



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MICHAEL JACKSON ALVES DE OLIVEIRA**

**APLICAÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DA QUEIMA DE RESÍDUOS TÊXTEIS  
NA GEOTECNIA: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL COM FOCO NA  
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO**

**RUSSAS**

**2025**

MICHAEL JACKSON ALVES DE OLIVEIRA

APLICAÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DA QUEIMA DE RESÍDUOS TÊXTEIS NA  
GEOTECNIA: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL COMO FOCO NA RESISTÊNCIA  
AO CISALHAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Ceará – Campus  
Russas, como requisito parcial à obtenção do  
título em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dr. Daniela Lima Machado  
da Silva.

RUSSAS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- O48a Oliveira, Michael.  
Aplicação de cinzas provenientes da queima de resíduos têxteis na geotecnia : uma abordagem experimental com foco na resistência ao cisalhamento / Michael Oliveira. – 2025.  
75 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2025.  
Orientação: Profa. Daniela Lima Machado da Silva.
1. Sustentabilidade. 2. Reaproveitamento. 3. Cinzas Têxteis. 4. Mistura. 5. Resistência ao cisalhamento. I. Título.

CDD 620

---

MICHAEL JACKSON ALVES DE OLIVEIRA

APLICAÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DA QUEIMA DE RESÍDUOS TEXTÉIS NA  
GEOTECNIA: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL COMO FOCO NA RESISTÊNCIA AO  
CISALHAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Ceará – Campus  
Russas, como requisito parcial à obtenção do  
título em Engenharia Civil.

Aprovada em: 21/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Daniela Lima Machado da Silva (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Me. Marcio Avelino de Medeiros  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Civil. Carlos Eduardo Machado de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A meus pais, familiares e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Adriana Alves e Danilo Ferreira, a quem eu dedico o mérito dessa grande conquista, pois além do grande apoio prestado por eles nos momentos mais difíceis, ambos não mediram esforços para que esse sonho fosse realizado.

A minha irmã, Maria Yasmim, a quem eu sou grato pelo companheirismo e pela responsabilidade do título de irmão mais velho, a amo muito e desejo todo o sucesso do mundo.

A minha amada avó Antonieta e a minha querida tia, Daniela Fernandes, que se faz presente em todos os âmbitos da minha vida, incluindo a minha vida acadêmica, sempre prestativa, amorosa e disposta a auxiliar no meu sucesso.

Aos meus falecidos avós, Maria de Lourdes e Adriano Oliveria, aos quais tive a infelicidade de me despedir definitivamente durante o caminhar dessa jornada, mas que se fizeram presentes em todas as etapas da minha vida, e foram as minhas grandes inspirações para iniciar esse ciclo acadêmico.

Aos meus primos, Rikelme e Clayton, a quem tenho enorme amor e carinho.

Ao meu companheiro de todos os momentos, João Pedro, que esteve integralmente presente em todas as etapas difíceis e felizes neste período de graduação, me ajudando a erguer e reerguer em todas as dificuldades e os obstáculos que enfrentei.

A orientadora do presente trabalho, Prof. Dra. Daniela Lima Machado da Silva, por ter acatado ao meu pedido de orientação e por ter me auxiliado em todos os momentos em que precisei durante a minha jornada acadêmica da graduação.

Aos meus amigos e companheiros de equipe, Hyago Breno e Andrea Oliveira, que foram responsáveis em auxiliar na produção e nos resultados apresentados neste trabalho.

Aos meus bons amigos, que foram bons companheiros em diversos momentos nessa trajetória, Sandy, Livia, Mateus, Victor, Karina.

Aos meus grandes amigos, Edilson Souza e Isaias Clementino, que merecem uma homenagem simbólica com essa conquista, por terem feito parte do meu desenvolvimento pessoal e pelo companheirismo de longa data, mas que infelizmente partiram precocemente deixando boas lembranças e muitas saudades.

Agradeço pela disponibilidade e compromisso do Me. Marcio Avelino de Medeiros e do Eng. Civil. Carlos Eduardo Machado de Oliveira, por aceitarem compor a banca examinadora do presente trabalho.

Agradeço a cerâmica do Liro, que forneceu as cinzas têxteis para a execução desse trabalho, esse gesto foi fundamental para a elaboração dessa pesquisa.

## RESUMO

A produção de resíduos sólidos industriais não renováveis e sem finalidades de manejo ou reutilização, torna-se um grande problema para o meio ambiente quando são descartados ou tratados sem o devido cuidado. Um exemplo disso é o uso de resíduos de tecidos como combustível em fornos de fábricas de cerâmica, que resulta na geração de cinzas. Embora as cinzas sejam subprodutos desse processo, frequentemente carecem de manejo adequado ou reaproveitamento eficaz, agravando os impactos ambientais. Assim sendo, o presente estudo tem como objetivo avaliar o aproveitamento de resíduos obtidos a partir da queima de resíduos têxteis na geotecnia, com foco na resistência ao cisalhamento. Contudo, os materiais investigados neste estudo consistem em solo arenoso, cinza têxtil e a mistura solo-cinza. O solo foi coletado em uma estrada vicinal, enquanto a cinza têxtil foi obtida de uma fábrica de cerâmica vermelha localizada no município de Russas-CE. As amostras foram encaminhadas ao Campus Russas da UFC, onde passaram por caracterização geotécnica, mecânica e química. Além disso, o comportamento mecânico da cinza têxtil foi avaliado por meio de ensaios de compactação com energia intermediária e resistência ao cisalhamento. Para a preparação da mistura solo-cinza, buscou-se otimizar o arranjo das partículas, visando a minimização do volume de vazios, utilizando-se para isso o modelo de Andreasen. Dessa forma, os resultados para os índices físicos do solo analisado, apresenta uma predominância de partículas na faixa da areia fina e média, com uma pequena fração de silte e praticamente ausência de argila, enquanto a cinza têxtil apresentou predominância de partículas finas e porosas, com elevado índice de retenção de umidade e volume de vazios. A análise química para a cinza identificou a presença de óxidos metálicos e outros compostos que podem influenciar na reatividade do material. Referente ao empacotamento de partículas, verificou-se que para um material com menor índice de vazios e com maiores índices de compacidade, as porcentagens de solo e cinza têxtil devem compor respectivamente 74% e 26% na composição da mistura. Os ensaios de resistência ao cisalhamento mostraram que a adição das cinzas têxteis ao solo, resultou em um conjunto com maior resistência a tensões de cisalhamento, maior ângulo de atrito interno e menor volume de vazios quando comparada ao solo. As deformações da mistura sob tensões normais apresentaram redução em cerca de 60% quando comparadas as deformações da cinza e do solo, pois a conjunto apresentou melhor compacidade no rearranjo estrutural das partículas. Por fim, além de melhorar a resistência ao cisalhamento em combinação com solo, os ensaios realizados demonstraram o potencial da aplicação da cinza têxtil em misturas, destacando a sua capacidade de reaproveitamento como material alternativo, além de reduzir os impactos ambientais causados pelas indústrias têxteis e cerâmicas.

**Palavras-Chave:** sustentabilidade; reaproveitamento; cinzas têxteis; mistura; resistência ao cisalhamento;

## ABSTRACT

The production of non-renewable industrial solid waste without proper management or reuse strategies poses a significant environmental problem, especially when such waste is disposed of or treated without due care. One example of this issue is the use of textile waste as fuel in ceramic factory kilns, which results in the generation of ashes. Although these ashes are byproducts of the process, they often lack appropriate disposal or effective reuse, exacerbating environmental impacts. Therefore, this study aims to evaluate the potential reuse of waste derived from the combustion of textile residues in geotechnical applications, focusing on shear strength. The materials investigated in this study consist of sandy soil, textile ash, and a soil-ash mixture. The soil was collected from a rural road, while the textile ash was obtained from a red ceramic factory located in the municipality of Russas-CE, Brazil. The samples were sent to the Russas Campus of the Federal University of Ceará (UFC), where they underwent geotechnical, mechanical, and chemical characterization. Additionally, the mechanical behavior of the textile ash was evaluated through compaction and shear strength tests. For the preparation of the soil-ash mixture, an effort was made to optimize the particle arrangement to minimize void volume, employing the Andreasen model. The physical characterization results of the analyzed soil indicated a predominance of fine and medium sand particles, with a small fraction of silt and an almost complete absence of clay. In contrast, the textile ash was composed mainly of fine and porous particles, exhibiting a high moisture retention capacity and a significant void ratio. The chemical analysis of the ash identified the presence of metal oxides and other compounds that may influence the material's reactivity. Regarding particle packing, it was found that an optimal composition with a lower void ratio and higher compactness was achieved when the mixture consisted of 74% soil and 26% textile ash. The shear strength tests demonstrated that the addition of textile ash to the soil resulted in a material with higher resistance to shear stresses, an increased internal friction angle, and a lower void ratio compared to the soil alone. Deformations in the mixture under normal stresses were reduced by approximately 60% when compared to those of the individual soil and ash samples, as the mixture exhibited better compactness due to improved structural particle rearrangement. Finally, in addition to enhancing shear strength when combined with soil, the conducted tests demonstrated the potential of textile ash for use in mixtures, highlighting its viability as an alternative material and its contribution to mitigating the environmental impacts caused by the textile and ceramic industries.

**Keywords:** sustainability; reuse; textile ashes; mixture; shear strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da cinza têxtil .....	22
Figura 2 – Classificação do Solos pelo Método SUCS.. .....	28
Figura 3 – Tabela de Classificação SUCS.....	29
Figura 4 – Representação do comportamento de solos. a) Amostra em confinamento; b) Amostra sobre tensões de cisalhamento simples.....	37
Figura 5 – Representação do funcionamento do ensaio de cisalhamento direto. ....	38
Figura 6 – Fluxograma dos ensaios experimentais realizados.....	40
Figura 7 – Localização da Cerâmica do Liro.....	41
Figura 8 – Localização da coleta de Solo. ....	42
Figura 9 – Armazenagem e tratamento das amostras: a) Solo arenoso armazenado; b) Cinza têxtil armazenada em saco plástico; c) Preparação das amostras para caracterizações.....	43
Figura 10 – Representação das etapas de peneiramento fino e grosso das amostras: .....	44
Figura 11 – Ensaio de sedimentação das amostras de solo e cinza; a) Proveta com solo; b) Solo após sedimentação; c) Proveta com cinza; d) Cinza após sedimentação. ...	44
Figura 12 – Ensaio de massa específica a) Picnômetro com solução e solo; b) Picnômetro com solução e cinza; c) Picnômetros em processo de aquecimento. ....	45
Figura 13 – Representação das fases do ensaio de compactação: a) Adição de umidade na amostra de cinza; b) Prensa para remover corpo de prova compactado; c) Corpo de prova de solo compactado; d) Corpo de prova de solo. ....	45
Figura 14 – Processos para ensaio de cisalhamento direto: a) Adição de água a para atingir ótima da amostra; b) Moldagem do material; c) Prensa de para ensaio de cisalhamento direto; .....	46
Figura 15 – Representação das amostras de cinza têxtil, mistura e solo após ensaio de cisalhamento direto. ....	47
Figura 16 – Curvas granulométricas do solo e cinza, e para a mistura sugerida pelo modelo de Andreasen .....	48
Figura 17 – Composição sugerida para a curva granulométrica da mistura, obtida por meio do modelo modificado de Andreasen.....	49
Figura 18 – Curva granulométrica do solo, cinza têxtil e mistura.....	51
Figura 19 – Curva de compactação do solo, cinza e mistura.....	53

Figura 20 – Volume e Índices de Vazios das Amostras .....	54
Figura 21 – Tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal da amostra de solo. ....	57
Figura 22 – Variação volumétrica x deslocamento horizontal da amostra de solo. ....	58
Figura 23 – Gráfico tensão de cisalhamento x tensão normal da amostra de solo. ....	58
Figura 24 – Tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal da amostra de cinza têxtil. ....	60
Figura 25 – Variação volumétrica x deslocamento horizontal da amostra de cinza têxtil. ....	61
Figura 26 – Gráfico tensão de cisalhamento x tensão normal da amostra de cinza têxtil. ....	62
Figura 27 – Tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal da mistura. ....	64
Figura 28 – Variação volumétrica x deslocamento horizontal da mistura. ....	65
Figura 29 – Gráfico tensão de cisalhamento x tensão normal da amostra da mistura. ....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio experimentais das amostras .....	40
Tabela 2 – Resultados do ensaio de umidade higroscópica. ....	49
Tabela 3 – Resultados para os limites de Atterberg das amostras.....	51
Tabela 4 – Classificação SUCS dos Solos. ....	51
Tabela 5 – Densidade real dos grãos das amostras de solo, cinza e mistura.....	52
Tabela 6 – Resultados da umidade ótima e massa específica seca máxima das amostras de solo, cinza e mistura.....	53
Tabela 7 – Caracterização química por FRX da amostra de solo.....	55
Tabela 8 – Tabela 8 – Caracterização química por FRX da amostra de cinza têxtil.....	56
Tabela 9 – Tabela 9 – Resultados para o ensaio de cisalhamento direto na amostra de solo.....	62
Tabela 10 – Tabela 10 – Resultados para o ensaio de cisalhamento direto na amostra de cinza. ....	62

## LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas'
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ARC	Agregado de Resíduo de Concreto
ARM	Agregado de Resíduo Misto
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEM	Balanço Energético Nacional
CC	Coefficiente de Curvatura
CLSM	Material de Baixa Resistência Controlada ( <i>Controlled Low-Strength Material</i> )
CNU	Coefficiente de Não Uniformidade
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FA	Cinza Volante ( <i>Fly Ash</i> )
FRX	Fluorescência de Raios X
ISO	International Organization for Standardization
LCC	Laboratório de Construção Civil
LL	Limite de Liquidez
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
LP	Limite de Plasticidade
LSP	Laboratório de Solos e Pavimentação
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PPC	Controle Preditivo de Processo
RSI	Resíduo Sólido Industrial
RSS	Resíduos Sólidos de serviços de Saúde
SPC	Controle Estatístico de Processo
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	16
2.1	<b>Objetivos Geral</b> .....	16
2.1	<b>Objetivos Específicos</b> .....	16
3	<b>REFERÊNCIAL TEÓRICO</b> .....	17
3.1	<b>Resíduos Sólidos e a Classificação de Resíduos Têxteis</b> .....	17
3.1.1	<i>Resíduos Sólidos Produção, Manejo e Tratamento</i> .....	17
3.1.2	<i>Classificação de Resíduos Sólidos</i> .....	18
3.1.3	<i>Resíduos Sólidos Provenientes da Indústria Têxtil</i> .....	19
3.1.4.	<i>Resíduos Têxteis como Fonte de Combustível em Fábricas de Cerâmicas</i> .....	20
3.2	<b>Cinzas Provenientes da Queima de Resíduos Têxteis</b> .....	22
3.2.1	<i>Tipos de Cinzas</i> .....	22
3.2.2	<i>Cinzas Volantes</i> .....	23
3.2.3	<i>Cinzas de Fundo</i> .....	24
3.3	<b>Reaproveitamento de Cinzas Industriais</b> .....	25
3.4	<b>Aplicação de Cinzas na Engenharia Civil</b> .....	25
3.5	<b>Classificação dos Solos</b> .....	27
3.5.1	<i>Classificação SUCS dos solos</i> .....	27
3.6	<b>Controle Preditivo de Processo e Controle Estatístico de Processo</b> .....	29
3.6.1	<i>Método de empacotamento de Partículas</i> .....	31
3.6.2	<i>Modelo Analítico de Furnas para Empacotamento</i> .....	31
3.6.3	<i>Modelo Analítico para Curva de Andreasen</i> .....	33
3.6.4	<i>Modelo Analítico para Curva de Andreasen Modificado</i> .....	33
3.7	<b>Aplicação de Cinzas na Geotecnia</b> .....	34
3.8	<b>Ensaio de Cisalhamento</b> .....	36
3.8.1	<i>Resistência ao Cisalhamento dos Solos</i> .....	36
3.8.2	<i>Ensaio de Cisalhamento Direto em Solos</i> .....	38
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	39
4.1	<b>Etapas dos processos experimentais</b> .....	39
4.2	<b>Coleta e Tratamento dos Materiais</b> .....	40
4.2.1	<i>Cinza Têxtil</i> .....	40

4.2.2	<i>Solo</i> .....	41
4.2.3	<i>Mistura Solo-Cinza</i> .....	43
4.3	<b>Caracterização dos Geotécnica dos Materiais</b> .....	43
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	47
5.1	<b>Modelo de Andreasen e Caracterização Geotécnica dos Materiais</b> .....	47
5.1.1.	<i>Modelo Modificado de Andreasen</i> .....	49
5.1.2	<i>Umidade Higroscópica</i> .....	49
5.1.3	<i>Limites de Atterberg</i> .....	50
5.1.4	<i>Granulometria por peneiramento e sedimentação</i> .....	50
5.1.5	<i>Densidade Real dos Grãos</i> .....	52
5.1.6	<i>Ensaio de Compactação</i> .....	52
5.2	<b>Caracterização Química</b> .....	55
5.2.1	<i>Caracterização química por Espectrometria de fluorescência de Raios - X</i> ....	55
5.3	<b>Caracterização Mecânica</b> .....	56
5.3.1	<i>Cisalhamento Direto</i> .....	56
6	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	67
6.1	<b>Conclusão</b> .....	67
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	69

## 1 INTRODUÇÃO

Garantir padrões de consumo e produção sustentáveis é um grande desafio, exigindo soluções inovadoras para reduzir resíduos e aumentar o reaproveitamento de materiais (ONU, 2015). Com o crescimento populacional e da demanda por recursos, a pressão ambiental aumenta, tornando urgente adotar práticas que minimizem o impacto negativo das atividades industriais. Um dos enfoques prioritários é a incorporação de resíduos como insumos alternativos, um processo que contribui para a economia e possibilita a redução do uso de matéria prima.

As indústrias de produção e processamento de materiais geram, em diferentes proporções, resíduos que nem sempre são reaproveitados ou descartados de forma ambientalmente adequada. A destinação correta desses subprodutos representa um desafio significativo. Em certas situações, podem ser reutilizados diretamente ou empregados como matéria-prima essencial em novos processos industriais (ISO 14040).

Na busca por alternativas para reduzir os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos gerados em processos industriais de geração de energia, diversos estudos têm investigado a aplicação de cinzas residuais na engenharia civil. Silva, Barroso e Cabral (2020) analisaram o uso de cinzas pesadas de usinas termoelétricas na fabricação de blocos de concreto para pavimentação, concluindo que o material atende aos padrões normativos de absorção e possui potencial para uso comercial em pavimentos intertravados. Soares *et al.* (2019) avaliaram a substituição parcial do cimento por cinzas leves provenientes da queima de carvão para geração de energia, considerando essa prática tecnicamente viável. Zimar *et al.* (2022) observaram que a aplicação de cinzas volantes de carvão mineral em subleitos de pavimentação asfáltica resulta no aumento da resistência e resiliência do pavimento, melhorando a durabilidade das estruturas viárias.

Além das inúmeras aplicações de resíduos em diferentes áreas da construção civil, a área da geotecnia apresenta grande potencial de reutilização de subprodutos industriais por conta do grande volume de materiais que são empregados nas obras. Para Boscov (2008) em obras geotécnicas de aterros sanitários, subprodutos industriais podem ser empregados nas camadas impermeáveis e drenantes, visando reaproveitar resíduos industriais reciclados em substituição aos solos, a fim de preservar os recursos naturais e diminuir o volume de resíduos dispostos, na perspectiva do desenvolvimento sustentável.

Ensaio de resistência mecânica em obras geotécnicas é crucial para compreender o comportamento estrutural de estabilidade da estrutura. Grandes eventos de escorregamento

de resíduos têm ocorrido devido à ruptura de aterros em diversos países durante os últimos anos, ocasionados por falhas de cisalhamento da estrutura (Kolsch e Ziehmann, 2004). Diante do exposto, percebe-se que uma compreensão no estudo da resistência mecânica sobre tensões de cisalhamento de estruturas de solo, é crucial para identificar e evitar possíveis desastres.

Os resíduos têxteis são gerados durante a fabricação de tecidos, seja na etapa de controle de qualidade das peças ou na produção de retalhos resultantes do processo de confecção. Em algumas indústrias, esses resíduos são reaproveitados como fonte de combustível em fornos. Um exemplo dessa prática ocorre no município de Russas-CE, onde uma fábrica de cerâmica coleta esses resíduos têxteis provenientes das indústrias de confecção da região e os utiliza como combustível no processo de queima das peças cerâmicas, resultando na geração semanal de uma quantidade expressiva de cinzas.

Desse modo, esta pesquisa visa analisar o comportamento geotécnico da mistura solo-cinza, o que pode contribuir para a valorização sustentável de resíduos industriais, promovendo sua reutilização de forma ambientalmente responsável. Além disso, busca impulsionar práticas construtivas mais eficientes na construção civil, alinhadas aos princípios de sustentabilidade e otimização de recursos.

## **2 OBJETIVOS**

Os objetivos desta pesquisa estão detalhados nos itens 2.1 e 2.2.

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o aproveitamento de resíduos obtidos a partir da queima de resíduos têxteis em misturas de solo na geotecnia, avaliando as suas principais características físicas e mecânicas, com foco na resistência ao cisalhamento.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar caracterização geotécnica, química e mecânica de um solo arenoso e cinzas provenientes da queima de resíduos têxteis;
- Obter uma mistura por meio da aplicação do modelo modificado de Andreasen, visando um material com menor volume de vazios, menor deformabilidade e maior compactação.

- Avaliar o comportamento mecânico da mistura por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento, visando obter os parâmetros de resistência coesão e ângulo de atrito.
- Avaliar o potencial de reaproveitamento das cinzas têxteis com base na resistência ao cisalhamento, objetivando a redução dos impactos ambientais das indústrias têxteis e cerâmicas.

### **3 REFERÊNCIAL TEÓRICO**

O conteúdo e as informações apresentadas durante o desenvolvimento da seguinte revisão bibliográfica, busca demonstrar através da literatura e das normativas disponíveis as etapas e procedimentos realizados durante a produção deste trabalho.

#### **3.1 Resíduos Sólidos e a Classificação de Resíduos Têxteis**

##### ***3.1.1 Resíduos Sólidos Produção, Manejo e Tratamento***

Com o avanço do desenvolvimento industrial no Brasil, a geração de resíduos sólidos industriais tem se tornado um desafio crescente, intensificado desde a Revolução Industrial no século XVIII. A expansão das atividades industriais resultou no aumento significativo da produção de resíduos, demandando soluções eficazes para seu gerenciamento e tratamento. O manejo inadequado desses materiais pode gerar impactos ambientais consideráveis, tornando essencial a implementação de práticas sustentáveis.

Segundo Fernandes *et al.* (2015), o gerenciamento integrado de resíduos envolve várias etapas, todas com o mesmo objetivo, não se limitando apenas ao tratamento dos resíduos. O gerenciamento eficiente inclui estratégias que contemplam armazenamento, coleta, manipulação, tratamento e destinação final, de maneira a garantir o melhor custo-benefício para a administração local, considerando, ainda, os aspectos econômicos que afetam a gestão municipal de resíduos.

No que se refere à legislação brasileira, a resolução nº 401, de 4 de novembro de 2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), destaca-se como um marco regulatório no que tange ao manejo de resíduos sólidos, com enfoque específico nos resíduos industriais. Essa resolução estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão desses resíduos, visando a minimização dos impactos ambientais, a reciclagem e o reaproveitamento

de materiais. Entre suas principais determinações, destaca-se a classificação dos resíduos industriais em categorias distintas, com o objetivo de orientar sua correta destinação e promover o uso de materiais reciclados em processos industriais subsequentes. (Brasil, 2008).

Além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecida pela Lei nº 12.305/2010, define as diretrizes gerais para o gerenciamento dos resíduos sólidos no país. Essa lei abrange uma variedade mais ampla de resíduos, incluindo os urbanos, industriais e agrícolas, e busca integrar ações voltadas à redução, reutilização e reciclagem, além de promover a responsabilidade compartilhada no ciclo de vida dos produtos (Brasil, 2010).

### ***3.1.2 Classificação de Resíduos Sólidos***

De acordo com Naime (2005), a gestão eficaz de resíduos sólidos requer, primeiramente, sua correta classificação. O conhecimento detalhado das características desses resíduos é fundamental para a escolha das alternativas mais adequadas de tratamento e disposição final. A princípio, é realizada a caracterização dos resíduos, utilizando-se critérios que levam em consideração sua origem e sua capacidade de degradação, o que gera uma classificação de caráter operacional. Contudo, esses critérios, por si só, não solucionam todos os desafios, sendo necessário, adicionalmente, classificar os resíduos com base em seu grau de periculosidade. Os resíduos são classificados e exemplificados, por sua origem como:

- Resíduos domiciliares: são os resíduos provenientes das residências, e são constituídos de restos de alimentos, produtos deteriorados, jornais, revistas, garrafas e uma grande diversidade de outros itens;
- Resíduos comerciais: são os resíduos provenientes dos estabelecimentos comerciais (supermercados, bancos, lojas, bares, restaurantes e outros), e são constituídos de papeis, plásticos, embalagens diversas, resíduos de asseio pessoal dos funcionários, e diversos outros itens;
- Resíduos industriais: são os resíduos provenientes de indústrias, nos quais se incluem os lodos provenientes dos processos de tratamento de efluentes líquidos industriais, cinzas, óleos, plásticos, papeis, madeira, borracha, vidros, cerâmicas e diversos outros itens;
- Resíduos públicos: são os resíduos provenientes dos serviços de limpeza pública e urbana, e são constituídos de papeis, plásticos, varrição e outros;

- Resíduos de serviços de saúde: são os resíduos provenientes de hospitais, clínicas médicas e veterinárias, postos de saúde, consultórios odontológicos e farmácias, e são constituídos de agulhas, seringas, gazes, bandagens e outros;
- Resíduos de portos, aeroportos e terminais rodoviários e ferroviários: são os resíduos provenientes destes segmentos e são constituídos basicamente de materiais de higiene, asseio pessoal, alimentação e outros.
- Resíduos agrícolas: são os resíduos resultantes de processos agropecuários, com ênfase em embalagens de defensivos agrícolas, pesticidas, herbicidas e fungicidas.
- Resíduos de construção civil: são os resíduos denominados entulhos, nos quais se enquadram restos de demolições e obras, solos de escavação.

Consoante as normativas que regulamentam os resíduos sólidos no Brasil, a norma responsável pela classificação da periculosidade desses é a ABNT NBR 10004:2004 - Resíduos Sólidos. De acordo com essa, os resíduos sólidos no Brasil são classificados com base nos riscos que oferecem ao meio ambiente e à saúde pública. A norma divide os resíduos em duas categorias principais: Classe I - Resíduos Perigosos, que possuem características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade ou toxicidade; e Classe II - Resíduos Não Perigosos, subdivididos em Classe II A - Não Inertes, que podem sofrer transformações físicas, químicas ou biológicas, e Classe II B - Inertes, que não apresentam alterações significativas em suas características e não oferecem riscos ambientais consideráveis (ABNT, 2004).

### ***3.1.3 Resíduos Sólidos Provenientes da Indústria Têxtil***

De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), resíduos sólidos industriais englobam todos os materiais resultantes de atividades industriais que se encontram nos estados sólido, semissólido, gasoso - quando devidamente contido - e líquido, desde que suas características inviabilizem o descarte nos sistemas públicos de esgoto ou corpos d'água, ou exijam soluções técnicas ou econômicas inviáveis, considerando-se as melhores tecnologias disponíveis (Brasil, 2002).

No caso específico da indústria têxtil, os resíduos sólidos, como sobras de tecidos, são classificados pela ABNT NBR 10004:2004 como pertencentes à Classe II - Resíduos Não Perigosos, pois, em sua maioria, não possuem propriedades de inflamabilidade, corrosividade ou toxicidade relevantes (ABNT, 2004). Esses resíduos são comumente categorizados como

Classe II A - Não Inertes, uma vez que podem passar por transformações físicas, químicas ou biológicas com o tempo, como a degradação parcial, dependendo da composição das fibras — sejam naturais, sintéticas ou mistas (Santana, 2021).

Apesar de não serem considerados perigosos, os resíduos têxteis podem ser gerados em grandes quantidades, demandando uma gestão adequada para evitar impactos ambientais como o acúmulo em aterros e a poluição do solo e das águas (Oliveira *et al.*, 2022). Uma fração desses resíduos industriais, particularmente os retalhos de tecidos, vem sendo utilizada como combustível em fornalhas industriais, o que constitui uma alternativa sustentável no setor energético (Santana, 2021). Tecidos sintéticos e mistos, como poliéster e nylon, apresentam alto poder calorífico devido à sua natureza polimérica, tornando-se uma opção viável para substituir combustíveis fósseis convencionais (Oliveira *et al.*, 2022). Essa prática não apenas reduz o consumo de recursos naturais não renováveis, como também assegura a destinação adequada de grandes volumes de resíduos têxteis que, de outra forma, seriam enviados para aterros sanitários.

Contudo, o uso desses materiais como combustível demanda rigoroso controle das emissões atmosféricas, pois a combustão de tecidos sintéticos pode liberar compostos nocivos, como dioxinas e furanos (Martis, 2020). Assim, o emprego de tecnologias avançadas de mitigação e filtragem de poluentes é essencial para garantir que essa solução, alinhada aos princípios da economia circular, minimize os impactos ambientais adversos e atenda às normas de controle ambiental vigentes.

### ***3.1.4 Resíduos Têxteis como Fonte de Combustível em Fábricas de Cerâmicas***

A atividade industrial inevitavelmente gera resíduos, e na construção civil, destaca-se a indústria de cerâmica vermelha. Durante o processo de fabricação de peças cerâmicas, diversas etapas contribuem para a geração de resíduos, seja nas fases de controle de qualidade, seja durante a combustão necessária para o preparo das peças. Nesse contexto, a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER), em 2014, ressalta a importância de as políticas empresariais buscarem a prevenção de impactos ambientais, a otimização dos processos produtivos e a melhoria da qualidade ambiental. Isso demanda uma mudança de atitude e maior engajamento tanto por parte dos líderes quanto dos colaboradores.

A busca por soluções sustentáveis tornou-se imprescindível, especialmente devido ao esgotamento dos recursos naturais primários e à poluição gerada pelos processos industriais. O desenvolvimento de alternativas energéticas é de suma importância, uma vez que os

combustíveis fósseis não apenas causam grandes desequilíbrios ambientais, mas também são recursos finitos que, eventualmente, serão exauridos devido à exploração excessiva. Qualquer processo de transformação industrial exige consumo energético, e a indústria da construção civil, particularmente na fabricação de materiais e componentes, desempenha um papel significativo nesse impacto ambiental.

Duailibi Filho e Carvalho (2002) destacam que, entre as diversas indústrias que compõem a cadeia produtiva da construção civil, a indústria de cerâmica vermelha se sobressai como uma das maiores consumidoras de energia e emissoras de poluentes atmosféricos. Esse cenário é agravado, em alguns casos, pelo baixo nível tecnológico adotado e pelo uso desregulado da madeira como fonte de combustível.

Atualmente, a escolha do combustível para a queima de produtos cerâmicos gera grande preocupação nas indústrias do setor, especialmente na região em estudo. Do ponto de vista econômico, a disponibilidade de lenha nativa, amplamente utilizada no processo de produção, está cada vez mais limitada. Além disso, as reservas de lenha de reflorestamento, embora uma alternativa sustentável, nem sempre estão localizadas perto dos principais centros de consumo, o que acaba elevando os custos operacionais e dificultando a logística.

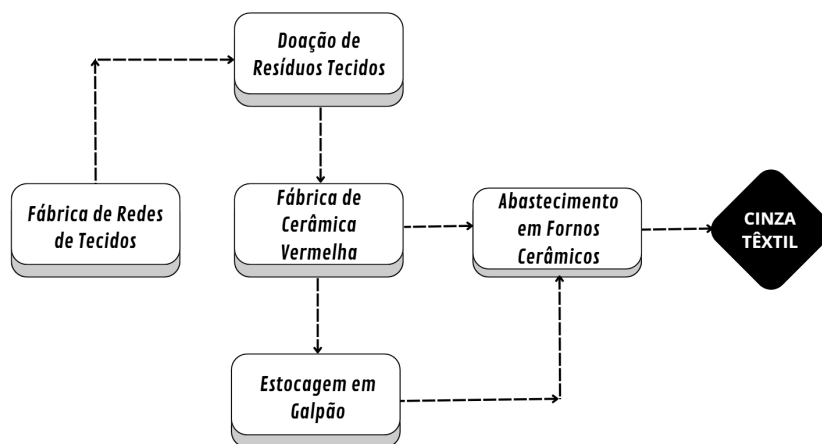
Conforme apontam Mattos (1988) e Alexandre *et al.* (2001), a etapa de queima do bloco cerâmico é considerada a mais crucial dentro do processo de produção. Durante essa fase, o consumo de energia é elevado, especialmente quando se recorre à lenha nativa, frequentemente utilizada sem a devida supervisão dos órgãos reguladores, resultando em prejuízos irreversíveis para o meio ambiente.

De acordo com o Balanço Energético Nacional – BEN (2006), no início da década de 1970, a lenha, que até então era o principal combustível empregado no Brasil, foi gradualmente substituída por combustíveis fósseis. Entretanto, atualmente, em virtude das altas cotações internacionais do petróleo, diversas indústrias têm recorrido a outras fontes de biomassa, como serragem de madeira, casca de arroz e bagaço de cana-de-açúcar. Em alguns casos, resíduos oriundos da indústria têxtil também têm sido utilizados, resultando, em geral, em elevados volumes de resíduos inertes, como cinzas industriais.

Na cidade de Jaguaruana-CE, a indústria têxtil, voltada para a confecção de redes, acumula retalhos sem destinação adequada. Em Russas-CE, esses resíduos têm sido utilizados como combustível em fornos cerâmicos, resultando em uma parceria entre os setores têxtil e cerâmico. O processo envolve a doação dos tecidos, sua prensagem para redução de volume, transporte para a cerâmica, estocagem e abastecimento dos fornos. A operação é organizada para garantir o funcionamento contínuo dos fornos por até três dias, com reabastecimento

conforme a produção têxtil. Os processos que envolvem os resíduos têxteis, desde sua geração até a formação das cinzas têxteis, estão representados na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma da cinza têxtil



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

## 3.2 Cinzas Provenientes da Queima de Resíduos Têxteis

### 3.2.1 Tipos de Cinzas

No processo de produção da cerâmica vermelha, é empregada uma grande quantidade de recursos naturais e energéticos, seja de material para a confecção das peças cerâmicas, seja de fontes de energia não renováveis para o processo de queima, como madeiras e resíduos têxteis, resultando na geração de subprodutos residuais, incluindo as cinzas provenientes da queima de resíduos têxteis.

Segundo Lopes (2014), a geração de energia a partir de grandes quantidades de resíduos não só se revela vantajosa, mas também se configura como uma fonte excepcional de energia sustentável. Contudo, como resultado desse processo de queima, a cinza constitui um dos principais resíduos gerados, que, muitas vezes, é destinada de forma inadequada, conforme apontado por Gimenes (2012).

A indústria de cerâmica vermelha possui uma abrangência geográfica relativamente restrita, estando presente em quase todas as regiões do país, e é capaz de fornecer essas cinzas residuais para empresas produtoras de cimento, independentemente de sua localização. Embora as cinzas geradas pela queima de madeira e carvão mineral sejam as mais reconhecidas na indústria, existe uma diversidade de cinzas que podem ser obtidas a partir da

combustão de materiais de diferentes origens, como as cinzas resultantes da queima de resíduos têxteis em processos energéticos industriais.

Essas cinzas são classificadas como resíduos sólidos que permanecem após a combustão de materiais em processos industriais ou domésticos. Elas são geradas em larga escala em diversas indústrias, incluindo a produção de energia, o tratamento de resíduos e a manufatura de uma variedade de produtos. Para Warpechowski da Silva *et al.* (2004), de maneira geral, as cinzas podem ser classificadas em duas categorias principais: cinzas de fundo e cinzas volantes.

### ***3.2.2 Cinzas Volantes***

As cinzas volantes são partículas finas geradas durante processos de combustão, especialmente em usinas termoeletricas, incineradores industriais e fornos. Durante a queima, essas cinzas são transportadas pelos gases quentes liberados e captadas por equipamentos de controle de poluição atmosférica, como filtros e precipitadores eletrostáticos. A composição das cinzas volantes é variável, contendo materiais como óxidos metálicos, sílica, alumina, metais pesados e, em alguns casos, compostos tóxicos. Devido à sua natureza fina e porosa, essas cinzas são adequadas para diversas aplicações, incluindo misturas de concreto, pavimentação de estradas e estabilização de solos. No entanto, a presença potencial de contaminantes exige uma caracterização adequada antes de sua reutilização.

Na pesquisa realizada por Warpechowski da Silva *et al.* (2004), os dados coletados indicam que a usina termoeletrica de Candiota, localizada no Rio Grande do Sul, produz anualmente cerca de 1.000.000 de toneladas de cinzas, com 80% desse total sendo cinzas volantes e 20% cinzas pesadas. De acordo com o estudo, as cinzas volantes, resultado da queima do carvão na usina, devem ser incorporadas em compostos cerâmicos para evitar problemas ambientais e altos custos associados à sua disposição inadequada.

Conforme Almeida e Gomes (2021), o uso de cinzas volantes resultantes da queima do carvão surge como uma solução eficaz para mitigar os impactos ambientais associados à sua produção em grande escala. A incorporação dessas cinzas na fabricação de cimentos é respaldada por sua atividade pozzolânica, que possibilita a formação de compostos com propriedades ligantes (ABNT, 2014). A inclusão das cinzas volantes no cimento contribui para a diminuição da quantidade de clínquer Portland utilizado, oferecendo uma alternativa sustentável ao processo de produção (ABNT, 2018).

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), esses materiais apresentam pouca ou nenhuma atividade aglomerante. No entanto, quando são submetidos a moagem e entram em contato com água, podem reagir com o hidróxido de cálcio, proporcionando propriedades ligantes aos compostos resultantes.

### **3.2.3 Cinzas de Fundo**

De acordo com Silva *et al.* (2005) as cinzas de fundo são resíduos sólidos pesados que se acumulam no fundo de caldeiras e fornalhas após a queima de materiais em processos industriais. Os autores ainda ressaltam que ao contrário das cinzas volantes, que são levadas por gases superaquecidos, as cinzas de fundo permanecem na base do sistema de combustão devido à sua densidade superior e granulometria maior. Formadas por materiais incombustíveis, como metais, minerais e fragmentos de carvão, essas cinzas apresentam uma granulometria mais grossa e, em geral, um risco de contaminação inferior quando comparadas às cinzas volantes. Apesar de serem mais estáveis, o manejo adequado das cinzas de fundo é fundamental.

Segundo Soares *et al.* (2019), os altos custos de armazenamento e a necessidade de grandes áreas para a disposição desses resíduos têm incentivado o desenvolvimento de soluções que sejam viáveis do ponto de vista técnico, ambiental e econômico para o descarte das cinzas, considerando sua similaridade com o cimento Portland. Para Altoé, Sales e Martins (2019), a utilização de cinzas passou a ser vista como uma alternativa vantajosa.

A combustão de materiais não renováveis em fornos, além da geração de vapor, resulta em aproximadamente 30% de resíduos, conhecidos como cinzas geradas pela queima da biomassa. Silva *et al.* (2020) analisaram a incorporação de cinzas pesadas provenientes de uma usina termoeétrica em blocos de concreto destinados à pavimentação, chegando à conclusão de que as cinzas em pavimentos intertravados possuem potencial comercializável, além de valores de absorção que estão dentro das especificações normativas.

Alcântara (2018) registrou uma alta taxa de geração de resíduos em uma usina termoeétrica em sua região de pesquisa e decidiu incorporar essas cinzas na produção de blocos de concreto para pavimentação, empregando concentrações que variam de 10% a 50% de cinzas pesadas provenientes de termelétricas. Os resultados obtidos mostraram que a resistência à compressão dos blocos ficou abaixo dos padrões estabelecidos pela norma brasileira. No entanto, a autora destacou que esses blocos poderiam ser utilizados em áreas com

características de pequenas sobrecargas, além de constituírem uma alternativa viável para a destinação do considerável volume de resíduos gerados pela usina termoeétrica.

### **3.3 Reaproveitamento de Cinzas Industriais**

As atividades industriais geram uma quantidade considerável de resíduos que não são inerentes aos objetivos da produção. Considerando que a redução da geração de resíduos é uma prioridade, mas enfrenta limitações técnicas, a reciclagem surge como a alternativa mais viável.

Conforme Vasconcelos (2010), o aumento da demanda por agregados na construção civil suscita preocupações sobre o esgotamento dos recursos naturais e os impactos ambientais resultantes da extração desses materiais. Assim, torna-se imprescindível explorar alternativas aos materiais naturais utilizados na construção civil. A indústria da construção civil apresenta um enorme potencial para o reaproveitamento de rejeitos, tanto os originados de seus próprios processos quanto os de outras indústrias. A prática de reutilizar resíduos industriais na construção não é recente; subprodutos do carvão, como cinzas, têm sido empregados de forma ampla no concreto de cimento Portland nos últimos 50 anos.

Bossel (1999), ressalta que cada etapa do processo produtivo na indústria têxtil gera resíduos, seja durante a fiação, tecelagem, beneficiamento ou confecção. Assim, a indústria têxtil busca reduzir os volumes de resíduos gerados, procurando reutilizá-los ou reciclá-los, com a intenção de prolongar o ciclo de vida dos produtos.

Uma das maiores barreiras para a implementação de estratégias eficazes de manejo e destinação de resíduos, além dos obstáculos econômicos, políticos e administrativos, é a falta de técnicas de processamento e beneficiamento adequadas às características e dimensões das localidades que necessitam de soluções. Nesse cenário, a sociedade contemporânea exige não apenas um desempenho técnico e funcional satisfatório dos materiais, mas também um entendimento aprofundado de suas interações com o meio ambiente, priorizando aqueles que requerem o mínimo de consumo energético e causam o menor impacto ecológico possível.

### **3.4 Aplicação de Cinzas na Geotecnia**

Os resíduos sólidos industriais impõem sérios desafios para a sociedade e o meio ambiente. A preocupação crescente em nível global tem levado nações a revisarem suas regulamentações, que estão se tornando cada vez mais rigorosas. As novas diretrizes

concentram-se, principalmente, na responsabilidade dos geradores desses resíduos, que devem garantir um descarte adequado e ecologicamente responsável. No cenário internacional, a incineração emerge como uma das principais alternativas para o tratamento de Resíduos Sólidos Industriais (RSI) e Resíduos de Serviço de Saúde (RSS), além de ser utilizada para resíduos domésticos. Entretanto, no Brasil, essa prática ainda é pouco comum, principalmente em razão dos altos custos associados, resultando no encaminhamento dos RSI para aterros de classe I, enquanto os RSS são destinados a células específicas em aterros sanitários.

A pesquisa realizada por Lopes *et al.* (2004), avaliou as características de uma mistura de solo, cimento e cinzas do bagaço de cana-de-açúcar para sua possível utilização na fabricação de materiais alternativos de construção. Obteve como resultado que substituição parcial de 20% do cimento Portland por cinzas na mistura de solo-cimento-cinzas não alterou significativamente a massa específica aparente seca máxima dos solos. A incorporação de 3% de cimento ou a substituição por 20% de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar aumentou a resistência à compressão simples dos solos após 60 dias.

Na investigação realizada por Vizcarra (2021), aplicando cinzas de Resíduos Sólidos Urbanos para base de pavimentos, investigou a utilização de cinzas como aditivo para estabilização de solo para base de pavimentos de baixo tráfego. Os resultados indicaram que o solo original, classificado como CH e A-7-6, não é adequado para pavimentos devido à baixa capacidade de suporte e alta expansibilidade. No entanto, a adição de cinzas, especialmente cinza volante em 40%, melhorou significativamente a resistência à compressão e reduziu a expansibilidade, tornando o solo viável para pavimentação. O estudo também destacou que a cinza volante favoreceu a estabilização química do solo, com a necessidade de ajustes no teor de cinza para otimizar os parâmetros de compactação e comportamento resiliente.

Segundo Silva e Lange (2009), a possibilidade de reutilizar as cinzas volantes na construção civil está sendo investigada, mas com a devida cautela devido às suas particularidades químicas. A técnica de solidificação/estabilização em cimento está sendo avaliada como uma alternativa promissora para o tratamento dessas cinzas. Essa abordagem é econômica e de fácil implementação, mas é crucial que cada situação seja cuidadosamente analisada, pois diversos estudos indicam que certas combinações podem resultar em efeitos adversos nas matrizes cimentícias, especialmente no que diz respeito à imobilização de contaminantes presentes nos resíduos.

Ademais, é importante ressaltar que os resíduos incinerados no Brasil, tanto industriais quanto oriundos de serviços de saúde, possuem características bastante distintas em relação aos processados na Europa, onde até mesmo resíduos domésticos são incinerados. Essa

diferença torna necessária uma caracterização mais detalhada das cinzas de fundo e das cinzas volantes geradas no Brasil, visando compreender melhor suas propriedades e, assim, adotar estratégias de manejo mais eficazes, seja por meio de tratamentos específicos ou através de sua reutilização.

### **3.5 Classificação dos Solos**

De acordo com Almeida e Silva (2010), os solos resultam da decomposição das rochas, influenciada por fatores como composição mineralógica, clima e tempo de exposição ao intemperismo. A classificação dos solos baseia-se em suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, permitindo identificá-los conforme critérios específicos, como granulometria, origem e características pedológicas. Nesse contexto, os solos podem ser classificados com base em sua origem em residuais, saprolíticos e transportados. Quanto à granulometria, são categorizados em arenosos, argilosos e siltosos, enquanto a análise pedológica considera horizontes superficiais, subsolos e a rocha mãe.

Santos e Rodrigues (2015) destacam que os sistemas de classificação de solos fornecem um padrão técnico para descrever suas propriedades, com destaque para o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e o sistema *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), amplamente utilizados na engenharia civil e geotécnica. O SUCS é preferido para projetos geotécnicos devido à sua abrangência na caracterização de solos com base em granulometria e limites de consistência, enquanto o sistema AASHTO, adotado por departamentos rodoviários, categoriza solos em grupos como A-1 a A-7, com subdivisões baseadas no percentual de material passante na peneira nº 200 e nos limites de Atterberg.

#### **3.5.1 Classificação SUCS dos solos**

O Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) é uma das ferramentas mais utilizadas na geotecnia para a classificação e descrição dos solos com base em suas propriedades físicas. Segundo Holtz, Kovacs e Sheahan (2011), o SUCS divide os solos em dois grupos principais: solos finos e solos grosseiros. Os solos finos, como as argilas e os siltes, são classificados com base nos limites de Atterberg, que determinam a plasticidade e a consistência do solo. Os solos grosseiros, como as areias e os cascalhos, são classificados por sua distribuição granulométrica, sendo definidos por parâmetros como a percentagem de

material que passa pela peneira nº 200. Essa divisão permite que engenheiros e técnicos entendam melhor o comportamento dos solos, como a sua compactação, drenagem e estabilidade, aspectos fundamentais em projetos de infraestrutura e fundações.

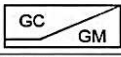
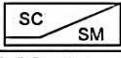
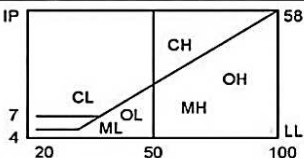
De acordo com a revisão de Das (2007), a classificação SUCS é baseada em dois critérios principais: a granulometria e os limites de Atterberg. Solos classificados como areias e cascalhos, por exemplo, têm maior estabilidade e são mais adequados para fundações rasas, enquanto solos finos, como as argilas, possuem maior capacidade de retenção de água e plasticidade, o que pode afetar a estabilidade e a compactação de fundações. A metodologia de classificação considera ainda a uniformidade e a coesão das partículas presentes, permitindo que o comportamento de solos mais complexos seja melhor compreendido, de forma a garantir a segurança e a eficiência das construções. As figuras abaixo demonstram o método de classificação SUCS dos solos e suas classes, a Figura 2 descreve minuciosamente as classificações, a Figura 3 é composta apenas por nomenclaturas, visando a praticidade.

Figura 2 - Classificação do Solos pelo Método SUCS.

<b>SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA:</b> mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped.com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped.areia e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped.areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
<b>SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA:</b> 50% ou mais passando pela peneira nº 200	SILTES e ARGILAS com $LL \leq 50$	ML	Siltos inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.	
		CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.	
		OL	Siltos orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.	
	SILTES e ARGILAS com $LL > 50$	MH	Siltos - Areias finas ou siltos micáceos - Siltos elásticos.	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.	
	Solos Altamente Orgânicos		PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.

Fonte: - PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos (2006).

Figura 3 - Tabela de Classificação SUCS.

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3
		% P #200 > 12	GC 
	5 < #200 < 12	GM	
	S > G : S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3
			SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3
% P #200 > 12		SC 	
	SM		
		5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.
% P #200 > 50	C	CL	
		CH	
	M	ML	
		MH	
	O	OL	
		OH	

Fonte: PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos (2006).

Além disso, o SUCS também leva em consideração o comportamento do solo sob diferentes condições de umidade e carga. Como ressaltado por Mitchell e Soga (2005), os limites de Atterberg são fundamentais para determinar a plasticidade de solos finos e sua tendência a sofrer mudanças volumétricas quando expostos à variação de umidade. Esses limites ajudam na identificação de solos problemáticos, como argilas expansivas, que podem comprometer a estabilidade das fundações. Para os solos grosseiros, a distribuição granulométrica é o principal fator determinante, o que permite prever o comportamento desses solos durante a compactação e drenagem.

### 3.6 Controle Preditivo de Processo e Controle Estatístico de Processo

Os métodos de Controle Preditivo de Processo (PPC) e Controle Estatístico de Processo (SPC) desempenharam um papel fundamental nos estudos de empacotamento de partículas conduzidos por Andreasen, cujo objetivo era minimizar ao máximo o volume de vazios em misturas particuladas. A busca por uma distribuição granulométrica otimizada, que assegurasse maior estabilidade e desempenho mecânico, impulsionou investigações anteriores à formulação do modelo de empacotamento modificado de Andreasen.

Para Funk, J. E. e Dinger, D. R. (1994), o Controle Preditivo de Processo (PPC - *Predictive Process Control*) é uma abordagem voltada para antecipar o comportamento de suspensões particuladas aglomeradas, utilizando medições de propriedades específicas dos ingredientes das matérias-primas antes de sua integração no produto final. Por outro lado, o Controle Estatístico de Processo (SPC - *Statistical Process Control*) emprega ferramentas

estatísticas para supervisionar, estabilizar e otimizar processos, identificando e corrigindo variações que possam impactar negativamente a qualidade do produto após sua montagem.

O PPC concentra-se na análise das propriedades fundamentais das matérias-primas desde sua origem, investigando a forma como essas características influenciam o processamento subsequente. Ele acompanha todo o ciclo produtivo, desde a extração até as etapas de fabricação. Quando bem implementado, o PPC complementa o SPC, especialmente a partir do momento em que as operações de conformação se tornam determinantes para o desempenho do produto. Com base nos princípios do PPC e do SPC, é essencial realizar uma análise integrada das características mineralógicas e químicas das amostras particuladas que compõem misturas como Solo-Cinza. Essa análise possibilita a padronização da distribuição granulométrica dos sólidos, assegurando o desempenho desejado e atendendo aos requisitos de qualidade e aplicabilidade.

Ainda para Funk, J. E. e Dinger, D. R. (1994), a necessidade de um método de controle eficaz surge da constatação de que as propriedades das matérias-primas, como o solo utilizado neste estudo, podem apresentar variações significativas entre diferentes lotes de coleta. Dessa forma, é inviável assumir que uma fórmula de porcentagem granulométrica, baseada na análise de uma única amostra, seja suficiente para garantir resultados consistentes em outras amostras particuladas com características similares. O Controle Preditivo de Processo (PPC) aborda essa questão ao considerar que:

- As propriedades das matérias-primas podem variar dependendo de fatores como:
  - O método de extração.
  - O processo de beneficiamento.
  - A produção química das partículas.
  - A produção térmica das partículas.
- Uma composição granulométrica fixa pode gerar um desempenho inconsistente, devido às variações intrínsecas das matérias-primas.
- Por outro lado, uma composição granulométrica adaptada às propriedades específicas de cada matéria-prima pode garantir um desempenho uniforme, desde que:
  - As propriedades físicas das partículas sejam bem compreendidas.
  - As interações químicas entre partículas em suspensão sejam identificadas.
  - A reologia da suspensão da matéria-prima seja devidamente analisada.

- Além disso, o desempenho consistente também depende do conhecimento do sinergismo entre as propriedades comportamentais das matérias-primas, permitindo ajustes adequados nas composições granulométricas.

### ***3.6.1 Método de empacotamento de Partículas***

O desenvolvimento dos princípios do empacotamento de partículas, no final dos anos 1920 e início dos anos 1930, visou reduzir a porosidade e maximizar a densificação em pós cerâmicos. Pesquisadores como Furnas, Andreasen e outros demonstraram que a distribuição dos tamanhos de partículas influencia tanto as propriedades finais dos corpos cerâmicos, como densidade e resistência, quanto as características de processamento, como viscosidade e permeabilidade. Enquanto nanopartículas apresentam um volume intersticial fixo de 26%, em sistemas reais, partículas menores podem preencher os espaços entre partículas maiores, aumentando a densidade. Assim, a otimização da distribuição de tamanhos surge como uma estratégia eficaz para maximizar o empacotamento e minimizar os espaços intersticiais.

McGeary (1961) demonstrou experimentalmente que a densidade máxima em um empacotamento de esferas de tamanho único varia entre 60% e 64%. No entanto, em empacotamentos binários, onde há uma combinação de dois tamanhos de esferas, é possível atingir densidades de até 85%, desde que a relação entre os tamanhos seja de pelo menos sete. Para sistemas ternários, que utilizam três tamanhos de esferas, McGeary alcançou densidades de 90%, enquanto em sistemas quaternários, os valores ultrapassaram 95%.

Embora a distribuição de nanopartículas proposta por Furnas permita um empacotamento máximo, ela não ocorre naturalmente, é economicamente inviável e resulta em misturas de baixo desempenho.

### ***3.6.2 Modelo Analítico de Furnas para Empacotamento***

O modelo de empacotamento de partículas proposto por Furnas é um dos métodos fundamentais na análise de misturas granulométricas. Ele estabelece que a eficiência máxima de empacotamento ( $PE_{max}$ ) em uma mistura de partículas de diferentes tamanhos depende da combinação e interação das frações grosseiras (L), médias (M) e finas (S). Essas frações são integradas em uma equação que considera as eficiências individuais de empacotamento de cada classe ( $PE_L$ ,  $PE_M$ ,  $PE_S$ ), sendo expressa através da Equação 1:

$$PE_{\text{máx}} = PE_L + (1 - PE_L) \cdot PE_M + (1 - PE_L)(1 - PE_M) \cdot PE_S \quad (\text{Equação 1})$$

Quando se assume que as eficiências de empacotamento para todas as classes são iguais ( $PE_L = PE_M = PE_S = PE$ ), assim resultou-se na Equação 2.

$$PE_{\text{máx}} = PE + (1 - PE) \cdot PE + (1 - PE)^2 \cdot PE \quad (\text{Equação 2})$$

Esse modelo foi posteriormente expandido para incluir distribuições contínuas, onde a eficiência de empacotamento de misturas infinitas de partículas pode ser descrita pela Equação 3:

$$CPTF = \frac{R^{\log D} - R^{\log D_S}}{R^{\log D_L} - R^{\log D_S}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

CPTF=Curva Percentual Fina Total acumulada

D= representa o tamanho da partícula;

$D_L$ =Tamanho Máximo das Partículas

$D_S$ =Tamanho Máximo das Partículas

R = Razão entre os volumes das partículas em classes adjacentes.

Segundo Funk, J. E. e Dinger, D. R. (1994) e Oliveira *et al.* (2000), para atingir o empacotamento ótimo, as razões entre os tamanhos das partículas devem ser cuidadosamente ajustadas. Idealmente, proporções como 100:1 são recomendadas para minimizar o volume de vazios adicionais gerados pelo efeito de parede. No entanto, na prática, razões menores, como 20:1 ou 10:1, também podem ser eficazes.

Os estudos de McGeary K. R. (1961) indicaram que, em misturas binárias de esferas de tamanho uniforme, é possível alcançar densidades máximas entre 60% e 64%. Com ajustes precisos nas razões entre tamanhos, misturas ternárias podem atingir densidades de até 90%, enquanto misturas quaternárias podem superar 95%, representando uma distribuição extremamente eficiente.

### 3.6.3 Modelo Analítico para Curva de Andreasen

Andreasen, por sua vez, argumentava que o conceito de semelhança associado ao empacotamento ideal (relacionado ao comportamento fractal) deveria ser expresso por uma lei de potência. Em oposição ao modelo de Furnas, Andreasen sugeriu uma nova abordagem baseada na Equação 4.

$$\text{CPTF} = \left(\frac{D}{D_L}\right)^q \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

CPTF = Curva Percentual Fina Total acumulada

D = Tamanho da partícula analisada

$D_L$  = Tamanho Máximo das Partículas

q = Expoente que define a distribuição granulométrica

A equação de Andreasen não considera um tamanho mínimo finito para as partículas, assumindo, no limite, que esse valor é zero. Embora essa suposição pareça irrelevante em cálculos como o tamanho médio das partículas, onde o erro gerado é pequeno, ela se torna significativa ao calcular a área superficial específica ou o número médio de partículas. Andreasen chegou à conclusão de que, para se obter um empacotamento máximo, o módulo de distribuição granulométrica (q) deve variar entre 0,33 e 0,5 (Oliveira *et al.*, 2000).

Dessa forma, isso ocorre porque partículas menores têm uma contribuição desproporcionalmente grande: o número de partículas é inversamente proporcional ao cubo do tamanho, e a área superficial, ao quadrado. Assim, com um tamanho mínimo de zero, tanto a área superficial quanto o número de partículas tenderiam ao infinito. Esse efeito também é evidente nas curvas cumulativas (CPFT) de distribuições granulométricas, demonstrando como a ausência de um limite mínimo realista pode distorcer os resultados teóricos.

### 3.6.4 Modelo Analítico para Curva de Andreasen Modificado

Nas distribuições granulométricas reais, há sempre um limite inferior para o tamanho das partículas. Reconhecendo essa limitação, Dinger e Funk (1994) modificaram a equação de Andreasen ao introduzir um tamanho mínimo finito para as partículas. Essa alteração resultou no modelo de Alfred, descrito pela Equação 5, amplamente conhecida como a equação modificada de Andreasen:

$$CPTF = \left( \frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

CPTF=Curva Percentual Fina Total acumulada

D=Tamanho da partícula analisada

$D_L$ =Tamanho Máximo das Partículas

$D_s$ =Tamanho Máximo das Partículas

q=Expoente que define a distribuição granulométrica.

Através de simulações numéricas utilizando a equação modificada de Andreasen, foi determinado que o valor do expoente  $q=0,37$  é ideal para otimizar a distribuição granulométrica visando o empacotamento máximo de partículas esféricas. Quando representada graficamente em escala bi-logarítmica, a curva CPFT do modelo de Alfred se desvia da linha teórica de Andreasen e inflete em direção a zero conforme o tamanho das partículas se aproxima do limite mínimo definido na distribuição. Nesse contexto, as linhas teóricas do modelo de Andreasen atuam como assíntotas em relação às curvas do modelo de Alfred, evidenciando as diferenças entre as duas abordagens.

### 3.7 Aplicação de Cinzas na Geotecnia

A estabilização do solo refere-se ao aprimoramento das propriedades geotécnicas do solo natural por meio da incorporação de outros materiais, com o objetivo de aumentar a resistência e a durabilidade da superfície que será pavimentada (Firoozi *et al.*, 2017). Entre os métodos existentes, destaca-se a estabilização granulométrica, definida como o processo que melhora a capacidade de resistência de materiais naturais ou misturas por meio de energia de compactação apropriada, garantindo estabilidade e durabilidade ao material final (DNIT, 2010, p. 2). Essa prática frequentemente se apresenta como uma alternativa mais econômica em comparação à substituição completa do solo.

Diversos materiais têm sido pesquisados como agentes estabilizantes, incluindo resíduos sólidos provenientes da indústria e da construção civil, que se mostram promissores para aplicação em camadas de pavimentos. Esses materiais possuem regulamentação específica para tal finalidade, conforme estabelecido pelas normas NBR 15115 e NBR 15116/2004, sendo classificados em duas categorias principais: Agregado de Resíduo Misto (ARM) e Agregado

de Resíduo de Concreto (ARC). Estudos, como o realizado por Grubba (2009), demonstram que o ARC pode ser aplicado como material para camadas de base e sub-base de pavimentos, devido às suas propriedades mecânicas.

Na pesquisa realizada por Turkel, S. (2007), avaliou-se a aplicação de cinzas volantes em um Material de Baixa Resistência Controlada (CLSM - *Controlled Low-Strength Material*), material esse que pode ser aplicado em aterros em substituição a solos compactados. Neste estudo, foram testadas diferentes composições de misturas contendo grandes quantidades de cinzas volantes (FA - *Fly Ash*), pó de calcário triturado (*Filler*) e uma pequena porcentagem de cimento pozolânico. O ensaio de cisalhamento direto mostrou que as misturas de CLSM possuem maior resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de resistência ao cisalhamento em comparação aos solos compactados. Os resultados indicaram que em 7 dias, esses parâmetros superaram os dos materiais convencionais, indicando que o CLSM com o incremento de cinzas volantes é adequado para aplicações de aterro.

Salmaso (2017) realizou ensaios de cisalhamento direto em solo arenoso com diferentes compacidades (50%, 75% e 90%) e constatou que, à medida que o índice de vazios diminuía, o ângulo de atrito interno aumentava, variando entre 24° e 39°. Esses resultados demonstram que a compactação do solo e o confinamento das partículas melhora sua estabilidade estrutural, tornando-o mais resistente a esforços cisalhantes.

Seguindo a análise das pesquisas, que realizaram a incorporação e cinzas volantes em misturas de solos, o estudo desenvolvido por Noaman (2023), analisou o efeito da adição de cinza volante (FA) na resistência ao cisalhamento de solos argilosos, testando misturas com diferentes proporções de FA (5% a 50%) por meio de ensaios triaxiais sob pressões de confinamento de 50, 100 e 150 kPa. Os resultados mostraram que a resistência ao cisalhamento aumentou com a adição de FA, atingindo valores máximos de coesão (30 kPa) e ângulo de atrito interno (16°) com 25% de FA. O módulo de elasticidade também foi otimizado nessa proporção, enquanto concentrações maiores reduziram a eficácia do reforço.

Com base nos estudos realizados por Rodrigues (2015), o comportamento mecânico dos solos indica que a redução do volume de vazios está diretamente relacionada ao aumento do ângulo de atrito interno, influenciando na resistência ao cisalhamento do material analisado. Além disso, o uso desses materiais pode reduzir os impactos ambientais, ao minimizar a necessidade de exploração de recursos naturais em outras localidades e valorizar resíduos e insumos regionais na construção civil.

## 3.8 Ensaio de Cisalhamento

### 3.8.1 Resistência ao Cisalhamento dos Solos

A deformação de uma massa de solo é determinada pela interação entre seus componentes, especialmente pelo movimento relativo entre as partículas que o compõem (Lambe, T. 1969). Assim, a resistência dos solos está intrinsecamente associada à resistência ao cisalhamento presente nas interfaces entre suas partículas. A avaliação da magnitude dessa resistência é fundamental para diversas aplicações em engenharia geotécnica, sendo um aspecto crucial na concepção e execução de projetos na construção civil.

Terzaghi (1925) estabeleceu os fundamentos para a compreensão da mobilização da parcela friccional a partir da interação entre partículas do solo. Em outras palavras, a tensão de contato entre dois elementos gera uma força adesiva nos pontos de contato, restringindo seu deslocamento relativo. Dessa forma, a relação entre a força normal e a resistência ao cisalhamento é diretamente proporcional. Complementando essa análise, Lambe (1969) destaca que o aumento da força normal, desde que a tensão de escoamento do material permaneça constante, resulta em uma ampliação da área de contato entre as partículas.

Os critérios de ruptura podem ser entendidos como leis que estabelecem os mecanismos de falha dos materiais com base em propriedades mensuráveis. No caso dos solos, embora modelos como os de Tresca e Coulomb sejam aplicáveis, o critério mais amplamente reconhecido é o de Mohr-Coulomb, originalmente concebido por Coulomb (1776) e posteriormente aprimorado por Mohr (1882) (Budhu, 2010).

Esse critério postula que a interação entre tensões normais e de cisalhamento cria uma condição mais crítica do que a análise isolada das tensões máximas. Assim, a ruptura do solo ocorrerá em qualquer ponto onde essa relação for atendida (Craig, 2012). Apesar da relação entre tensões normais efetivas ( $\sigma'$ ) e tensões de cisalhamento ( $\tau$ ) não ser estritamente linear, essa simplificação é considerada adequada para a maioria das análises de estabilidade de maciços terrosos (Lambe, T. 1969). Dessa forma, a resistência ao cisalhamento do solo expressa pelo critério de Mohr-Coulomb é definida pela Equação 6.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \Phi \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$\tau$  = Resistência ao cisalhamento (KPa)

$c$  = Coesão dos grãos (KPa)

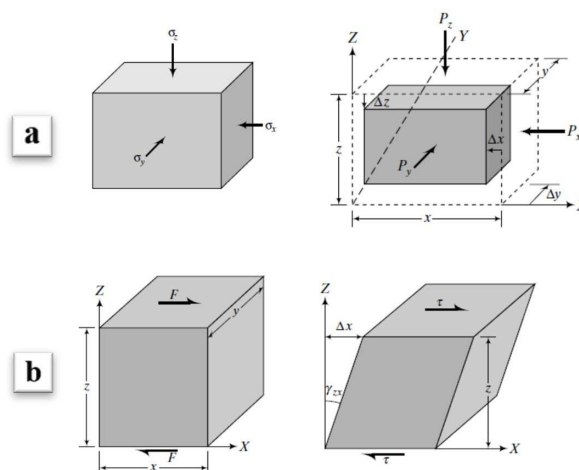
$\sigma$  = Tensão normal no plano de ruptura (KPa)

$\Phi$  = Ângulo de atrito do solo ( $^{\circ}$ )

Segundo Lambe (1969), a resistência do solo está diretamente relacionada ao seu comportamento ao cisalhamento e aos parâmetros de resistência. A coesão ( $c$ ) representa a força de ligação entre partículas, sendo predominante em solos argilosos, enquanto o ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) está associado ao atrito entre partículas, sendo mais relevante em solos arenosos e materiais granulares. No processo de mobilização dessa resistência, além das distorções cisalhantes, ocorrem deformações por compressão ou extensão (Gerscovich, 2016).

Quando submetido a tensões de confinamento, o solo pode apresentar deformações volumétricas significativas devido à compressão isotrópica (Gerscovich, 2016). Embora o deslizamento relativo entre partículas gere tensões de cisalhamento, a interação dessas tensões ao longo de um plano específico pode resultar em sua anulação. Conseqüentemente, em uma massa de solo sujeita exclusivamente a tensões de confinamento, a tensão cisalhante em qualquer plano é nula. A Figura 4, apresenta o comportamento de amostras de solo em confinamento e sobre tensões de cisalhamento.

Figura 4 – Representação do comportamento de solos. a) Amostra em confinamento; b) Amostra sobre tensões de cisalhamento simples.



Fonte: Budhu, (2008).

Segundo Hanzawa et al. (2007), o cisalhamento simples pode ocorrer por translação ao longo de um plano horizontal ou pela combinação de translação vertical e movimento do plano, sendo este último o mecanismo mais comum (Symes *et al.* 1984). Budhu (1984) destaca que o cisalhamento simples representa diversas situações geotécnicas, como

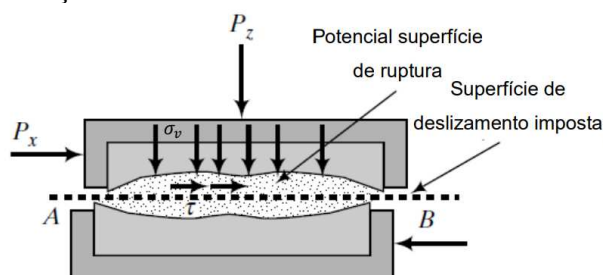
carregamentos dinâmicos em terremotos e cisalhamento de solo em estacas (Randolph & Wroth, 1981).

### 3.8.2 Ensaio de Cisalhamento Direto em Solos.

O ensaio de cisalhamento direto em solos consiste na aplicação de tensões horizontais de cisalhamento ao corpo de prova, que está confinado por tensões verticais. Esse processo ocorre por meio do deslocamento relativo entre dois planos de contato. No método de cisalhamento direto, uma metade do corpo de prova, contida em uma caixa de cisalhamento, é forçada a se mover em relação à outra (Hanzawa et al., 2007). Devido à rigidez das paredes da caixa, não há distorções angulares no solo, e o cisalhamento ocorre exclusivamente pelo deslizamento entre os dois planos.

No ensaio de cisalhamento direto, uma tensão vertical ( $\sigma_v$ ) é aplicada ao corpo de prova, promovendo o confinamento e a consolidação do solo. Em seguida, o cisalhamento ocorre ao longo de uma superfície de deslizamento horizontal por meio da aplicação de uma força nessa direção, como pode-se observar na Figura 5.

Figura 5 - Representação do funcionamento do ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: Budhu, (2008).

Esse ensaio permite determinar as envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo, tanto na condição de resistência de pico quanto na residual. A resistência de pico representa a máxima resistência oferecida por um material intacto, sem grandes deformações. Já a resistência residual corresponde ao valor mínimo de resistência ao cisalhamento, observado na condição drenada após grandes deslocamentos. Fonseca (2006) complementa que, a determinação da resistência residual é essencial na avaliação de taludes com superfícies de ruptura já formadas, na identificação do risco de falhas progressivas e na análise das características de depósitos sedimentares que apresentam discontinuidades, como fissuras, juntas e falhas.

O procedimento consiste na aplicação de uma tensão normal constante na amostra de solo, enquanto a tensão cisalhante é aumentada gradativamente até o ponto de ruptura, momento em que a resistência máxima é atingida.

De acordo com a ASTM D3080-04 – (*Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils*), o procedimento é realizado sob condições drenadas e consolidadas, sendo adequado para a determinação rápida do ângulo de atrito drenado de solos. Embora o método apresente limitações, como a dificuldade em replicar o estado de tensões tridimensional real do campo, devido à superfície planar de cisalhamento, ele fornece dados fundamentais para análises geotécnicas. Esses resultados auxiliam no dimensionamento seguro de estruturas em solos, alinhando-se aos princípios de resistência ao cisalhamento definidos por Terzaghi e Peck (1967).

Das (2010), enfatiza que o ensaio de cisalhamento direto é amplamente utilizado na engenharia geotécnica para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, como a coesão efetiva ( $c'$ ) e o ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ). Esse método experimental avalia o comportamento do solo sob tensões normais e cisalhantes ao longo de uma superfície predefinida, sendo essencial em análises de estabilidade de taludes, fundações e estruturas de contenção (Craig, 2004).

## **4 METODOLOGIA**

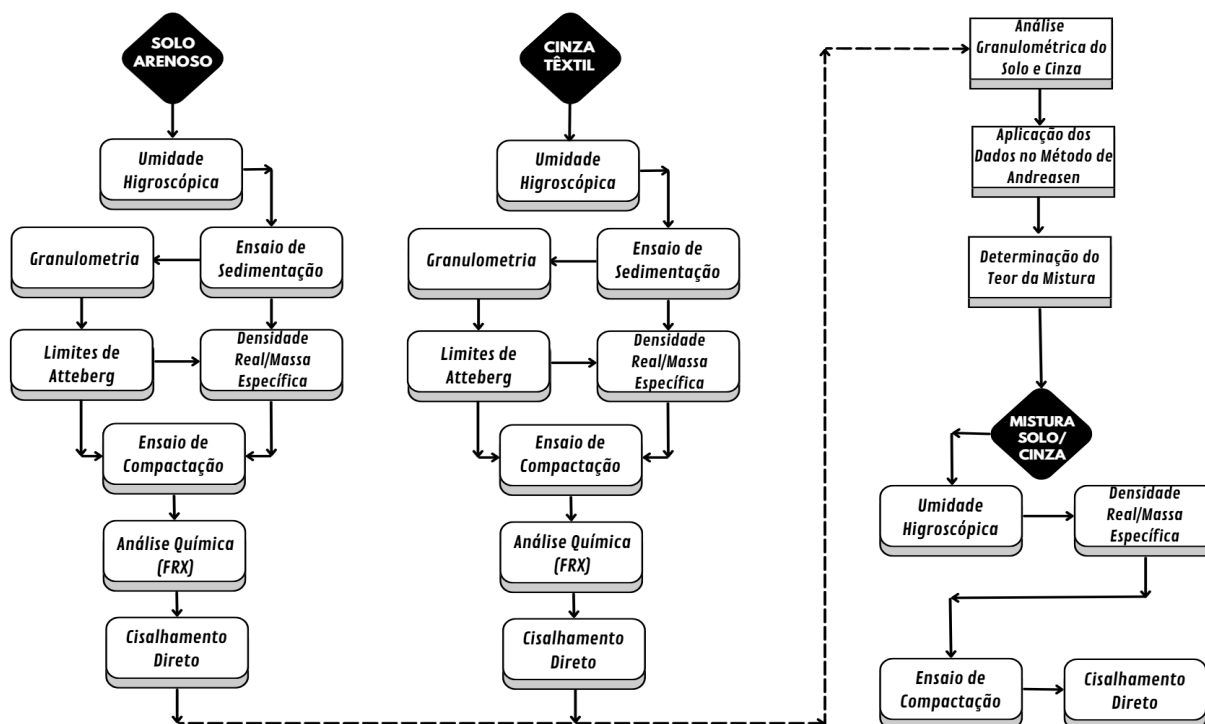
### **4.1 Etapas dos processos experimentais.**

A pesquisa iniciou-se através da coleta dos materiais incluindo a cinza têxtil e solo, para a preparação da amostra. Para a elaboração do traço ideal da mistura para fins de estudo, as proporções foram determinadas pelo método analítico utilizando os parâmetros da curva do modelo modificado de Andreasen, a fim de atingir uma mistura com as partículas bem graduadas e com menor número de vazios para que os estudos de comportamento mecânico da mistura fossem bem analisados. Ensaios de caracterização geotécnica dos materiais foram realizados, análise química e comportamento mecânico da mistura foram executados. O fluxograma dos ensaios experimentais realizados está representado na Figura 6.

Os ensaios geotécnicos de caracterização das amostras, foram produzidos no Laboratório de Construção Civil (LCC) e Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) da UFC campus de Russas, para os ensaios de resistência mecânica a diferentes aplicações de cargas, utilizou-se as dependências físicas do Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) pertencente

a UFC campus do Pici. Na Tabela 1, estão representados os ensaios experimentais realizados para os materiais e seus respectivos métodos.

Figura 6 - Fluxograma dos ensaios experimentais realizados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 1 - Ensaio experimentais das amostras

Ensaio	Método
Preparação das Amostras	ABNT NBR 6457:2016
Umidade Higroscópica	ABNT NBR 6457:2016
Densidade Real	ABNT NBR 6458:2016
Granulometria por Peneiramento e Sedimentação	ABNT NBR 7181/2016
Límite de Plasticidade	ABNT NBR 6459:2016
Limites de Liquidez	ABNT NBR 7180:2016
Caracterização Química	Fluorescência de Raios X – (FRX)
Ensaio de Compactação	ABNT NBR 7182:2016
Cisalhamento Direto	STM D3080-04

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

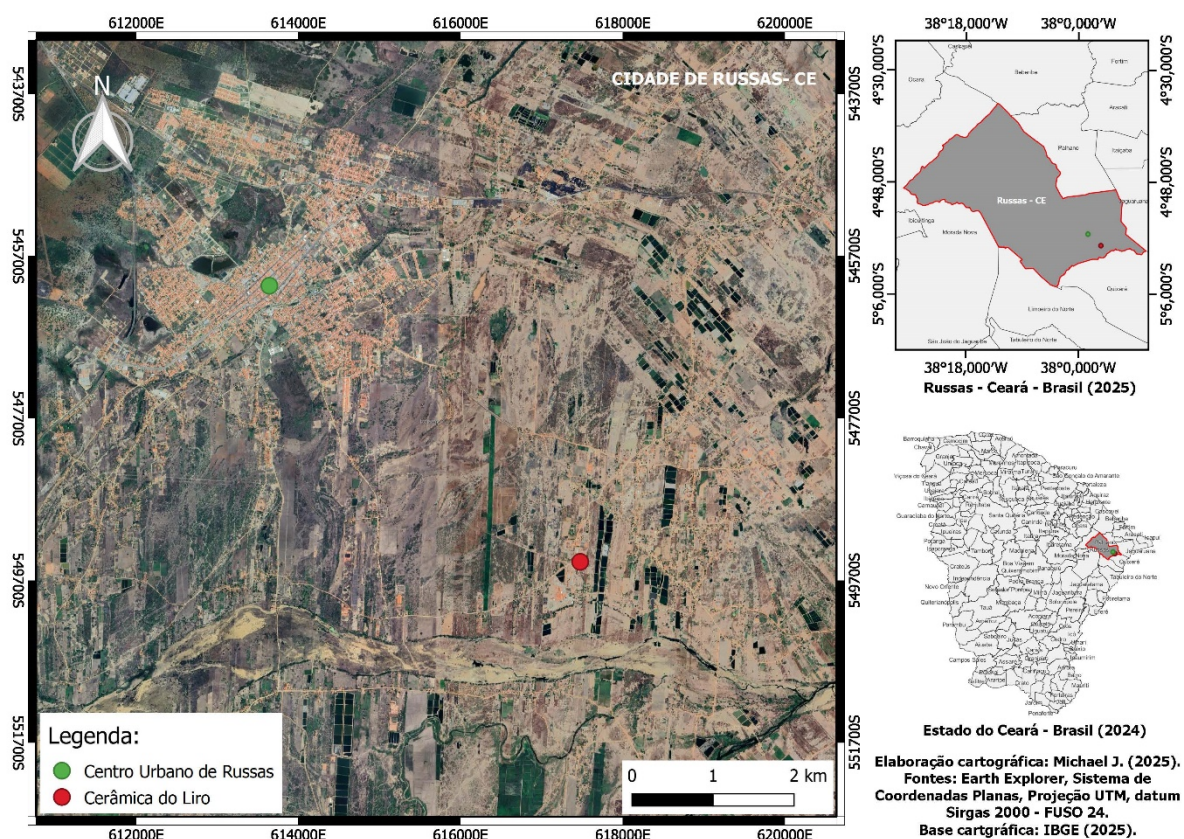
## 4.2 Coleta e Tratamento dos Materiais

### 4.2.1 Cinza Têxtil

As cinzas têxteis empregadas neste estudo foram obtidas por meio da combustão controlada de resíduos de redes têxteis em fornos cerâmicos industriais, caracterizando-se

como um subproduto de processos térmicos com potencial de reaproveitamento em aplicações geotécnicas. As amostras foram cedidas por meio de doação pela empresa Cerâmica do Liro, situada no município de Russas-CE, a aproximadamente 9 km do campus da Universidade Federal do Ceará em Russas e da região central do município. A obtenção desse material foi viabilizada mediante parceria institucional. Os colaboradores da fábrica relataram que os tecidos são fornecidos à cerâmica por uma indústria situada no município de Jaguaruana-CE, localizada a uma distância de 29 km do município de Russas. Em relação a coleta das cinzas têxteis, realizou-se com a ajuda da equipe de funcionários da cerâmica, sendo transportadas em sacos de nylon e armazenadas no LCC. O mapa de localização da cerâmica onde foi realizada a coleta da cinza está representado na Figura 7.

Figura 7 - Localização da Cerâmica do Liro.



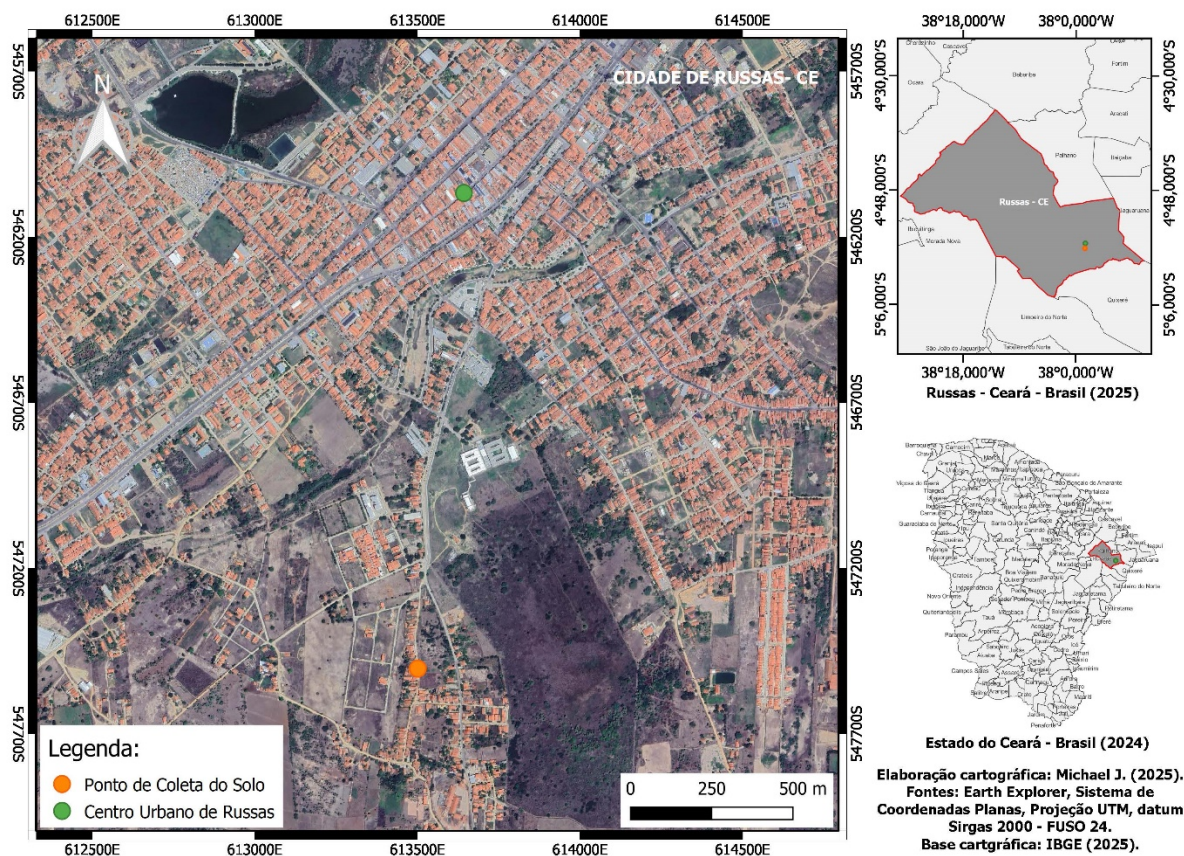
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

#### 4.2.2 Solo

O processo de coleta do solo foi realizado em uma estrada não pavimentada localizada no bairro Cidade Universitária, no município de Russas-CE. A coleta foi feita manualmente, utilizando ferramentas como enxadas e pás. Durante o procedimento, foi

identificado que o solo apresentava resíduos, incluindo fragmentos cerâmicos e material vegetal, esses foram removidos no processo de coleta. Para garantir a preservação do material, as amostras foram acondicionadas em baldes plásticos fornecidos pelo campus da UFC em Russas. Posteriormente, os baldes foram transportados com segurança e armazenados no Laboratório de Construção Civil (LCC) para análise. A localização situa-se nas coordenadas de latitude:  $4^{\circ}57'9.75''\text{S}$  e longitude:  $37^{\circ}58'34.40''\text{O}$ . A Figura 8 apresenta a exata localização da coleta do solo em estudo.

Figura 8 - Localização da coleta de Solo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para a armazenagem e tratamento das amostras, algumas das etapas estão apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Armazenagem e tratamento das amostras: a) Solo arenoso armazenado; b) Cinza têxtil armazenada em saco plástico; c) Preparação das amostras para caracterizações.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

#### 4.2.3 Mistura Solo-Cinza

A porcentagem da mistura entre o solo e a cinza foi definida com base na equação modificada de Andreasen, proposta por Funk, J. E., & Dinger, D. R. (1994), que introduziu um tamanho mínimo finito para as partículas, ajustando o modelo original de Andreasen. A equação modificada permite uma distribuição granulométrica mais realista, levando em consideração o efeito significativo das partículas menores na área superficial específica e no número total de partículas. Essa abordagem resultou em uma proporção de 26% de cinza e 74% de solo para a mistura, considerando a compatibilidade granulométrica entre os dois materiais.

A aplicação dessa equação possibilitou a obtenção de uma distribuição granulométrica otimizada para a mistura, assegurando um menor índice de vazios e, conseqüentemente, a melhoria das propriedades mecânicas do material.

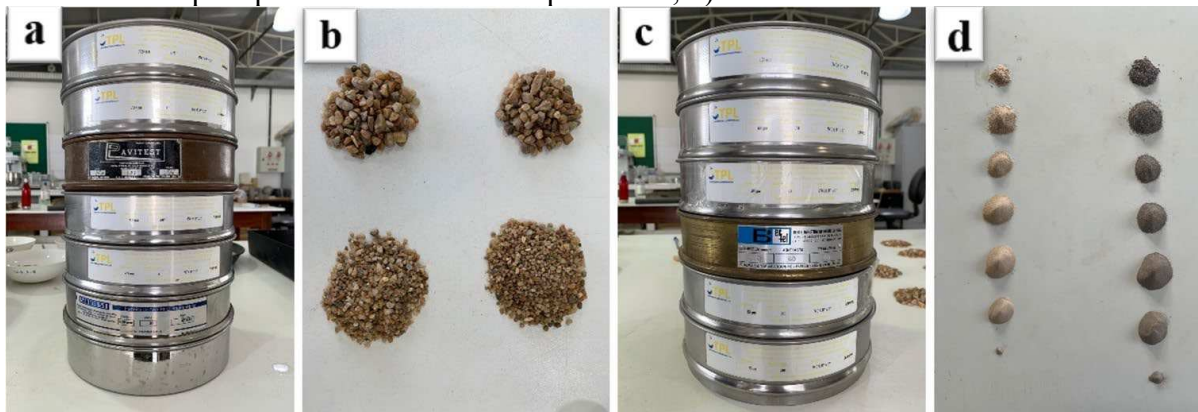
#### 4.3 Caracterização Geotécnica dos Materiais

Para a caracterização geotécnica dos materiais de estudo, realizou-se os principais ensaios utilizados para entender a mecânica dos solos e seus comportamentos. Para a parte experimental, seguiu-se a literatura normativa da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para cada ensaio, foram realizados os ensaios de umidade higroscópica, granulometria por peneiramento e sedimentação, densidade real ou massa específica dos grãos, limites de Atterberg, compactação sob energia de proctor normal, análise química por FRX e cisalhamento direto.

Os ensaios de granulometria foram executados conforme a norma NBR 7181/2018 (ABNT, 2018) - Solo - Análise Granulométrica, utilizando os métodos de peneiramento e

sedimentação. A amostra preparada estava previamente seca e desagregada e foi submetida a caracterização por peneiramento fino e grosso. Os processos para o ensaio de peneiramento estão apresentados na Figura 10.

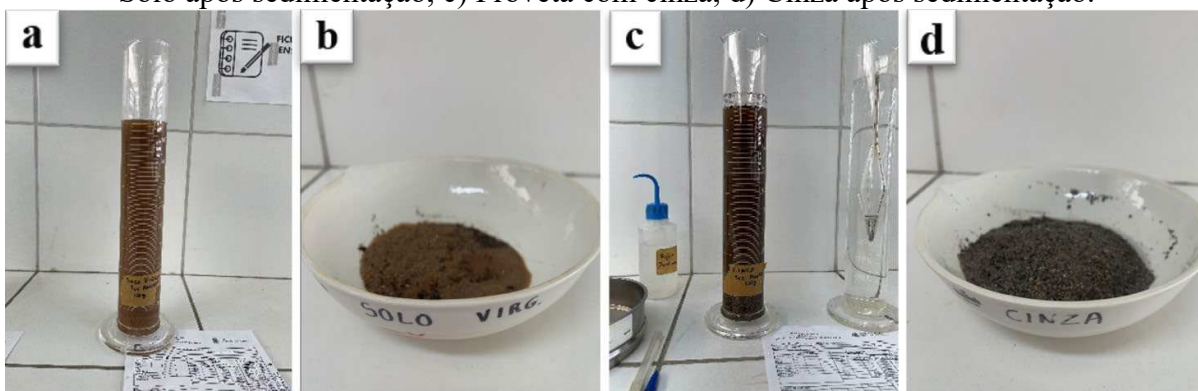
Figura 10 – Representação das etapas de peneiramento fino e grosso das amostras:  
a) Peneiras para peneiramento grosso; b) Peneiramento grosso das amostras de solo; c)  
Peneiras para peneiramento fino das partículas; d) Peneiramento fino das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O ensaio de sedimentação foi conduzido seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 6459 (ABNT, 2016), com a amostra sendo dispersa em uma solução de água e um dispersante adequado para evitar a aglomeração das partículas. Na Figura 11, estão apresentadas as etapas do procedimento experimental.

Figura 11 – Ensaio de sedimentação das amostras de solo e cinza; a) Proveta com solo; b) Solo após sedimentação; c) Proveta com cinza; d) Cinza após sedimentação.

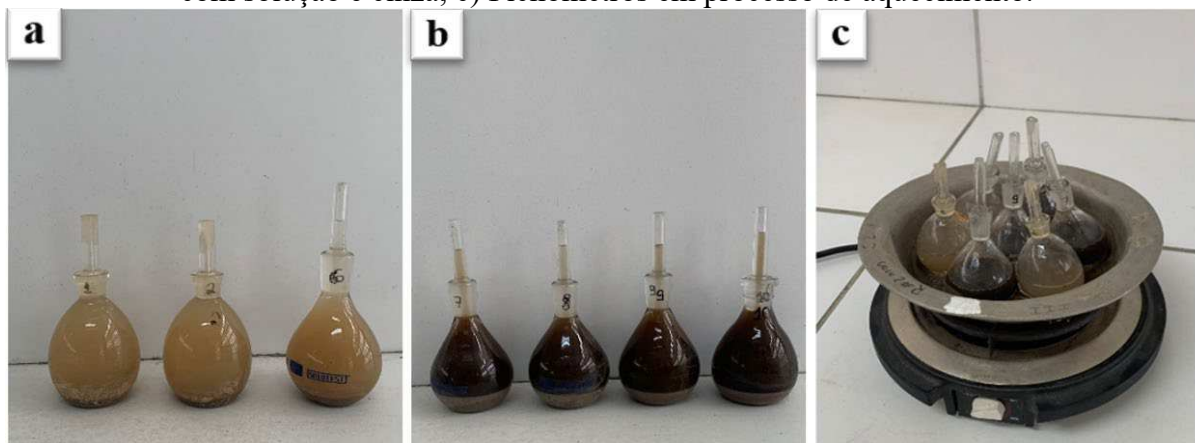


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os ensaios de massa específica foram realizados conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 2016), utilizando o método do picnômetro para a determinação da densidade das amostras de solo e cinza. O ensaio das amostras foi realizado em temperatura de 29 °C, no

Laboratório de Construção Civil da UFC. A execução do ensaio de massa específica está representada na Figura 12.

Figura 12 – Ensaio de massa específica a) Picnômetro com solução e solo; b) Picnômetro com solução e cinza; c) Picnômetros em processo de aquecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para os ensaios de compactação, esses foram executados conforme a norma NBR 7182 (ABNT, 2016), o ensaio foi realizado utilizando energia intermediária com molde cilíndrico proctor normal, com 26 golpes por camada. A representação das fases do ensaio de compactação está apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Representação das fases do ensaio de compactação: a) Adição de umidade na amostra de cinza; b) Prensa para remover corpo de prova compactado; c) Corpo de prova de solo compactado; d) Corpo de prova de solo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Durante a execução do ensaio, foram obtidos os parâmetros da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima do solo. Para a construção da curva de compactação, o ensaio foi repetido cinco vezes resultando em 5 pontos de umidade para as amostras. A

compactação do solo local, da cinza têxtil e das misturas de solo-cinza, nas proporções de 74% e 26%, respectivamente, foram realizadas no Laboratório de Construção Civil (LCC) da Universidade Federal do Ceará, Campus Russas.

O ensaio de cisalhamento direto foi executado no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) – UFC Campus do Pici, com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura de solo e cinza têxtil. O procedimento seguiu a metodologia estabelecida pela NBR 7184 (ABNT, 2016), que especifica a técnica para avaliação da coesão e do ângulo de fricção interna de materiais granulados.

A amostra da mistura de solo e cinza, na proporção de 74% de solo e 26% de cinza, como determinou a curva de Andreasen modificado, foram preparadas e compactadas em moldes retangulares, com a utilização de uma umidade ótima pré-determinada no ensaio de compactação da mistura realizado, para garantir a consistência das amostras. Os processos executados para o ensaio de cisalhamento direto estão apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Processos para ensaio de cisalhamento direto: a) Adição de água para atingi a umidade ótima da amostra; b) Moldagem do material; c) Prensa para ensaio de cisalhamento direto;



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O ensaio foi realizado em uma máquina de cisalhamento direto composta por uma célula de cisalhamento retangular dividida em duas metades, onde as amostras foram submetidas a tensões normais (50,100 e 200KPa), como o ensaio foi drenado, utilizou-se pedra porosa abaixo da célula retangular de cisalhamento. O extensômetro horizontal, com precisão de 0,01 mm, foi empregado para medir os deslocamentos horizontais da amostra durante o ensaio. O anel dinamométrico, equipado com um extensômetro de precisão de 0,001 mm, foi utilizado para medir as forças horizontais aplicadas. Além disso, um extensômetro vertical, com precisão de 0,01 mm, foi responsável por analisar as deformações volumétricas e os deslocamentos verticais da amostra.

A amostra foi cisalhada horizontalmente com o ângulo de cisalhamento predefinido, e o deslocamento foi monitorado até a ruptura, permitindo a obtenção dos valores de resistência ao cisalhamento. Os parâmetros de coesão e ângulo de fricção interna foram calculados a partir da curva de resistência, obtida pela relação entre a carga máxima aplicada e o deslocamento observado. As amostras de cinza têxtil, mistura e solo após ensaio de cisalhamento direto estão representadas na Figura 15.

Figura 15 – Representação das amostras de cinza têxtil, mistura e solo após ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico, apresentam-se os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização das amostras de solo local, cinza têxtil e da mistura determinada pelo modelo modificado de Andreasen.

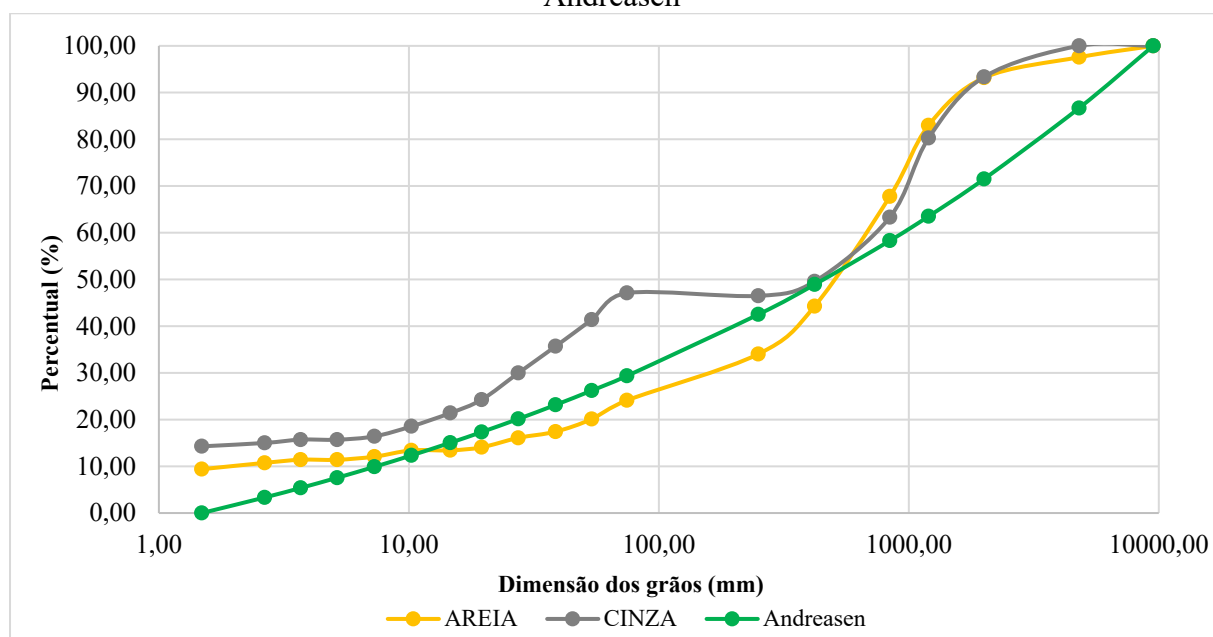
### 5.1 Modelo de Andreasen e Caracterização Geotécnica dos Materiais

#### 5.1.1 Modelo Modificado de Andreasen

Com base na caracterização geotécnica do solo e da cinza no tópico 5.1.4, onde foi realizada a análise granulométrica do solo e da cinza, obteve-se os dados fundamentais para a aplicação do modelo modificado de Andreasen. Os dados fornecidos através das curvas, permitiu utilizar o método para determinar as proporções ideais dos componentes para obter mistura com uma distribuição granulométrica otimizada, visando obter um material com menor volume de vazios e melhor compactidade. Na Figura 16 estão apresentadas as curvas

granulométricas do solo, cinza e da composição da mistura formulada pelo modelo de Andreasen.

Figura 16 - Curvas granulométricas do solo e cinza, e para a mistura sugerida pelo modelo de Andreasen

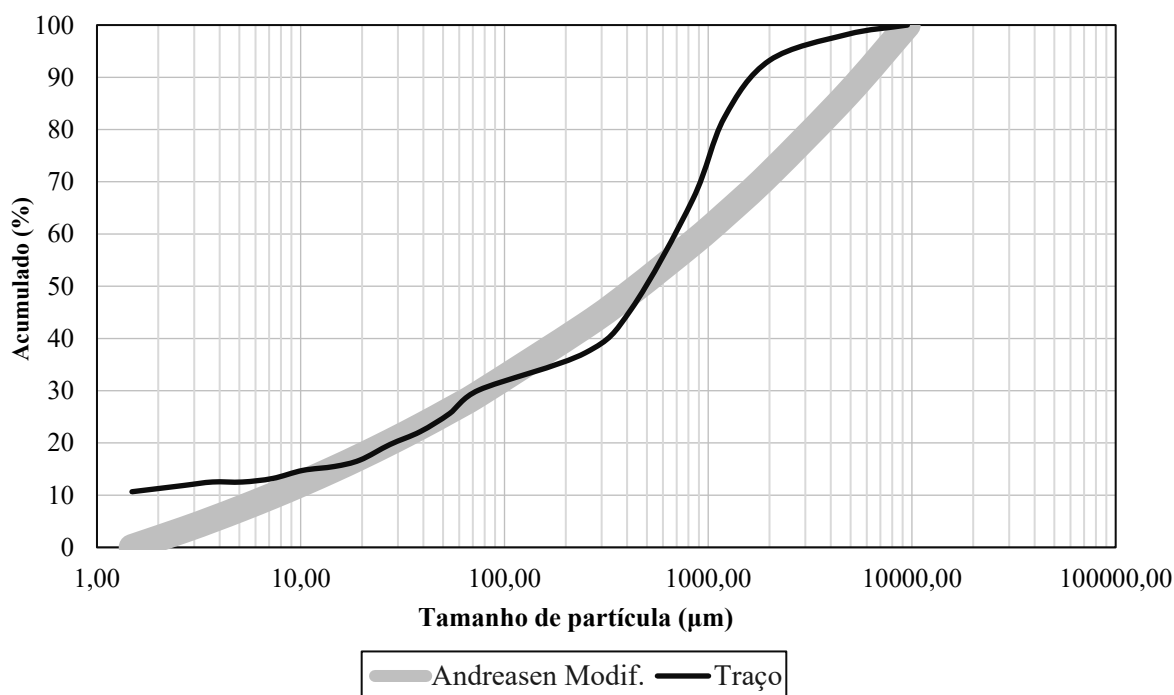


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 17 apresenta o traço para a composição sugerida para a curva granulométrica da mistura e a curva teórica sugerida pelo modelo modificado de Andreasen. Quando a curva do traço se alinha à curva teórica de Andreasen, significa que a distribuição das partículas na mistura está próxima do ideal, resultando em um material mais denso e coeso.

Dessa forma, após o processamento dos dados no modelo, obteve-se que para uma mistura ideal, que apresenta equilíbrio entre as proporções de partículas finas, médias e grossas de modo a minimizar o volume de vazios e maximizar a compactação da mistura, o modelo sugeriu uma composição em massa com 74% de solo e 26% de cinza. Para o modelo, essa proporção permite um melhor empacotamento das partículas, melhorando a densidade, reduzindo o volume de vazios e melhorando a estabilidade da mistura. Além disso, a presença controlada de cinza contribui para o preenchimento dos espaços entre as partículas maiores, otimizando a distribuição granulométrica e potencialmente melhorando as propriedades mecânicas do material resultante.

Figura 17 - Composição sugerida para a curva granulométrica da mistura, obtida por meio do modelo modificado de Andreasen.



### 5.1.2 Umidade Higroscópica

Os ensaios de umidade higroscópica foram realizados para as amostras de solo, cinza e mistura. Na Tabela 2 estão apresentados os valores experimentais resultantes.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de umidade higroscópica.

Umidade higroscópica (%)	
<b>Solo</b>	0,37
<b>Cinza</b>	3,37
<b>Mistura Solo Cinza</b>	0,65

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Verifica-se que, valores ínfimos de umidade higroscópica está diretamente associado a uma menor capacidade de retenção de água na estrutura da amostra, o que se relaciona à elevada proporção de frações sólidas na composição granulométrica do material. Além disso, observa-se que a capacidade de retenção de umidade da cinza têxtil é superior à do solo. Contudo, mesmo com o incremento de cinza têxtil. A mistura solo/cinza apresentou apenas um aumento mínimo na capacidade de retenção de água, evidenciando que a capacidade do material em termos de estabilidade estrutural, não é afetada por consequência da umidade.

De acordo com Soares (2005), materiais com elevada umidade higroscópica possuem uma maior tendência de reter água, o que pode resultar no aumento do peso específico do solo presente na estrutura de taludes, reduzindo a resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, favorecendo a ocorrência de deslizamentos ou falhas estruturais. Por outro lado, solos com baixa higroscopicidade apresentam menor risco de saturação, o que contribui significativamente para a estabilidade estrutural em obras de geotecnia, substancialmente em construções de taludes e barragens de terra.

### ***5.1.3 Limites de Atterberg***

Com base na análise dos resultados obtidos experimentalmente para os ensaios de limites de Atterberg para as amostras, constatou-se que o solo e a cinza têxtil não apresentam comportamento plástico ou líquido, sucedendo em valores nulos para os limites. A mistura também apresentou ausência de limites de consistência. O índice de plasticidade (IP) foi determinado como não existente, uma vez que corresponde à diferença entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP).

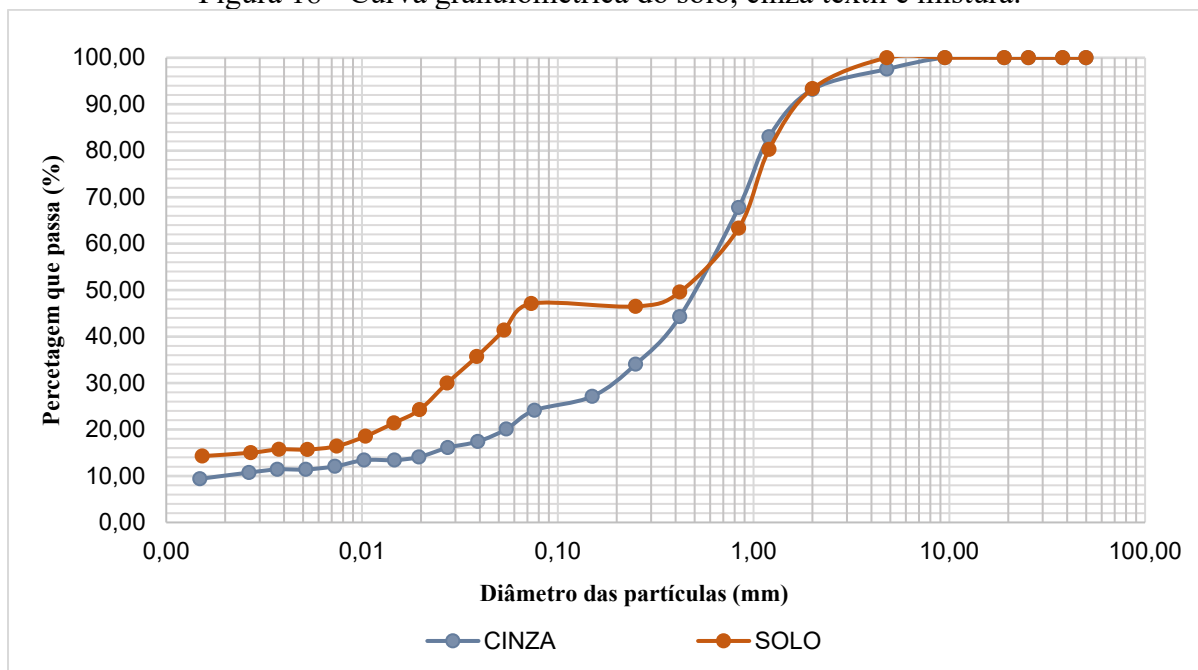
Materiais com baixos índices de plasticidade e liquidez tendem a apresentar menor deformabilidade e maior facilidade de compactação e manuseio.

### ***5.1.4 Granulometria por peneiramento e sedimentação***

As curvas granulométricas de cada material são apresentadas na Figura 18. A análise das curvas revelou diferenças significativas entre o solo e a cinza. Conforme os dados extraídos do gráfico, para o solo, a curva demonstra uma distribuição mais uniforme de partículas ao longo das diferentes faixas granulométricas, enquanto a cinza apresenta uma maior predominância de frações finas.

O Coeficiente de Não Uniformidade (CNU) e o Coeficiente de Curvatura (CC) indicaram que o solo possui uma granulometria bem distribuída, considerando que o material possui sólidos bem graduados. A curva o solo apresenta distribuição granulométrica mais ampla, abrangendo partículas de diferentes tamanhos, desde frações finas até partículas mais grossas. Por outro lado, a curva da cinza têxtil (linha azul) apresenta uma distribuição significativamente deslocada para a fração fina, indicando que a maior parte das partículas são de pequeno diâmetro.

Figura 18 - Curva granulométrica do solo, cinza têxtil e mistura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os Índices de Grupos para ambas as amostras, apresentaram valores nulos, indicando eficiência na utilização em aplicações em construções de obras de terra. A presença predominante de grãos finos da cinza têxtil incrementadas ao teor de solo recomendado pelo modelo de Andreasen, visa otimizar a distribuição dos grãos, promovendo um empacotamento ótimo das partículas e minimizando a presença de vazios na estrutura do material.

Com base na análise das curvas granulométricas e seus coeficientes, conjuntamente aos resultados dos limites de Atterberg, realizou-se a classificação dos materiais seguindo o método de classificação dos solos SUCS, como representado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação SUCS dos Solos.

Descrição	Solo	Cinza
% passante na peneira 2 mm	93,185	93,356
% passante na peneira 0,075 mm	24,119	47,103
IP (%)	0	0
LL(%)	0	0
Classificação SUCS	SM	SM
Denominação	(Areia Siltosa)	(Areia Siltosa)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

De acordo com a classificação granulométrica do solo, da cinza têxtil e da mistura, através do método SUCS, os materiais classificam-se como material areia siltosa. A combinação entre o solo arenoso e a cinza, que possui um maior teor de finos. A graduação

granular dos grãos da mistura facilita o processo de compactação, garantindo maior densidade e resistência à erosão interna.

### 5.1.5 Densidade Real dos Grãos

A análise dos valores da densidade real dos grãos demonstra a eficiência da mistura entre solo e cinza. O solo apresentou uma densidade real de 2370 kg/m<sup>3</sup>, enquanto a cinza teve 2280 kg/m<sup>3</sup>, resultando em uma densidade intermediária de 2720 kg/m<sup>3</sup> para a mistura. O resultado da densidade para a mistura foi encontrado através da média ponderada dos dados obtidos para o solo e a cinza. Os valores resultantes do experimento estão representados na Tabela 4.

Tabela 4 - Densidade real dos grãos das amostras de solo, cinza e mistura.

<b>Amostras</b>	<b>(kg/m<sup>3</sup>)</b>
Solo	2370
Cinza	2280
Mistura Solo-Cinza	2720

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

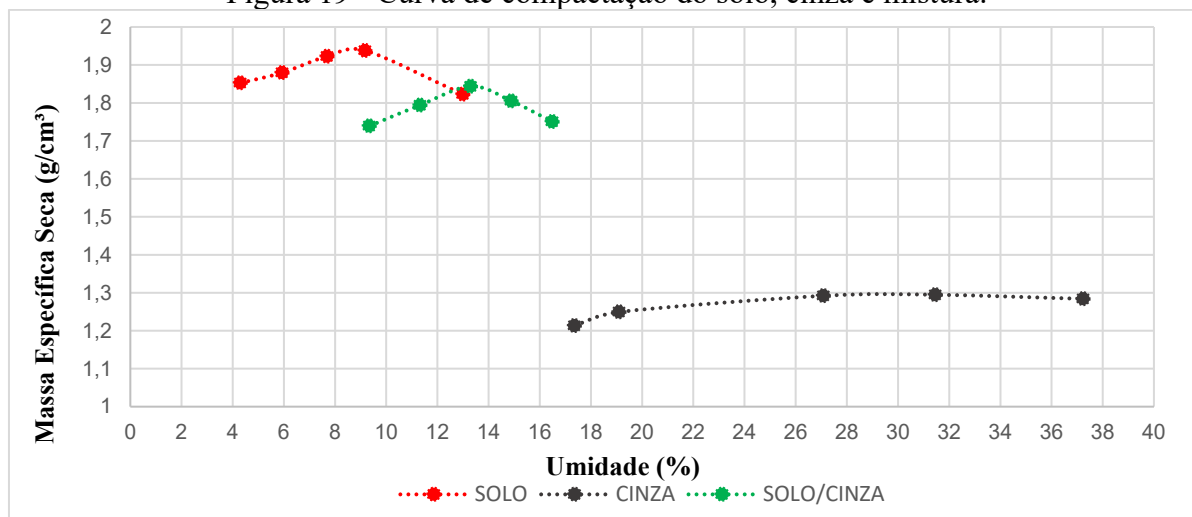
Esses resultados indicam que a inclusão da cinza não compromete significativamente a densidade da mistura, preservando características importantes para a compactação e estabilidade estrutural do material.

### 5.1.6 Ensaio de Compactação

Neste tópico, apresentam-se os resultados obtidos a partir dos ensaios de compactação das amostras de solo, cinza têxtil e da mistura composta por 74% de solo e 26% de cinza têxtil. As curvas de compactação dos materiais estão representadas no Figura 19.

Através das curvas de compactação observa-se que a capacidade de retenção de umidade da cinza é superior à do solo em estudo, similares aos resultados encontrados por Zhang *et al.* (2016). Em contrapartida a massa específica seca do solo é mais elevada que a da cinza, o que é esperado, pois a cinza geralmente possui uma densidade menor devido à sua natureza porosa e leve (Pandian *et al.* 2002).

Figura 19 - Curva de compactação do solo, cinza e mistura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para a mistura, a parcela incrementada de cinza têxtil não aumentou significativamente a retenção de umidade, isso assegura que não houve grandes alterações na estrutura da mistura em relação a retenção de umidade. Houve redução da massa específica seca da amostra, mas não de forma significativa. Segundo Pandian *et al.* (2002) relatam que, devido a porosidade da cinza, pode haver uma redução da massa específica seca da mistura, pois a estrutura porosa da cinza, tende a reter mais umidade do que o solo puro.

Portanto, os resultados indicam que a mistura entre solo e cinza não apresentam mudanças elevadas em relação a umidade e mantém propriedades adequadas para aplicações geotécnicas. Os resultados de umidade ótima e massa específica seca máxima das amostras de solo, cinza e mistura são apresentados na Tabela 5.

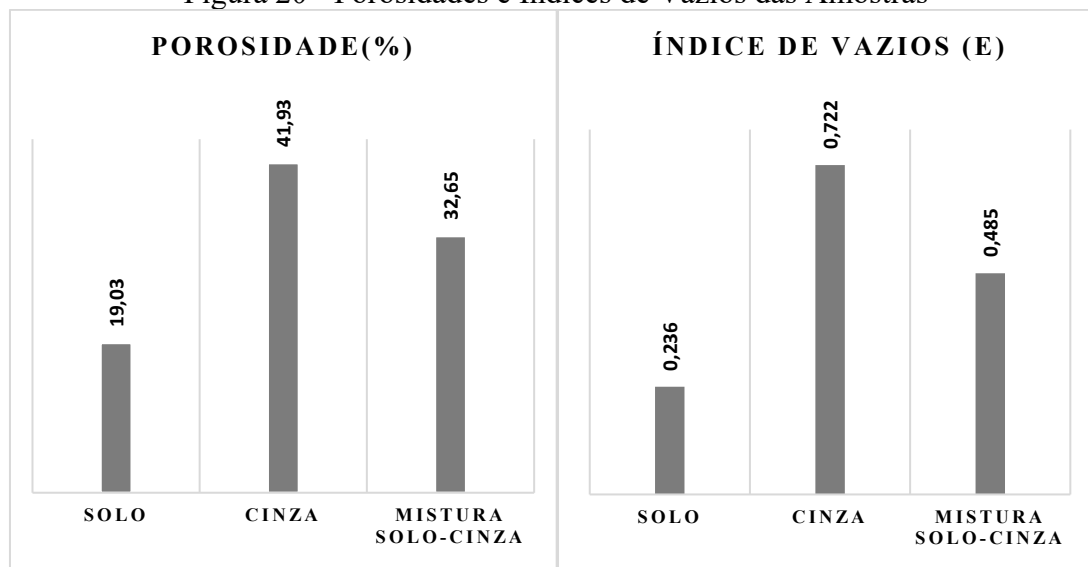
Tabela 5 - Resultados da umidade ótima e massa específica seca máxima das amostras de solo, cinza e mistura.

Amostras	Energia de Compactação	Massa específica seca máxima (kg/m³)	Umidade ótima (%)
Solo	Intermediária	1918	8,57
Cinza	Intermediária	1324	32,88
Mistura Solo Cinza	Intermediária	1832	13,12

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Após a determinação da massa específica seca máxima das amostras, resultante do ensaio de compactação, determinou-se os volumes de vazios e os índices de vazios dos materiais, como apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Porosidades e Índices de Vazios das Amostras



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 20, o solo apresenta baixa porosidade e alta compactação, o que é típico de solo areno-siltoso bem compactado. Estudos como os de Das (2015) e Holtz *et al.* (2011) destacam que solos com baixo índice de vazios tendem a ter maior resistência mecânica e menor permeabilidade, sendo ideais para aplicações em barragens e fundações.

A cinza, por ser um material residual de baixa densidade e com predominância de finos em sua granulometria, apresenta alta porosidade. Resultados semelhantes foram observados por Pandian (2004), que estudou cinzas volantes e destacou sua alta porosidade e baixa densidade aparente.

A mistura apresenta valores intermediários, indicando que a adição de cinza ao solo aumenta a porosidade, mas mantém uma estrutura mais estável do que a cinza pura. Estudos como os de Senol *et al.* (2006) e Ghosh e Subbarao (2007) mostram que a adição de cinzas volantes ao solo pode melhorar propriedades como permeabilidade e capacidade de adsorção, mas pode reduzir a resistência mecânica se a proporção de cinza for excessiva.

## 5.2 Caracterização Química

### 5.2.1 Caracterização química por Espectrometria de fluorescência de Raios - X

A análise química por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) revelou diferenças significativas entre as amostras de solo e cinza, como representado nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Caracterização química por FRX da amostra de solo.

Material	%
Si	46,4
Ca	15,1
Fe	13,0
K	10,9
Al	8,2
P	2,5
Outros	3

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O solo apresentou um alto teor de silício (Si) com 46,4%, indicando uma composição rica em silicatos, o alto teor de silício indica a presença de minerais silicatados, como quartzo e feldspatos, que são comuns em solos arenosos (Santos *et al.* 2018). Além de cálcio (Ca) e ferro (Fe) com 15,1% e 13,0%, respectivamente, Ferreira *et al.* (2015) destacam que o cálcio pode contribuir para a estabilização de solos, enquanto o ferro influencia a cor e a densidade do material. O potássio (K) com 10,9% e alumínio (Al) com 8,2% sugerem a presença de minerais argilosos e feldspatos, Campos *et al.* (2017) relatam que solos com alto teor de alumínio e potássio são comuns em regiões tropicais e podem apresentar boa capacidade de troca catiônica. Já o fósforo (P) com 2,5% pode indicar a presença de compostos fosfatados, além de estar associada a minerais fosfatados, como apatita (Oliveira *et al.* 2019), enquanto os outros elementos somam 3% da composição total.

Por outro lado, a cinza apresentou um aumento expressivo no teor de cálcio (Ca) para 55,0%, o que indica possível origem de materiais calcários ou de combustão com resíduos ricos nesse elemento, o alto teor de cálcio na cinza sugere origem calcária ou proveniente da queima de materiais ricos nesse elemento, como biomassa ou resíduos industriais (Silva *et al.* 2020). Diógenes (2023) realizou a análise química por FRX de cinza têxtil, e encontrou aproximadamente 60% de cálcio na composição da cinza.

Tabela 7 - Caracterização química por FRX da amostra de cinza têxtil.

<b>Material</b>	<b>%</b>
Ca	55,0
Si	14,8
K	11,9
Fe	8,2
Al	3,0
P	2,3
Outros	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O silício (Si) apresentou 14,8%, enquanto a composição de ferro (Fe) é cerca de 8,2%, e o alumínio (Al) 3,0%, dessa forma, sugere-se que haja menor presença de silicatos e óxidos metálicos. Pereira *et al.* (2016), em seus estudos, relatam que cinzas com baixo teor de silício e alumínio são menos reativas, mas podem ser utilizadas em misturas para melhorar a permeabilidade. O potássio (K) aumentou para 11,9%, possivelmente devido à queima de biomassa, e o fósforo (P) manteve um valor próximo ao do solo, com 2,3%. Além disso, a categoria “outros” aumentou para 5%, podendo incluir traços de compostos voláteis ou resíduos da combustão.

A análise por FRX revelou diferenças significativas na composição química do solo e da cinza, o que influencia suas aplicações potenciais. Enquanto o solo apresenta características típicas de materiais silicosos, a cinza, com seu alto teor de cálcio, pode ser utilizada como corretivo de solo ou na produção de materiais cimentícios.

### 5.3 Caracterização Mecânica

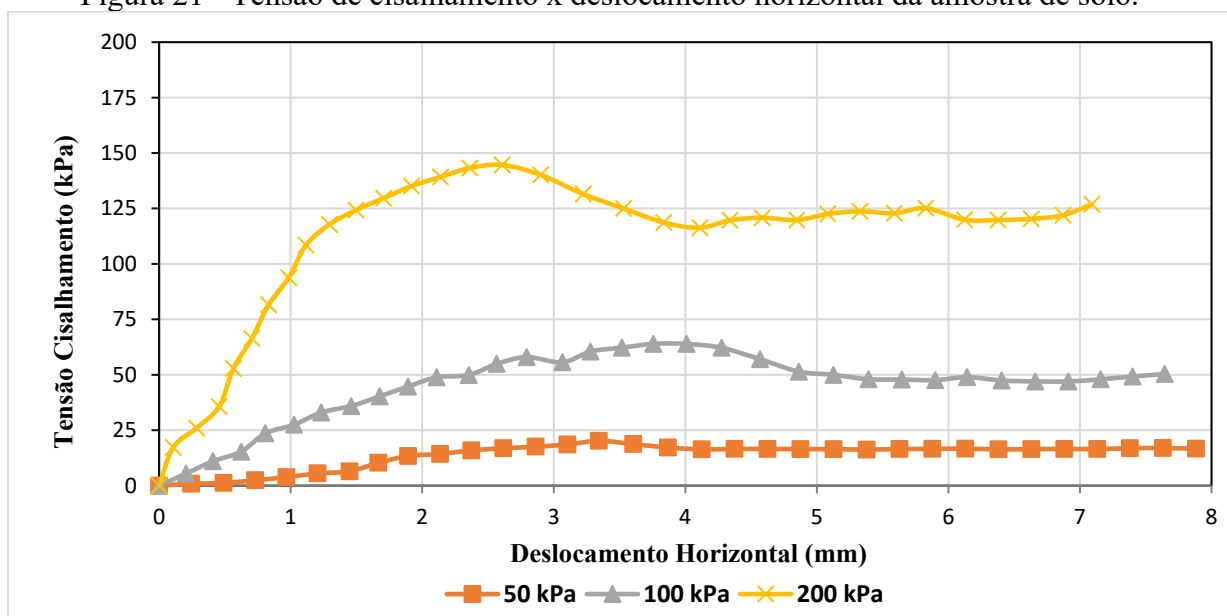
#### 5.3.1 Cisalhamento Direto

Os resultados obtidos através do ensaio de cisalhamento direto aplicado no solo, cinza e mistura, estão representados nos gráficos e tabelas abaixo, demonstrando a relação entre a resistência a tesões de cisalhamento e deslocamentos horizontais, variação volumétrica vs. deslocamentos horizontais e tensão de cisalhamento máxima em relação a tensões normais. Além disso determinou-se o ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e o índice de coesão ( $c$ ) para cada material.

### a) Solo

O solo apresentou valores de resistência cisalhante conforme a Figura 21, com a aplicação das tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. A análise da curva de tensão vs. deslocamento sugere que o solo pode ter comportamento frágil sob altas tensões normais (200 kPa), mas com valores de resistência ao cisalhamento satisfatórios.

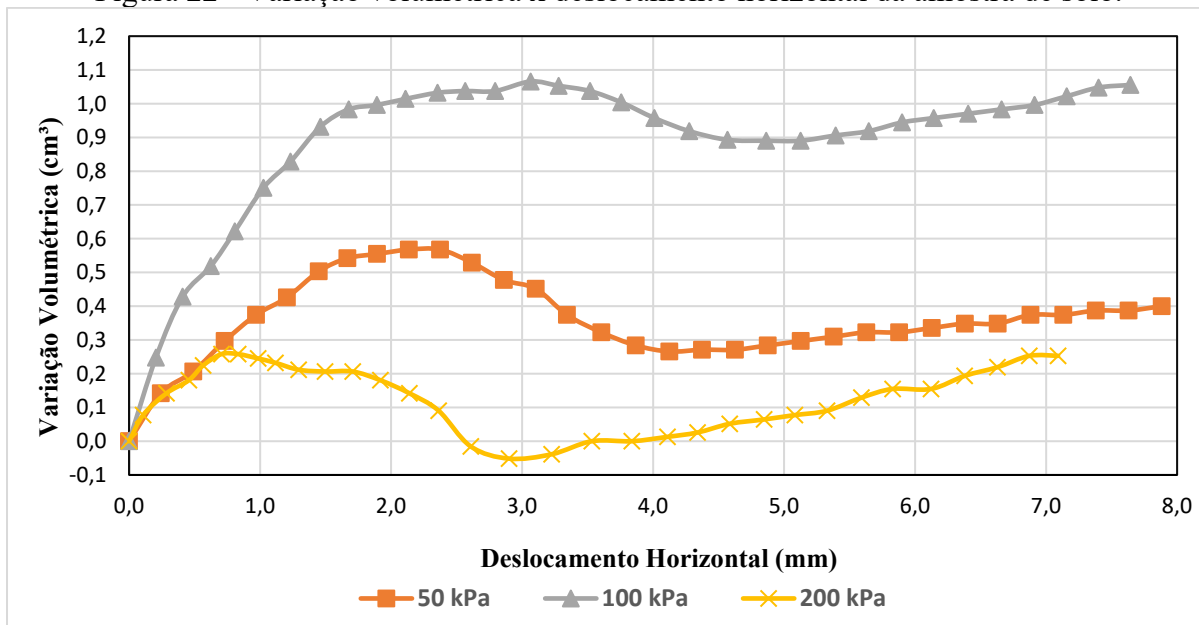
Figura 21 - Tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal da amostra de solo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 22, está representado a relação entre a variação volumétrica e o deslocamento horizontal da amostra de solo sob diferentes tensões normais (50, 100 e 200 kPa), obtido a partir de um ensaio de cisalhamento direto. Para a tensão de 50 kPa, observa-se um comportamento ligeiramente dilatante, estabilizando rapidamente após os primeiros deslocamentos. Bolton (1986) menciona que esse comportamento típico de solos arenosos siltosos com baixo confinamento. Sob 100 kPa, o solo apresenta o maior grau de dilatância, indicando que, sob tensão moderada, há maior expansão volumétrica durante o cisalhamento. Já para 200 kPa, o comportamento inicial é compressivo, seguido de uma dilatância limitada devido ao maior confinamento do solo, Terzaghi *et al.* (1996) afirma que, em tensões normais elevadas, as partículas do solo são pressionadas umas contra as outras, reduzindo os vazios e causando uma fase inicial de compressão.

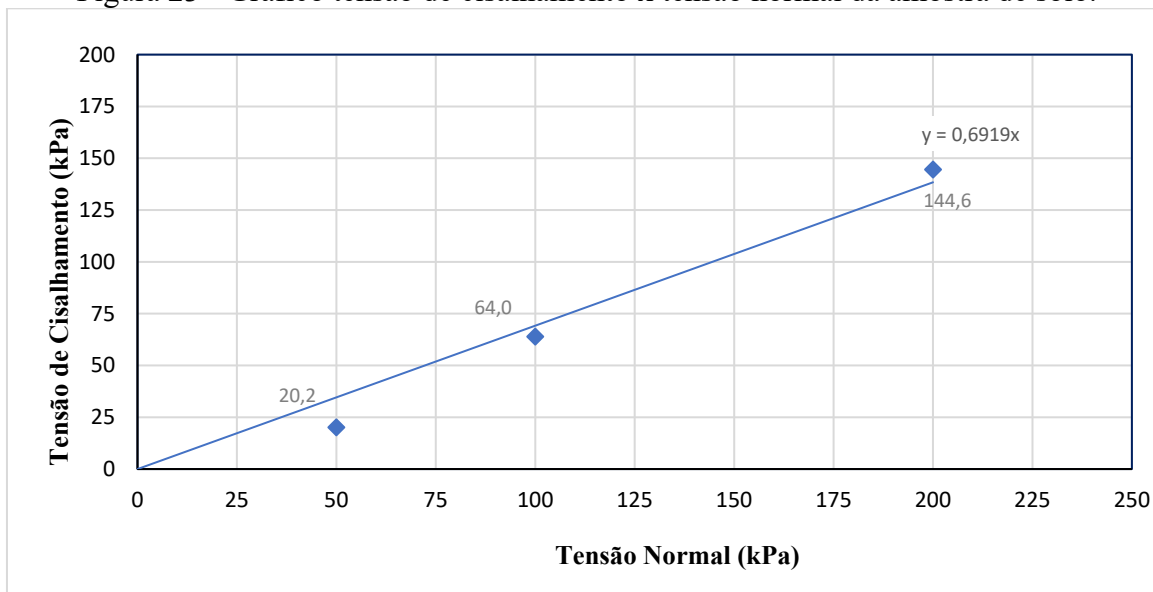
Figura 22 - Variação volumétrica x deslocamento horizontal da amostra de solo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 23, apresenta-se a relação entre a tensão cisalhante e tensão normal, que gera a envoltória de ruptura pela linha de tendência dos pontos obtidos durante o ensaio, onde o ângulo desta reta é correspondente ao ângulo de atrito e a constante desta reta representa o intercepto coesivo do material.

Figura 23 - Gráfico tensão de cisalhamento x tensão normal da amostra de solo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Equação 6, representa a envoltória de ruptura representa o comportamento do solo em seu estado natural. Para determinar o valor do intercepto coesivo, é necessário considerar o ponto onde “x” é igual a zero.

$$y = 0,6919 * x \quad (\text{Equação 7})$$

Desta forma, para  $x = 0$ , como se trata de um solo predominantemente granular, assim o valor do intercepto coesivo ( $c'$ ) será nulo.

O valor do ângulo de atrito pode ser obtido pela derivada primeira que corresponde ao coeficiente angular da reta e, o arco tangente deste valor será a inclinação da reta (envoltória de ruptura).

Deste modo:

$$\frac{dy}{dx} = 0,6919 * x = 0,6919$$

O cálculo da  $\tan^{-1}(0,6919) \cong 34,67^\circ$ , sendo o resultado o valor correspondente ao ângulo de atrito interno do solo em seu estado natural. Na tabela 8 estão representados os principais resultados obtidos através do ensaio de cisalhamento direto na amostra de solo.

Tabela 8 – Resultados para o ensaio de cisalhamento direto na amostra de solo.

SOLO						
Corpo de Prova	Massa Específica Aparente Seca (kg/m <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Tensão Normal (KPa)	Tensão de Cisalhamento Máxima (KPa)	Coesão (KPa)	Atrito (Graus)
1	1789	8,6	50	20,2		
2	1789	8,6	100	64,0	0,00	34,67
3	1789	8,6	200	144,6		

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De acordo com os resultados, o solo estudado apresenta um ângulo de atrito interno alto ( $\phi=34,67^\circ$ ), característica presente em solos granulares (como areias e solos arenosos siltsos) como descrevem Lambe e Whitman (1969). Holtz *et al.* (2011) ressalta que a ausência de coesão em solos, como demonstra o resultado encontrado para o solo em estudo, indica que o solo não possui partículas finas (como argila) ou ligações eletroquímicas, o que é típico de solos granulares. O aumento significativo da tensão de cisalhamento máxima (de 20,2 kPa para

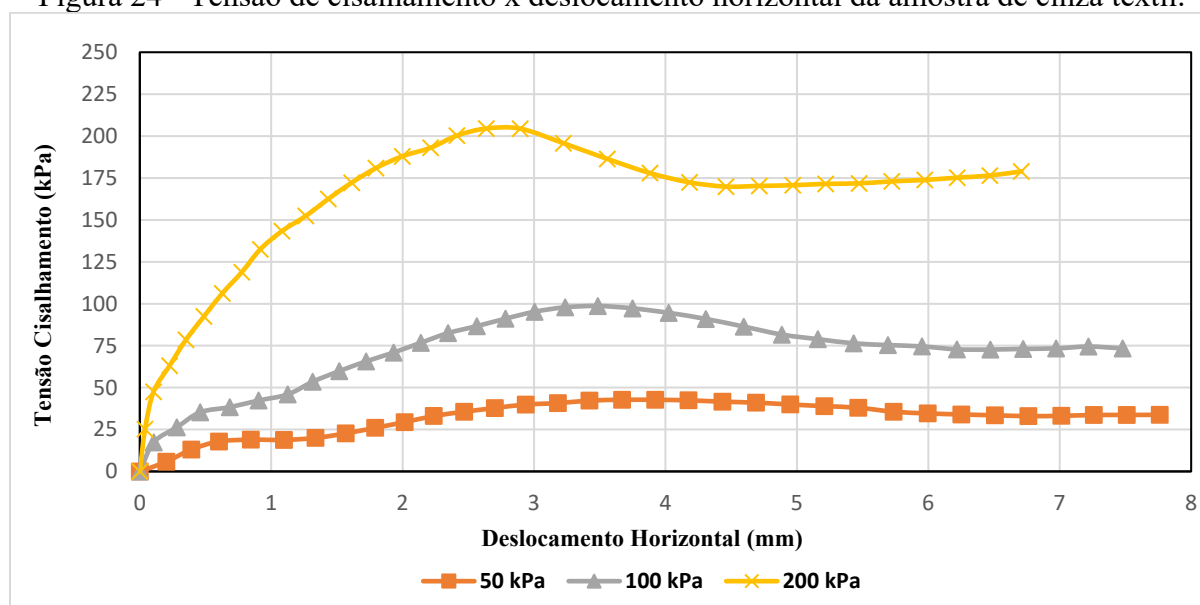
144,6 kPa) à medida que a tensão normal aumenta (de 50 kPa para 200 kPa) é um comportamento típico de solos granulares, como areias e solos arenosos siltosos. Esse fenômeno é explicado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb (Das, 2015). Observa-se que, para todas as três amostras ensaiadas, a massa específica aparente seca e a umidade permaneceram constantes, garantindo condições homogêneas para a análise dos efeitos da tensão normal aplicada.

## b) Cinza

Na Figura 24, está apresentada a relação entre a tensão de cisalhamento e o deslocamento horizontal da amostra de solo para diferentes tensões normais aplicadas: 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

Para a tensão normal de 50 kPa, a tensão de cisalhamento atinge níveis de tensões baixos devido à ausência de confinamento dos grãos e ao elevado volume de vazios da amostra, indicando baixa resistência ao cisalhamento sob baixas tensões normais, como já abordado por Bolton (1986). Já para as tensões de 100 kPa e 200 kPa, há um pico seguido de queda, porém sugerindo que o material apresentou progresso de resistência a tensões de cisalhamento sob maiores tensões de confinamento, como descrito por Terzaghi *et al.* (1996).

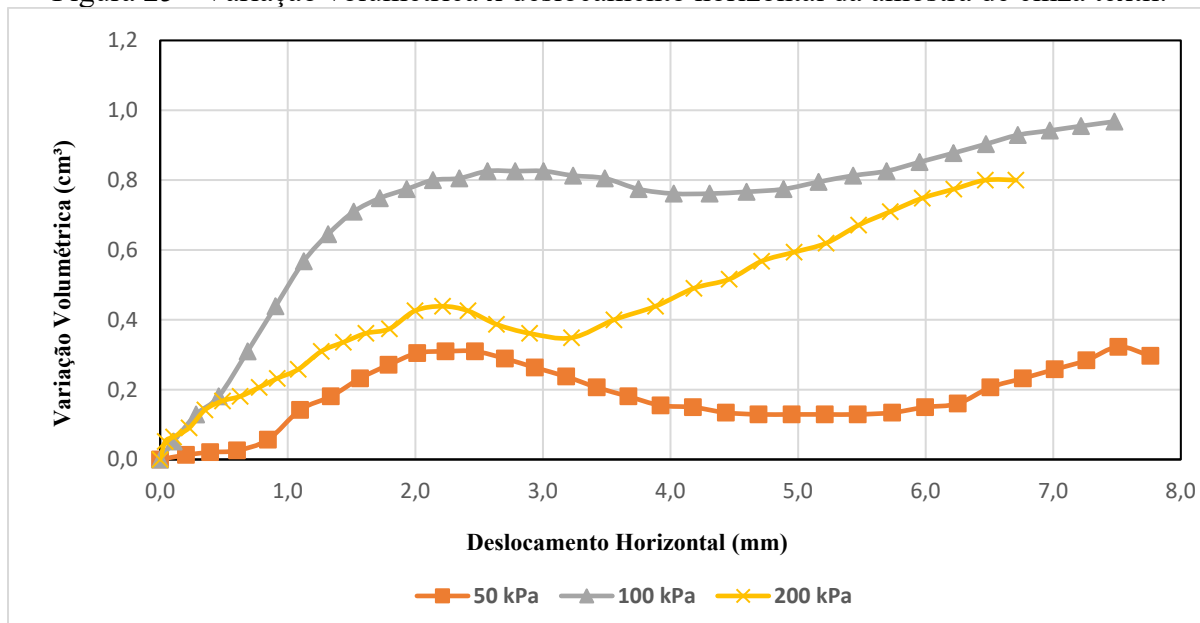
Figura 24 - Tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal da amostra de cinza têxtil.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O comportamento de variação volumétrica da cinza sob diferentes tensões normais (50, 100 e 200 kPa), estão representados na Figura 25.

Figura 25 - Variação volumétrica x deslocamento horizontal da amostra de cinza têxtil.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A cinza têxtil apresentou instabilidade volumétrica durante o ensaio, com tendência inicial de expansão, especialmente sob menores tensões normais, comportamento similar ao do solo. Com o aumento do deslocamento horizontal, a variação volumétrica ocorreu de forma irregular, indicando baixa coesão e alta compressibilidade, assim como descrito por Sivapullaiah et al. (2000), que afirma que esse comportamento é característico de resíduos industriais, como cinzas volantes e cinzas de biomassa. Em tensões mais elevadas, a tendência expansiva persistiu, evidenciando sua menor resistência estrutural, Fredlund & Rahardjo (1993) afirmam que expansão contínua indica que as partículas continuam se rearranjando, mesmo após o fechamento inicial dos vazios, o que é típico de materiais com alta compressibilidade e baixa densidade.

Na Figura 26, está representado a tensão cisalhante e tensão normal, que gera a envoltória de ruptura da amostra de cinza têxtil. A Equação 7, representa a envoltória de ruptura representa o comportamento da cinza têxtil em seu estado natural. Para identificar o intercepto coesivo, faz-se ( $x = 0$ ), mas como a amostra não apresenta coesão, conclui-se que esse coeficiente é nulo.

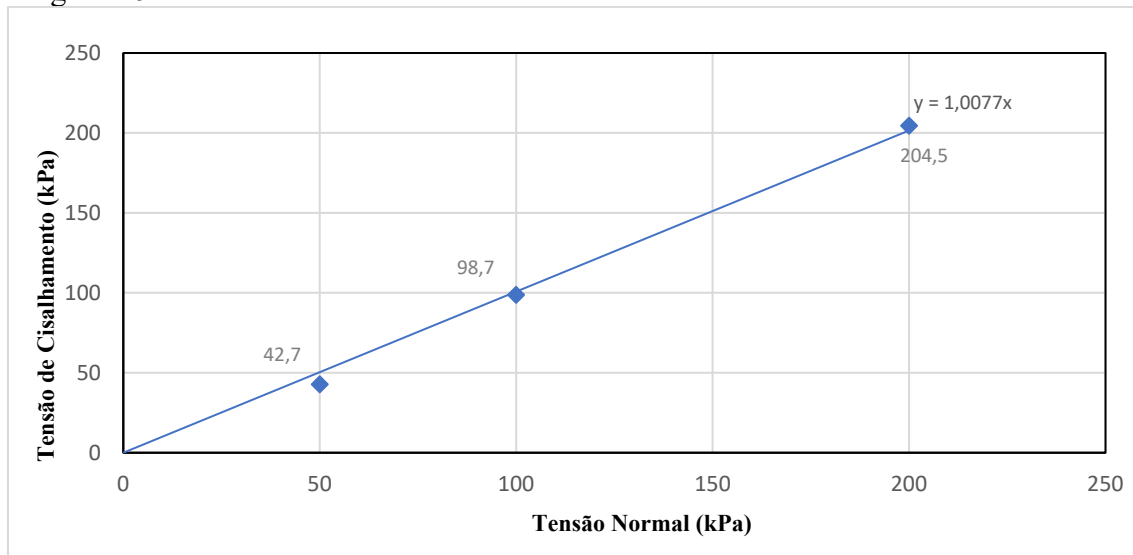
$$y = 1,0077 * x \quad (\text{Equação 8})$$

O ângulo de atrito é determinado a partir da primeira derivada, que representa o coeficiente angular da reta. A inclinação da envoltória de ruptura, por sua vez, é obtida pelo arco tangente desse coeficiente.

Deste modo:

$$\frac{dy}{dx} = 1,0077 * x = 1,0077$$

Figura 26 - Gráfico tensão de cisalhamento x tensão normal da amostra de cinza têxtil.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O cálculo da  $\tan^{-1}(1,0077) \cong 45,21^\circ$ , sendo o resultado o valor correspondente ao ângulo de atrito interno do solo em seu estado natural. Na tabela 9 estão representados os principais resultados obtidos através do ensaio de cisalhamento direto na amostra de cinza têxtil.

Tabela 9 - Resultados para o ensaio de cisalhamento direto na amostra de cinza.

CINZA						
Corpo de Prova	Massa Específica Aparente Seca (kg/m³)	Umidade (%)	Tensão Normal (KPa)	Tensão de Cisalhamento Máxima (KPa)	Coesão (KPa)	Atrito (Graus)
1	1358	32,9	50	42,7		
2	1358	32,9	100	98,7	0	45,21
3	1358	32,9	200	204,5		

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os resultados obtidos para a cinza têxtil evidenciam que o material possui um elevado ângulo de atrito interno ( $\phi=45,21^\circ$ ), o que indica uma significativa resistência ao cisalhamento devido à fricção entre suas partículas. Das (2010) explica que esse

comportamento é típico de materiais granulares com superfícies rugosas ou irregulares, que aumentam a resistência ao deslizamento relativo das partículas, e comenta que esse parâmetro é favorável para aplicações em que a resistência ao cisalhamento é crítica, como em aterros ou bases de pavimentos. Na pesquisa realizada por Diógenes (2023), indicou que a cinza têxtil, quando misturada ao solo em proporções adequadas (especialmente 50%), pode ser uma alternativa viável para aplicação em camadas de sub-base de pavimentos.

Além disso, a uniformidade granulométrica do material, caracterizada pela predominância de grãos finos e de elevado volume de vazios, resulta na alta capacidade de retenção de umidade. Essas características tornam inviável a utilização exclusiva da cinza têxtil em estruturas de obras geotécnicas, pois a ausência de coesão e a sensibilidade à umidade podem resultar em problemas de instabilidade, principalmente em situações de infiltração ou carregamentos críticos. Portanto, a aplicação da cinza têxtil na geotecnia deve ser considerada apenas em combinação com outros materiais, visando a estabilização granulométrica ou com outros materiais que possam complementar suas deficiências. Estudos como o de Ferreira et al. (2018) e Silva et al. (2020) corroboram essas observações, destacando que a cinza têxtil, quando utilizada isoladamente, apresenta baixa resistência mecânica e tendência à compactação excessiva sob carga.

### **c) Mistura**

Para a mistura de solo/cinza determinada através do modelo modificado de Andreasen, os resultados obtidos para o ensaio de cisalhamento direto, estão apresentados na Figura 27, apresentando os índices de resistência mecânica obtidos através do ensaio de cisalhamento direto.

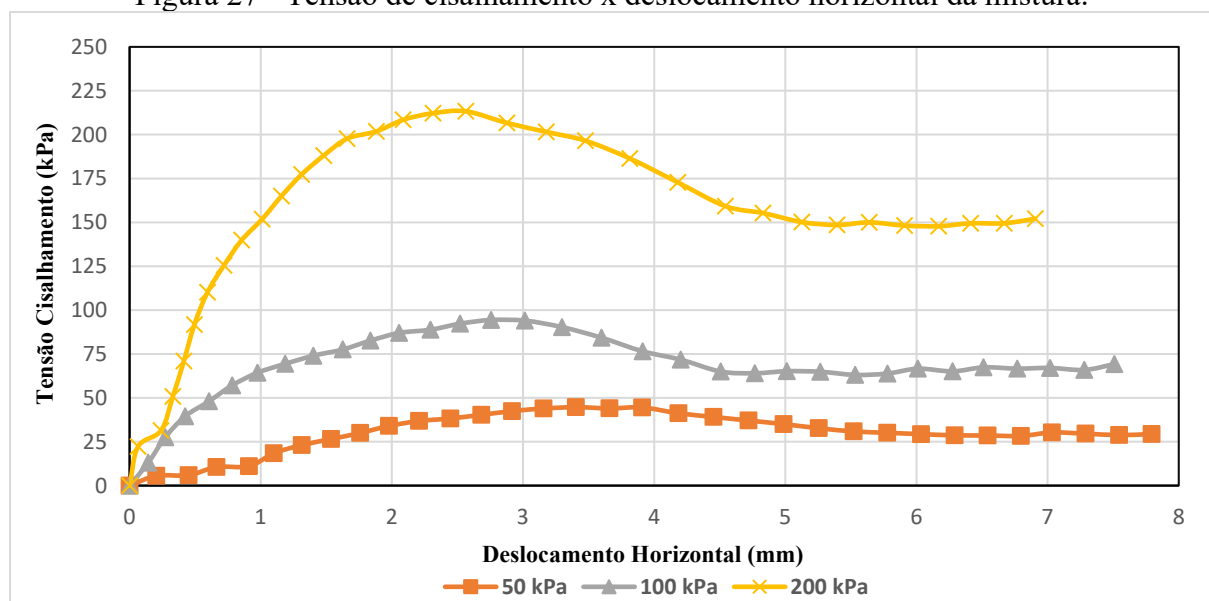
Como abordado anteriormente, a cinza e o solo quando analisados individualmente apresentaram deficiências de resistência mecânica e particularidades nas características físicas nas quais poderiam ser complementadas quando em misturas a outros materiais. O solo apresentou ausência de coesão, ângulo de atrito interno relativamente baixo quando comparado a cinza têxtil e resistência a tensões de cisalhamento baixa quando submetido a altas tensões normais. A cinza por sua vez, classifica-se como um resíduo industrial, entretanto, não fornece características geotécnicas e resistência mecânica suficiente para ser empregada individualmente em obras de geotecnia.

Ao analisar as curvas no gráfico na Figura 27, observa-se que a amostra sob tensão normal de 50 KPa, apresenta baixa resistência ao cisalhamento, rompendo rapidamente e

estabilizando-se rapidamente. Sob tensão normal de 100 KPa, o comportamento de resistência não difere muito quando relacionado a tensão normal anterior. Porém a resistência ao cisalhamento é elevada, sob tensão normal de 200 KPa, reafirmado os estudos realizados por Terzaghi *et al.* (1996).

Portanto, o aumento linear da tensão de cisalhamento máxima, está relacionada com o aumento da tensão normal, coerente com o critério de resistência de Mohr-Coulomb. Como mencionado por Lambe e Whitman (1969), esse comportamento é característico de solos com resistência à cisalhamento bem definido, com um pico associado à resistência máxima antes de um possível comportamento de rompimento.

Figura 27 - Tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal da mistura.



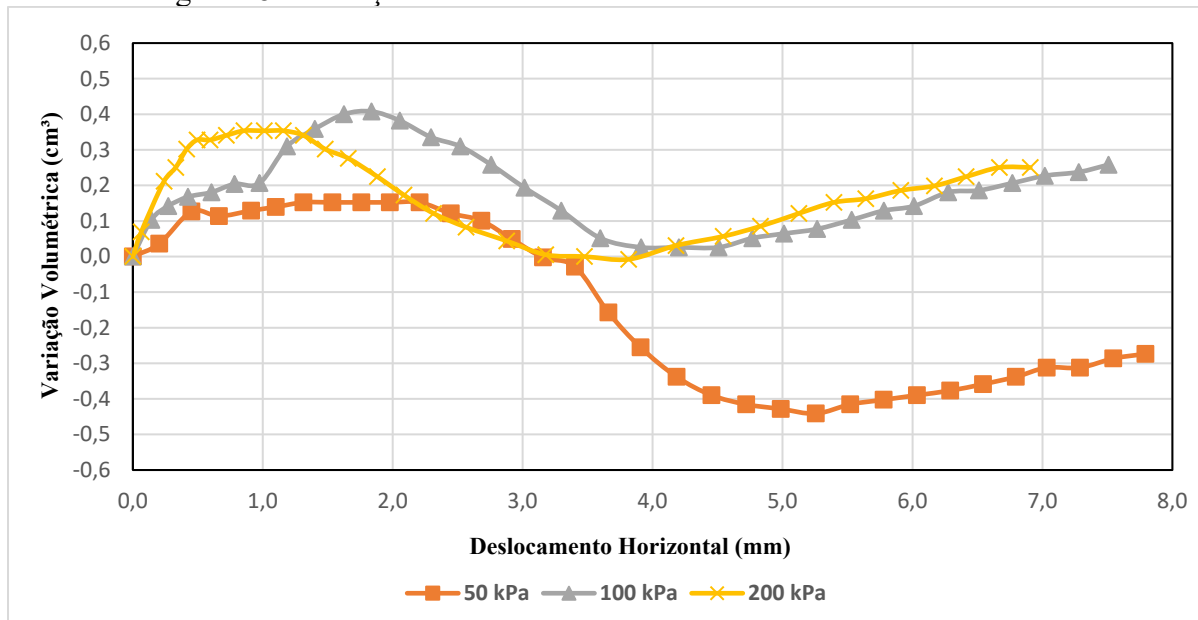
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 28, apresenta a relação entre a variação volumétrica e o deslocamento horizontal da mistura solo-cinza sob tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. Para 50 kPa, observa-se dilatação até aproximadamente 1,5 mm de deslocamento, seguida de compressão acentuada, indicando que, em baixas tensões, a mistura tende a reorganizar as partículas após a dilatação inicial. Sob 100 kPa, há dilatação moderada até cerca de 2,5 mm, evidenciando um equilíbrio entre dilatação e compressão, com menor deformação volumétrica. Já a 200 kPa, ocorre dilatação inicial até 1,2 mm, seguida de compressão gradual, menos intensa que em 50 kPa, resultando em maior estabilidade volumétrica. Zorzan (2019) relata que observou uma redução no intercepto coesivo com o aumento da deformação das amostras de solos arenosos,

indicando que fenômeno ocorre porque, em níveis mais elevados de deformação, a resistência por atrito se torna a principal contribuição para a resistência ao cisalhamento do solo.

A variação volumétrica da mistura é inferior cerca de 60% quando comparada com a variação volumétrica da cinza têxtil, e cerca de 65% inferior quando comparada ao solo.

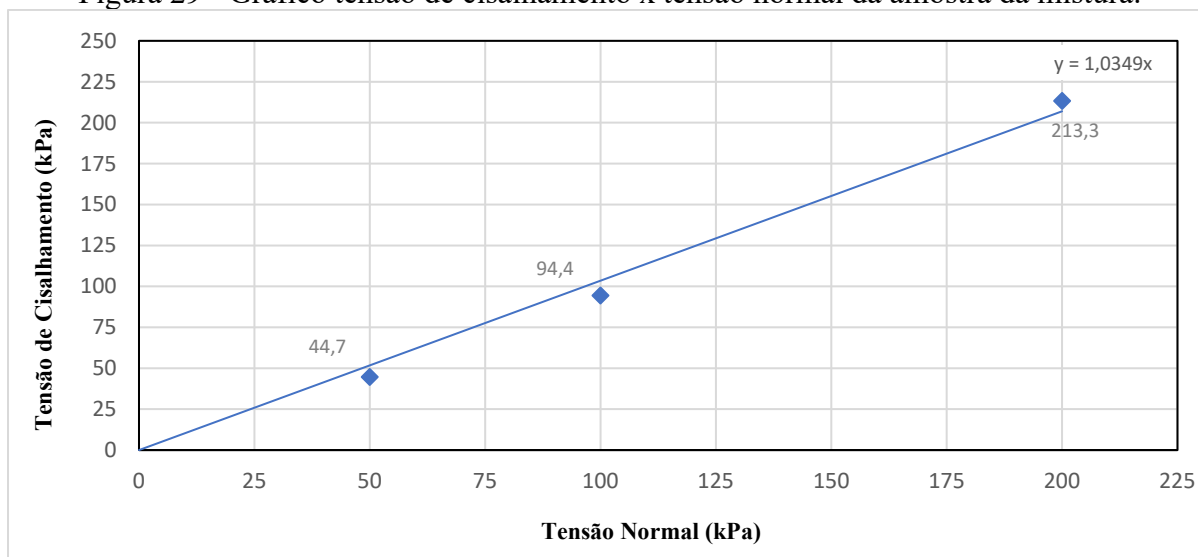
Figura 28 - Variação volumétrica x deslocamento horizontal da mistura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na Figura 29, estão representadas a tensão cisalhante e a tensão normal, que determinam a envoltória de ruptura da amostra analisada.

Figura 29 - Gráfico tensão de cisalhamento x tensão normal da amostra da mistura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Equação 7, representa a envoltória de ruptura e descreve o comportamento da mistura de solo e cinza têxtil em seu estado natural. Para determinar o intercepto coesivo, considerou-se ( $x = 0$ ). No entanto, como a amostra não apresenta coesão, conclui-se que esse coeficiente é nulo.

$$y = 1,0349 * x \quad (\text{Equação 9})$$

Deste modo:

$$\frac{dy}{dx} = 1,0349 * x = 1,0349$$

O cálculo da  $\tan^{-1}(1,0349) \cong 45,98^\circ$ , o resultado corresponde ao valor do ângulo de atrito interno da mistura de solo e cinza têxtil em seu estado natural. A Tabela 10 apresenta os principais resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto realizado na mistura.

Tabela 10 - Resultados para o ensaio de cisalhamento direto na mistura de solo/cinza.

MISTURA SOLO/CINZA						
Corpo de Prova	Massa Específica Aparente Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Tensão Normal (KPa)	Tensão de Cisalhamento Máxima (KPa)	Coesão (KPa)	Atrito (Graus)
1	1883	13,1	50	44,7		
2	1883	13,1	100	94,4	0	45,98
3	1883	13,1	200	213,3		

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A relação entre a tensão de cisalhamento máxima e o deslocamento horizontal da mistura solo/cinza demonstra uma boa resistência inicial à deformação, indicando estabilidade, durabilidade e bom índice de compactação da mistura. A amostra além de apresentar baixo índice de vazios e boa graduação das partículas sólidas, exibe valor uniforme para massa específica aparente seca (1,883 g/cm<sup>3</sup>), indicando compactação homogênea. A umidade ótima (13,10%) sugere níveis controlados de absorção e retenção de água. O ângulo interno de atrito da mistura ( $\phi=45,98^\circ$ ) aponta uma excelente resistência ao cisalhamento, o valor está na faixa encontrada por Costa *et al.* (2017), para misturas de solo e resíduos industriais compactados, com resistência ao cisalhamento dominada pelo atrito interno. A ausência de coesão da amostra demonstra que a resistência do material é dominada pelo atrito interno, o que pode ser uma limitação em condições de baixa tensão normal.

Para barragens, Fell *et al.* (2005) destacam que materiais granulares com alto ângulo de atrito interno são adequados para zonas de filtro, pois proporcionam boa drenagem

e resistência ao cisalhamento. Já Sherard *et al.* (1984) também ressaltam, que a compactação controlada e a umidade ótima são índices críticos para garantir a estabilidade da estrutura de barragens. Na utilização da mistura na estabilização de taludes, Fredlund e Rahardjo (1993) destacam que a ausência de coesão em materiais granulares pode ser uma limitação em taludes de baixa altura ou sob baixas tensões normais, onde a coesão seria essencial para a estabilidade, assim sendo, recomenda-se o uso em projetos onde predominam altas tensões normais sendo adequado para taludes íngremes ou de altura considerável. Duncan *et al.* (2014) observaram que taludes íngremes sujeitos a altas tensões normais se beneficiam de materiais com alto ângulo de atrito interno, pois a resistência ao cisalhamento é dominada pelo atrito entre partículas.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **6.1 Conclusão**

A caracterização geotécnica, química e mecânica do solo arenoso e das cinzas geradas pela queima de resíduos têxteis permitiu entender melhor as propriedades físicas, químicas e estruturais. Os ensaios de granulometria indicaram que o solo é composto predominantemente por partículas de tamanho médio, enquadrando-se na faixa de areia fina e média, com uma pequena fração de silte e ausência praticamente total de argila. Por outro lado, as cinzas têxteis apresentaram uma predominância de partículas finas e porosas, com características distintas em relação ao solo analisado. Os maiores valores de porosidade e índices de vazios foi encontrado para a cinza. A análise química para a cinza identificou a presença de óxidos metálicos e outros compostos que podem influenciar na reatividade do material.

A aplicação do modelo de Andreasen visando otimizar a distribuição granulométrica da mistura entre a cinza e o solo, resultou em um material com menor volume de vazios e maior compactidade. A combinação de 74% de solo e 26% de cinzas resultou em uma mistura mais homogênea e densa, melhorando suas propriedades físicas e geotécnicas. A otimização mostrou que a mistura atingiu uma distribuição granulométrica equilibrada, o que favoreceu a interação entre as partículas e reduziu o volume de vazios presente na estrutura do material.

Os ensaios de resistência ao cisalhamento, mostraram que a adição das cinzas têxteis ao solo aumentou o ângulo de atrito e resistência ao cisalhamento da mistura. A tensão

de cisalhamento máxima obtida antes da ruptura indicou um ganho significativo de resistência em comparação ao solo puro, comprovando a eficácia da incorporação das cinzas. Esses resultados sugerem que o material desenvolvido tem maior eficiência a resistência a tensões de cisalhamento devido ao seu elevado ângulo de atrito interno e baixo volume de vazios, além de apresentar menor deformação volumétrica em relação aos materiais individuais.

Por fim, a avaliação do potencial de reaproveitamento das cinzas têxteis destacou sua viabilidade como material alternativo na engenharia geotécnica. O estudo mostrou que, além de melhorar a resistência ao cisalhamento do solo, o uso desse resíduo pode ajudar a reduzir os impactos ambientais causados pelas indústrias têxteis e cerâmicas. O reaproveitamento das cinzas não só diminui a disposição inadequada de resíduos, mas também promove soluções sustentáveis na construção civil.

### **Recomendações para trabalhos futuros;**

- Realizar caracterização química dos materiais, incluído microscopia e granulometria por difração a laser da cinza têxtil.
- Analisar o comportamento da mistura sob ensaio de compressão e resistência ao cisalhamento pelo método de ensaio triaxial, para complementar as análises de resistência da mistura produzida.
- Submeter a amostra a ensaios complementares para avaliar o comportamento a longo prazo (sob variações de umidade e drenagem).
- Analisar o comportamento mecânico e a efetividade do comportamento do material em campo, após a aplicação do material nas edificações dos taludes e barragens de terra.

## REFERÊNCIAS

- ALCANTARA, M. R. G. de. **Estudo da utilização de cinzas pesadas de termoeletrica para produção de blocos de concreto para pavimentos intertravados**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- ALEXANDRE, J. et al. **Análise das alterações das propriedades mecânicas de produtos cerâmicos em função do tempo de queima**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 45., 2001, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ABC, 2001. CD-ROM.
- ALMASO, Victor Henrique Silva. **Estudo dos parâmetros de resistência em areia utilizando o equipamento de cisalhamento direto de grande porte**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto, 2017.
- ALMEIDA, E. P.; GOMES, W. C. **Reutilização das cinzas volantes de carvão mineral na fabricação de cimento de Portland**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 8, p. 375-386, 2021.
- ALMEIDA, J. C.; SILVA, M. P. **Geotecnia e classificação de solos**. São Paulo: Editora Acadêmica, 2010.
- ALTOÉ, L.; SALES, L. S.; MARTINS, M. A. **Utilização de cinzas como alternativa vantajosa na construção civil**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 22, n. 4, p. 123-130, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D3080-04 – Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2004.
- ANICER. (2014). Políticas empresariais e sustentabilidade na indústria cerâmica. Associação Nacional da Indústria Cerâmica. Disponível em: [https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2016/11/relatorio\\_2014.pdf](https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2016/11/relatorio_2014.pdf). Acesso em: 20 dez. 2024 .
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004:2004 – Resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653:2014 – Cimento Portland: requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653:2018 – Cimento Portland: requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457:2016 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6458:2016 – Solo – Determinação da densidade real**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459:2016 – Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

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

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

ASTM. **ASTM D3080/D3080M-22 – Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. Disponível em: <https://www.astm.org>. Acesso em: 10 dez. 2024.

BOLTON, M. D. **The strength and dilatancy of sands**. *Géotechnique*, v. 36, n. 1, p. 65-78, 1986.

BOSCOV, M. E. G. **Materiais alternativos em geotecnia ambiental: aplicações em barreiras e sistemas de drenagem**. *Revista Escola de Minas*, v. 61, n. 4, p. 379-384, 2008.

BOSSEL, H. **Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications**. A Report to the Balaton Group. International Institute for Sustainable Development, Canadá, 1999.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução n.º 401, de 4 de novembro de 2008**. Dispõe sobre o gerenciamento ambientalmente adequado de resíduos industriais e estabelece critérios e procedimentos para sua destinação final. *Diário Oficial da União*, seção 1, Brasília, DF, 5 nov. 2008. Acesso em: 10 dez. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução n.º 313, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe sobre o inventário nacional de resíduos sólidos industriais. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 13 nov. 2002. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2002/res\\_conama\\_313\\_2002\\_residuos.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2002/res_conama_313_2002_residuos.pdf). Acesso em: 10 dez. 2024.

BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 10 dez. 2024.

BUDHU, Muni. **Soil Mechanics and Foundations**. 3. ed. United States Of America: Wiley, 2010. 780 p.

CAMPOS, T. M. et al. **Minerais argilosos em solos tropicais: ocorrência e aplicações**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 41, p. 1-15, 2017.

COSTA, A. et al. **Estabilização de cinzas têxteis com cimento para aplicação em obras geotécnicas**. In: *Seminário Nacional de Resíduos Sólidos*, 2017. Anais. p. 78-89.

CRAIG, R. F. **Soil Mechanics**. 7. ed. London: Taylor & Francis, 2004.

CRAIG, R. F. **Soil Mechanics**. 8. ed. United States of America: Crc Press, 2012. 584 p.

DAS, B. M. **Principles of Geotechnical Engineering**. 5. ed. Boston: Cengage Learning, 2007.

- DAS, B. M. **Principles of Geotechnical Engineering**. 7. ed. Stamford: Cengage Learning, 2010.
- DAS, B. M. **Principles of Geotechnical Engineering**. Cengage Learning, 2015.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT 141: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010.
- DIÓGENES, Laís Alves. **Incorporação de cinzas têxteis provenientes de fornos cerâmicos como camadas de sub-base de pavimentos**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, Russas, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/75210>.
- DUAILIBI FILHO, J.; CARVALHO, O. O. **Os números da vermelha**. Revista Mundo Cerâmico, São Paulo, n. 83, p. 34-38, set. 2002.
- DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. **Soil Strength and Slope Stability**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2006: ano base 2005**. Rio de Janeiro: EPE, 2006. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-BEN>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. **Geotechnical Engineering of Dams**. London: Taylor & Francis, 2005.
- FERNANDES, Diego da Rocha. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos: diretrizes jurídico-ambientais para a sustentabilidade**. 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Centro de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/21091>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- FERREIRA, C. et al. **Caracterização e comportamento geotécnico de cinzas têxteis em obras de terra**. Revista Brasileira de Geotecnia, v. 45, n. 2, p. 123-134, 2018.
- FERREIRA, S. R. M. et al. **Influência do cálcio e do ferro nas propriedades de solos lateríticos**. Geotecnia, n. 134, p. 45-58, 2015.
- FIROOZI, A. A. et al. **Fundamentals of soil stabilization**. International Journal of Geo-Engineering, nov. 2017.
- FONCECA, L. G. **Determinação da resistência residual em taludes e análise de depósitos sedimentares**. Revista Brasileira de Geotecnia, v. 25, n. 3, p. 123-134, 2006.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley & Sons, 1993.
- FUNK, James E.; DINGER, Dennis R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions: Applied to Ceramic Manufacturing**. Springer Science+Business Media, 1994.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 192 p.

GHOSH, A.; SUBBARAO, C. **Strength characteristics of class F fly ash modified with lime and gypsum.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 133, n. 7, p. 757-766, 2007.

GIMENES, J. **Análise de geração, recuperação e destinação de cinzas em caldeira – o caso de uma indústria.** Curitiba, 97 p., 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

GRUBBA, C. **Aplicação do ARC em pavimentos: propriedades mecânicas e desempenho.** Revista de Engenharia de Pavimentos, v. 11, n. 2, p. 45-52, 2009.

HANZAWA, H.; NUTT, N.; LUNNE, T.; TANG, Y. X.; LONG, M. **A comparative study between the NGI direct simple shear apparatus and the MIKASA direct Shear apparatus.** Soils and Foundations, v. 47, n. 1, p. 47–58, 2007.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D.; SHEAHAN, T. C. **An Introduction to Geotechnical Engineering.** 2. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.** Geneva, 2006.

KOLSCH, F.; ZIEHMANN, G. **Stability of landfills: Shear failure mechanisms and hazard assessment.** Waste Management & Research, v. 22, n. 5, p. 439-453, 2004.

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

LOPES, E. J. **Desenvolvimento de sistema de gaseificação via análise de emissões atmosféricas.** Curitiba, 146 p., 2014. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná.

LOPES, Maria Clara Viana; SILVA, Eliane de Lima. **A contribuição da engenharia de produção para a gestão de resíduos sólidos industriais: uma revisão bibliográfica.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 8, n. 3, p. 287-295, 2004. DOI: 10.1590/S0100-69162004000300001.

MARTINS, J. A. **Emissões atmosféricas na queima de resíduos têxteis: desafios e soluções.** Revista de Engenharia e Meio Ambiente, v. 15, n. 3, p. 45-56, 2020.

MATTOS, D. M. **Desenvolvimento de componentes para edificação: Blocos cerâmicos de vedação.** 1988. 182 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

MCGEARY, R. K. **Mechanical Packing of Spherical Particles.** Journal of the American Ceramic Society, v. 44, n. 10, p. 513-522, 1961.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior.** 3. ed. New York: Wiley, 2005.

NAIME, Renato. **Gestão de Resíduos Sólidos: Uma Abordagem Prática.** Novo Hamburgo: FEEVALE, 2005.

NOAMAN, A. **Efeito da adição de cinza volante na resistência ao cisalhamento de solos argilosos.** Revista Brasileira de Geotecnia, v. 25, n. 3, p. 123-135, 2023.

OLIVEIRA, J. T. et al. **Fósforo em solos: origem, dinâmica e aplicações.** Química Nova, v. 42, n. 5, p. 567-575, 2019.

OLIVEIRA, M. R. et al. **Modelo de empacotamento máximo de partículas com base na distribuição contínua.** Revista Brasileira de Engenharia, v. 22, n. 3, p. 56-64, 2000.

OLIVEIRA, R. F.; SILVA, M. T.; PEREIRA, L. C. **Potencial energético de resíduos têxteis: uma análise da queima em fornalhas.** Journal of Cleaner Production, v. 120, p. 175-184, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>. Acesso em: 20 out. 2024.

PANDIAN, N. S.; KRISHNA, K. C.; LEELAVATHAMMA, B. **Effect of Fly Ash on the Compaction and Strength Properties of Black Cotton Soil.** Journal of Testing and Evaluation, v. 30, n. 6, p. 484-489, 2002.

PEREIRA, A. C. et al. **Caracterização de cinzas de biomassa para uso em geotecnia.** Matéria, v. 21, n. 2, p. 1-12, 2016.

RANDOLPH, M. F.; WROTH, C. P. **Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles.** Géotechnique, v. 31, n. 1, p. 143-157, mar. 1981. DOI: 10.1680/geot.1981.31.1.143.

RODRIGUES, Nuno Gonçalo Loureiro. **Estudos sobre o ângulo de atrito em solos graníticos residuais.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2015. Disponível em: [https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/5018/1/4187\\_8009.pdf](https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/5018/1/4187_8009.pdf).

SALMASO. **Ensaio de cisalhamento direto em solo arenoso: influência da compacidade e do índice de vazios na resistência ao cisalhamento.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – 2017.

SANTANA, K. L. **Uso de resíduos têxteis como combustível: uma abordagem sustentável.** Anais do Congresso Brasileiro de Sustentabilidade, v. 8, p. 112-120, 2021.

SANTOS, R. A.; RODRIGUES, L. P. **Engenharia de solos: conceitos e aplicações práticas.** Rio de Janeiro: LTC, 2015.

SANTOS, R. D. et al. **Caracterização de solos tropicais para aplicações geotécnicas.** Revista Brasileira de Geotecnia, v. 38, n. 2, p. 123-135, 2018.

SENOL, A.; EDIL, T. B.; BIN-SHAFIQUE, M. S. **Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes.** Resources, Conservation and Recycling, v. 46, n. 4, p. 365-376, 2006.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; TALBOT, J. R. **Basic Properties of Sand and Gravel Filters.** Journal of Geotechnical Engineering, v. 110, n. 6, p. 684-700, 1984.

SILVA, F. de A.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. de M. R. **Aproveitamento de cinzas volantes em materiais de construção.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, São Paulo. Anais... São Paulo: IBRACON, 2005.

SILVA, M. L.; LANGE, L. C. **Caracterização das cinzas de incineração de resíduos sólidos urbanos e sua aplicação na construção civil.** Química Nova, v. 32, n. 8, p. 2037-2042, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/Z7x5YhQv3VNtTPkctXVRJNz/?format=pdf&lang=pt>.

SILVA, R. et al. **Avaliação da retenção de umidade e estabilidade de cinzas têxteis em misturas com solo.** Geotecnia e Meio Ambiente, v. 12, n. 3, p. 89-101, 2020.

SILVA, W. B. C.; BARROSO, S. H. A.; CABRAL, A. E. B. **Avaliação da aplicação de cinzas pesadas de termelétricas em blocos intertravados de concreto para pavimentos.** Matéria, v. 25, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0895>. Acesso em: 20 out. 2024.

SIVAPULLAIAH, P. V.; BAIG, M. A.; SANKAR, H. S. **Compressibility of fly ashes.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 126, n. 9, p. 804-811, 2000.

SOARES, L. F.; RODRIGUES, A. L. N.; SOARES, J. B.; BASTOS, J. B. dos **S. Incorporação de elevados percentuais de cinzas leves em substituição ao cimento para uso em intertravados.** In: 33º ANPET, nov. 2019, Balneário Camboriú. Anais do 33º ANPET – 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Santa Catarina, p. 1926-1937, 2019.

SOARES, R. M. **Resistência ao Cisalhamento de um Solo Coluvionar Não Saturado do Rio de Janeiro, RJ.** 2005. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SYMES, M. J. P. R.; GENS, A.; HIGHT, D. W. **Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand.** Géotechnique, v. 34, n. 1, p. 11-27, mar. 1984. DOI: 10.1680/geot.1984.34.1.11.

TERZAGHI, K. **Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage.** Leipzig und Wien: Verlag Franz Deuticke, 1925. 399 p.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil Mechanics in Engineering Practice.** Wiley, 1967.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice.** John Wiley & Sons, 1996.

TÜRKEL, S. **Strength properties of fly ash based controlled low strength materials.** Journal of Hazardous Materials, v. 147, p. 1015-1019, 2007. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.132.

VASCONCELLOS, Cláudia Barroso; LEAL, Cláudio Luiz Dias; FRANÇA, Marcelo Pereira; CASTRO, Protasio Ferreira e. **O Aproveitamento da Cinza de Caldeira na Construção Civil.** Revista Vértices, v. 6, n. 1, p. 131–148, 2010. DOI: 10.5935/1809-2667.20040007. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/1809-2667.20040007>. Acesso em: 23 out. 2024.

VIZCARRA, Gino. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos.** 2021. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Gino-Vizcarra/publication/387737618\\_Aplicabilidade\\_de\\_Cinzas\\_de\\_Residuo\\_Solido\\_Urbano\\_para\\_Base\\_de\\_Pavimentos/links/677a495ae74ca64e1f4d8683/Aplicabilidade-de-Cinzas-de-Residuo-Solido-Urbano-para-Base-de-Pavimentos.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Gino-Vizcarra/publication/387737618_Aplicabilidade_de_Cinzas_de_Residuo_Solido_Urbano_para_Base_de_Pavimentos/links/677a495ae74ca64e1f4d8683/Aplicabilidade-de-Cinzas-de-Residuo-Solido-Urbano-para-Base-de-Pavimentos.pdf). Acesso em: 9 fev. 2025.

WARPECHOWSKI DA SILVA, N. I.; CALARGE, L. M.; CHIES, F.; MALLMANN, J. E.; ZWONOK, O. **Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico.** Cerâmica, v. 45, n. 296, p. 259-266, 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/LL8VztCX84FRkTP6pKvVDZJ/?lang=pt>. Acesso em: 20 out. 2024.

ZHANG, Y.; JOHNSON, A. E.; SMITH, J. **Effects of Fly Ash on Soil Properties and Geotechnical Applications**. Journal of Geotechnical Engineering, v. 142, n. 3, p. 04015078, 2016.

ZIMAR, Z.; et al. **Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: a review**. Journal of Environmental Management, [S.L.], v. 312, p. 114926, jun. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114926>. Acesso em: 28 out. 2023.