



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FRANCISCA ANDREA DE SOUSA OLIVEIRA

**ANÁLISE DA COMPRESSIBILIDADE DE UM SOLO ESTABILIZADO
GRANULOMETRICAMENTE COM CINZAS TÊXTEIS**

RUSSAS
2025

FRANCISCA ANDREA DE SOUSA OLIVEIRA

ANÁLISE DA COMPRESSIBILIDADE DE UM SOLO ESTABILIZADO
GRANULOMETRICAMENTE COM CINZAS TÊXTEIS

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 de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. 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)

- S696a Sousa Oliveira, Francisca Andrea de.
Análise da Compressibilidade de um solo estabilizado granulometricamente com cinzas têxteis /
Francisca Andrea de Sousa Oliveira. – 2025.
65 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Ciência da Computação, Russas, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Daniela Lima Machado da Silva .
1. ensaio edométrico. 2. resíduos sólidos industriais. 3. estabilização de solos. 4. resíduos têxteis. 5. cinzas
têxteis. I. Título.

CDD 005

FRANCISCA ANDREA DE SOUSA OLIVEIRA

ANÁLISE DA COMPRESSIBILIDADE DE UM SOLO ESTABILIZADO
GRANULOMETRICAMENTE COM CINZAS TÊXTEIS

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 de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 21/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Daniela Lima Machado da Silva (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jerfson Moura Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Auciane Dyrrlen da Silva (Examinadora Externa)

A Deus.

Aos meus pais, irmãos, sobrinhos e Bernoulli.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo sustento durante toda essa trajetória.

À minha mãe, mulher simples e sem estudo que nunca mediu esforços para me proporcionar o melhor, inclusive através do incentivo ao estudo, dedico minha graduação assim como qualquer conquista.

Ao meu pai, Assis, por todo apoio e incentivo.

À cada um dos meus irmãos, Sandra, Glaucia, Analiene, Mirian, Marly e Thiago que sempre me apoiaram e fizeram o meu sonho se tornar possível, fazendo com que algumas vezes o fardo se tornasse mais leve.

Ao meu sobrinho e irmão de criação, Victor Hugo, por dividir comigo essa jornada desde o começo.

Aos meus sobrinhos, em especial à Larissa, Leticia e Laura que por muitos dias foram minha força para continuar e voltar para casa.

Ao meu fiel amigo, Bernoulli que também foi meu apoio e fonte de amor quando eu estava distante de toda minha família.

Ao meu amigo Ilie Gois que me acolheu em sua casa sem ao menos me conhecer e me apresentou a cidade de Russas.

Aos meus amigos Camila Barboza, Kliweer Oliveira, Renato Marciel, Pedro Targino e Gustavo Ilgner que estiveram comigo desde o começo, se tornando parte da minha família, partilhando os piores e os melhores momentos.

Aos amigos que adiquiri ao longo do curso e também se tornaram minha família, Elias Gomes, Matheus, Michael, João, Hyago e Vanessa Sand.

Aos técnicos de laboratório, Thiago Sena e Myckelle Ferreira. Em espical ao Thiago Sena, por todo acolhimento e cuidado, minha eterna gratidão.

Ao meu professor e amigo, Prof. Dr. Antônio Neves da Silva, pela amizade, parceria e acolhimento durante o período em que fui sua monitora e ao longo do curso.

Aos professores participantes da banca avaliadora, Dr. Jerfson Moura Lima, a Me Auciane Dyrrlen da Silva pela disponibilidade e colaborações.

Ao Sr. Liro, dono da Cerâmica do Liro, pela doação do resíduo têxtil, material utilizado no estudo.

“O homem não teria alcançado o possível se, repetidas vezes, não tivesse tentado o impossível.”

(Max Weber).

RESUMO

A estabilização granulométrica de solos granulares com cinzas provenientes de resíduos industriais é uma prática bastante comum, pois estes resíduos apresentam uma significativa quantidade de partículas finas, o que contribui para a redução do volume de vazios e deformabilidade. As cinzas provenientes da indústria têxtil, quando utilizadas na estabilização granulométrica de solos, terão uma destinação mais sustentável e segura para o meio ambiente. No entanto, apesar de ser vantajosa, a utilização das cinzas têxteis na estabilização de solos deve ser bem avaliada, em virtude da sua composição ser bastante complexa. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi analisar o efeito da adição de cinzas provenientes de resíduos têxteis na compressibilidade em um solo arenoso, visando analisar a viabilidade desse material como estabilizante granulométrico. Os materiais analisados nesta pesquisa foram um solo arenoso, cinza têxtil e a mistura solo-cinza. O solo estudado foi coletado em uma estrada vicinal, enquanto a cinza têxtil foi obtida em uma fábrica de cerâmica vermelha localizada no município de Russas-CE. As amostras foram encaminhadas à UFC – Campus Russas, onde foram submetidas à caracterização geotécnica, mecânica e química. Ademais, foi realizada a análise do comportamento mecânico da cinza têxtil, a partir dos ensaios de compactação, e a análise da compressibilidade por meio do ensaio de compressão edométrica. Para obtenção da mistura solo-cinza, buscou-se a otimização do arranjo das partículas, com a minimização do volume de vazios e, para isso, utilizou-se o modelo empacotamento de Andreasen. O ensaio edométrico foi realizado sob as cargas 6,25, 12,5, 25, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, com amostra deformada e compactada no ponto ótimo da curva de compactação considerando a energia de Proctor Normal. Na realização do ensaio ocorreu carregamento e descarregamento completo das amostras. Os resultados obtidos para o coeficiente de adensamento foram de $8,893 \times 10^{-7} m^2/s$ para o solo, de $8,774 \times 10^{-7} m^2/s$ para a cinza têxtil e $8,421 \times 10^{-7} m^2/s$ para a mistura, indicando que a adição de cinzas ao solo não irá aumentar drasticamente a velocidade no adensamento e que a cinza não altera significativamente o comportamento hidráulico e a deformabilidade do solo e, portanto, a cinza atua apenas como estabilizante granulométrico.

Palavras-chave: ensaio edométrico; resíduos sólidos industriais; estabilização de solos; resíduos têxteis; cinzas têxteis.

ABSTRACT

The granulometric stabilization of granular soils with ashes derived from industrial waste is a widely adopted practice, as these residues contain a significant amount of fine particles, contributing to the reduction of void volume and deformability. Textile industry ashes, when used for granulometric soil stabilization, provide a more sustainable and environmentally safe disposal alternative. However, despite its advantages, the use of textile ashes in soil stabilization must be carefully evaluated due to their complex composition. Thus, the objective of this study was to analyze the effect of adding ashes from textile waste on the compressibility of a sandy soil, aiming to assess the feasibility of this material as a granulometric stabilizer. The materials analyzed in this research included sandy soil, textile ash, and a soil-ash mixture. The soil sample was collected from a rural road, while the textile ash was obtained from a red ceramic factory located in the municipality of Russas, Ceará, Brazil. The samples were sent to UFC – Russas Campus, where they underwent geotechnical, mechanical, and chemical characterization. Additionally, an analysis of the mechanical behavior of textile ash was conducted through compaction tests, and compressibility analysis was performed using oedometer compression tests. To obtain the soil-ash mixture, the optimization of particle arrangement was sought by minimizing the void volume, using the Andreasen packing model. The oedometer test was conducted under loads of 6.25, 12.5, 25, 100, 200, 400, 800, and 1600 kPa, with deformed and compacted samples at the optimal point of the compaction curve, considering Normal Proctor energy. During the test, complete loading and unloading of the samples were carried out. The results obtained for the consolidation coefficient were $8,893 \times 10^{-7} m^2/s$ for the soil, $8,774 \times 10^{-7} m^2/s$ for the textile ash, and $8,421 \times 10^{-7} m^2/s$ for the mixture. These values indicate that the addition of ashes to the soil does not significantly increase the consolidation rate, nor does it substantially alter the soil's hydraulic behavior and deformability. Therefore, the ash acts primarily as a granulometric stabilizer.

Keywords: oedometer test; industrial solid waste; soil stabilization; textile waste; textile ashes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de solo saturado e compressível submetido a variação de tensões	28
Figura 2 - Fluxograma da pesquisa.....	31
Figura 3 - Programa experimental.....	31
Figura 4 - Aparelho de Casagrande na realização do ensaio de Limite de Liquidez.....	32
Figura 5 - Picnômetros utilizados no ensaio de densidade real.....	33
Figura 6 - Conjuntos de peneiras utilizado para o peneiramento grosso e fino.....	33
Figura 7 - Provetas utilizadas no processo de sedimentação das amostras	34
Figura 8 - Corpos de prova após o ensaio de compactação: a) Solo local; b) Cinza têxtil; c) Mistura solo-cinza têxtil	35
Figura 9 - Aparelhagem utilizada o para o ensaio de adensamento.....	38
Figura 10 - Aparelho de adensamento	38
Figura 11 - Amostras após o ensaio de adensamento	39
Figura 12 - Amostras de cinza têxtil, solo e mistura solo/cinza têxtil.....	39
Figura 13 - Curva de distribuição dos materiais e curva de Andreasen	40
Figura 14 - Curva de distribuição granulométrica otimizada.....	40
Figura 15 - Localização da estrada vicinal em Russas - CE.....	42
Figura 16 - Retida do solo da estrada vicinal	42
Figura 17 - Localização da fábrica de cerâmica do Liro, Russas-CE.....	43
Figura 18 - Armazenamento da cinza têxtil.....	43
Figura 19 - Curvas granulométricas das amostras.....	47
Figura 20 - Curva de Compactação - Solo local.....	50
Figura 21 - Curva de Compactação - Cinza têxtil	50
Figura 22 - Curva de Compactação - Mistura solo-cinza têxtil.....	50
Figura 23 - Curva de compressão do solo local	52
Figura 24 - Curva de compressão da cinza têxtil	52
Figura 25 - Curva de compressão da mistura solo local/cinza têxtil.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro resumo de normas utilizadas para caracterização geotécnica.....	40
Tabela 2 - Quadro resumo das normas utilizadas para caracterização mecânica	41
Tabela 3 - Resultados do ensaio de umidade higroscópica do solo local e da cinza têxtil.....	44
Tabela 4 - Resultados do ensaio de densidade real do solo local e da cinza têxtil	45
Tabela 5 - Composição granulométrica do solo natural	47
Tabela 6 - Composição granulométrica da cinza têxtil.....	47
Tabela 7 - FRX do solo local	48
Tabela 8 - FRX da cinza têxtil	48
Tabela 9 - Massa específica e Umidade ótima	50
Tabela 10 - Parâmetros obtidos no ensaio de adensamento edométrico.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

CO ²	Dióxido de carbono
SiO ₂	Dióxido de silício
Ca ²⁺	Íon cálcio
LCC	Laboratório de Construção Civil
LMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
LAMSP	Laboratório de Solos e Pavimentação
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
CaO	Óxido de cálcio
%	Porcentagem
Ph	Potencial hidrogeniônico
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Impactos ambientais do descarte de resíduos sólidos	17
2.2	Cinzas	17
2.3	Classificação das Cinzas	18
2.4	Aplicação da Cinza Volante na Estabilização de Solos	19
2.5	Cinza Têxtil	20
2.6	Mistura Solo-Cinza na Geotecnia	21
2.7	Estabilização dos Solos	21
2.8	Empacotamento de Partículas	23
2.8.1	Modelos de empacotamento de partículas	24
2.9	A compressibilidade dos solos: Fundamentos e Influências	26
2.9.1	Teoria de adensamento de Terzagui.....	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	Programa experimental	31
3.1.1	Caracterização geotécnica.....	32
3.1.2	Caracterização química	34
3.1.3	Caracterização mecânica.....	34
3.1.4	Determinação da mistura solo-cinza têxtil.....	39
3.2	Materiais	41
3.2.1	Solo Local	41
3.2.2	Cinza têxtil	42
4	RESULTADOS E DISCURSÕES	44
4.1	Caracterização Geotécnica	44
4.2	Caracterização química	48
4.3	Caracterização Mecânica	49
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
5.1	Conclusão	56
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

O descarte inadequado de resíduos sólidos é um problema ambiental crescente, afetando a qualidade do solo, da água e do ar, além de representar riscos à saúde pública e ao meio ambiente. A geração desses resíduos, especialmente no setor têxtil, tem aumentado consideravelmente, demandando soluções sustentáveis para mitigar seus impactos negativos (Santos *et al.*, 2010). Métodos convencionais, como a queima descontrolada e o descarte em aterros sanitários, além de gerarem poluentes, dificultam a gestão eficiente desses materiais, tornando essencial a busca por alternativas de reutilização (Defensoria Pública do Estado de São Paulo, 2021).

No Ceará, a indústria têxtil desempenha um papel fundamental na economia, contribuindo significativamente para a geração de empregos e para o Produto Interno Bruto (PIB). Segundo dados do Investe CE (2022), em 2019 o setor têxtil e de vestuário representava aproximadamente R\$ 550,4 milhões do PIB industrial do estado e gerava cerca de 12 mil empregos formais, colocando o Ceará entre os maiores empregadores do setor no Brasil. Ainda de acordo com Oliveira *et al.* (2022), esse setor representa aproximadamente 18% do trabalho industrial cearense, empregando milhares de trabalhadores direta e indiretamente. No entanto, sua expansão traz consigo desafios ambientais consideráveis, especialmente relacionados à geração de resíduos sólidos e efluentes tóxicos.

Além do grande consumo de água, o processo produtivo têxtil envolve o uso de diversos produtos químicos, que podem contaminar o solo e os recursos hídricos caso os efluentes sejam descartados de forma inadequada (Almeida *et al.*, 2020). Esse descarte inadequado dos resíduos agrava a poluição ambiental e sobrecarrega os aterros sanitários (Martins e Ferreira, 2019). Diante desse cenário, é essencial buscar soluções para reduzir esses impactos.

Uma alternativa promissora é o aproveitamento dos resíduos têxteis como fonte de energia na indústria cerâmica. Estudos indicam que esses materiais possuem alto poder calorífico e podem ser utilizados na geração de energia térmica ou elétrica por meio da combustão controlada, reduzindo o volume de resíduos destinados a aterros e gerando economia de energia para as indústrias (Santos *et al.*, 2021).

A indústria de cerâmica vermelha, responsável pela produção de tijolos, telhas e blocos, também enfrenta desafios relacionados à gestão de resíduos sólidos. Durante o processo produtivo, uma quantidade significativa de sobras de materiais é gerada. No entanto, essa indústria possui matéria-prima abundante, permitindo a incorporação de resíduos de outros setores e a reutilização de materiais ao final de sua vida útil (Grigoletti, 2001).

No município de Russas – CE, empresas de cerâmica vermelha têm observado que a incorporação de resíduos têxteis como combustível nos fornos cerâmicos não apenas auxilia na destinação desses materiais, mas também representa uma solução viável para reduzir custos energéticos e impactos ambientais. Com isso, parcerias entre o setor têxtil e a indústria cerâmica têm sido desenvolvidas, promovendo benefícios econômicos e ambientais.

Além do uso energético, a cinza resultante da combustão dos resíduos têxteis pode conferir propriedades cimentantes ao solo, influenciando positivamente sua resistência e deformabilidade (Mitchell e Soga, 2005). Sua incorporação em misturas de solo reduz a necessidade de materiais não renováveis e torna o processo construtivo mais sustentável (Mehta e Monteiro, 2014). No entanto, para garantir sua aplicação segura e eficaz, é essencial avaliar os efeitos da cinza têxtil sobre a compressibilidade do solo, considerando parâmetros estruturais que podem ser alterados por sua adição (França, 2003).

O estudo da compressibilidade do solo desempenha um papel importante na engenharia geotécnica, visto que esta propriedade está diretamente relacionada com a estabilidade e durabilidade de fundações, aterros e pavimentos. Terzaghi (1943) afirma que o entendimento desta propriedade é essencial para prever recalques e evitar falhas estruturais em projetos de infraestrutura. A análise desse comportamento ao longo do tempo permite determinar parâmetros de deformação sob cargas externas (Sartori, 2015).

Pesquisas indicam que a cinza têxtil pode melhorar a resistência do solo e reduzir sua compressibilidade devido ao efeito cimentante proporcionado pelo material (Santos *et al.*, 2010). No entanto, quando utilizada em grandes quantidades, pode aumentar a expansibilidade da mistura, tornando-a inadequada para certas aplicações na engenharia geotécnica. Por isso, o ensaio de adensamento edométrico é essencial para quantificar a variação volumétrica do solo sob diferentes cargas e identificar parâmetros como o índice de adensamento e o coeficiente de compressão, permitindo prever o comportamento mecânico da mistura e sua adequação a diferentes tipos de obras (Lambe; Whitman, 1969).

Dessa forma, a reutilização de resíduos sólidos se mostra uma alternativa eficiente tanto para a redução do volume descartado quanto para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos solos empregados em obras de infraestrutura (Mitchell; Soga, 2005). Entre os materiais estudados, a cinza têxtil, subproduto da combustão de resíduos têxteis, destaca-se como uma opção viável para aprimorar o comportamento mecânico dos solos. Segundo Pinto (2006), o uso desses resíduos na construção civil pode contribuir para a sustentabilidade do setor, reduzindo a dependência de recursos naturais não renováveis.

1.1 Objetivos

Neste tópico serão abordados os objetivos gerais e específicos estudados ao longo da pesquisa desenvolvida.

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o efeito da adição de cinzas provenientes de resíduos têxteis na compressibilidade de um solo arenoso, visando verificar a viabilidade desse material como estabilizante granulométrico.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização geotécnica (umidade higroscópica, limites de Atterberg, densidade real dos grãos, granulometria por sedimentação) e mecânica (compactação do solo e adensamento edométrico) do solo local, cinza têxtil e mistura solo local-cinza têxtil, de modo a verificar a influência da adição das cinzas nas propriedades físicas do solo;
- Determinar a composição química (espectrometria de fluorescência de raios – X) do solo local e da cinza têxtil;
- Obter uma mistura de solo-cinza têxtil otimizada, considerando o menor índice de vazios por meio do uso do modelo de empacotamento de Andreasen;
- Quantificar a compressibilidade da mistura solo-cinza por meio da realização de ensaio edométrico, visando obter uma maior compreensão do impacto da cinza têxtil na compressibilidade dos solos e sua viabilidade como material estabilizante.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico será abordado o referencial teórico ao qual esta pesquisa possui como embasamento.

2.1 Impactos ambientais do descarte de resíduos sólidos

O descarte inadequado de resíduos sólidos ocasiona inúmeros danos ambientais, como por exemplo, a contaminação do solo, da água e a emissão de gases poluentes. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) busca promover a gestão eficiente desses resíduos, incentivando a reciclagem e a destinação sustentável. Dessa forma, para mitigar esses impactos, a Resolução CONAMA nº 307/2002 propõe diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos sólidos na construção civil, sugerindo o reaproveitamento de materiais, como as cinzas têxteis, como uma alternativa sustentável, promovendo a reutilização, reciclagem e destinação ambientalmente adequada.

A indústria têxtil é uma das principais geradoras de resíduos sólidos industriais, destacando-se o lodo proveniente dos processos de tingimento e acabamento (Pereira *et al.*, 2021). A incineração desses resíduos produz cinzas com potencial poluidor, por conter metais pesados e corantes sintéticos (Wu *et al.*, 2023). No entanto, estudos mostram que a incorporação dessas cinzas em concretos pode melhorar propriedades como a trabalhabilidade e a durabilidade (Zhu *et al.*, 2023), além de reduzir a emissão de CO₂ associada à produção de cimento (Kasaw *et al.*, 2021; Gebeyehu *et al.*, 2025).

A reciclagem de resíduos sólidos é uma estratégia essencial para a sustentabilidade, pois reduz impactos ambientais e conserva recursos naturais. Contudo, o modelo de produção atual ainda gera grandes volumes de resíduos devido ao uso de matérias-primas não renováveis. Para enfrentar os desafios crescentes da gestão de resíduos, é fundamental buscar soluções sustentáveis e tecnologias viáveis que promovam uma gestão mais eficiente e minimizem os danos ambientais (John, 2000; Angulo; Zordan; John, 2001).

2.2 Cinzas

A descoberta da argamassa hidráulica pelos romanos por volta de 312 a.C., a partir da mistura de cinzas vulcânicas com cal viva, representou um grande avanço na engenharia da época. Esse material, que endurecia mesmo em ambientes úmidos, foi amplamente utilizado na

construção de aquedutos, como o Aqua Appia, além de monumentos icônicos como o Coliseu e o Panteão (English Heritage, 2021; Wilson, 2009). Com o passar dos séculos, o uso de cinzas em construções continuou a evoluir, principalmente com o crescimento das termelétricas movidas a carvão pulverizado, que geraram grandes quantidades de resíduos conhecidos como cinzas volantes (*fly ash*), levantando preocupações ambientais devido à presença de metais pesados e outros contaminantes (Environmental Protection Agency, 2019).

Durante o século XX, a utilização das cinzas volantes tornou-se uma solução viável para mitigar problemas ambientais e de infraestrutura, especialmente após a Segunda Guerra Mundial. Segundo Papadakis, Tsimas *et al.* (2022), nos Estados Unidos, entre as décadas de 1950 e 1960, regulamentações ambientais mais rígidas impulsionaram o aproveitamento dessas cinzas na construção civil. No Brasil, estudos de pesquisadores como Pinto (1971) e Nardi (1975) demonstraram o potencial das cinzas na estabilização de solos, favorecendo sua aplicação na pavimentação e infraestrutura rodoviária. A pesquisa de Almeida (2017) reforça essa tendência, analisando o uso das cinzas da termelétrica do Pecém para soluções sustentáveis.

As cinzas resultantes da queima de carvão possuem uma composição mineral alterada por processos químicos, conforme descrito por Rohde, Silva e Souza (2006). Elas podem ser aproveitadas para melhorar as propriedades do solo, especialmente em aplicações geotécnicas, com a adição de agentes cimentantes como cal ou cimento, conforme destacado por Ubaldo (2005). Dessa forma, a reutilização das cinzas na construção civil não só reduz impactos ambientais, como também promove alternativas econômicas e sustentáveis para o setor.

2.3 Classificação das Cinzas

As cinzas resultantes da queima ou gaseificação do carvão podem ser classificadas de acordo com sua origem, composição química e comportamento reacional. Segundo Thomas (2007), a cinza de fundo (*bottom ash*) é caracterizada por sua granulometria grossa e maior densidade, depositando-se no fundo das fornalhas durante a combustão de carvão pulverizado. Já a cinza volante (*fly ash*), composta por partículas extremamente finas, apresenta propriedades pozolânicas que a tornam adequada para uso em concreto e misturas cimentícias (Malhotra, 1990). Kihara (1983) ressalta que sua composição pode variar conforme o tipo de carvão e o processo de combustão. Além dessas, a cinza de biomassa, derivada da queima de resíduos orgânicos como casca de arroz e bagaço de cana, pode apresentar características cimentantes ou pozolânicas, conforme apontado por Goyal, Sharma e Singh (2007).

Com base na composição química, as cinzas são classificadas pelo teor de cálcio. De acordo com Mehta (1987), as cinzas com alto teor de cálcio são encontradas em carvões de baixo teor de enxofre e biomassa, apresentando alta reatividade e sendo amplamente utilizadas na estabilização de solos e misturas de concreto. Em contrapartida, as cinzas com baixo teor de cálcio, comuns em carvões betuminosos, possuem propriedades pozolânicas mais acentuadas, o que as torna eficientes como substituto parcial do cimento (Pandian, 2004).

Quanto ao comportamento reacional, Thomas (2007) descreve as cinzas pozolânicas como aquelas que reagem com hidróxido de cálcio na presença de água, formando compostos cimentantes. Já as cinzas cimentantes, segundo Chindaprasirt, Rukzon e Sata (2009), possuem a capacidade de se hidratar e endurecer por conta própria, sendo ricas em cálcio e derivadas de determinados tipos de carvão ou biomassa.

2.4 Aplicação da Cinza Volante na Estabilização de Solos

As cinzas volantes possuem propriedades cimentantes que permitem sua aplicação na estabilização de solos sem que haja necessidade de adicionar ativadores para o melhoramento das suas características mecânicas. Essa capacidade é útil em solos moles e é geralmente empregada em bases e sub-bases, pois os compostos cimentantes melhoram a coesão e a capacidade de suporte do solo (Bin-Shafique, 2005; Thomas, 2007).

Dessa forma, estudos destacam a eficácia da cinza volante na estabilização de diferentes tipos de solo. Lekha, Ramasamy e Rajasekaran (2015) observaram que a adição de cinza volante em solos de baixa resistência aumentou os valores do Índice de Suporte Califórnia (CBR). Mishra (2012) aponta que a cinza volante reduz a plasticidade de solos argilosos e os torna menos expansivos e mais adequados para utilização em obras de aterros e fundações. Ainda, Cristelo, Oliveira e Almeida (2013) demonstraram um aumento significativo na resistência à compressão não confinada, com ganhos progressivos ao longo do tempo de cura em misturas de solo-cinzas ativadas.

A cinza volante pode ser incorporada ao solo em proporções variáveis e isso depende das propriedades desejadas assim como as características do solo. Frequentemente métodos como a compactação com energia de Proctor normal ou modificada são utilizados para otimizar a densidade e a resistência das misturas. Além disso, a reatividade da cinza volante pode ser aumentada quando houver combinações com estabilizantes adicionais, como a cal ou cimento (Eberemu, 2013; Pandian, 2004).

2.5 Cinza Têxtil

De acordo com Bossel (1999), Santos e Fernandes (2012), cada etapa do processo produtivo da indústria têxtil, como a fiação, tecelagem, beneficiamento e confecção, é responsável pela geração de vários tipos de resíduos. Esses resíduos, se não geridos de forma adequada, provocam impactos ambientais severos, o que tem motivado o setor a adotar práticas de sustentabilidade, como a reutilização e reciclagem, visando prolongar o ciclo de vida dos produtos (Kant, 2012; Nogueira *et al.*, 2017).

Toniollo *et al.* (2015) explicam que os corantes utilizados no tingimento de tecidos, como o algodão, por exemplo, possuem elementos químicos em sua composição e que, ao serem descartados inadequadamente em corpos d'água, podem causar impactos significativos no ambiente. A alta solubilidade dos corantes dificulta sua remoção durante os processos de tratamento de água, o que intensifica ainda mais os impactos negativos. Além disso, os autores apontam que a presença desses compostos nos corpos hídricos pode interferir nos processos ecológicos, como a passagem de luz solar, comprometendo a fotossíntese.

A preocupação com os impactos ambientais gerados pela indústria têxtil motiva o desenvolvimento de diversos estudos voltados para o reaproveitamento de resíduos de tecidos em aplicações alternativas, como na construção civil. Yalcin-Enis *et al.* (2019) afirmam que esses resíduos, amplamente disponíveis, possuem características que os tornam úteis em uma variedade de aplicações. Entre elas, a produção de isolantes térmicos e acústicos, materiais de construção, reforço em compósitos, conversão em produtos químicos e outras atividades comerciais que aproveitam as propriedades dos resíduos.

Com relação à aplicação dos resíduos têxteis, Avelar (2012) afirma que o lodo biológico possui, geralmente em sua composição, altos teores de matéria orgânica, além de elementos químicos como nitrogênio e fósforo, micronutrientes, metais pesados e agentes patogênicos. A autora destaca ainda que o lodo pode ser empregado na agricultura, além de incinerado ou estabilizado. Quando estabilizado, o lodo pode ser utilizado para geração de energia em sistemas de combustão, reforçando a explicação feita por Bastian *et al.* (2009) que apontam o uso do lodo biológico têxtil como fonte de combustível em caldeiras de biomassa.

Diversas práticas podem ser abordadas na gestão de resíduos têxteis, como a recuperação energética, reciclagem, reutilização e redução. No entanto, uma parte significativa desses resíduos é descartada em aterros sanitários. Sotayo *et al.* (2015) apontam que a disposição de resíduos têxteis em aterros sanitários contribui para a emissão de gases de efeito estufa, como metano e dióxido de carbono, devido ao processo de decomposição.

2.6 Mistura Solo-Cinza na Geotecnia

A utilização de misturas solo-cinza tem se mostrado uma estratégia eficiente e sustentável na estabilização de solos aplicados na geotecnia. Os processos industriais em termelétricas, como a queima de carvão pulverizado, geram subprodutos, como as cinzas volantes. Por possuir uma composição rica em óxidos de cálcio (CaO), silício (SiO₂) e alumínio (Al₂O₃), essas cinzas apresentam propriedades pozolânicas que reagem com a água presente no solo e formam compostos cimentantes que melhoram as características mecânicas e químicas do solo tratado (Eberemu, 2013; Mishra, 2012).

Lekha, Ramasamy e Rajasekaran (2015) demonstraram que solos estabilizados com cinzas volantes apresentaram melhorias substanciais em parâmetros como limites de liquidez e plasticidade, densidade seca e resistência à compressão, além de apresentarem desempenho satisfatório em condições de cura variáveis. Esses resultados corroboram para a viabilidade da aplicação de misturas solo-cinza em sub-bases rodoviárias e aterros.

De acordo com Pandian (2003) e Krishna (2003), além dos benefícios técnicos, a utilização das cinzas na estabilização do solo promove a reutilização de resíduos industriais, minimizando os impactos causados pelo descarte incorreto. Ainda, Cristelo, Oliveira e Almeida (2013) destacaram em seu estudo a importância de parâmetros como a relação ativador/cinza e a concentração de hidróxido de sódio para a eficácia da estabilização. O estudo revelou que misturas com concentrações otimizadas de ativador alcançaram resistência à compressão de até 43,4MPa após períodos de cura de até um ano.

2.7 Estabilização dos Solos

Os solos naturais nem sempre possuem as características necessárias para desempenhar adequadamente as funções a que se destinam. Por isso, uma solução viável é intervir em sua composição, alterando suas propriedades para melhorar seu comportamento conforme as necessidades. Esse processo, conhecido como estabilização do solo, visa aprimorar suas propriedades de resistência e adequação para usos específicos (Brito; Paranhos, 2017).

A estabilização do solo pode ser definida como um processo, natural ou artificial, que modifica as características originais do solo, com o objetivo de aumentar sua resistência a deformações. Esse processo altera as interações entre as partículas sólidas e a água, além de redu-

zir os índices de vazios (Houben; Guillaud, 1994). O objetivo é melhorar propriedades essenciais do solo, como estabilidade, resistência, compressibilidade, permeabilidade e durabilidade, características de grande interesse para engenheiros (Rosales *et al.*, 2020).

Diversas alternativas para a estabilização de solos têm sido estudadas ao longo dos anos. Dentre elas, destacam-se as cinzas geradas em processos produtivos, como a cinza de casca de arroz (Silva, 2018; Constantino, 2018), cinza do bagaço de cana-de-açúcar (Lima *et al.*, 2022) e cinza de resíduos sólidos da saúde (Alencar, 2022).

Azevêdo (2010) classifica a estabilização do solo em três tipos principais: mecânica, granulométrica e química.

a) Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica é um dos métodos mais tradicionais e antigos já utilizados pela humanidade, sendo amplamente usada na construção civil, especialmente em estradas. Consiste na compactação simples do solo até que a estabilização granulométrica seja atingida para dessa forma reduzir a porosidade, aumentar a densidade e melhorar a resistência mecânica. Esse processo redistribui as partículas sólidas, diminui o índice de vazios e a permeabilidade, além de reduzir a deformabilidade do solo (Trindade *et al.*, 2008; Mogrovejo, 2013).

Além disso, correções granulométricas podem ser adicionadas a estabilização mecânica uma vez que envolvem a mistura de diferentes tipos de solos para obter uma composição bem mais graduada, homogênea e com menor conteúdo de partículas finas, aumentando a estabilidade e resistência do solo após a compactação (Villibor, 1982; Lima *et al.*, 1993).

b) Estabilização Física

A estabilização física, também chamada de estabilização granulométrica, é realizada visando modificar as propriedades do solo por meio do ajuste na distribuição das partículas. Essa técnica altera a proporção entre partículas finas, médias e grossas, otimizando as características mecânicas e hidráulicas do solo para atender objetivos específicos e melhorar seu desempenho (Pinto, 2008).

De acordo com Sartori (2015), a estabilização granulométrica consiste na alteração das propriedades dos solos através da adição ou retirada de partículas do solo, consistindo principalmente na adição de um material ou na mistura de dois ou mais materiais para que se enquadrem em uma faixa granulométrica que atenda às especificações previstas nas normativas técnicas.

A maneira mais simples e usual de correção granulométrica é a mistura do solo natural com outro solo também em condição natural que não satisfaz as exigências normativas, produzindo assim um novo material, mas com granulometria corrigida (Almeida *et al.*, 2010).

2.8 Empacotamento de Partículas

O empacotamento de partículas refere-se à maneira como partículas de diferentes tamanhos e formas se organizam para ocupar um volume. Dessa forma, segundo Powers (1968), a eficiência do empacotamento influencia diretamente na densidade do material e na quantidade de vazios ou poros presentes. Assim, as partículas de tamanho menor podem ocupar interstícios deixados pelo empacotamento das partículas maiores, elevando a densidade do sistema e tornando-o mais estável.

Nesse contexto, Funk e Dinger (1994) classificam os modelos de empacotamento de partículas como discretos ou contínuos. Nos modelos contínuos, assume-se que partículas de todos os tamanhos podem estar presentes no sistema de distribuição granular, logo, apresentarão distribuição granulométrica contínua. Já nos modelos discretos, as partículas são consideradas individualmente e possuem o mesmo tamanho (mono tamanho), fazendo com que o sistema não dependa do tamanho das partículas.

Para Mehta e Monteiro (2014), o empacotamento pode ser ordenado ou aleatório. O empacotamento ordenado ocorre quando as partículas se organizam em arranjos geométricos regulares, como cúbico ou hexagonal, enquanto o aleatório se caracteriza pela organização das partículas sem um padrão rígido. Esse tipo de organização pode afetar diretamente as propriedades do material, como a densidade e a resistência.

A forma das partículas também exerce grande influência no empacotamento. Santa-Marina *et al.* (2001) afirmam que partículas esféricas apresentam menor atrito interno e maior densidade de empacotamento em comparação com partículas angulares, que tendem a formar arranjos menos densos devido ao travamento mecânico.

Além disso, Powers (1968) ressalta que uma curva granulométrica balanceada, com partículas de vários tamanhos, favorece um empacotamento com maior densidade, visto que distribuições unimodais tendem a ser menos densas do que distribuições multimodais, nas quais os diferentes tamanhos de partículas se complementam para preencher os vazios.

Mogrovejo (2013) complementa essa ideia, destacando que o empacotamento de partículas pode ser significativamente melhorado com a aplicação de energia de compactação. Esse processo promove o rearranjo das partículas, reduz os vazios e aumenta a densidade do material.

O crescente interesse no estudo do empacotamento de partículas nos últimos anos pode ser explicado pelo fato de que muitos materiais naturais ou industriais utilizados diariamente contêm partículas de diferentes formas e tamanhos (Castro; Ferreira, 2016). Esse conhecimento tem aplicações práticas importantes em diversas áreas da engenharia. Mehta e Monteiro (2014), por exemplo, destacam em seus estudos sobre concreto que o empacotamento é fundamental para reduzir o volume de pasta de cimento necessária, otimizando custos e propriedades mecânicas. Além disso, a utilização de agregados bem graduados aumenta a resistência e diminui a porosidade do concreto.

2.8.1 Modelos de empacotamento de partículas

a) Modelo de Furnas:

Em 1930, Furnas iniciou estudos sobre o empacotamento de partículas, propondo que a densidade máxima é alcançada ao combinar partículas de diferentes tamanhos, inicialmente dois, e depois ampliando para três ou mais, o que resulta em um empacotamento ainda mais denso. Ele destacou que a densidade depende da quantidade e das dimensões das partículas. Sua teoria foi posteriormente expandida para incluir distribuições contínuas, superando o modelo discreto de partículas.

Furnas desenvolveu métodos para calcular o volume aparente de misturas e concluiu que o empacotamento máximo ocorre quando partículas menores preenchem os espaços entre as maiores, criando uma distribuição mais densa e uniforme. Durante seus estudos, ele verificou que a densidade máxima de empacotamento é alcançada por várias proporções de tamanhos de partículas, que seguem uma progressão aritmética. Com isso, expandiu sua teoria para incluir qualquer mistura polinomial, conforme a equação (1).

$$CPFT = \left(\frac{D_p^{\log r} - D_S^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_S^{\log r}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Onde CPFT é a porcentagem acumulada de partículas com diâmetro inferior a D_p , sendo D_p o diâmetro da partícula, D_L é o diâmetro da maior partícula, D_S é o diâmetro da menor partícula na distribuição e r é a razão entre os volumes das partículas em classes de tamanhos adjacentes.

b) Modelo de Andreasen:

Andreasen (1930) destacou que distribuições contínuas são comumente observadas na natureza, indicando que qualquer teoria voltada para descrever o empacotamento de partículas em sistemas reais deve ser fundamentada nesse tipo de distribuição.

Oliveira *et al.* (2000) afirmam que o modelo de empacotamento máximo idealizado por Andreasen se baseia no princípio de similaridade entre partículas de diferentes tamanhos. Essa similaridade é representada por uma lei de potência, desenvolvida como uma alternativa ao modelo formulado por Furnas. Dessa forma, tem-se a seguinte equação (2):

$$CPFT = \left(\frac{D_p}{D_L}\right)^q \cdot 100 \quad (2)$$

Onde, CPFT é a porcentagem acumulada de partículas com diâmetro inferior à D_p , sendo D_p o diâmetro da partícula, q uma constante determinada por módulo de distribuição granulométrica, e D_L o diâmetro da maior partícula na distribuição. Com base nos seus estudos experimentais, 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).

A representação gráfica da equação (2) em escala logarítmica é uma reta com inclinação (q). No entanto, foi identificada uma inconsistência na teoria de Andreasen, pois sua equação não estabelece um limite para o tamanho mínimo das partículas, permitindo que partículas de tamanho infinitamente pequeno sejam consideradas, o que não reflete a realidade. Embora a representação gráfica se aproxime desses tamanhos, ela nunca atinge partículas nulas ou um CPFT igual a zero (DINGER; FUNK, 1984). Para corrigir essa falha, Andreasen propôs a inclusão de um termo de correção para ajustar o percentual de porosidade, levando em conta a ausência dessas partículas infinitamente pequenas (Oliveira *et al.*, 2000).

c) Modelo de Alfred:

Uma análise comparativa entre os modelos de Furnas e Andreasen revela que ambos, ao incluir um limite mínimo para o tamanho das partículas, característica típica em distribuições reais, convergem para a mesma formulação matemática. A equação (3), representa uma evolução dos conceitos propostos por Andreasen e Furnas, demonstrando que, embora apresentem abordagens distintas, descrevem essencialmente o mesmo fenômeno de maneira equivalente (Funk; Dinger, 1984).

$$CPFT = \left(\frac{D_p^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Onde, CPFT é a porcentagem acumulada de partículas com diâmetro inferior a D_p , sendo D_p o diâmetro da partícula, q uma constante determinada por módulo de distribuição granulométrica, D_L o diâmetro da maior partícula e D_S o diâmetro da menor partícula. Por meio de simulação numérica, Castro e Pandolfelli (2009) demonstraram que o expoente (q) que otimiza a distribuição granulométrica para o empacotamento máximo de partículas esféricas assume valores inferiores a 0,37. Valores superiores a esse limite resultam em porosidade residual, evidenciando o impacto da proporção de partículas finas na densidade do material.

2.9 A compressibilidade dos solos: Fundamentos e Influências

O adensamento dos solos é um fenômeno geotécnico fundamental para a compreensão do comportamento mecânico de materiais naturais submetidos a carregamentos externos. Segundo Martins (2013), trata-se do processo de compressão gradual de um solo saturado ao longo do tempo, ocasionado pela expulsão da água contida nos vazios. Esse fenômeno ocorre devido à transferência da poro-pressão para a tensão efetiva, promovida pela aplicação de cargas externas. Nesse contexto, a compressão do solo pode ser definida como a relação entre a variação volumétrica do material e o estado de tensões efetivas sob condições de equilíbrio.

A compressão do solo possui três fases distintas: compressão inicial, compressão primária e compressão secundária. A compressão inicial ocorre imediatamente após a aplicação da carga inicial e está associada ao rearranjo das partículas do solo e à expulsão de ar presente nos vazios, sendo mais significativa em solos parcialmente saturados (Craig, 2004). A compressão primária, por sua vez, corresponde ao adensamento propriamente dito e é governada pela dissipação da poro-pressão, conforme a teoria de Terzaghi (1943). Já a compressão secundária ocorre após a dissipação completa da poro-pressão e está relacionada a reestruturação das partículas do solo, sendo relevante em solos orgânicos e argilosos de alta plasticidade (Mesri & Castro, 1987).

Na engenharia geotécnica, um dos aspectos mais críticos do estudo do adensamento é a determinação das deformações resultantes de carregamentos verticais, pois estas influenciam diretamente os recalques superficiais de fundações e aterros (Terzagui, 1943; Lambe; Whitman, 1969). Segundo Pinto (2006), o recalque de fundações superficiais, como sapatas e radiers, é

uma das principais preocupações em projetos de infraestrutura, uma vez que pode comprometer a estabilidade estrutural. Entre os fatores que influenciam os recalques está a compressibilidade do solo, ou seja, sua capacidade de sofrer deformações volumétricas sob ação de cargas externas (Mesri; Godlewski, 1977). A magnitude dessas deformações varia conforme a constituição e estrutura do solo, tornando-o mais ou menos suscetível a recalques ao longo do tempo.

A compressibilidade dos solos é avaliada por meio de parâmetros específicos obtidos em ensaios laboratoriais. Para Terzaghi (1943), um dos métodos mais eficazes para essa determinação é o ensaio edométrico, também conhecido como ensaio de adensamento confinado. Esse ensaio permite obter parâmetros fundamentais, como o índice de compressão (C_c), o índice de recompressão (C_r), o índice de expansão (C_s) e o coeficiente de adensamento (C_v). Segundo Menezes e Rodrigues (2010), solos de alta compressibilidade, como argilas moles, são particularmente suscetíveis a recalques diferenciais, o que pode comprometer a funcionalidade e a segurança de obras de infraestrutura.

A compressibilidade dos solos está diretamente relacionada às suas características físicas e estruturais. Fatores como a granulometria, plasticidade, composição mineralógica e grau de saturação exercem influência significativa sobre o comportamento mecânico desses materiais. Conforme Mitchell e Soga (2005), solos finos, como argilas, apresentam alta capacidade de retenção de água, tornando-se mais compressíveis devido ao rearranjo estrutural das partículas e sua elevada deformabilidade sob aplicação de carga. Em contrapartida, solos arenosos, devido à sua menor coesão entre partículas e maior permeabilidade, apresentam compressibilidade reduzida e uma resposta mais rápida às cargas aplicadas.

Além das características físicas, a interação entre as partículas sólidas e os fluidos presentes nos vazios do solo desempenha um papel fundamental no comportamento do adensamento. Segundo Lambe e Whitman (1969), a presença de água nos espaços porosos afeta diretamente a resistência ao cisalhamento e a magnitude das deformações induzidas por carregamentos externos. Em solos saturados, o adensamento ocorre de maneira gradual, pois o processo é governado pela drenagem lenta da água dos poros. Já em solos secos ou parcialmente saturados, as deformações ocorrem mais rapidamente, pois não há restrição à saída da água intersticial.

A teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi (1943) revolucionou a forma como o comportamento dos solos saturados é analisado na engenharia geotécnica. Essa teoria permite prever a evolução dos recalques ao longo do tempo e estimar a taxa de dissipação das pressões neutras, auxiliando no dimensionamento de fundações e estruturas de contenção.

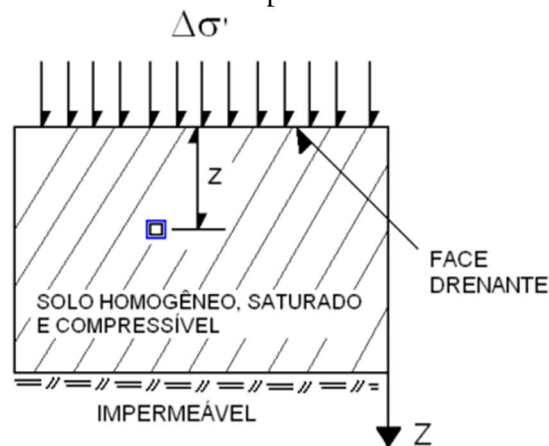
O ensaio edométrico, desenvolvido por Terzaghi, é amplamente utilizado para avaliar a taxa de adensamento dos solos ao longo do tempo. Sua metodologia é relativamente simples e

a condição de deformação estudada se assemelha àquela observada em campo, onde o solo confinado sofre compressão sem ruptura por cisalhamento. No entanto, o ensaio pode ser demorado, pois à medida que as deformações verticais ocorrem, a dissipação das pressões neutras segue um processo gradual, exigindo tempo para que o equilíbrio final seja atingido.

2.9.1 Teoria de adensamento de Terzagui

Terzaghi (1943) desenvolveu a Teoria do Adensamento Unidimensional, visando solucionar problemas relacionados à variação de volume e à evolução das pressões neutras em camadas de solo compressíveis. O principal objetivo dessa teoria é determinar, ao longo do tempo, a dissipação da pressão neutra em um elemento de solo submetido a um acréscimo de carga e, conseqüentemente, a variação volumétrica resultante. A figura 1 ilustra o sistema desenvolvido para aplicação da teoria proposta.

Figura 1 - Esquema de solo saturado e compressível submetido a variação de tensões



Fonte: adaptado da internet (2024)

Sendo assim, a formulação da teoria de adensamento de Terzagui baseia-se nos princípios da hidráulica aplicados à mecânica dos solos, com algumas adaptações para que a aplicabilidade do modelo seja garantida. Dessa forma, para um elemento de solo situado a uma profundidade z em uma camada homogênea, saturada e compressível, um acréscimo de tensão é aplicado na superfície. A partir desse carregamento, ocorre a dissipação progressiva da poropressão, levando à consolidação da camada ao longo do tempo.

Para a formulação da equação fundamental do adensamento, Terzagui estabeleceu algumas hipóteses que possibilitam a modelagem matemática simplificada do comportamento do

solo durante o adensamento, mesmo que em condições reais algumas delas sejam limitadas. Sendo elas:

- O solo está totalmente saturado;
- A compressão e o fluxo de água ocorrem em uma única direção (unidimensional);
- O solo é homogêneo ao longo da camada analisada;
- As partículas sólidas e a água são consideradas incompressíveis, em comparação com a compressibilidade global do solo;
- O solo pode ser estudado em elementos infinitesimais, apesar de sua composição granular;
- O fluxo de água nos poros segue a Lei de Darcy, sendo proporcional ao gradiente hidráulico;
- As propriedades do solo permanecem constantes durante o processo de adensamento;
- O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva.

A equação diferencial fundamental do adensamento unidimensional, formulada por Terzaghi, é expressa como:

$$C_v \times \frac{\partial^2 u}{\partial Z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$\frac{\partial^2 u}{\partial Z^2}$ = derivada parcial de segunda ordem da pressão neutra (u) em relação à profundidade do elemento de solo (z);

$\frac{\partial u}{\partial t}$ = derivada parcial da pressão neutra (u) em relação ao tempo de acréscimo de carga (t);

t = tempo de adensamento, ou tempo decorrido após o acréscimo de tensão no solo;

z = profundidade do elemento de solo;

u = pressão neutra atuante no elemento de solo, na profundidade z; e

C_v = coeficiente de adensamento do solo.

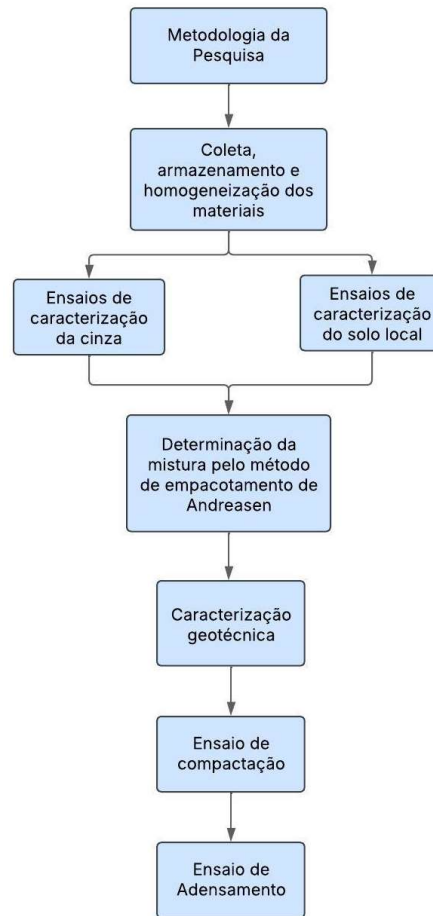
Dessa forma, os elementos envolvidos na equação fundamental de adensamento que podem ser medidos em laboratório são o coeficiente de adensamento do solo (C_v), coeficiente de deformação volumétrica (M_v), coeficiente de compressibilidade (a_v), coeficiente de permeabilidade (K), índice de vazios (e) e peso específico da água (ρ_w).

3 METODOLOGIA

A Figura 2 apresenta o fluxograma com as principais etapas metodológicas adotadas neste estudo, desde a coleta dos materiais até a realização dos ensaios experimentais. As amostras de solo e cinza têxtil foram inicialmente coletadas, armazenadas e homogeneizadas, garantindo condições adequadas para os procedimentos laboratoriais. Em seguida, foram conduzidos os ensaios de caracterização individual para cada um dos materiais, com destaque para a análise granulométrica, que serviu de base para a etapa seguinte. Com os dados granulométricos obtidos, foi aplicada a teoria de empacotamento de partículas utilizando o modelo de Andreasen, com o objetivo de determinar a proporção ideal da mistura solo-cinza. Após a definição da curva granulométrica ideal, realizou-se a preparação da mistura na proporção determinada. Essa mistura foi, então, submetida a ensaios geotécnicos de compactação e adensamento, permitindo a avaliação do comportamento mecânico da amostra composta, especialmente quanto à sua capacidade de resistir a cargas e deformações ao longo do tempo.

Os ensaios de caracterização geotécnica e compactação foram realizados nos Laboratórios de Construção Civil (LCC) e de Solos e Pavimentação (LAMSP), ambos localizados no Campus Russas da Universidade Federal do Ceará (UFC). A espectrometria de fluorescência de raio-X, aplicada às amostras de solo local e cinza têxtil, foi conduzida em parceria com o Laboratório de Caracterização de Materiais da UFC – Campus Russas. Já o ensaio de adensamento foi realizado em colaboração com o Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP), vinculado à UFC e situado no Campus do Pici, em Fortaleza.

Figura 2 - Fluxograma da pesquisa

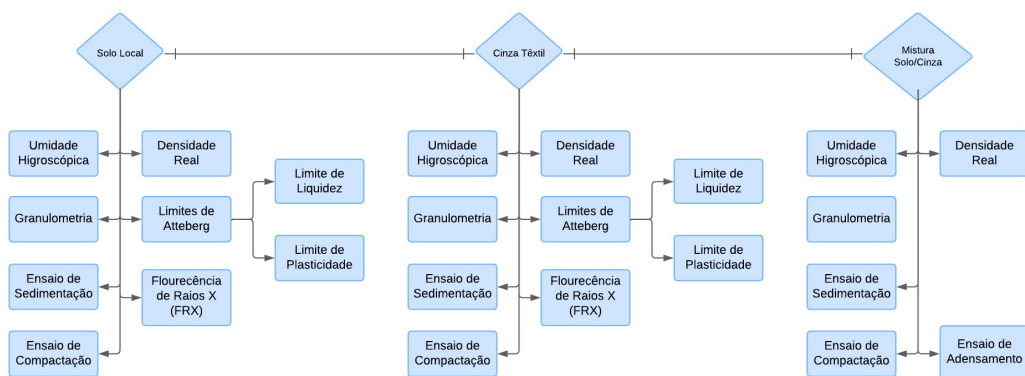


Fonte: autoria própria (2024)

3.1 Programa experimental

Este tópico tem como objetivo apresentar os ensaios de caracterização geotécnica, química e mecânica que foram realizadas com solo local, cinza têxtil e mistura solo-cinza têxtil. A Figura 3 apresenta o esquema da programação experimental dos ensaios realizados.

Figura 3 - Programa experimental



Fonte: autoria própria (2024)

3.1.1 Caracterização geotécnica

Durante a primeira etapa realizou-se a coleta, armazenamento e homogeneização dos materiais, solo local, e cinza têxtil para logo após seguir com os ensaios normatizados de caracterização geotécnica. Foi determinada a umidade higroscópica, os limites de liquidez e plasticidade, densidade real e a granulometria por peneiramento e sedimentação.

a) Umidade higroscópica

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 6457/2016 - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

b) Limites de Atteberg

Os ensaios de Limites de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), foram realizados seguindo o que preconiza a NBR 6459/2016 - Solo - Determinação do Limite de Liquidez, e NBR 7180/2016 - Solo - Determinação do Limite de Plasticidade. A figura 4 ilustra o aparelho utilizado para realização do ensaio de limite de liquidez.

Figura 4 - Aparelho de Casagrande na realização do ensaio de Limite de Liquidez



Fonte: autoria própria (2024)

c) Densidade real

A determinação da densidade real dos grãos dos materiais e da mistura segue as orientações da NBR 6458/2016 que estabelece o procedimento utilizando o picnômetro. A figura 5 ilustra o aparelho utilizado para realização do ensaio.

Figura 5 - Picnômetros utilizados no ensaio de densidade real



Fonte: autoria própria (2024)

d) Granulometria por peneiramento e sedimentação

Os ensaios de peneiramento grosso, fino e sedimentação foram realizados conforme a NBR 7181/2016. A figura 6 ilustra os conjuntos de peneiras utilizados para o peneiramento grosso e fino dos materiais e a figura 7 as provetas utilizadas para a sedimentação dos materiais.

Figura 6 - Conjuntos de peneiras utilizado para o peneiramento grosso e fino



Fonte: autoria própria (2024)

Figura 7 - Provetas utilizadas no processo de sedimentação das amostras



Fonte: autoria própria (2024)

3.1.2 Caracterização química

O ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) é uma técnica não destrutiva para identificar os elementos químicos do material. Realizado em parceria com o Laboratório de Caracterização dos Materiais da UFC de Russas, o teste utilizou amostras de solo local e cinza têxtil, previamente peneiradas em malha de 0,075 mm e armazenadas em *eppendorfs*. O equipamento empregado foi o ZSX Mini II da Rigaku.

3.1.3 Caracterização mecânica

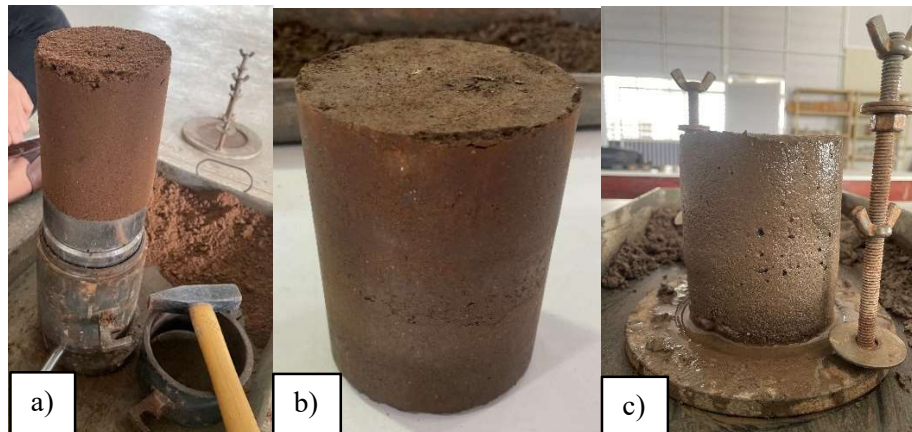
A caracterização mecânica dos materiais foi realizada por meio de ensaios de compactação e adensamento edométrico nas amostras de solo local, cinza têxtil e na mistura solo-cinza têxtil. A seguir, são apresentados os detalhes desses ensaios.

a) Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação foi realizado conforme a NBR 7182/2016, que estabelece os parâmetros para sua execução, e com a NBR 6457/2024 que trata da preparação de amostras para o ensaio. O objetivo foi determinar a umidade ótima e a densidade máxima dos materiais e da mistura. Para a obtenção da curva de compactação, o ensaio foi repetido cinco vezes para cada amostra.

Os ensaios foram realizados com o solo local, a cinza têxtil e a mistura solo local/cinza têxtil nas dependências do Laboratório de Construção Civil (LCC) localizado no Campus Russas da Universidade Federal do Ceará (UFC). A figura 8 ilustra os corpos de prova das amostras dos materiais após a retirada do molde.

Figura 8 - Corpos de prova após o ensaio de compactação: a) Solo local; b) Cinza têxtil; c) Mistura solo-cinza têxtil



Fonte: autoria própria (2024)

b) Ensaio de Adensamento

O ensaio de adensamento é um procedimento que determina a taxa de adensamento do material, fornecendo informações sobre sua deformação volumétrica quando submetido a variações de cargas. Sua execução é estabelecida pela NBR 16853/2022. As amostras do solo local, cinza têxtil e mistura solo/cinza têxtil foram preparadas no Laboratório de Construção Civil (LCC), sendo posteriormente armazenadas e transportadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP), localizado no Campus Fortaleza da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde o ensaio foi realizado.

Para o início do ensaio, realizou-se a separação e o ajuste de toda a aparelhagem necessária, incluindo o nivelamento da prensa de adensamento, preparação das amostras, separação do anel de adensamento e pedra porosa, cabeçote, balança, extensômetro para medição dos deslocamentos, cronômetro e pesos para aplicação das cargas.

Para a preparação dos corpos de prova, inicialmente foram realizadas medições da massa, do diâmetro interno e da altura do anel de adensamento. Os materiais e a mistura solo-cinza têxtil foram cuidadosamente preparados e inseridos no anel, individualmente, evitando qualquer perda durante o processo de moldagem. Após a inserção, o conjunto foi pesado novamente para obter a massa total da amostra e do anel.

Com o corpo de prova devidamente preparado, procedeu-se à montagem do conjunto na prensa de adensamento. O anel contendo o material foi posicionado de forma ajustada na prensa, garantindo o alinhamento correto para a aplicação das cargas. As cargas foram aplicadas de maneira progressiva, sendo elas: 6,25, 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600Kpa com estágios de tempo bem definidos (6s, 15s, 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 45min, 60min, 120min, 180min, 240min e 1440min). Dessa forma, cada estágio permitiu que as deformações verticais do material fossem registradas por meio do extensômetro.

Após a conclusão de todos os estágios de carregamento, iniciou-se a etapa de descarregamento, realizada de forma análoga ao carregamento. As cargas foram removidas gradativamente, também em estágios, e dessa forma foi possível verificar as deformações elásticas do corpo de prova. O ensaio forneceu dados essenciais para a análise da compressibilidade e do comportamento dos materiais e da mistura solo/cinza têxtil sob condições de carga incremental e posterior alívio. A partir dos dados obtidos, é possível avaliar o comportamento mecânico das amostras quando submetidas a carga unidimensional.

Através da realização do ensaio de adensamento edométrico foi possível determinar os parâmetros de compressibilidade do material a partir da curva de compressão obtida pela relação entre os índices de vazios e o logarítmico da tensão efetiva aplicada. Esses parâmetros foram: coeficiente de adensamento (C_v), o coeficiente de compressibilidade (a_v), índice de compressão (C_c), e índice de expansão (C_s) para as amostras do solo local, cinza têxtil e mistura solo-cinza têxtil. A seguir, tem-se as equações que foram utilizadas para a determinação dos parâmetros de acordo com a curva gerada pelo ensaio.

- Índice de compressão (C_c):

O índice de compressão representa a inclinação da curva de compressão na região normalmente adensada do gráfico e é determinado pela equação (5):

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log \left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_i} \right)} \quad (5)$$

Onde:

C_c = Índice de compressão;

Δe = Variação do índice de vazios;

σ'_f = Tensão efetiva final (kPa ou kN/m²);

σ'_i = Tensão efetiva inicial (kPa ou kN/m²).

- Índice de expansão (C_s):

O índice de expansão mede a variação do índice de vazios durante a descarga do ensaio, ou seja, quando a tensão aplicada é retirada gradativamente. Ele é calculado pela equação (6):

$$C_s = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_i}\right)}$$

Equação (6)

Onde:

C_s = Índice de expansão;

Δe = Variação do índice de vazios;

σ'_f = Tensão efetiva final (kPa ou kN/m²);

σ'_i = Tensão efetiva inicial (kPa ou kN/m²).

- Coeficiente de compressibilidade (a_v):

O coeficiente de compressibilidade indica a variação volumétrica do solo em função da tensão aplicada, sendo calculado pela equação (7):

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'}$$

Equação (7)

Onde:

a_v = Coeficiente de compressibilidade (m²/kN ou cm²/kgf);

Δe = Variação do índice de vazios;

$\Delta \sigma'$ = Variação da tensão efetiva vertical (kPa ou kN/m²).

- Coeficiente de adensamento (C_v):

O coeficiente de adensamento mede a velocidade com que ocorre o adensamento primário do material e foi calculado através do método de Taylor. Sendo determinado pela equação (8):

$$C_v = \frac{T_v \cdot H_d^2}{t_{90}}$$

Equação (8)

Onde:

t_{90} = tempo correspondente a 90% do adensamento primário;

$T_v = 0,848$;

H_d = altura drenada da amostra do material.

As figuras 9, 10, 11 e 12 ilustram respectivamente a preparação dos materiais para a realização do ensaio de adensamento, a prensa de adensamento nivelada e as amostras dos materiais após a realização do ensaio e retirada do anel de corpo de prova.

Figura 9 - Aparelhagem utilizada o para o ensaio de adensamento



Fonte: autoria própria (2024)

Figura 10 - Aparelho de adensamento



Fonte: autoria própria (2024)

Figura 11 - Amostras após o ensaio de adensamento



Fonte: autoria própria (2024)

Figura 12 - Amostras de cinza têxtil, solo e mistura solo/cinza têxtil



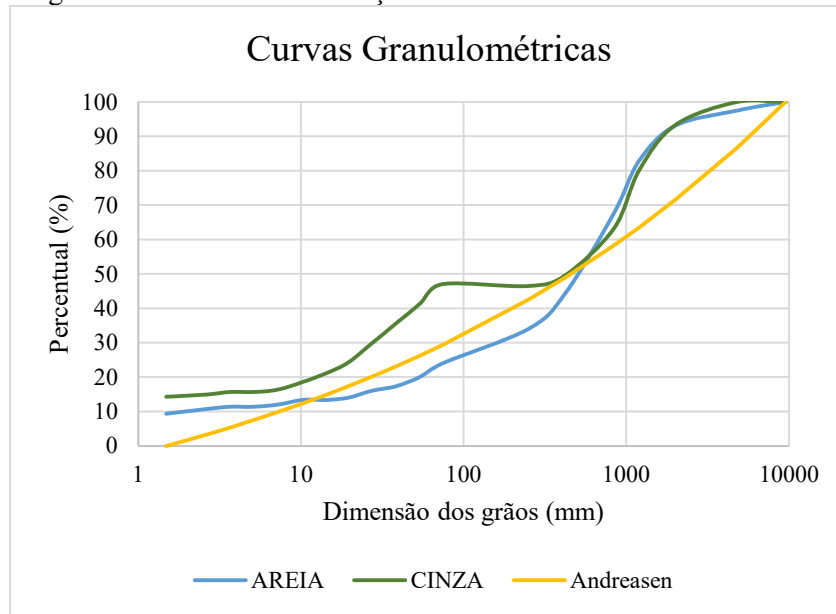
Fonte: autoria própria (2024)

3.1.4 Determinação da mistura solo-cinza têxtil

A partir da caracterização das amostras e determinação das respectivas curvas granulométricas foi possível determinar o melhor coeficiente de empacotamento de partículas utilizando o modelo de Andreasen.

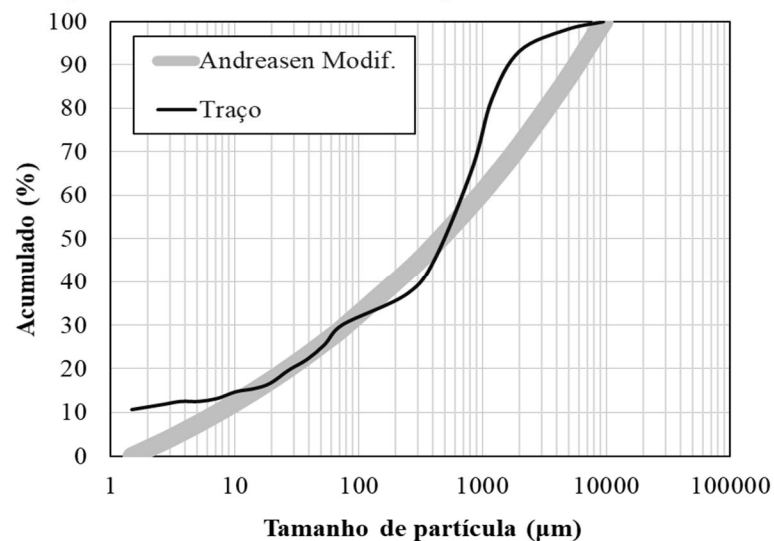
A modelagem da mistura solo local-cinza têxtil foi realizada utilizando o modelo de empacotamento de Andreasen por meio da função Solver no *Microsoft Excel* que resultou na curva teórica apresentada na figura 13, enquanto a distribuição granulométrica é apresentada na figura 14. O objetivo foi minimizar os resíduos dos dados inseridos em relação à fórmula do modelo, otimizando-os para obter um resíduo mínimo e, assim, definir com precisão a curva da mistura. O coeficiente de correlação máximo obtido foi $R^2=0,92$, indicando uma boa homogeneidade entre os materiais. Além disso, o coeficiente de distribuição foi $q=0,15$, valor abaixo da faixa de empacotamento estabelecida por Andreasen. Com base nesses resultados, a proporção final da mistura foi definida como 76% de solo natural e 16% de cinza têxtil.

Figura 13 - Curva de distribuição dos materiais e curva de Andreasen



Fonte: autoria própria (2024)

Figura 14 - Curva de distribuição granulométrica otimizada



Fonte: autoria própria (2024)

Os Quadros 1 e 2 apresentam um resumo das normas que foram utilizadas para a execução de cada ensaio abordado no presente estudo.

Tabela 1 - Quadro resumo de normas utilizadas para caracterização geotécnica

Ensaio	Norma
Preparação de amostras	NBR 6457/2016
Umidade higroscópica	NBR 6457/2016
Densidade real	NBR 6458/2016
Análise granulométrica	NBR 7181/2016
Limite de liquidez	NBR 6459/2016

Limite de Plasticidade	NBR 7180/2016
Composição química	Fluorescência de raios -X
Massa específica real	NBR NM 23/1998

Fonte: autoria própria (2024)

Tabela 2 - Quadro resumo das normas utilizadas para caracterização mecânica

Ensaio	Norma
Ensaio de Adensamento	NBR 16853/2022
Ensaio de Compactação	NBR 7182/2016

Fonte: autoria própria (2024)

3.2 Materiais

Os materiais empregados na realização dos experimentos desta pesquisa estão detalhados nos itens a seguir.

3.2.1 Solo Local

O solo utilizado neste estudo foi coletado em uma estrada vicinal próxima ao campus da Universidade Federal do Ceará, no município de Russas-CE. A escolha desse material baseou-se no trabalho de Diógenes (2023), que identificou uma redução na capacidade de suporte de misturas desse solo com cinza têxtil. A coleta foi realizada manualmente de acordo com a NBR 6457:2021, precedida de uma limpeza superficial do local, sem a necessidade de escavação profunda, garantindo a obtenção de uma amostra homogênea e deformada. O transporte do material ocorreu de forma segura, utilizando baldes fornecidos pelo Laboratório de Construção Civil (LCC), onde foi posteriormente armazenado.

A Figura 15 e 16 ilustram respectivamente a localização da estrada vicinal onde a amostra de solo foi coletada, com coordenadas geográficas 4°57'02"S 37°58'34"W e a maneira como foi extraído.

Figura 15 - Localização da estrada vicinal em Russas - CE



Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2024)

Figura 16 - Retida do solo da estrada vicinal



Fonte: autoria própria (2024)

3.2.2 Cinza têxtil

A cinza têxtil utilizada foi doada pela Fábrica de Cerâmica do Liro, localizada em Russas-CE, distante a aproximadamente 9 km do campus da UFC em Russas. Esse material é obtido a partir da queima de tecido de redes em fornos cerâmicos. O resíduo sólido têxtil necessário para a produção da cinza foi doado por uma fábrica têxtil situada em Jaguaruana-CE, a cerca de 29 km de Russas. A coleta das cinzas para o experimento foi realizada nas dependências da fábrica do Liro pelos funcionários do local, sendo posteriormente transportadas em sacos de nylon e armazenadas no Laboratório de Construção Civil (LCC) de Russas. A Figura 17 exhibe a localização dessa fábrica, com coordenadas geográficas $4^{\circ}58'12.77''S$ e $37^{\circ}56'25.85''O$ e a figura 18 mostra a maneira como a cinza foi armazenada.

Figura 17 - Localização da fábrica de cerâmica do Liro, Russas-CE



Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2024)

Figura 18 - Armazenamento da cinza têxtil



Fonte: autoria própria (2024)

4 RESULTADOS E DISCURSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos e a análise correspondente aos ensaios realizados conforme as atividades de pesquisa propostas na metodologia. Os ensaios foram conduzidos conforme as normas técnicas resumidas nos quadros 1 e 2.

4.1 Caracterização Geotécnica

Os ensaios para caracterização geotécnica foram realizados com as amostras de solo local, cinza têxtil e para a mistura solo local-cinza têxtil.

a) Umidade higroscópica

A umidade higroscópica referente ao solo, cinza têxtil e mistura solo-cinza têxtil são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de umidade higroscópica do solo local e da cinza têxtil

Umidade higroscópica das amostras (%)	
Solo Local	0,37
Cinza têxtil	3,59
Mistura solo/cinza têxtil	0,65

Fonte: autoria própria (2024)

Percebe-se que o solo estudado possui baixo teor de umidade, característica típica de solos arenosos. Por outro lado, a cinza têxtil tem comportamento diferente, retendo mais umidade quando comparada ao solo, possivelmente por possuir uma superfície específica significativa ou microporosidade. Observa-se ainda que a adição de cinza têxtil ao solo resultou em um aumento modesto da incidência de umidade com relação a umidade do solo local.

Gomes *et al.* (2019) verificaram que a cinza de casca de arroz, ao ser misturada ao solo, contribuiu para um leve aumento na umidade, sem comprometer sua drenabilidade. Além disso, Rodrigues *et al.* (2021) apontaram que a adição de cinza volante em solos arenosos pode melhorar seu comportamento mecânico sem deixá-los suscetíveis ao colapso quando saturados. Dessa forma, os resultados obtidos estão em consonância com as análises feitas na literatura.

b) Limites de Atteberg

A ausência de plasticidade observada nos ensaios de limites de consistência do solo indica que ele é não plástico, ou seja, não apresenta índice de plasticidade. Esse comportamento está diretamente relacionado à granulometria e à composição mineralógica do solo. De acordo com Sousa Pinto (2000), solos com baixo teor de argila ou com predominância de partículas arenosas tendem a apresentar baixa ou nenhuma plasticidade. Deb (2014) ainda afirma que a adição de cinza volante ao solo reduz os limites de consistência, uma vez que esse material possui partículas pequenas e sem coesão. Sendo assim, os resultados se mostram coerentes em comparação aos estudos apresentados

c) Densidade real dos grãos

Os resultados obtidos através do ensaio de densidade real dos grãos estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de densidade real do solo local e da cinza têxtil

Densidade real dos grãos (kg/m³)	
Solo Local	2370
Cinza têxtil	2260
Mistura solo/cinza têxtil	2700

Fonte: autoria própria (2024)

De acordo com Mitchell (2005), a densidade real típica de solos minerais varia entre 2600 e 2800 kg/m³, especialmente quando há predominância de quartzo e minerais pesados. No entanto, a densidade do solo local, que foi de 2370 kg/m³, sugerindo a presença de minerais mais leves, partículas arenosas e possível material orgânico. Já segundo Mehta e Monteiro (2014), a densidade das cinzas normalmente varia entre 2000 e 2500 kg/m³. Como a cinza têxtil apresentou uma densidade de 2260 kg/m³, observa-se que ela se encontra dentro da faixa esperada para resíduos industriais. Além disso, a adição da cinza têxtil aumentou significativamente a densidade do solo, o que pode impactar suas características físicas e mecânicas.

Os resultados obtidos neste estudo também podem ser comparados aos de Diógenes (2023). A densidade real do solo local aqui analisado foi aproximadamente 7,4% menor do que no estudo anterior, possivelmente devido a diferenças na composição mineralógica ou no grau de compactação dos solos. Além disso, a densidade real da cinza têxtil foi 17,2% menor neste

estudo, o que pode estar relacionado à sua origem, ao processo de obtenção ou ao teor de impurezas. Já a densidade da mistura solo-cinza têxtil apresentou um valor intermediário em relação às amostras analisadas por Diógenes (2023), que variaram entre 2640 kg/m³ e 2820 kg/m³. A proximidade entre os valores sugere similaridades na composição da mistura, enquanto o aumento da densidade na combinação dos materiais, em comparação com os componentes individuais, pode indicar um melhor empacotamento dos grãos.

d) Granulometria por peneiramento e sedimentação

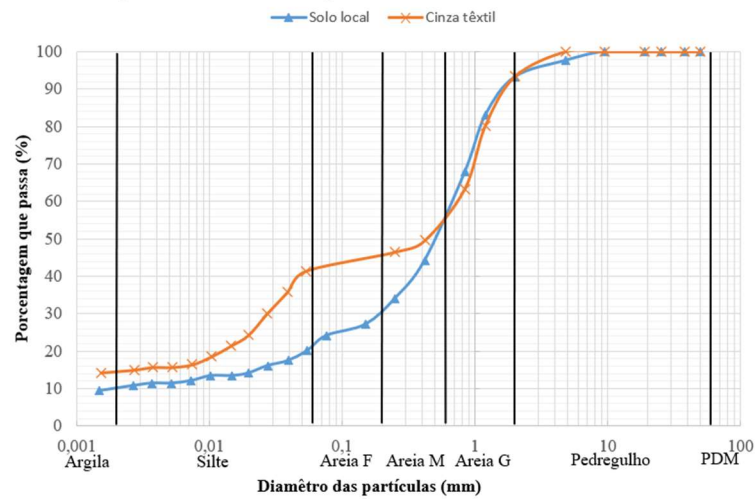
Com base na análise granulométrica, o solo é classificado como Areia Siltosa (SM) segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), devido à presença de 20,48% de finos e à ausência de plasticidade. Holtz e Kovacs (2011) afirmam que solos arenosos com fração siltosa significativa tendem a ser mais compressíveis que areias puras, especialmente quando não há presença de argila para fornecer coesão. Dessa forma, a granulometria do solo observada, com 97,57% do material passante na peneira de 4,75 mm, reforça que o solo é predominantemente arenoso, mas com quantidade suficiente de finos para alterar seu comportamento mecânico.

No caso da cinza têxtil, a análise da distribuição granulométrica da mostra que 58,61% do material passa na peneira #200 (0,074 mm), o que indica que mais da metade do solo é composto por finos. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de solos, quando um solo tem mais de 50% de fração fina, ele é classificado como um solo coesivo. Nesse caso como a cinza têxtil apresenta fração arenosa, ela é caracterizada como areia siltosa, devido à presença predominante de finos. Ainda, a descontinuidade na sua curva granulométrica indica uma distribuição irregular dos tamanhos de partículas, que pode impactar sua compactação, resistência e comportamento mecânico. Esse fenômeno pode ser resultado do processo de queima, que resulta na segregação de partículas e composição mineralógica.

Além disso, a falta de plasticidade da cinza têxtil tem um impacto significativo na compressibilidade do material, especialmente quando misturado com solo arenoso. Holtz e Kovacs (2011) observam que solos não plásticos, como a cinza têxtil, não apresentam coesão entre as partículas, o que aumenta sua sensibilidade à umidade e dificulta sua compactação, resultando em uma compressibilidade elevada.

A composição granulométrica do solo local e da cinza têxtil estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6, e as curvas granulométricas encontram-se dispostas na figura 19.

Figura 19 - Curvas granulométricas das amostras



Fonte: autoria própria (2024)

Tabela 5 - Composição granulométrica do solo natural

abertura da peneira (mm)	acumulada(%)	passante (%)
38	0	100,00
25,4	0	100,00
19,1	0	100,00
9,5	0	100,00
4,8	2,43	97,57
2	6,79	93,21
1,2	16,97	83,03
0,84	32,12	67,88
0,42	55,54	44,46
0,25	65,76	34,24
0,15	72,64	27,36
0,074	79,52	20,48

Fonte: autoria própria (2024)

Tabela 6 - Composição granulométrica da cinza têxtil

abertura da peneira (mm)	acumulada(%)	passante (%)
38	0	100,00
25,4	0	100,00
19,1	0	100,00
9,5	0	100,00
4,8	0,00	100,00
2	6,64	93,36
1,2	19,74	80,26
0,84	36,68	63,32
0,42	50,42	49,58

0,25	53,52	46,48
0,15	52,90	47,10
0,074	58,61	41,39

Fonte: autoria própria (2024)

4.2 Caracterização química

Por meio do ensaio de espectrometria de Fluorescência de Raio-X para o solo local e a cinza têxtil, obteve-se os resultados dispostos na Tabela 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7 - FRX do solo local

Material	% em massa
Si	46,7
Ca	15,1
Fe	13,0
K	10,9
Al	8,9
P	2,5
Outros	3

Fonte: autoria própria (2024)

Tabela 8 - FRX da cinza têxtil

Material	% em massa
Ca	55,0
Si	14,8
K	11,9
Fe	8,2
Al	3,0
P	2,3
Outros	5

Fonte: autoria própria (2024)

É percebido que o solo possui alto teor de sílica (46,7%) e quantidades significativas de cálcio (15,1%), ferro (13%) e potássio (10,9%) indicando uma predominância de minerais como o quartzo, típico em solos arenosos. A elevada quantidade de sílica indica que o solo possui

uma compressibilidade baixa. Além disso, a presença de ferro e alumínio podem reduzir a permeabilidade do solo, tornando o processo de adensamento mais lento. O potássio por sua vez, influencia na resistência mecânica do solo, visto que reduz a dispersão das partículas e melhora sua estabilidade. Ainda, de acordo com Rezende (1995), o alto teor de sílica afeta diretamente as propriedades mecânicas do solo, como a textura e a capacidade de reter água.

Além disso, os resultados obtidos para a cinza têxtil revelam que na sua composição química há predominância de cálcio (55%) que sugere a presença de óxidos e hidróxidos de cálcio que influenciam na reatividade do material. Ainda há predominantemente presente na composição química da cinza têxtil, sílica (14,8%) e potássio (11,9%) e os demais materiais somam cerca de 18,5%. Segundo Horrocks (2000), a presença de cálcio na cinza pode ser derivada de corantes utilizados como fixadores na indústria têxtil.

A análise de Fluorescência de Raios X (FRX) da cinza revela que ela possui uma composição química distinta quando comparada com outros elementos industriais. Diógenes (2023), apresentou em seu trabalho uma cinza têxtil com altos teores de cálcio (60,49%), magnésio (12,77%) e silício (10,8%). Em contrapartida, Irigon (2021), aponta que as cinzas pesadas advindas de termoelétricas de carvão mineral apresentam em sua composição uma predominância de sílica, alumina, óxido de ferro. Dessa forma, a caracterização química da cinza têxtil mostra que o elevado teor de cálcio pode influenciar nas suas propriedades pozolânicas, tornando-a aplicável em matrizes cimentícias.

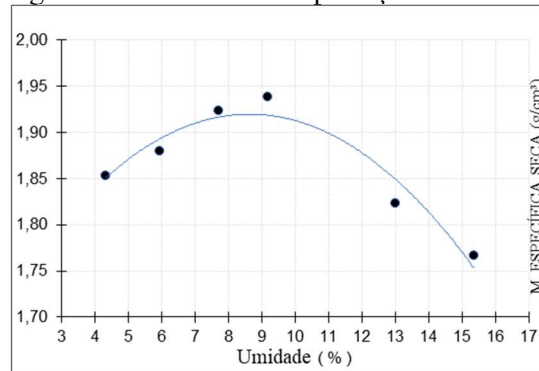
4.3 Caracterização Mecânica

Os ensaios para caracterização geotécnica foram realizados com as amostras de solo natural, cinza têxtil e a mistura solo-cinza têxtil.

a) Definição da Massa Específica e Umidade Ótima

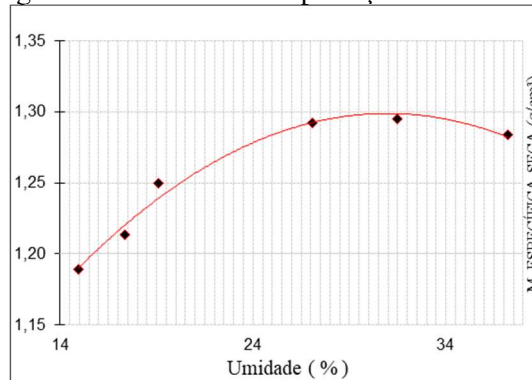
A partir do ensaio de compactação com energia de Proctor normal foram geradas as curvas de compactação para as amostras de solo local, cinza têxtil e mistura solo-cinza têxtil, ambas estão dispostas respectivamente nas figuras 20, 21 e 22.

Figura 20 - Curva de Compactação - Solo local



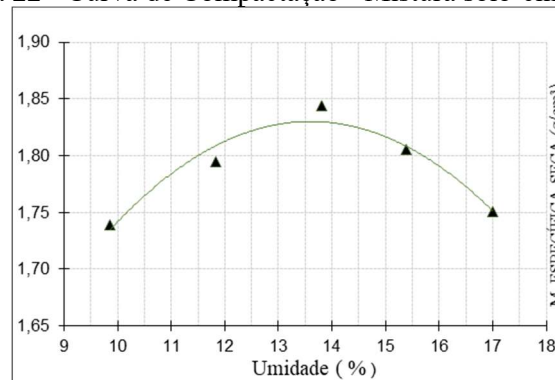
Fonte: autoria própria (2024)

Figura 21 - Curva de Compactação - Cinza têxtil



Fonte: autoria própria (2024)

Figura 22 - Curva de Compactação - Mistura solo-cinza têxtil



Fonte: autoria própria (2024)

Tabela 9 - Massa específica e Umidade ótima

	Solo Local	Cinza têxtil	Solo+Cinza têxtil
Massa específica (kg/m³)	1918	1324	1832
Umidade ótima (%)	8,57	32,88	13,12

Fonte: autoria própria (2024)

Inicialmente, observa-se que o solo natural apresenta uma boa capacidade de compactação, atingindo uma massa específica seca máxima de 1918 kg/m^3 com um teor de umidade ótima de 8,57%. Em contrapartida, a cinza têxtil demonstra um comportamento distinto, evidenciado por sua curva mais plana, que indica baixa capacidade de compactação, sendo esse comportamento também observado por Alcantara *et al.* (2017). Além disso, requer uma quantidade significativamente maior de água para atingir o ponto de compactação ótimo, com um teor de umidade de 32,88%.

A adição da cinza têxtil ao solo causou mudanças notáveis nas propriedades de compactação do solo, como a redução da massa específica seca para 1832 kg/m^3 e o aumento da umidade ótima para 13,12%. A redução na massa específica seca sugere que a mistura de solo com a cinza têxtil se tornou menos densa comparada ao solo puro. Esse efeito pode ser atribuído ao fato de a cinza ser mais leve e possuir uma maior quantidade de poros, o que diminui a compactação das partículas e a densidade do material. Isso ocorre pelo fato de a cinza possuir maior número de finos e ser mais leve, além de possuir mais poros. (Silva *et al.*, 2020)

Além disso, a baixa densidade e maior porosidade da cinza têxtil provoca um aumento na compressibilidade do solo, tornando assim, a mistura menos densa e mais suscetível a deformações (Mitchell e Soga, 2005).

Dessa forma, os resultados encontrados são corroborados por vários estudos, como o de Diógenes (2023), que observa um comportamento semelhante. Segundo esse estudo, a adição de cinza têxtil ao solo, reduz a densidade máxima seca e aumenta a umidade ótima. Além disso, a mudança ocasionada pela cinza têxtil, evidencia que há uma interação entre as partículas, promovendo a retenção de água que altera as propriedades de compactação. Esse fenômeno também foi observado por Souza *et al.* (2020) em seu estudo com cinzas de biomassa.

b) Ensaio de Adensamento

A partir do ensaio edométrico foi possível gerar curvas de compressão para os três materiais estudados, solo local, cinza têxtil e mistura solo-cinza têxtil. Ambas estão dispostas nas figuras 23, 24 e 25.

Figura 23 - Curva de compressão do solo local

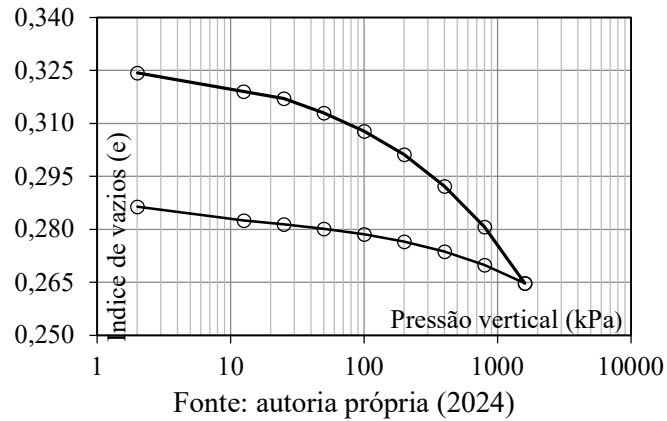


Figura 24 - Curva de compressão da cinza têxtil

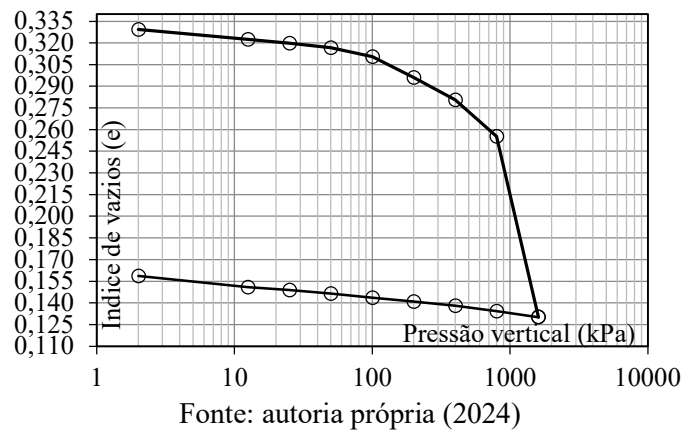
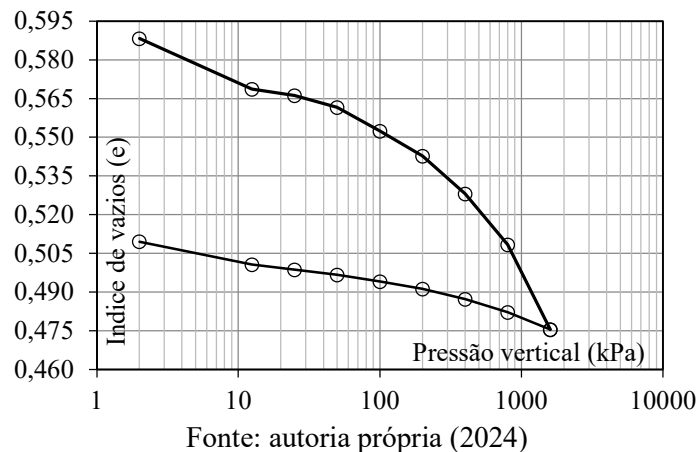


Figura 25 - Curva de compressão da mistura solo local/cinza têxtil



Os gráficos que relacionam o tempo (min) no eixo das abscissas e a variação da altura do corpo de prova (mm) no eixo das ordenadas foram gerados para cada estágio de carregamento de cada amostra. No entanto, optou-se por não os apresentar neste trabalho. Embora os gráficos tenham sido elaborados para a variação de carregamento de cada amostra de solo local,

cinza têxtil e mistura solo-cinza têxtil, decidiu-se apresentar apenas os resultados referentes à carga aplicada de 200 kPa, com o objetivo de comparar os coeficientes de adensamento entre as amostras de solo local, cinza têxtil e a mistura.

Com base nesses gráficos e aplicando o método de Taylor foi possível calcular os coeficientes de adensamento (C_v) de cada amostra. Os resultados obtidos indicaram um valor de $C_v=8,893 \times 10^{-7} m^2/s$ para o solo local, $C_v=8,774 \times 10^{-7} m^2/s$ para a cinza têxtil e $C_v = 8,421 \times 10^{-7} m^2/s$ para a mistura solo local/cinza têxtil. A redução do coeficiente de adensamento indica que a mistura apresenta uma taxa menor de dissipação de poropressões que pode ter sido gerada pelo rearranjo estrutural causado pela cinza têxtil.

A partir dos gráficos de Índice de vazios x Pressão efetiva foram geradas curvas relacionando o índice de vazios à pressão vertical efetiva em escala logarítmica para cada material. A partir dessas curvas, foi possível determinar os índices de compressão, de expansão, e coeficiente de compressibilidade. Nesses gráficos, o índice de vazios está representado no eixo das ordenadas, enquanto a tensão efetiva aplicada está no eixo das abscissas, em escala logarítmica.

Dessa forma, o índice de compressão foi obtido a partir da inclinação da parte linear da curva virgem de adensamento. O índice de expansão foi determinado durante a fase de descarregamento, associando os pontos de índice de vazios e tensões efetivas. O coeficiente de compressibilidade foi calculado com base na variação do índice de vazios em relação ao incremento linear de tensão efetiva.

A seguir tem-se o quadro resumo com todos os índices e coeficientes calculados para as amostras de solo local, cinza têxtil e mistura solo/cinza têxtil.

Tabela 10 - Parâmetros obtidos no ensaio de adensamento edométrico

Parâmetros	Solo Natural	Cinza têxtil	Solo+Cinza têxtil
a_v (m ² /kN)	$2,25 \times 10^{-11}$	$1,56 \times 10^{-10}$	$4,0 \times 10^{-11}$
C_c	0,0448	0,4152	0,0664
C_s	0,00503	0,010	0,0113
C_v (m ² /s)	$8,893 \times 10^{-7}$	$8,774 \times 10^{-7}$	$8,421 \times 10^{-7}$

Fonte: autoria própria (2024)

O ensaio edométrico foi conduzido com o objetivo de avaliar a compressibilidade do solo local, da cinza têxtil e da mistura entre ambos. A Tabela 10 apresenta os principais parâmetros obtidos, incluindo o coeficiente de compressibilidade, o índice de compressão, o índice de expansão e o coeficiente de adensamento. Esses resultados são essenciais para compreender o comportamento do solo antes e após a adição da cinza têxtil.

Observa-se que o solo local apresenta um coeficiente de compressibilidade de $2,25 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{kN}$, indicando pequenas variações volumétricas sob aplicação de carga externa. Em contrapartida, a cinza têxtil possui um valor mais elevado, sendo igual a $1,56 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{kN}$, refletindo maior deformabilidade. A mistura apresenta um índice superior ao do solo $4,0 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{kN}$, mas inferior ao da cinza, sugerindo que a adição da cinza têxtil aumentou a compressibilidade do sistema, embora de forma mais controlada.

O baixo índice de compressibilidade do solo local demonstra sua reduzida capacidade de variação volumétrica sob tensão efetiva, enquanto a cinza têxtil exibe um comportamento mais compressível. No entanto, ao ser incorporada ao solo, a cinza reduz significativamente sua deformabilidade em relação ao seu estado isolado, fazendo com que a mistura seja um pouco mais compressível que o solo em seu estado isolado. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de partículas finas na cinza têxtil, que influenciam na redistribuição das tensões e na compactação do material. Esse comportamento está alinhado com o estudo de Elias (2018), que investigou a estabilização de solos com cinza de casca de arroz. Elias observou que a adição de cinzas a solos pode aumentar a compressibilidade, mas com um efeito mais controlado, dependendo da quantidade de cinza adicionada.

O índice de expansão do solo local indica baixa propensão à expansão. Já a cinza têxtil apresenta maior suscetibilidade à expansão, possivelmente devido à interação entre as partículas finas e a água presente nos vazios. A mistura solo local-cinza têxtil exibe um índice superior ao do solo, mas com um aumento relativamente pequeno com relação à cinza isolada. Esse fenômeno, descrito por Mitchell e Soga (2005) em solos porosos, ocorre devido à alta porosidade da cinza têxtil, que favorece a retenção e a movimentação da água nos espaços intersticiais.

O coeficiente de adensamento reflete a taxa de expulsão da água dos vazios do solo durante o processo de adensamento. O solo local apresenta um valor de $8,893 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$, indicando uma boa velocidade de adensamento, o que reflete o comportamento de solos com quantidade moderada de finos, além de boa capacidade drenante. Já a cinza têxtil possui um valor igual a $8,774 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$, valor ligeiramente inferior ao do solo, o que pode ser atribuído à maior presença de partículas finas que tendem a reduzir a permeabilidade do material.

Ao adicionar a cinza têxtil ao solo, observa-se um leve decréscimo no coeficiente de adensamento da mistura, $8,421 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$, sugerindo que a combinação dos materiais reduziu a permeabilidade do sistema, uma vez que a presença de finos preenche os interstícios entre as partículas maiores dificultando a passagem de água. Esse resultado está em conformidade com as observações de Mitchell e Soga (2005), que apontam que solos finos tendem a restringir a passagem da água ao preencher os interstícios entre as partículas maiores.

Nascimento (2017) investigou o coeficiente de adensamento vertical com a realização de vários ensaios, observando variações consideráveis nos valores obtidos. O estudo destacou que fatores como a composição do solo e a natureza dos aditivos influenciam diretamente o coeficiente de adensamento, reforçando a importância de caracterizações detalhadas para cada combinação específica de solo e aditivo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

Este estudo teve como objetivo analisar a compressibilidade de um solo estabilizado granulometricamente com cinza têxtil. A partir dos ensaios realizados, foi possível compreender melhor as propriedades físicas, químicas e mecânicas do solo antes e depois da adição desse resíduo industrial.

Na caracterização geotécnica, o solo apresentou comportamento de areia siltosa, com predominância de partículas entre as faixas de areia média e fina, além de uma pequena quantidade de silte. Já a cinza têxtil também foi classificada como areia siltosa, porém com maior proporção de finos e maior volume de vazios, o que contribuiu para um aumento na retenção de água da mistura solo-cinza.

A análise química revelou que o solo possui alto teor de minerais característicos de solos arenosos, sendo a elevada quantidade de sílica um indicativo de sua baixa compressibilidade. Em contrapartida, a cinza têxtil apresentou um alto teor de cálcio, sugerindo a presença de compostos que influenciam sua reatividade.

Nos ensaios de compactação, o solo local apresentou uma densidade seca máxima de 1918 kg/m^3 e um teor de umidade ótimo de 8,57%. A cinza têxtil, devido à sua granulometria e composição mineralógica, mostrou um comportamento mais disperso, necessitando um teor de umidade superior (32,88%) para atingir a compactação ideal. Ao adicionar cinza têxtil ao solo, a densidade seca máxima foi reduzida para 1832 kg/m^3 , enquanto o teor de umidade ótimo aumentou para 13,12%, indicando maior retenção de água e menor capacidade de compactação da mistura.

Na determinação da proporção ideal de solo e cinza têxtil, o modelo de empacotamento de Andreasen foi aplicado para minimizar os resíduos da distribuição granulométrica. A composição mais eficiente encontrada foi 74% de solo local e 26% de cinza têxtil, resultando em uma mistura mais homogênea e densa, com uma curva granulométrica equilibrada, favorecendo a interação entre partículas e reduzindo o volume de vazios.

O ensaio de adensamento edométrico demonstrou que a adição de cinza têxtil modificou a estrutura granular do sistema devido ao aumento da fração de finos. Como resultado, o coeficiente de compressibilidade da mistura aumentou em relação ao solo puro, mas permaneceu inferior ao da cinza isolada, indicando que o efeito foi controlado. Além disso, a presença da

cinza têxtil tornou o solo ligeiramente mais compressível e reduziu sua permeabilidade, pois as partículas menores preencheram os vazios entre as maiores, dificultando a passagem de água. Diante dos resultados experimentais, a cinza têxtil mostrou potencial para ser utilizada como material estabilizante granulométrico em aplicações geotécnicas que demandam maior retenção de água e redução moderada da permeabilidade. Além disso, seu aproveitamento contribui para a redução do descarte inadequado desse resíduo industrial, trazendo benefícios ambientais.

No entanto, para confirmar sua viabilidade em longo prazo, recomenda-se a realização de estudos complementares, analisando sua durabilidade, bem como seu desempenho sob diferentes condições de umidade e carga.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar ensaios de longa duração para avaliar o comportamento da mistura solo local/cinza têxtil sob diferentes ciclos de umidade e carga;
- Realizar testes para avaliar a durabilidade e desempenho da mistura solo local/cinza têxtil em condições reais de campo;
- Comparar os resultados obtidos com outras técnicas de estabilização de solos, como o uso de cimento ou cal.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, Victor Lindemberg de Lima. **Caracterização geotécnica de solo estabilizado com cimento e cinzas de resíduos sólidos da saúde**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.
- ALMEIDA, F. A. **Análise do uso de cinzas da termelétrica do Pecém em soluções sustentáveis para a construção civil**. Revista Brasileira de Engenharia e Tecnologia, v. 9, n. 3, p. 210-220, 2017.
- ALMEIDA, J. M.; SILVA, D. B.; PEREIRA, P. F. **Correção granulométrica de solos: uma análise da mistura de solos**. Revista de Engenharia Civil, v. 10, n. 2, p. 15-22, 2010.
- ALMEIDA, A. et al. **Impactos ambientais da indústria têxtil: consumo de água e contaminação dos recursos hídricos**. Revista Brasileira de Meio Ambiente, v. 8, n. 2, p. 45-60, 2020.
- ALCÂNTARA, Marco Antônio de Moraes et al. **Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-cal**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 22, p. e11875, 2017.
- ALCANTARA, J. P.; SILVA, M. M.; COSTA, L. F. **Estudo de compactação de solos com adição de cinzas têxteis**. Revista Brasileira de Geotecnia, v. 35, n. 2, p. 120-128, 2017.
- ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. São Paulo: IBAM, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:2016 – Identificação e classificação de solos para fins de engenharia geotécnica**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458:2016 – Determinação da densidade do solo e do agregado miúdo de solo**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:2016 – Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:2016 – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:2016 – Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16853:2022 – Solo – Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23:1998 – Cimento Portland – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

AVELAR, L. A. **Lodo de esgoto: características e aplicações**. Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas, v. 6, n. 1, p. 11-20, 2012.

AZEVÊDO, A. A. **Estabilização de solos: conceitos e aplicações na engenharia geotécnica**. São Paulo: Editora Técnica, 2010.

BASTIAN, J. R.; ROCCO, L. A.; SILVA, A. L. S. **Utilização de lodo de esgoto como combustível em caldeiras de biomassa**. Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas, v. 3, n. 2, p. 1-10, 2009.

BIN-SHAFIQUE, S. **Utilization of fly ash in soil stabilization**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 131, n. 6, p. 755-758, 2005.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v. 6, p. 425-438, 2017.

BOSSSEL, H. **Indicators for sustainable development: Theory, method, applications**. International Institute for Sustainable Development, 1999.

CASTRO, F. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Simulação numérica da otimização da distribuição granulométrica para empacotamento máximo de partículas esféricas**. Journal of Materials Science, v. 44, n. 1, p. 212-220, 2009.

CASTRO, M. J.; FERREIRA, P. A. **Empacotamento de partículas e suas aplicações na engenharia de materiais**. São Paulo: Editora Engenharia, 2016.

CHINDAPRASIRT, P.; RUKZON, S.; SATA, V. **Utilization of waste ash from palm oil industry in concrete**. Construction and Building Materials, v. 23, n. 2, p. 981-987, 2009.

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

CRAIG, R. F. **Soil Mechanics**. 7. ed. London: CRC Press, 2004.

CRISTELO, N.; OLIVEIRA, S.; ALMEIDA, J. **Use of fly ash in soil stabilization: A review**. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, v. 44, n. 1, p. 1-10, 2013.

DEFENSORIA PÚBLICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Impactos ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos**. São Paulo, 2021.

DEB, Tanaya; PAL, Sujit Kumar. **Effect of fly ash on geotechnical properties of local soil-fly ash mixed samples**. Int. J. Res. Eng. Technol, v. 3, n. 5, p. 507-516, 2014.

DIÓGENES, Laís Alves. **Incorporação de cinzas têxteis provenientes de fornos cerâmicos como camadas de sub-base de pavimentos**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2023.

EBEREMU, A. O. **Effect of fly ash on the geotechnical properties of lateritic soils.** *Geotechnical Testing Journal*, v. 36, n. 5, p. 1-9, 2013.

ENGLISH HERITAGE. **Roman concrete and pozzolana: an introduction.** London: **English Heritage**, 2021. Disponível em: <https://www.english-heritage.org.uk/learn/histories/roman-concrete/>. Acesso em: 20 dez. 2024.

ELIAS, João da Silva. **Efeito da incorporação de cinza de casca de arroz na compressibilidade de solos.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Coal Combustion Residuals — Fly Ash Basics.** Washington, DC: EPA, 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/coalash/coal-combustion-residuals-fly-ash-basics>. Acesso em: 20 dez. 2024.

FRANÇA, R. G. **Estabilização química de solos: fundamentos e metodologias.** Rio de Janeiro: Editora Engenharia, 2003.

FRANÇA, L. A. **O comportamento de solos com adição de resíduos industriais: um estudo experimental.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **A model for particle packing.** 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1994.

GEBEYEHU, M.; BEKELE, T.; MENGESHA, T. **Durability and environmental impact of wastewater sludge ash as a cement replacement in concrete.** *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, v. 6, 2025. DOI: [http_s://doi.org/10.1186/s43065-024-00109-9](http://s://doi.org/10.1186/s43065-024-00109-9).

GRIGOLETTI, G. **Reaproveitamento de resíduos na indústria cerâmica: desafios e benefícios.** *Revista de Engenharia Ambiental*, v. 4, n. 1, p. 85-98, 2001.

GOMES, D. A., Silva, F. T., & Pereira, R. J. (2019). **Efeito da cinza de casca de arroz no comportamento de um solo arenoso.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 43(2), 265-275.

GOYAL, D.; SHARMA, S.; SINGH, P. **Utilization of rice husk ash in concrete: a review.** *Journal of Materials Science*, v. 42, n. 9, p. 2904-2913, 2007.

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

HOUBEN, Hugo; GUILLAUD, Hubert. **Earth Construction: A Comprehensive Guide.** Londres: Intermediate Technology Publications, 1994. 362 p.

HORROCKS, A. Richard; ANAND, Subhash C. (Ed.). **Handbook of technical textiles.** Elsevier, 2000.

INVESTE CE. **Indústria da moda cearense prevê crescimento e consolidação do segmento como líder na região Nordeste.** Fortaleza: Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará, 2022. Disponível em: <https://investece.com.br/industria-da-moda-cearense-preve-crescimento-e-consolidacao-do-segmento-como-lider-na-regiao-nordeste/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

IRIGON, P. I. **Reaproveitamento da cinza pesada de termelétrica a carvão mineral para obtenção de sílica gel.** 2021. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, RS, 2021.

JOHN, Vanderley Moacyr. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KASAW, M.; YADASSA, A.; TEFAYE, T. **Incineration of textile sludge for partial replacement of cement in concrete production: a case of Ethiopian textile industries.** *Materials Today: Proceedings*, v. 46, p. 5537–5542, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.117>.

KANT, R. **Textile dyeing industry an environmental hazard.** *Natural Science*, v. 4, n. 1, p. 22-26, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4236/ns.2012.41004>. Acesso em: 29 nov. 2024.

KIHARA, S. **Properties of fly ash and its utilization in concrete.** *Cement and Concrete Research*, v. 13, n. 5, p. 635-650, 1983.

KRISHNA, R. S. **Effect of fly ash on the properties of concrete.** *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 3, p. 423-428, 2003.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics.** 1. ed. Boston: Wiley, 1969.

LEKHA, S.; RAMASAMY, S.; RAJASEKARAN, S. **Effect of fly ash on the engineering properties of soil.** *Geotechnical Testing Journal*, v. 38,n. 2, p. 1-10, 2015.

LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização dos solos II: técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa.** Viçosa, MG, MG: UFV, 1993.

LIMA, Ricardo Paganelli de; et al. **Estabilização de solo laterítico utilizando cinza do bagaço da cana-de-açúcar e cal hidratada.** *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, e13143, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220001.13143>.

MALHOTRA, V. M. **Fly ash, slag, silica fume, and rice husk ash in concrete: a review.** *ACI Materials Journal*, v. 87, n. 6, p. 449-468, 1990.

MARTINS, R.; FERREIRA, L. **Impactos ambientais do descarte inadequado de resíduos têxteis.** *Revista de Ciências Ambientais*, v. 7, n. 2, p. 150-165, 2019.

MARTINS, J. R. **Adensamento e deformações dos solos.** 2. ed. São Paulo: Editora ABC, 2013.

MEDINA, L. A. **Reação solo-cimento: Fundamentos e aplicações na estabilização de solos.** São Paulo: Editora Técnica, 1987.

MENEZES, E. A.; RODRIGUES, J. C. **Análise da compressibilidade de solos moles.** Engenharia Geotécnica, v. 45, p. 31-40, 2010.

MEHTA, P. K. **High-performance, high-strength concrete: an overview.** Cement and Concrete Composites, v. 9, n. 1, p. 1-9, 1987.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.** 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014.

MEHRI, E.; CASTRO, A. **Comportamento de solos argilosos sob compressão.** Geotechnical Research Journal, v. 32, n. 2, p. 115-126, 1987.

MESRI, G.; GODLEWSKI, P. **Effect of stress state on compressibility and permeability of clays.** Journal of Geotechnical Engineering, v. 103, n. 9, p. 917-934, 1977.

MISHRA, M. **Effect of fly ash on the plasticity and expansiveness of clayey soils.** International Journal of Geotechnical Engineering, v. 6, n. 4, p. 523-530, 2012.

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

MOGROVEJO, D. R. L. **Avaliação das propriedades geotécnicas de um solo argiloso e outro arenoso com adição de fibras de papel kraft.** 2013. 181 f. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

NARDI, R. **Estudo da utilização de cinzas volantes na estabilização de solos para pavimentação.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 9, n. 1, p. 45-50, 1975.

NOGUEIRA, F. A. et al. **Economia circular na indústria têxtil: oportunidades e desafios.** Revista Brasileira de Inovação, v. 16, n. 1, p. 41-62, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20396/rbi.v16i1.8656504>. Acesso em: 29 nov. 2024.

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, M. et al. **A indústria têxtil no Ceará: impactos socioeconômicos e ambientais.** Revista Econômica do Nordeste, v. 40, n. 4, p. 320-335, 2022.

PANDIAN, S. **Effect of fly ash on the properties of concrete.** Cement and Concrete Research, v. 34, n. 3, p. 423-428, 2004.

PANDIAN, S. **Effect of fly ash on the properties of concrete.** Cement and Concrete Research, v. 34, n. 3, p. 423-428, 2003.

PAPADAKIS, V. G.; TSIMAS, S.; THEODORIDIS, K.; STEFANIDIS, S. **A comprehensive**

review on coal fly ash and its application in the construction industry. Clean Materials, [S.l.], v. 6, p. 100095, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clmt.2022.100095>. Acesso em: 15 dez. 2024.

PEREIRA, D. M.; SANTOS, R. A.; LOPES, V. C. **Avaliação de resíduos sólidos industriais no setor têxtil: impactos e gestão sustentável.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 10, n. 1, p. 87–104, 2021.

PINTO, T. P. **Utilização de cinzas volantes na estabilização de solos para pavimentação.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 5, n. 2, p. 123-128, 1971.

PINTO, C. R. **Estabilização física de solos: fundamentos e aplicações.** Revista Brasileira de Geotecnia, v. 12, n. 4, p. 34-40, 2008.

PINTO, C. S. **Métodos de análise de solos para engenharia civil.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, E. M. **Recalques de fundações e comportamento de solos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Técnica, 2006.

POWERS, T. C. **The packing of particles in granular materials.** Journal of Soil Mechanics and Foundations, v. 84, n. 1, p. 15-22, 1968.

RESENDE, Mauro. **Pedologia: base para distinção de ambientes.** Neput, 1995.

ROHDE, L. A.; SILVA, M. A.; SOUZA, J. R. **Composição mineral das cinzas volantes e sua influência nas propriedades do solo.** Revista Brasileira de Geotecnia, v. 20, n. 2, p. 85-92, 2006.

Rodrigues, L. M., Oliveira, M. S., & Santos, P. F. (2021). **Influência da cinza volante no comportamento mecânico de solos arenosos.** Engenharia Geotécnica, 29(3), 355-367.

ROSALES, J. et al. **Use of Nanomaterials in the Stabilization of Expansive Soils into a Road Real-Scale Application.** Materials, v. 13, n. 14, p. 1–25, 2020.

SARTORI, D. S. **Estabilização de solos por correção granulométrica: conceitos e técnicas.** Revista de Engenharia e Construção, v. 21, n. 3, p. 50-55, 2015.

SARTORI, M. **Compressibilidade dos solos: impactos estruturais e métodos de análise.** Engenharia Geotécnica e Solos, v. 9, n. 2, p. 110-125, 2015.

SANTA-MARINA, C. et al. **Influência da forma das partículas no empacotamento de materiais.** Revista de Engenharia de Materiais, v. 28, n. 3, p. 224-231, 2001.

SANTOS, E. A. **Utilização de resíduos industriais e agrícolas na estabilização de solos: uma revisão.** Recife: Editora Sustentabilidade, 2013.

SANTOS, A. et al. **Avaliação do potencial energético de resíduos têxteis na indústria cerâmica.** Revista Brasileira de Energia Sustentável, v. 12, n. 3, p. 75-89, 2021.

SANTOS, J. et al. **Geração e impactos ambientais dos resíduos sólidos industriais**. Revista de Gestão Ambiental, v. 15, n. 1, p. 22-36, 2010.

SANTOS, A. L. S.; FERNANDES, L. S. **Gestão de resíduos sólidos na indústria têxtil: uma revisão**. Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas, v. 6, n. 1, p. 1-10, 2012.

SILVA, Jayne Araújo. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

SILVA, P. et al. **Gestão de resíduos na indústria cerâmica: um estudo de caso**. Revista Brasileira de Engenharia Sustentável, v. 8, n. 1, p. 55-70, 2020.

SILVA, T. A.; LIMA, M. B.; CARVALHO, P. S. **Propriedades físicas e mecânicas de solos misturados com cinzas têxteis**. Revista de Engenharia Civil, v. 49, n. 3, p. 200-210, 2020.

SOLIZ, A. **Estabilização química de solos: o uso de aditivos para melhoria de propriedades**. Porto Alegre: Editora Geotecnia, 2007.

SOUZA, L. F. **Desafios na gestão de resíduos têxteis: um estudo na indústria de redes de Jaguaruana – CE**. Revista de Desenvolvimento Regional Sustentável, v. 6, n. 3, p. 90-105, 2021.

SOUZA, F. G.; ALMEIDA, J. L.; CUNHA, V. D. **Efeitos de cinzas de biomassa em solos: uma análise geotécnica**. Journal of Environmental Engineering, v. 38, n. 1, p. 80-92, 2020.

SOUSA PINTO, A. (2000). **Geotecnia: Comportamento de solos e fundações**. São Paulo: Editora Blucher.

SOTAYO, A. T. et al. **Impacto ambiental da disposição de resíduos têxteis em aterros sanitários**. Environmental Science and Pollution Research, v. 22, n. 24, p. 19947-19955, 2015.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. New York: Wiley, 1943.

THOMAS, M. D. A. **The role of mineral admixtures in concrete**. Cement and Concrete Research, v. 37, n. 12, p. 1590-1596, 2007.

TONIOLLO, G. H. D. et al. **Impactos ambientais dos corantes têxteis: uma revisão**. Química Nova, v. 38, n. 3, p. 413-420, 2015.

TRINDADE, T. P. et al. **Compactação de solos: fundamentos teóricos e práticos**. Viçosa: Editora UFV, 2008.

UBALDO, A. M. **Aditivos cimentantes na melhoria das propriedades geotécnicas de solos**. Revista Brasileira de Engenharia Geotécnica, v. 10, n. 1, p. 33-40, 2005.

VIZCARRA, M. **Tecnologias alternativas para estabilização química de solos**. São Paulo: Editora Ambiental, 2010.

WILSON, R. **The Secrets of Roman Concrete**. New Scientist, v. 202, n. 2707, p. 38-41, 2009.

WU, Y.; ZHOU, M.; LI, Z. **Utilization of textile dyeing sludge incineration ash in autoclaved aerated concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 35, n. 3, p. 04023021, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-18131>.

YALCIN-ENIS, T. et al. **Utilização de resíduos têxteis na construção civil: uma revisão**. Journal of Building Engineering, n. 25, v. 100799, 2019.

ZHU, H.; WANG, Y.; LIU, X. **Effect of textile sludge on strength, shrinkage, and microstructure of polypropylene fiber concrete**. Buildings, v. 13, n. 2, p. 379, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13020379>.