14 dias e 7 dias, respectivamente. A mistura S15G apresentou reduções significativas do ângulo de atrito para as idades iniciais, mas uma tendência de crescimento para as maiores idades, um comportamento que se diferenciou das demais misturas solo-grits. O ângulo de atrito da envoltória da mistura S15G das amostras não submetidas a idades de cura foi de $25,18^\circ$ e para as amostras com 7 dias de cura foi de $24,38^\circ$, reduções de 44,8% e 46,5% em relação ao parâmetro referência do solo, respectivamente. Para a maior idade de cura, o ângulo de atrito obtido foi de $39,35^\circ$, uma redução de 13,7% em relação à referência.

A Figura 4.30 apresenta os resultados do ângulo de atrito das diferentes misturas e do solo em questão, podendo visualizar as diferentes tendências desse parâmetro em cada mistura solo-grits. Ressalta-se que todos os parâmetros de ângulo de atrito obtidos nas misturas foram inferiores a referência, conforme demonstra a Figura 4.30. Ademais, a mistura S5G mostrou uma tendência de estabilidade nesse parâmetro ao longo das idades de cura, a mistura S10G apresentou uma tendência de redução, e a mistura S15G teve reduções bruscas no ângulo de atrito nas menores idades, e uma tendência de crescimento nos maiores períodos de cura. Reitera-se que houve um ganho de resistência ao cisalhamento com o tempo de cura e com a adição das porcentagens de resíduo, com exceção para o percentual de 15%. No entanto, essa redução no ângulo de atrito pode estar associada o ganho de rigidez acentuado do material, onde o intercepto coesivo ganha destaque. Ainda, salienta-se que todas as amostras estabilizadas com o resíduo apresentaram dilatância.

Figura 4.30: Regressões polinomiais do ângulo de atrito interno em função do período de cura das amostras para os diferentes teores das misturas

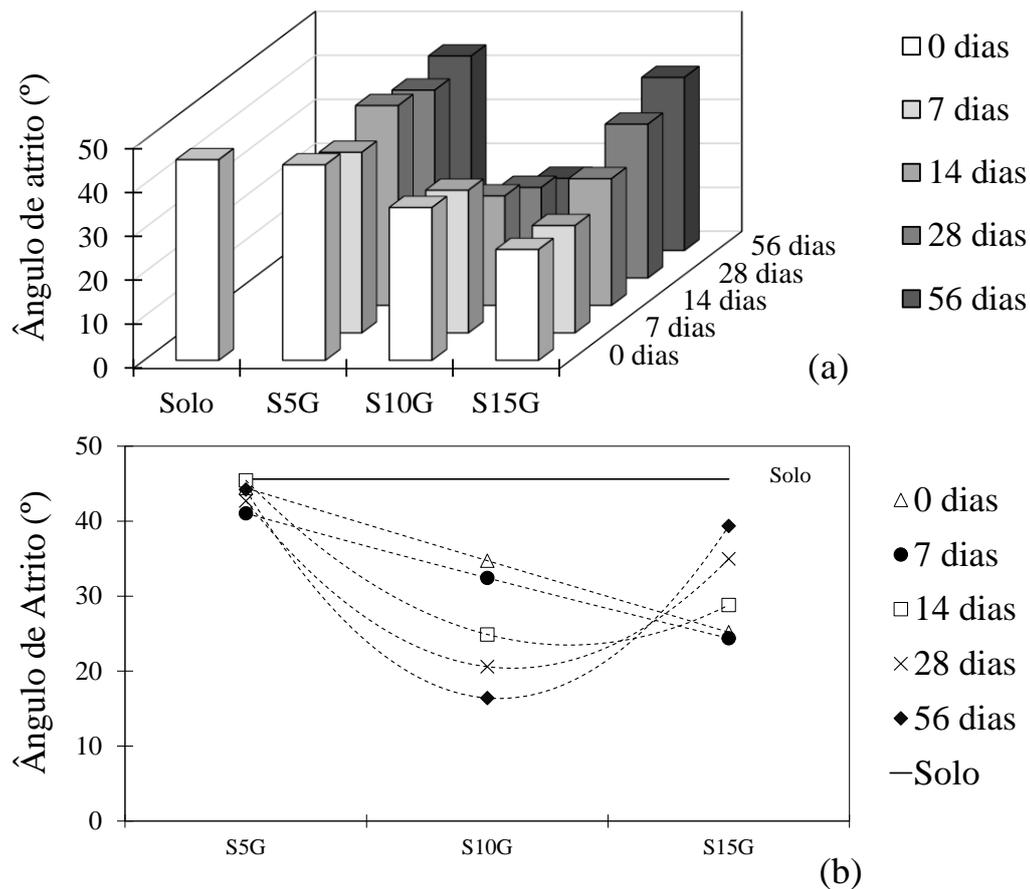


Fonte: Autor (2024)

A Figura 4.31 também ilustra os valores do ângulo de atrito obtidos pelas envoltórias de resistência das misturas solo-grits em função da porcentagem de adição do resíduo grits. Ressalta-se que as maiores reduções do valor do ângulo de atrito ocorrem para as maiores idades de cura da mistura S10G, nas quais foram observados os maiores valores de intercepto coesivo. Pela Figura 4.31 (b), nota-se uma diminuição do ângulo de atrito conforme o aumento do teor

de resíduo na mistura para as idades de cura de 0 e 7 dias. Nos demais períodos de cura, foi observado uma redução do ângulo de atrito da mistura S5G para S10G, e um aumento da mistura S10G para S15G, mas ainda inferiores aos valores da mistura com o menor teor de resíduo.

Figura 4.31: Influência dos teores de adição do resíduo nas diferentes idades de cura sobre o ângulo de atrito interno



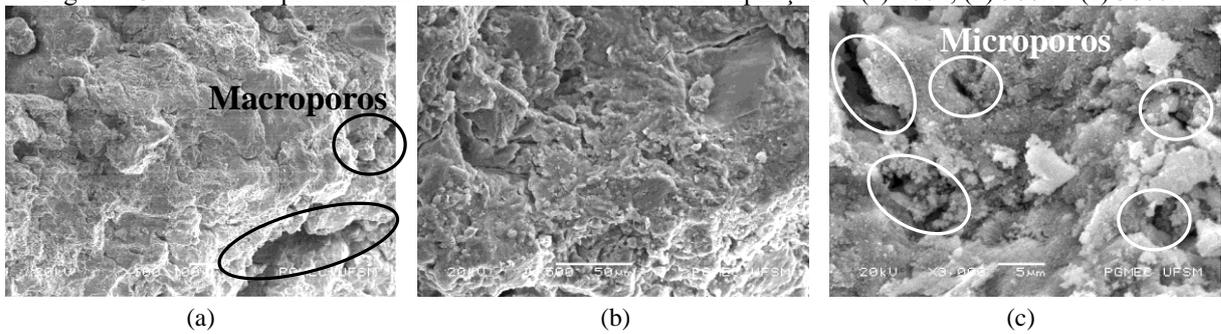
Fonte: Autor (2024)

4.3 AVALIAÇÃO DO MICROSCOPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

Foram realizadas análises por meio do microscópio eletrônica de varredura em amostras compactadas do solo e das misturas solo-grits, nos três diferentes teores de adição do resíduo. Salienta-se que todas as amostras foram compactadas na umidade ótima. O tempo decorrido entre a compactação e a análise através do MEV foi de 7 dias. A Figura 4.32 apresenta as análises da amostra de solo, a Figura 4.33 apresenta os resultados da mistura S5G, enquanto as Figura 4.34 e Figura 4.35 reúnem as imagens referentes a mistura S10G e S15G, respectivamente.

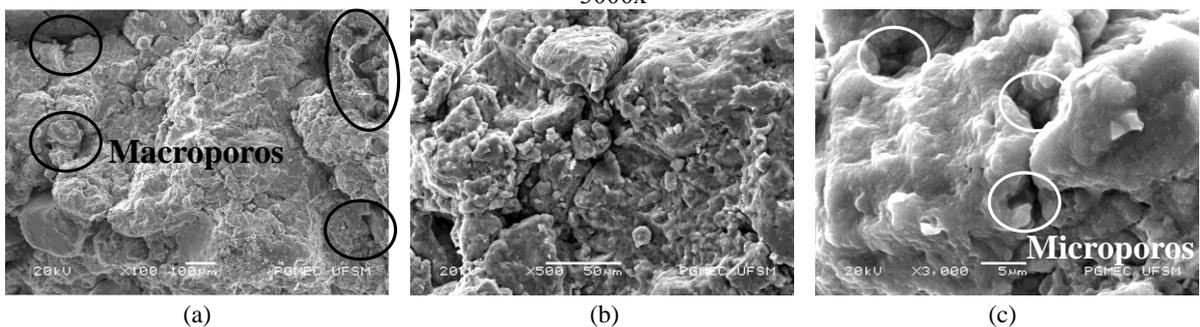
Observa-se que o solo compactado com energia normal apresenta microporos e macroporos isolados, além de poucas agregações. Ao analisar a mistura com diferentes teores de grits, são observadas estruturas distintas, justificando o comportamento cisalhante diferenciado. Na mistura S5G, é possível observar o aparecimento de agregações, resultando em uma maior quantidade de poros, configurando uma estrutura floculada, ou seja, mais aberta e com maior número de vazios. À medida que a adição de resíduo aumenta, a estrutura torna-se mais dispersa, evidenciando a repulsão entre as partículas, que tendem a se orientar. Com a adição de 10% de resíduo, ocorre uma redução dos macros e microporos, bem como uma maior orientação das partículas. Com o aumento contínuo de resíduos, observa-se uma maior orientação das partículas.

Figura 4.32: Microscopia eletrônica de varredura do solo com ampliação de (a) 100x, (b) 500x e (c) 3000x



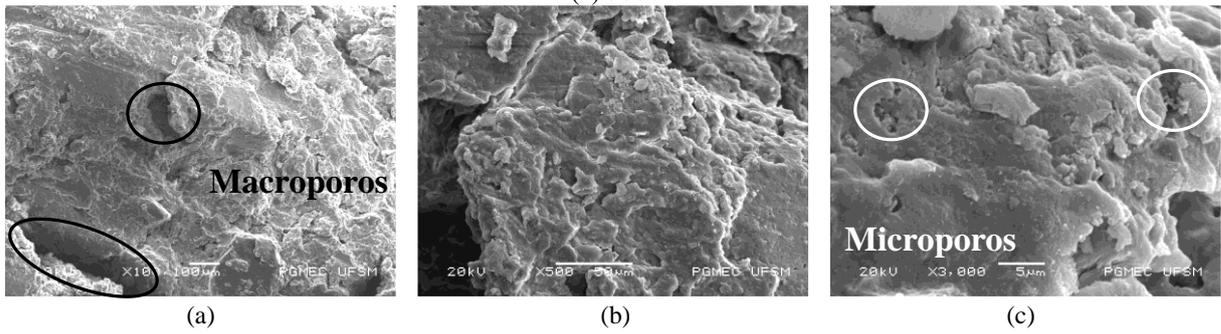
Fonte: Autor (2024)

Figura 4.33: Microscopia eletrônica de varredura da mistura S5G com ampliação de (a) 100x, (b) 500x e (c) 3000x



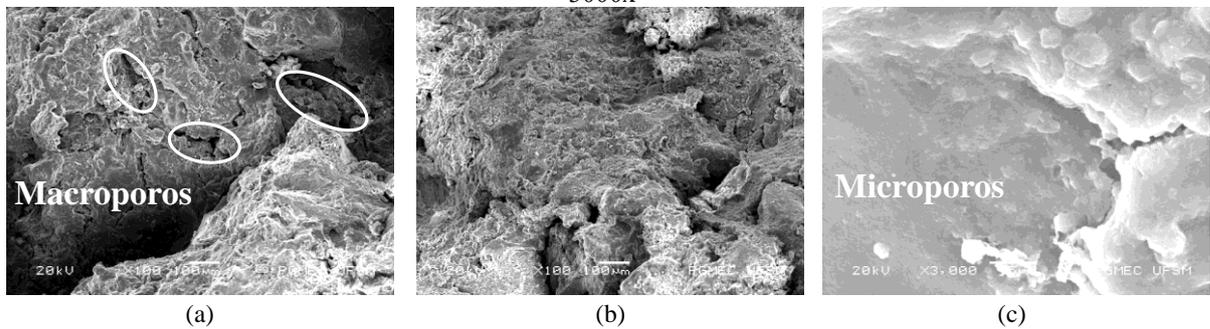
Fonte: Autor (2024)

Figura 4.34: Microscopia eletrônica de varredura da mistura S10G com ampliação de (a) 100x, (b) 500x e (c) 3000x



Fonte: Autor (2024)

Figura 4.35: Microscopia eletrônica de varredura da mistura S15G com ampliação de (a) 100x, (b) 500x e (c) 3000x



Fonte: Autor (2024)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A preocupação com a sustentabilidade ambiental tem crescido significativamente nos últimos anos. Um assunto que ganha destaque nesse cenário é o reaproveitamento de resíduos sólidos industriais. Aliado a isso, a indústria de celulose nacional vem apresentando um crescimento expressivo na última década, sendo uma grande geradora de resíduos. Este trabalho teve o objetivo de estudar o comportamento cisalhante de um solo laterítico proveniente do município de Cruz Alta, Rio Grande do sul, com a adição do resíduo grits, proveniente da indústria da celulose, em diferentes teores (5%, 10% e 15%) e diferentes períodos de cura (0, 7, 14, 28 e 56 dias).

Foram realizados ensaios de caracterização sobre a mistura solo-grits, notando-se um aumento do Limite de Liquidez para a mistura S5G, a qual proporcionou um aumento do Índice de Plasticidade, em relação ao solo de referência. As misturas com os maiores teores não apresentaram diferenças significativas em relação à referência.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em amostras compactadas na energia Proctor normal, nas condições de umidade ótima e não inundados, sendo a envoltória construída a partir dos ensaios sobre tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. O solo em estudo apresentou intercepto coesivo de 43,28 kPa, e ângulo de atrito interno de 45,61 °. A incorporação de diferentes teores de resíduo aumentou de forma significativa o intercepto coesivo, especialmente para a mistura com teor de adição de 10% do resíduo. As misturas S5G e S15G apresentaram uma tendência de estabilização desse parâmetro com diferentes períodos de cura. A mistura S5G resultou num intercepto coesivo de 89,30 kPa para a idade de cura de 7 dias, e a mistura S15G obteve 104,81 kPa para o maior período de cura. Entretanto, a mistura S10G apresentou uma tendência expressiva de crescimento do intercepto coesivo ao longo do tempo, alcançando valores próximos de 230 kPa.

Em relação ao ângulo de atrito, todos os resultados obtidos foram inferiores ao do solo de referência. A mistura S5G apresentou uma estabilidade desse parâmetro nas diferentes idades de cura, com o maior valor de 45,44 ° para a idade de cura de 14 dias. A mistura S10G apresentou uma tendência de diminuição do ângulo de atrito com o tempo, com $\phi=16,41^\circ$ para 56 dias de cura das amostras. Por outro lado, a mistura S15G apresentou uma tendência de crescimento em relação ao aumento das idades de cura, com $\phi=39,35^\circ$ para o maior período de cura. Nota-se que a mistura S10G apresentou os maiores valores de intercepto coesivo, e os menores valores do parâmetro do ângulo de atrito.

As análises a partir do microscópio eletrônico de varredura foram realizadas sobre amostras com idades de cura de 7 dias. Nessas, foi observado que solo compactado apresentou microporos e macroporos isolados, além de poucas agregações. As diferentes misturas solo-grits apresentaram estruturas distintas, corroborando com o comportamento cisalhante diferente ao solo de referência. Na mistura S5G, observou-se o aparecimento de agregações, resultando em uma maior quantidade de poros. À medida que a adição de resíduo aumenta, notou-se estruturas mais orientadas. Nas misturas S10G, ocorreu uma redução dos macros e microporos. Com o aumento contínuo de resíduos, observa-se uma maior orientação das partículas. Além disso, a redução dos macroporos com a adição do resíduo pode estar correlacionada ao maior número de finos que o grits ($D_{med} < 177 \mu m$) impõe ao corpo de prova, preenchendo esses vazios.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no estudo apresentado, são recomendados como sugestões para pesquisas futuras:

- I. Efetuar novos ensaios de cisalhamento direto sobre as mesmas condições apresentadas nessa pesquisa, com o intuito de se obter uma maior amostragem de resultados, envolvendo análises estatísticas;
- II. Realizar ensaios de cisalhamento direto na condição inundada para obter parâmetros de resistência efetivos e entender o efeito da mistura solo-grits frente à inundação;
- III. Analisar por meio do MEV e tomografia computadorizada amostras com diferentes idades de cura, visualizando os efeitos na mistura ao longo do tempo;
- IV. Confrontar os resultados das envoltórias de resistência obtidas pelo cisalhamento direto com diferentes ensaios de resistência mecânica;
- V. Realizar análises comparando os resultados obtidos nessa pesquisa com as curvas características do solo e das misturas solo-grits.
- VI. Correlacionar os resultados com os obtidos em misturas de solo-cal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3080**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Annual Book of ASTM Standards, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 8 p., 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de Pedregulho retidos na peneira de abertura de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 10p., 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 5 p., 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p., 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica, Rio de Janeiro, 16 p., 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação, Rio de Janeiro, 9 p., 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação, Rio de Janeiro, 77 p., 2004

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D.; FERREIRA, C. A.; ANDRADE, G. C. Utilização de resíduos da produção de celulose. **Revista da Madeira – REMADE**. Curitiba, v. 77, 2003.

BOSZCZOWSKI, R. B.; et al. **Laboratório de mecânica dos solos**: ensaios especiais. Oficina de Textos, 2023.

BRAHAMI, Y.; SAEIDI, A.; FISET, M., Ba, K. The Effects of the Type and Quantity of Recycled Materials on Physical and Mechanical Properties of Concrete and Mortar: A Review. **Sustainability**, v. 14, 2022.

BRITISH STANDARD - BSI. **BS 1377-7**: Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Part 7: Shear Strength Test (Total Stress). UK British Standard Institute, 1990.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6 ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. 1996.

CHENG, W.C.; XUE.Z.W. L.; XU, J. Using Post-Harvest Waste to Improve Shearing Behavior of Loess and Its Validation by Multiscale Direct Shear Tests. **Applied Sciences**, v. 29, 2019.

CORREIA, F. M. **Análise de distúrbios de compactação de cavacos de eucalipto em digestores contínuos fase vapor**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2010.

COSTA, A. O. S; LIMA E. L. Modelling and Control of an Industrial Multiple-Effect Evaporator System. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.81, p. 1-9, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 256**: Solos compactados com equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 6p., 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 258**: Solos compactados com equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro, 14p., 1994.

DESTEFANI, A. Z.; SANTOS, M. M.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização e avaliação do resíduo grits da indústria de celulose. In: XIX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, XIX CBECiMat. **Anais...** Campos do Jordão, SP, 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **BEN 50 anos**, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/ben-50-anos>. Acesso em: maio, 2024

FALCÃO, P. **Avaliação do impacto da inundação na resistência e deformabilidade de um solo laterítico e colapsível: estudo experimental e numérico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021

FALCÃO, P. **Análise de um solo potencialmente colapsível: sob o viés clássico, reológico e numérico**. Qualificação de Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.

FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W.Y.Y.; BICA, A.V.D. The use of filter-paper and suction-plate methods for determining the soil-water characteristic curve of undisturbed colluvium soils. **Geotechnical Testing Journal**, v. 29, 9.419-425, 2006,

FIGUEIRÊDO, L. S. **Modelagem matemática do estado estacionário de um real sistema d caustificação em uma fábrica de celulose**. Dissertação (Mestrado) – Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, MG, 2009.

FIORI, A.P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2. ed. Curitiba. Editora UFPR, 2009.

FOELKEL, C. **Eucalyptus online book: Resíduos sólidos indústrias do processo de fabricação de celulose kraft**. 2011. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/disponiveis.html>. Acesso em: maio, 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Online data FAOSTAT**, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em: mai0, 2024.

GERSCOVICH, D.M.S. **Estabilidade de Taludes**. 2. ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2016.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual IBÁ**, 2023. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>. Acesso em maio, 2024

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Energy balances**, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>. Acesso em: maio, 2024.

JUNIOR, A.L. O. **Produção e caracterização de eco-clínquer a partir do reaproveitamento de resíduos industriais**. Dissertação (Mestrado) –Universidade Federal de viçosa, Viçosa, MG 2020.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V., **Soil Mechanics**. New York, John Wiley & Sons, 1969.

LEITE, M.M. TCF System Closure. The Kvaerner Vision. In: Encontro Internacional de Branqueamento da Pasta Celulósica. **Anais...** Vitória, ES., 1996.

LIMA, D. C.; ROHM, S. A.; BARBOSA, P. S. A. **A estabilização dos solos III: Misturas solo-cal para fins rodoviários**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1993.

MACHADO, C.C.; PEREIRA, R. S.; PIRES, J. M.M. Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial (grits) na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, nº4, 2003

MACHADO, C.C.; PEREIRA, R.S.P.; LIMA, D.C., CARVALHO, C.A.B., PIRES, D.M. Caracterização tecnológica de mistura solo-grits para pavimentos de estradas florestais: influência do tratamento térmico do grits na resistência mecânica das misturas. **Revista Árvore**, Viçosa. MG, v. 31, nº 3, p. 487-494, 2007.

MACIEL, T.M.S.; ALVES, M.C.; SILVA, F. C. Atributos químicos da solução e do solo após aplicação de resíduo da extração de celulose. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.1, p.84–90, 2015.

MAIA, E.S.; SOUZA, M. M.; AGUIAR, M. F. P.; OLIVEIRA, F. H. L. Estudo do melhoramento de solo com utilização de resíduo de indústria de celulose. **Revista Tecnologia. Fortaleza**, v. 35, n. 1 e 2, p. 78-88, 2014.

MARTINS, F. M. Caracterização Química e Mineralógica de Resíduos Sólidos Industriais Minerais do Estado do Paraná. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

NOBREGA, M.T. **As reações dos argilominerais com a cal**. Associação Brasileira de produtores de cal, boletim 14, São Paulo, SP, 1985.

OLIVEIRA, T.C.G.; CALEJA, C.; OLIVEIRA, M.B.; BARROS, L. Reuse of fruits and vegetables biowaste for sustainable development of natural ingredients. **Food bioscience**. v. 53, 2023.

OLIVEIRA, Y. S. de; COSTA, E. B. C.; MOTTA, L. A. de C. Uso de dregs e grits em substituição parcial ao cimento: caracterização e resistência mecânica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 24, 2024.

PEREIRA, R.S. Viabilidade técnica do emprego de resíduos da indústria de celulose para construção de estradas florestais. **Tese** (Doutorado) –Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3 ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2006.

PRIOR, A. Comportamento de solo laterítico com adição de resíduo da celulose e cimento: resistência ao cisalhamento e compressão axial. **Trabalho Conclusão de Curso**- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maira, no prelo 2025.

REZA, M.A.; ABBAS, G.; LEILA, C.S. An investigation into the effects of lime on compressive and shear strength characteristics of fiber-reinforced clays, **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**. v.13 (4), 2021.

RIBEIRO, A. P. Avaliação do uso de resíduos sólidos inorgânicos da produção de celulose em materiais cerâmicos. **Tese (Doutorado)** – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SHI, Y.; LI, S.; ZHANG, T.; LIU, J.; ZHANG, J. Compaction and shear performance of lime-modified high moisture content silty clay. **Case Studies in Construction Materials**. v.21, 2024.

SILVA, S.; CARSON, P.; INDRAPALA, D.V.; WARWICK, B.; REICHMAN, S.M. Land application of industrial wastes: impacts on soil quality, biota, and human health. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30. 2023.

SMOOK, G.A. **Handbook for Pulp and paper technologists**. 2 ed. Vancouver, Canada: Angus Wilde Publications Inc. 1989.

SOUZA, T. I.; CARDOSO, A.V. Utilização de Resíduos Sólidos da Indústria de Celulose Kraft na Fabricação de Cimento: Caracterização Físico-Química. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 18º CBECiMat. **Anais...** Porto de Galinhas, PE, 2008

TORRES, C.M.M.E.; SILVA, C.M.; PEDROTI, L.G.; FERNANDES, W.E.H.; BALLOTIN, F.C.; ZANUNCIO, A.J.V.; Dregs and grits from kraft pulp mills incorporated to Portland cement clinker. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, p. 851–861, 2020.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; Comparison of Different Procedures to Predict Unsaturated Soil Shear Strength. **ASTM Proceedings**, Unsaturated Soils, Geo-Denver, 2002.

WOLFF, E. O uso do lodo de estação de tratamento de água e resíduos da indústria de celulose (dregs, grits e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha. **Tese (Doutorado)** – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008

ZANELLA, B. P.; CRISTINA, I., TRANNIN, B. Recycling residues from the pulp and paper industries in the civil construction. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 20, n. 3, p. 1115–1128, 2019.