



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LAÍS ALVES DIÓGENES

**INCORPORAÇÃO DE CINZAS TÊXTEIS PROVENIENTES DE FORNOS
CERÂMICOS COMO CAMADAS DE SUB-BASE DE PAVIMENTOS**

RUSSAS

2023

LAÍS ALVES DIÓGENES

INCORPORAÇÃO DE CINZAS TÊXTEIS PROVENIENTES DE FORNOS CERÂMICOS
COMO CAMADAS DE SUB-BASE DE PAVIMENTOS

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

2023

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)

D622i Diógenes, Laís Alves.
Incorporação de cinzas têxteis provenientes de fornos cerâmicos como camadas de sub-base de pavimentos / Laís Alves Diógenes. – 2023.
59 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Daniela Lima Machado da Silva.

1. Cinza têxtil. 2. Sub-base. 3. Pavimentação. I. Título.

CDD 620

LAÍS ALVES DIÓGENES

INCORPORAÇÃO DE CINZAS TÊXTEIS PROVENIENTES DE FORNOS CERÂMICOS
COMO CAMADAS DE SUB-BASE DE PAVIMENTOS

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: __/__/__.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Me. Mateus do Nascimento Lira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Thiago Fernandes da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, irmãos e sobrinhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo sustento durante toda essa trajetória.

À Silvana, minha mãe, por todos os joelhos dobrados para que esse momento se realizasse, a quem eu dedico minha graduação e qualquer conquista que eu venha a ter.

Ao José, meu pai, por todos os esforços para que a minha vida fosse transformada por meio da educação.

À Letícia, minha irmã, por ser o melhor presente que tenho em minha vida, a quem amo e torço pela felicidade, pois tenho certeza de que estará ao meu lado até o fim.

Ao Oriel Diógenes, meu irmão, por mudar a realidade da nossa família e tornar nossos sonhos possíveis.

Ao José Miguel, meu sobrinho, por ser luz em tempos difíceis, a qual lutarei dia após dia para que cresça feliz.

Aos meus tios, Luzia Diógenes e Cristiano Maia, por priorizarem minha educação, bem-estar, e por incentivarem meus sonhos.

À Profa. Dra. Daniela Lima, minha orientadora, a quem tenho enorme admiração, por ter acompanhado minha graduação de perto, pela gentileza e bondade nos dias em que não pude dar o meu melhor, pelo apoio, compressão e ensinamentos, essenciais para a concretização desse projeto.

Aos professores participantes da banca avaliadora, Mateus do Nascimento Lira e Thiago Fernandes da Silva, pela disponibilidade e colaborações excelentes.

À Myckelle Michely, técnica do Laboratório de Construção Civil, pelo auxílio na realização dos ensaios, bem como, a disponibilidade para me fornecer qualquer suporte necessário.

Ao Thiago de Sá Sena, técnico do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação, pelos conhecimentos compartilhados, a quem considero um presente na reta final da minha graduação, e um dos melhores engenheiros que conheço.

As empresas parceiras, construtora Samaria LTDA e Cerâmica do Liro, pelo compromisso e responsabilidade.

“Mas, quanto a você, Ele encherá de riso a sua boca e de brados de alegria os seus lábios.”

(Jó 8,21).

RESUMO

A infraestrutura viária consome um grande volume de matéria-prima, e com isso, nem sempre materiais que atendem aos padrões de desempenho estão disponíveis nas proximidades das obras. Dessa forma, pode-se acarretar uma divergência entre a oferta e a demanda, tornando-se imprescindível a realização de estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental de novas matérias-primas. Com isso, a verificação da existência de materiais alternativos que consigam suprir a grande demanda gerada na confecção de pavimentos é de suma importância. Assim sendo, realizou-se uma pesquisa sobre a incorporação de cinzas têxteis para fins de pavimentação, com o objetivo de analisar a viabilidade dessas cinzas como camadas de sub-base. Para tanto, elaborou-se uma revisão bibliográfica da aplicação de cinzas industriais em pavimentos, bem como, a caracterização de um solo local e da cinza têxtil. Esse solo foi coletado de uma estrada vicinal, e a cinza têxtil foi proveniente da queima de tecidos de redes em fornos de uma fábrica de cerâmica vermelha. A obtenção de ambos os materiais se deu na cidade de Russas, localizada no estado do Ceará. A partir do solo e da cinza foram feitas três misturas diferentes, denominadas M30, M50 e M70, que se relacionam, respectivamente, aos teores de 30%, 50% e 70% da cinza adicionada ao solo, permitindo a análise do comportamento mecânico da cinza têxtil, a partir dos ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR). Além desses ensaios, também foi realizada a caracterização física do solo local, cinza têxtil e misturas, por meio de ensaios de umidade higroscópica, limites de Atterberg, granulometria por sedimentação e densidade real. Com exceção das misturas, executou-se a caracterização química a partir da Fluorescência de Raios – X (FRX) e matéria orgânica. Realizou-se, então, uma pesquisa com uma abordagem tanto qualitativa quanto quantitativa. Diante disso, verificou-se que a adição da cinza têxtil ao solo local aumentou a capacidade de suporte deste, sendo a proporção com 50% de cinza a mais viável para a aplicação como camada de sub-base, seguindo os critérios estabelecidos por DNIT (2006). Com isso, tem-se que um material sem finalidade comercial como a cinza têxtil pode ter uma destinação que visa a infraestrutura viária. Além disso, o uso dessa cinza com a aplicação em camadas de pavimentos, até então sem estudos registrados na literatura, traz o incentivo à reutilização de resíduos industriais, o fortalecimento da economia circular, e a diminuição das áreas ocupadas por tecidos em aterros sanitários.

Palavras-chave: cinza têxtil; sub-base; pavimentação.

ABSTRACT

The road infrastructure consumes a large volume of raw material, and with this, materials that meet the performance standards are not always available in the vicinity of the works. In this way, it can lead to a divergence between supply and demand, making it essential to carry out technical, economic and environmental feasibility studies of new raw materials. With this, the verification of the existence of alternative materials that can meet the great demand generated in the manufacture of pavements is of paramount importance. Therefore, a research was carried out on the incorporation of textile ash for paving purposes, with the objective of analyzing the viability of these ash as sub-base layers. To this end, a bibliographic review of the application of industrial ash in pavements was elaborated, as well as the characterization of a local soil and textile ash. This soil was collected from a back road, and the textile ash came from the burning of net fabrics in furnaces of a red ceramic factory. The acquisition of both materials took place in the city of Russas, located in the state of Ceará. From the soil and ash, three different mixtures were made, called M30, M50 and M70, which relate, respectively, to the contents of 30%, 50% and 70% of the ash added to the soil, allowing the analysis of the mechanical behavior of textile ash, from the compaction tests and California Bearing Ratio (CBR). In addition to these tests, the physical characterization of the local soil, textile ash and mixtures was also carried out, by means of tests of hygroscopic moisture, Atterberg limits, particle size by sedimentation and real density. With the exception of the mixtures, the chemical characterization was performed from X-ray Fluorescence (XRF) and organic matter. A research was then carried out with both a qualitative and quantitative approach. In view of this, it was found that the addition of textile ash to the local soil increased its support capacity, with the proportion with 50% ash being the most viable for application as a sub-base layer, following the criteria established by DNIT (2006). With this, it is said that a material without commercial purpose such as textile ash can have a destination that aims at road infrastructure. In addition, the use of this ash with the application in layers of pavements, until then without studies recorded in the literature, brings the incentive to the reuse of industrial waste, the strengthening of the circular economy, and the reduction of the areas occupied by fabrics in sanitary landfills.

Keywords: textile gray; sub-base; paving.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da cinza têxtil.....	29
Figura 2 – Representação das estruturas de pavimento-tipo	30
Figura 3 – Classificação TRB.....	31
Figura 4 – Classificação SUCS.....	32
Figura 5 – Fluxograma da pesquisa.....	34
Figura 6 – Programa experimental.....	35
Figura 7 – Localização da estrada vicinal em Russas – CE.....	37
Figura 8 – Coleta e peneiramento do solo natural: a) Coleta do solo local na estrada vicinal; b) Peneiramento grosso do solo local; c) Peneiramento fino do solo local.....	38
Figura 9 – Localização da fábrica da Cerâmica do Liro em Russas – CE.....	39
Figura 10 – Coleta e ensaios de caracterização da cinza têxtil: a) Obtenção da cinza; b) Quarteamento; c) Limite de Liquidez; d) Limite de Plasticidade; e) Matéria orgânica.....	39
Figura 11 – Quantidades preparadas para o ensaio do Índice de Suporte Califórnia.....	41
Figura 12 – Ensaio CBR: a) Imersão; b) Prensa usada no ensaio.....	41
Figura 13 – Curva granulométrica do solo local e da cinza têxtil.....	43
Figura 14 – Curva granulométrica das misturas M30, M50 e M70.....	43
Figura 15 – Curva de compactação do Sl, Ct, e misturas M30, M50 e M70.....	47
Figura 16 – Curva de penetração referente ao solo local e a cinza têxtil.....	48
Figura 17 – Curva de penetração referente às misturas M30, M50 e M70.....	49

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1	– Proporções de solo local e cinza têxtil para as misturas M30, M50 e M70.....	40
Tabela 2	– Resultados do ensaio de umidade higroscópica do Sl, Ct, e misturas M30, M50 e M70.....	42
Tabela 3	– Classificação TRB das amostras Sl, Ct, e misturas M30, M50 e M70.....	44
Tabela 4	– Densidade real do Sl, Ct, e misturas M30, M50 e M70.....	44
Tabela 5	– Matéria orgânica do Sl e Ct.....	45
Tabela 6	– FRX do solo local.....	45
Tabela 7	– FRX da cinza têxtil.....	46
Tabela 8	– Resultados da umidade ótima e massa específica seca máxima do Sl, Ct, e misturas M30, M50 e M70.....	48
Tabela 9	– Expansão e CBR do Sl, Ct, e misturas M30, M50 e M70.....	49

LISTAS DE QUADROS

Quadro 1 – Ensaio de caracterização do solo local.....	38
--	----

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Anicer	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	California Bearing Ratio
CE	Ceará
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de Tratamento de Água
FRX	Fluorescência de Raios - X
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
kg	Quilo
km	Quilômetro
LASMP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
LCC	Laboratório de Construção Civil
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LTDA	Limitada
min	Minuto
mm	Milímetro
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
n°	Número
PET	Polietileno Tereftalato
pH	Potencial hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RJ	Rio de Janeiro
RS	Rio Grande do Sul
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

SEBRAE Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SUCS SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS
TRB *Transportation Research Board*
UFC Universidade Federal do Ceará

LISTAS DE SÍMBOLOS

CO ₂	Dióxido de carbono
Si	Silício
Al	Alumínio
Fe	Ferro
Mn	Manganês
Ca	Cálcio
S	Enxofre
P	Fósforo
Mg	Magnésio
K	Potássio
Na	Sódio
Ti	Titânio
%	Porcentagem
SiO ₂	Dióxido de Silício
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
MnO	Óxido de Manganês
Ba	Bário
Cl	Cloro
°C	Celsius
Sr	Estrôncio
Rb	Rubídio
Zn	Zinco
≥	Maior que ou igual a
=	Igual
≤	Menor que ou igual a

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Problemática	19
1.2	Justificativa	19
1.3	Objetivos	20
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	20
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Legislação e normativas referentes a área de resíduos sólidos	21
2.2	Cinzas industriais	23
<i>2.2.1</i>	<i>Subprodutos da produção de carvão mineral</i>	23
<i>2.2.1.1</i>	<i>Cinza volante</i>	24
<i>2.2.1.2</i>	<i>Cinza pesada</i>	24
<i>2.2.2</i>	<i>Cinza da lenha</i>	25
<i>2.2.3</i>	<i>Fábricas de cerâmica vermelha e a geração de cinzas têxteis</i>	26
<i>2.2.4</i>	<i>Pavimentação</i>	29
<i>2.2.4.1</i>	<i>Classificação dos solos</i>	30
<i>2.2.5</i>	<i>Uso de cinzas na pavimentação</i>	33
3	METODOLOGIA	34
3.1	Programa experimental	34
<i>3.1.1</i>	<i>Caracterização física</i>	35
<i>3.1.2</i>	<i>Caracterização química</i>	36
<i>3.1.3</i>	<i>Caracterização mecânica</i>	36
3.2	Materiais	37
<i>3.2.1</i>	<i>Solo natural (Sn)</i>	37
<i>3.2.2</i>	<i>Cinza têxtil (Ct)</i>	38
<i>3.2.3</i>	<i>Misturas Sn e Ct</i>	39
3.3	Ensaio de Compactação	40
3.4	Índice de Suporte Califórnia (CBR)	40
4	RESULTADOS E DISSCURSÕES	42
4.1	Caracterização física	42
4.2	Caracterização química	44

4.3	Caracterização mecânica.....	46
4.3.1	<i>Ensaio de compactação.....</i>	47
4.3.2	<i>Índice de Suporte Califórnia (CBR).....</i>	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
5.1	Conclusão.....	51
5.2	Recomendações para futuras pesquisas acadêmicas.....	51
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

As obras de infraestrutura viária fazem uso de grande volume de recursos naturais na produção das camadas constituintes de pavimentos, restringindo-se as jazidas para obtenção de materiais primários como solo e brita. Ademais, nem sempre existe a disponibilidade de materiais que atendam aos padrões de desempenho nas proximidades das obras, acarretando uma divergência entre oferta e demanda, o que torna imprescindível a realização de estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental de novas matérias-primas.

A empregabilidade de cinzas na pavimentação, como as provenientes de carvão mineral e da combustão da madeira já é bastante difundida na engenharia geotécnica. Com isso, diversos estudos trataram dos avanços na melhoria das técnicas do emprego desses resíduos, como as pesquisas de Zimar *et al* (2022) e Li *et al* (2009) que afirmam que há o aumento de resistência e resiliência quando as cinzas volantes do carvão mineral foram aplicadas em subleito. Em relação às cinzas advindas da madeira, os resultados obtidos por Dimter *et al* (2021) afirmam que as cinzas podem ser aplicadas em misturas estabilizantes na camada de base devido à resistência à compressão atingida de forma satisfatória.

Sabe-se que muitos estudos são realizados no âmbito de avaliação dos impactos ambientais causados pela indústria têxtil, por isso, há a tentativa de fazer o aproveitamento das sobras de tecidos na produção civil. Com isso, a pesquisa de Yalcin-Enis *et al* (2019) alega que a aplicabilidade dos resíduos têxteis é feita, em geral, na produção de isolantes térmico e acústico, em materiais de construção, reforço em compósitos, na conversão em produtos químicos e em outras atividades comerciais que consigam aproveitar as propriedades que o resíduo venha a possuir.

De acordo com Yalcin-Enis *et al* (2019), na gestão de resíduos têxteis pode ser feita a disposição final para recuperação energética, reciclagem, reutilização e redução, mas a maior parte ainda acontece em aterros sanitários. Assim sendo, Sotayo *et al* (2015) explica que há emissão para a atmosfera dos gases metano e dióxido de carbono quando os resíduos têxteis são eliminados em aterros.

Existe uma empregabilidade pouco conhecida na literatura que é a utilização dos restos de tecidos como matéria-prima para a combustão em fornos de fábricas de cerâmica vermelha. Com a queima, as cinzas têxteis geradas não têm função comercial, apenas acumulativa. Além disso, a cinza têxtil obtida dos fornos cerâmicos possui a textura de um solo arenoso, com coloração dependente do tingimento dos tecidos, variando entre tons amarelo e cinza.

Portanto, este estudo visa analisar a viabilidade de incorporação de misturas solo/cinza têxtil como camadas de sub-base, possibilitando o aumento da variabilidade de matéria-prima da infraestrutura viária, a partir de materiais residuais.

1.1 Problemática

A pesquisa traz como problema a escassez de material natural adequado para a pavimentação, aliando-se à problemática de geração industrial de resíduos.

Quando eliminados em aterros, a composição química dos resíduos têxteis pode ser prejudicial ao meio ambiente, com o potencial de contaminação dos solos e dos recursos hídricos devido ao corante usado no tingimento dos tecidos, e consequentemente, o desenvolvimento de problemas de saúde na população que fizer uso desses recursos naturais. Com isso, não tem sido apontada na literatura a empregabilidade ambiental desses resíduos.

Apesar disso, quando restos de tecidos foram usados para a combustão em fornos cerâmicos, a cinza resultante não apresentou proporções significativas de elementos tóxicos, tais como metais pesados. Todavia, essa cinza têxtil ocupa grandes espaços nas fábricas devido ao seu volume e ausência de valor de mercado.

Assim sendo, muitas parcerias podem ser criadas entre as empresas, pois o estoque sem funcionalidade da cinza têxtil pode ser resolvido por meio de doações para novas empregabilidades na cadeia produtiva. Com isso, o estudo da incorporação dessa cinza na produção dos pavimentos pode se mostrar uma alternativa viável para a diversificação dos materiais usados nessa infraestrutura, podendo também, agregar valor comercial a cinza têxtil.

1.2 Justificativa

A infraestrutura viária consome volumes exorbitantes de material em suas obras; a cada obra de pavimentação novas jazidas de solo e brita são exploradas. Dessa forma, é de suma importância a utilização de materiais alternativos que consigam suprir a grande demanda desses recursos.

Ademais, Mancini *et al* (2021) alega que a sociedade se preocupa cada vez mais com os impactos ambientais. Com isso, as indústrias devem promover a economia circular, ou seja, minimizar os riscos e danos que os resíduos têxteis causam ao ambiente, à população e à economia quando descartados inadequadamente.

Já existem estudos de melhoramento de solos para as camadas de pavimentação devido à empregabilidade de cinzas industriais (FARIAS, 2005; BARROS E MELLO, 2017). Dessa maneira, a cinza têxtil proveniente da queima de tecidos de redes em fornos usados na

indústria de cerâmica vermelha pode ser um desses materiais que melhoram as propriedades do solo. Portanto, pode-se analisar a incorporação de diferentes teores de cinza têxtil para a aplicação como camada de sub-base. Os parâmetros de resistência exigidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para a camada de sub-base são menores que para a camada de base e maiores que para o subleito.

1.3 Objetivos

Os objetivos desta pesquisa estão detalhados nos itens 1.3.1 e 1.3.2.

1.3.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade técnica da incorporação de cinzas têxteis provenientes de fornos cerâmicos como camadas de sub-base de pavimentos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar as práticas usadas com cinzas industriais para o melhoramento de solos na aplicação para pavimentação;
- Compreender o comportamento geotécnico, químico e mecânico da cinza têxtil proveniente de fornos cerâmicos;
- Analisar a influência da adição de diferentes teores de cinza têxtil na mistura com o solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

2.1 Legislação e normativas referentes a área de resíduos sólidos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), foi um marco na legislação ambiental brasileira. Cabe salientar que nesse documento, não é feita a menção da palavra lixo, buscando uma mudança cultural sobre essa perspectiva. Ademais, essa lei apresenta a ordem de prioridade na gestão e manejo dos resíduos sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição adequada dos rejeitos.

Dessa forma, Neto e Rocha (2015) explicam que a PNRS contribui para que a sociedade brasileira reconheça os resíduos sólidos como um assunto complexo, em que atitudes isoladas não possuem melhorias significativas, com isso, inaugura-se uma nova visão para a gestão e desenvolvimento ambiental do Brasil.

Ademais, ainda de acordo com a pesquisa de Neto e Rocha (2015), os planos estaduais e municipais de gerenciamento de resíduos sólidos deverão conter o diagnóstico da presente situação dos resíduos e as metas para a redução, além da reutilização e reciclagem. Todas essas ações buscam contribuir na diminuição do volume de rejeitos encaminhado aos aterros sanitários.

Com isso, Corrêa e Ribeiro (2022) relatam que a economia circular, ou seja, o modelo econômico que visa reduzir, reutilizar e reintroduzir os materiais de forma eficiente na cadeia produtiva, consegue reduzir a utilização dos recursos naturais, a emissão de gases de efeito estufa, além da diminuição dos rejeitos e da poluição ambiental.

Outra normativa relevante no setor de resíduos sólidos é a NBR 10004 (ABNT, 2004), a qual estabelece critérios de classificação dos resíduos sólidos. De acordo com essa norma, os resíduos são classificados em dois grupos:

- Classe I - resíduos perigosos: apresentam riscos à saúde pública, aumento de mortes, incidência de doenças e impactos adversos ao ambiente, como:
 - a) Inflamáveis;
 - b) Corrosivos;
 - c) Reativos;
 - d) Tóxicos;
 - e) Patogênicos;
- Classe II - resíduos não perigosos: não apresenta as características da Classe I.

Porém, a classe II se subdivide em dois grupos:

- Classe IIA - resíduos não inertes: possuem como características:
 - a) Solubilidade em água;
 - b) Combustibilidade;
 - c) Biodegradabilidade;
- Classe IIB - resíduos inertes: em testes de solubilização seus constituintes não são solubilizados.

Tratando-se dos resíduos da construção, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº307/2002 classifica da seguinte maneira:

- Classe A: atribui-se aos resíduos reutilizáveis ou recicláveis, que podem ser advindos da construção, demolição, além de reformas e reparos de pavimentos ou edificações, ademais, os resíduos provenientes do processo de fabricação e demolição das peças pré-moldadas também se encaixam nessa classe;
- Classe B: relaciona-se aos resíduos recicláveis com destinações diferentes, por exemplo, plásticos, madeiras, vidros, papéis e metais;
- Classe C: pertence aos resíduos sem tecnologia e aplicabilidade viáveis para reciclar ou recuperar;
- Classe D: representa os resíduos perigosos provenientes da construção, nocivos ao ambiente e à saúde humana, como óleos, tintas, solventes, telhas de amianto e dentre outros.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, segundo Tavares e Athayde Júnior (2014), alega que a destinação adequada deve incluir reciclagem, reutilização, recuperação, compostagem e aproveitamento energético. Os resíduos municipais têm três formas de disposição final: o lixão, o aterro controlado e o aterro sanitário. Cabe salientar que, dentre essas opções, o lixão é considerado prática de crime ambiental e, portanto, sua extinção e remediação da área degradada deverá ser realizada, para que a disposição final seja considerada ambientalmente adequada.

Dessa forma, Jardim *et al* (1995) e Oliveira (1997) comentam sobre o lixão ser a forma inadequada de fazer a disposição dos resíduos sólidos, pois são jogados ao solo sem existir proteção ao meio ambiente e à saúde pública. Em relação ao aterro controlado, Sant'ana Filho (1991) descreve que esse é uma variação do lixão, já que os resíduos são apenas cobertos com camadas de terra de forma arbitrária, continuando a poluir o solo, a água e o ar.

Por fim, a NBR 8419 (ABNT, 1984) descreve o aterro sanitário como técnica de disposição que não causa riscos ou danos à saúde pública e minimiza os impactos ao meio

ambiente, os resíduos são cobertos por terra após cada jornada de trabalho, e se necessário, em intervalos menores.

2.2 Cinzas industriais

As cinzas são um dos resíduos industriais mais comuns, sendo comumente compostas pelos argilominerais, os quartzos e os sulfatos, considerados como os principais componentes conforme elucidado por Silva *et al* (1999).

Dessa forma, como explica Farias (2005), a disposição dos resíduos industriais no meio ambiente está suscetível aos condicionamentos e às normativas específicas. Assim, as cinzas podem ter suas características físicas, químicas e mecânicas definidas, e devem, portanto, serem descartadas adequadamente na natureza.

Conforme Siqueira (2011), o Brasil é um país com grande geração de cinzas resultantes da combustão do carvão mineral, com uma produção aproximada de 4 milhões de toneladas/ano. Porém, apesar das cinzas de carvão serem as mais conhecidas na indústria, não são as únicas. Há uma diversidade delas, podendo ser obtidas pela queima de diferentes materiais, como por exemplo, a madeira e o tecido. Com isso, nos itens seguintes dessa seção, serão abordadas as definições, composições, disposições finais e sobre as incorporações dessas cinzas.

2.2.1 Subprodutos da produção de carvão mineral

Conforme Cândido *et al* (2016), a formação do carvão mineral se dá pelo processo de decomposição que os vegetais são submetidos de forma subterrânea e pela compactação em bacias com algum nível de profundidade. Como relata Siqueira (2011), a geração de energia elétrica é onde o carvão mineral tem sua maior aplicação.

As cinzas volantes e pesadas são subprodutos da queima do carvão mineral. Em relação à composição química, Silva *et al* (1999) relatam que as cinzas de carvão são constituídas por, basicamente, silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe) em baixos teores e alguns outros elementos, como cálcio (Ca), enxofre (S), fósforo (P), magnésio (Mg), potássio (K), sódio (Na) e titânio (Ti).

Segundo Siqueira (2011), a utilização desses subprodutos diminui de forma significativa a área destinada aos aterros sanitários, otimizando o consumo de recursos naturais. Ademais, de acordo com Elias *et al* (2021), existem muitas pesquisas com o objetivo de avaliar a aplicação dos resíduos na indústria de construção civil, como a incorporação das cinzas na produção de cimento Portland, na empregabilidade de pavimentos, em coberturas de aterros, e

em outros setores industriais, para que se afirmem técnicas economicamente e ambientalmente viáveis.

2.2.1.1 Cinza volante

As cinzas volantes, também chamadas de leves ou secas, são subprodutos da combustão do carvão. De acordo com Kihara (1983), essas cinzas são materiais sem homogeneidade, com composições que variam conforme o tipo de carvão mineral e a sua combustão.

Ademais, as características pozolânicas estão presentes nas cinzas volantes. Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais pozolânicos têm baixa ou nenhuma atividade aglomerante, porém, quando esses materiais são divididos e em contato com a água, podem reagir com o hidróxido de cálcio, fornecendo propriedades ligantes aos compostos.

Em relação aos estudos feitos por Silva *et al* (1999) com as cinzas volantes da termoelétrica da cidade de Candiota - RS, a mineralogia das cinzas era constituída por minerais cristalinos e possuíam uma matriz de vidro aluminosilicatado. Além disso, os resultados obtidos pela Difração de Raios - X (DRX) mostram que essas cinzas continham quartzo, feldspato, caulinita e alguns outros minerais como calcita, cristobalita e mulita. Em relação a radioatividade, a cinza de Candiota possui baixa atividade, sem riscos, quando se analisa a proteção radiológica. Vale salientar que as cinzas volantes e pesadas correspondiam a 80% e 20%, respectivamente, da produção da usina termoelétrica.

A utilização das cinzas volantes na produção de cimento Portland também foi objeto de estudos. Conforme Almeida e Gomes (2021), as amostras analisadas atingiram os parâmetros presentes na literatura, dessa forma, a utilização das cinzas como material pozolânico na incorporação do cimento atendeu a NBR 16697 (ABNT, 2018).

2.2.1.2 Cinza pesada

As cinzas pesadas, de fundo ou úmidas, são o outro tipo de subproduto originado da combustão do carvão. Conforme Froener (2016) e Almeida (2017), tem-se que as cinzas pesadas possuem menos relevância na indústria termoelétrica do que a cinza volante. As diferenças mais expressivas consistem na densidade, no aspecto da cinza pesada conter metais pesados, e de não ser feito seu uso como adição pozolânica devido ao seu aspecto granulométrico grosseiro e menor reatividade. Em virtude disso, a cinza pesada não recebe tanta importância na construção civil.

De acordo com Cheriaf e Cavalcante (1997), tanto as cinzas pesadas quanto as cinzas volantes possuem em grande maioria o dióxido de silício (SiO_2), seguido pelo óxido de alumínio (Al_2O_3), em que juntos representam quase 82,71% e 85,48% da composição química total, respectivamente, da cinza pesada e volante. Em contrapartida, o óxido de manganês (MnO) e o cloro (Cl) têm porcentagem praticamente nula em ambos os tipos de cinza.

Apesar de anteriormente ser citado que a cinza pesada não tem grande relevância na indústria de construção civil, há pesquisas importantes sobre o tema. De acordo com Pozzobom (1999), substituir a matéria-prima usada convencionalmente pela cinza pesada é economicamente vantajoso devido à redução do valor unitário de um componente pré-fabricado. Ademais, Farias (2005) avalia que o uso de misturas solo/cinza pesada pode ser empregada na pavimentação, no intuito de fornecer a estabilização granulométrica.

2.2.2 Cinza da lenha

Segundo Grigoletti (2001), a lenha é a fonte energética de maior uso nas indústrias, e possui a vantagem de poder sequestrar carbono, eliminando o CO_2 gerado na sua queima por meio da absorção pela biomassa cultivada.

A combustão da madeira gera cinzas, as quais, de acordo com Andrade (2012), podem ser provenientes de caldeiras. A queima acontece de acordo com a regulagem e a eficiência do equipamento. Ainda segundo a autora, a caracterização média da cinza depende dos parâmetros da região em que o resíduo foi gerado, no geral, atribuindo-se formato sólido e irregular.

Ademais, Andrade (2012) também relata em sua pesquisa a utilização da combinação da cinza de madeira, lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA) e resíduos de produção da cal como matéria-prima para a fabricação tanto de tijolos quanto de blocos.

Borlini *et al* (2005) apresentam em sua pesquisa as características das cinzas de lenha de eucalipto (*Eucalyptus*) obtidas em fornos cerâmicos, na cidade de Campos dos Goytacazes - RJ. Estas cinzas possuíam, predominantemente, carbonato de cálcio em sua composição, aglomerados de partículas esféricas e porosas, em sua maioria, com um tamanho médio de valor 0,15 mm.

Além disso, Brito e Barrichelo (1979) relatam o baixo teor de cinzas de madeira produzido, em geral, representa menos de 1% em relação ao peso. Os autores também afirmam que o teor de cinzas aumenta quando obtidas da casca. Além disso, o crescimento do teor pode estar relacionado às incrustações de solo na casca. A composição química da madeira foi objeto

de estudo para esses autores, sendo esta composição constituída por carbono (50,2%), hidrogênio (6,1%), nitrogênio (0,2%), oxigênio (43,4%) e cinzas (0,2%).

Ademais, Brito e Barrichelo (1979) também alegam em sua pesquisa que a produção de minerais não-metálicos, incluindo olarias e cerâmicas, e a produção de alimentos, dando destaque às padarias, seriam os maiores consumidores de lenha no Brasil.

Dessa forma, devido ao grande uso de madeira pela indústria, a silvicultura (termo que se relaciona a uma floresta plantada destinada à extração de matéria-prima) ganhou destaque, evitando o desmatamento de árvores nativas. Carvalho (2019) explica que a silvicultura tem como um dos propósitos a evolução da produção sustentável da madeira.

Ademais, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), para o ano de 2023, a quantidade de lenha de eucalipto produzida em 2022 com a prática da silvicultura representa a grande maioria com aproximadamente 86,18% do total, seguida pela lenha de pinus (*Pinus*) com cerca de 6,16% da produção, ficando o restante com a junção das demais espécies.

2.2.3 Fábricas de cerâmica vermelha e a geração de cinzas têxteis

Dentro da construção civil, pode-se destacar a indústria de cerâmica vermelha, a qual, segundo Grigoletti (2001), possui matéria-prima abundante, possibilitando a incorporação de resíduos proveniente de outras indústrias, reutilização ou reciclagem quando a vida útil do produto está acabando, e possui conteúdo energético considerado baixo.

Em relação à fabricação de peças cerâmicas, Barga *et al* (2016) descrevem o processo industrial. De acordo com os autores, inicia-se na lavra da matéria-prima, podendo ser de dois a três tipos de material argiloso. Em seguida, são encaminhadas para estocagem no pátio e misturadas com água, trazendo plasticidade para a argila e, conseqüentemente, melhorando a sua trabalhabilidade, em que se segue uma proporção para cada um dos componentes. Ademais, são homogeneizadas e levadas para os laminadores, reduzindo a espessura do material.

Ademais, ainda em relação ao processo produtivo, Barga *et al* (2016) explicam que após passar pelo misturador e laminador, leva-se o material argiloso para a maromba. Neste equipamento o material adquire a forma desejada que pode ser a definitiva ou, ainda, pode ser conduzido para as prensas, como ocorre com os tijolos. Após a maromba, cortam-se os materiais para que adquiram a forma final, e são encaminhados para a secagem, que depende de fatores sazonais, como a região e o clima.

Por fim, em 2008, o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae), traz o processo produtivo das cerâmicas, mencionando que as peças secas irão para a etapa de queima, adquirindo tanto as características quanto as propriedades desejadas, e em

seguida, estocadas e inspecionadas para a retirada de peças defeituosas. Em relação aos fornos, Neri (2004) e Sales *et al* (2012) revelam que no Brasil a maioria é do tipo intermitentes (70%), seguido pelos fornos semi-contínuos (28%) e o restante pelos contínuos (2%).

Entende-se que toda atividade industrial produz resíduos, portanto, a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (Anicer), no ano de 2014, afirma que é importante que a política das empresas queira prevenir danos ao meio ambiente, otimizar processos e melhorar a qualidade do ambiente, exigindo mudança de postura e de engajamento entre líderes e colaboradores.

Bossel (1999) e Santos e Fernandes (2012) explicam que cada etapa da produção têxtil gera resíduos, seja a fase da fiação, da tecelagem, do beneficiamento ou confecção. Com isso, a indústria têxtil pretende reduzir os volumes de resíduos produzidos, buscando reutilizá-los ou reciclá-los, com a premissa de que o ciclo de vida do produto seja prolongado. Por exemplo, os tecidos com reciclados, tanto de garrafa PET quanto de algodão, são encontrados no mercado. Além disso, pode-se recuperar a soda cáustica nos processos de beneficiamento com o objetivo de o sistema ser realimentado.

Conforme Toniollo *et al* (2015), os corantes usados para tingir o algodão têm elementos na composição que ao entrar em contato com os recursos hídricos podem contaminá-los. Além disso, os autores relatam a dificuldade da remoção dos corantes devido à sua solubilidade, podendo causar modificações nos recursos naturais e nos seres vivos pertencentes ao ecossistema devido ao impedimento da passagem de luz solar, causando alteração na fotossíntese. Ademais, a saúde humana também foi pauta desse estudo, pois esses componentes são tóxicos e podem estar associados, se ingeridos, às doenças como câncer de bexiga e câncer do fígado.

Em relação à aplicação dos resíduos têxteis, Avelar (2012) apresenta o lodo biológico, com composição, geralmente, de matéria orgânica em altos teores, elementos químicos como nitrogênio e fósforo, micronutrientes, metais pesados e agentes patogênicos. Ainda de acordo com a autora, o lodo pode ser empregado na agricultura, além de incinerado ou estabilizado. Caso aconteça a estabilização, pode ser usado na combustão de energia, reforçando a explicação feita por Bastian *et al* (2009) sobre o lodo biológico têxtil em caldeiras de biomassa.

Dessa forma, conclui-se que os resíduos têxteis são produzidos em grandes volumes, onde a grande maioria é destinada aos aterros sanitários, gerando impactos na natureza. Além disso, devido à toxicidade dos resíduos, suas aplicações acabam sendo

ambientalmente restritas, o que pode induzir a um menor interesse sobre a reintrodução do resíduo têxtil na cadeia industrial.

Diferentemente do que foi visto nos resíduos da queima do carvão mineral e da lenha, as cinzas têxteis são dificilmente estudadas; há pouquíssimas informações sobre elas na literatura, principalmente sobre a sua empregabilidade. Dessa forma, ao buscar atender a premissa de diminuir o descarte de resíduos sólidos por meio de aplicações sustentáveis, novas pesquisas podem ser desenvolvidas sobre os resíduos da indústria têxtil, que têm características pouco exploradas, possibilitando a ampliação das incorporações. Portanto, a utilização das cinzas têxteis pode ser uma alternativa pertinente.

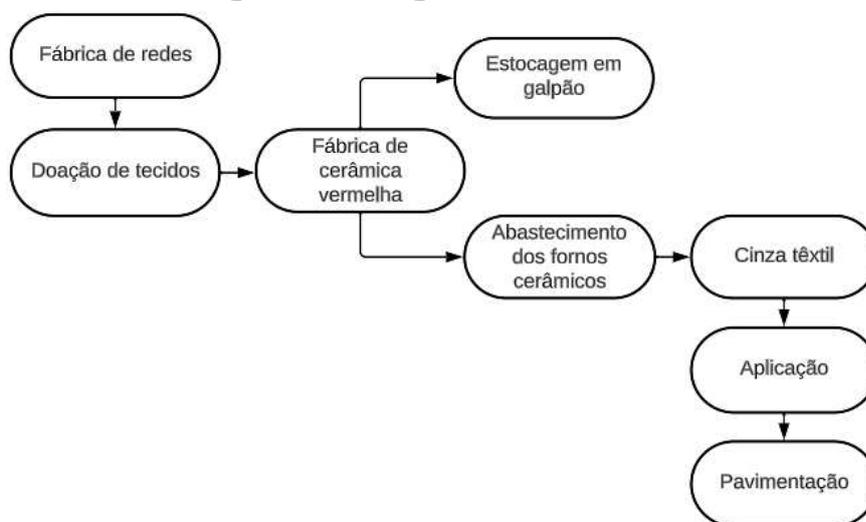
Muitas fábricas que produzem tecido não têm alternativa do que fazer com o volume sem finalidade de retalhos acumulados, como a indústria têxtil, da cidade de Jaguaruana – CE, focada na confecção de redes. Além disso, no município de Russas, também no estado do Ceará, tem-se percebido a incorporação de resíduos têxteis como combustível nos fornos cerâmicos.

Dessa forma, parcerias foram criadas entre os setores têxteis e de cerâmica vermelha, de modo que se percebe um custo-benefício ambiental importante de ser analisado. A parceria Jaguaruana - Russas se procede da seguinte maneira:

- Os tecidos são doados, dessa forma, a despesa da fábrica de cerâmica é inerente apenas ao traslado entre os dois municípios;
- Antes de serem transportados, os tecidos são prensados para reduzir o volume ocupado;
- Ao chegar na cerâmica, a destinação é dividida entre a estocagem em um galpão e o abastecimento dos fornos;
- A máquina enchedeira auxilia no transporte dos tecidos até os fornos;
- A quantidade de material para abastecimento deve ser suficiente para manter os fornos ativos por 2 ou 3 dias;
- Em relação ao estoque, a reposição acontece quando existe alguma pausa no fornecimento da fábrica têxtil, como feriados ou recessos.

Sendo assim, o material que acumulava espaço nas fábricas de rede, atualmente são destinados para a alimentação dos fornos cerâmicos. Porém, para fechar o ciclo dentro da cadeia produtiva, pode-se analisar a incorporação da cinza têxtil proveniente desses fornos no ramo de pavimentação de estradas, já que outras cinzas industriais são viavelmente empregadas. A Figura 1 representa o processo geral da cinza têxtil nesta pesquisa.

Figura 1 - Fluxograma da cinza têxtil



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

2.2.4 Pavimentação

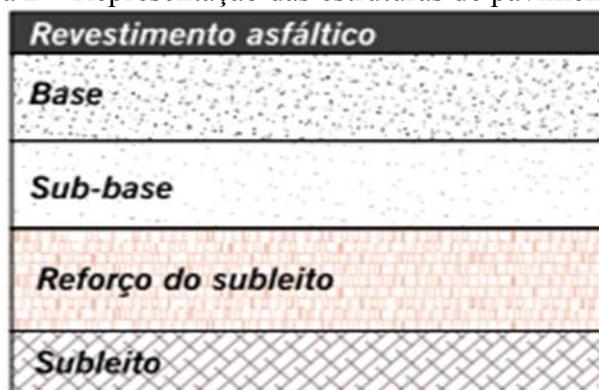
O DNIT (2006) classifica os pavimentos em flexíveis, semirrígidos e rígidos. Para Vicente (2022), os pavimentos flexíveis são caracterizados quando as cargas aplicadas conseguem se distribuir de maneira similar entre as camadas, sofrendo deformação elástica, enquanto os pavimentos semirrígidos se relacionam com a base constituída de materiais que possuem características cimentícias, e por fim, como o próprio nome sugere, os rígidos têm a camada de revestimento muito mais rígida que as demais, absorvendo as tensões aplicadas. Para Souza (2023), os pavimentos flexíveis são a maioria no Brasil.

Em relação aos componentes do pavimento, Vicente (2022) explica:

- Subleito: fundação do pavimento que recebe o peso da estrutura e as outras cargas aplicadas;
- Reforço de subleito: executada quando há a necessidade de reforçar o subleito quando este apresenta baixa capacidade de suporte, bem como, para reduzir a espessura da sub-base;
- Sub-base: faz a complementação da base e o seu desempenho é similar com a da camada de reforço de subleito;
- Base: fica acima da sub-base, do subleito ou reforço de subleito, absorvendo as cargas e distribuindo adequadamente para as camadas abaixo;
- Há a camada de rolamento ou revestimento, cuja função é sugerida pela designação.

Em relação aos componentes de um pavimento-tipo, a Figura 2 apresenta as estruturas constituintes.

Figura 2 – Representação das estruturas de pavimento-tipo



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al* (2022).

Segundo Roza (2018) e Souza (2023), devido ao estado de tensões ao qual o pavimento está submetido, a mudar conforme a rigidez de cada uma das camadas e da combinação entre elas, a etapa da escolha dos materiais que irão constituir as camadas é fundamental.

2.2.4.1 Classificação dos solos

Conforme Neves *et al* (2009), no âmbito da engenharia, o solo advém da decomposição das rochas, com constituição química e mineral que dependem do material rochoso de que foi originado, além das características do relevo, do clima e da duração da exposição às ações do intemperismo. Os autores também explicam que os solos são classificados pelas propriedades tanto físicas quanto químicas, bem como, minerais.

Ademais, ainda segundo Neves *et al* (2009), os solos são designados conforme a genética, a granulometria e sua pedologia. Quando classificados geneticamente podem ser pedogenéticos, saprolíticos e transportados. Em relação a sua granulometria se classificam em arenosos, argilosos e siltosos. Por fim, quando há a classificação pedológica, se estudam horizontes (superficial), subsolos e rocha de origem.

De acordo com Das (2007) e Dias (2016), os sistemas de classificação fornecem uma linguagem que explica as características gerais atribuídas ao solo, apresentando dois tipos em relação a granulometria e limites de Atterberg: o *Highway Research Board* (HRB) pertencente a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), atualmente denominado de *Transportation Research Board* (TRB), utilizado em

sua maioria pelos departamentos rodoviários, e o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), preferível na engenharia geotécnica.

Segundo o DNIT (2006), a classificação TRB, apresentada na Figura 3, reúne os solos em grupos e subgrupos conforme suas características granulométricas, limites de Atterberg e índice de grupo. Ademais, tem-se que os solos granulares, dos grupos A-1, A-2 e A-3, são os que possuem até 35% do material passante na peneira de nº 200. Os solos finos pertencem aos grupos A-4, A-5, A-6, e A-7, e contêm quantidade passante maior que 35% na peneira nº 200. Vale salientar que os grupos A-1, A-2 e A-7 possuem subdivisões.

Figura 3 - Classificação TRB

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	50 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia		Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos		
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT (2006).

Para a classificação SUCS, representada na Figura 4, o DNIT (2006) considera as características das porcentagens de pedregulhos, areias e finos, além da forma da curva granulométrica e dos parâmetros de plasticidade e compressibilidade. Com isso, pode-se fazer a seguinte divisão referente à peneira nº 200:

- Solos grossos: mais de 50% de material retido;
- Solos finos: mais de 50% de material passante.

Figura 4 - Classificação SUCS

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

Fonte: DNIT (2006).

Em se tratando da pavimentação, há requisitos que precisam ser atendidos. Segundo Barros (2015), quando as condições não são satisfeitas, há técnicas que podem ser empregadas para que as propriedades do solo melhorem, como a estabilização.

Dias (2016) relata que na estabilização de solos há parâmetros da utilização de agregados considerados não convencionais para que bases e sub-bases se estabilizem granulometricamente, além da viabilização técnica para que materiais reciclados sejam aplicados nas camadas de pavimento.

Segundo Neves *et al* (2009), todo processo em que o solo consegue melhorar suas características para atender adequadamente sua finalidade, chama-se de estabilização. Para Rebelo (2009) e Dias (2016), os métodos de estabilização são mecânica, granulométrica e química.

Dias (2016) reforça o que Medina e Motta (2004) explicam sobre a estabilização mecânica poder ser dividida em dois tipos: mecânica por compactação e granulométrica, sendo a primeira forma o melhoramento que se dá com a densidade máxima referente a determinada energia de compactação e umidade ótima.

Em relação à estabilização granulométrica, Senço (2007) descreve o processo como a obtenção de um material graduado de forma densa e uma fração que é fina plástica limitada, pela mistura de dois solos ou mais.

Por fim, a estabilização química do solo é conceituada por Santos *et al* (1995) como a adição de produto químico para que provoque alterações que influenciem na resistência mecânica, na permeabilidade e na deformabilidade.

2.2.5 Uso de cinzas na pavimentação

Conforme Dias (2004) existe um predomínio na empregabilidade dos agregados reciclados nas camadas de base e sub-base, tanto nacionalmente quanto no exterior. Além disso, conforme o autor, as experiências se referem aos resíduos da construção civil, principalmente, os materiais cimentícios, os cerâmicos e os solos. Grubba (2009) alega que a maioria dos resíduos de construção são inertes e recicláveis, por exemplo, os restos de argamassas e materiais cerâmicos.

Em estudos realizados por Maciel e Gonçalves (2020) sobre a aplicação de cinzas de carvão mineral na pavimentação asfáltica, obteve-se em conformidade com as normas referentes a análise granulométrica, estabilidade, volume de vazios, relação betume e vazios, e vazios de agregado mineral, quando se usou o teor ótimo de 4,5% e a substituição da areia pela cinza.

Com isso, ainda de acordo com Maciel e Gonçalves (2020), é possível fazer aplicações tecnológicas das cinzas na mistura do revestimento asfáltico, pois os parâmetros citados anteriormente dizem respeito à rigidez, permeabilidade, durabilidade, deformação permanente e resistência à fadiga, ademais, a aplicação evita que as cinzas sejam descartadas inadequadamente, diminuindo seus impactos ao meio ambiente.

As pesquisas realizadas por Vasconcelos *et al* (2019) com as cinzas de carvão mineral abordaram as seguintes misturas: 50% cinza / 50% solo; 95% cinza / 5% cal, apresentando-se aptas de forma técnica e ambiental para serem empregadas em pavimentos, pois apresentaram desempenhos satisfatórios nas análises mecânicas e empíricas.

Em relação às cinzas da lenha, estudos sobre a aplicação de cinzas de pinus na construção de pavimentos realizado por Barros e Mello (2017) mostram que é tecnicamente possível, se adicionadas parcialmente como *filler*, pois os resultados foram satisfatórios no concreto asfáltico, porém não houve mudanças favoráveis na mistura asfáltica.

Barros e Mello (2017) também explicam que a cinza não interagiu bem com o ligante e reduziu a densidade da fração por conta da baixa massa específica, aumentando de forma excessiva o consumo de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), sendo economicamente inviável. É ressaltado que se for analisado a longo prazo, há benefícios ambientais, pois evitam medidas a serem empregadas futuramente para reduzir a poluição causada pelas cinzas.

Já em relação à cinza de eucalipto em pavimentos flexíveis, os resultados obtidos por Lima *et al* (2021) não atenderam as normas referentes à pavimentação, pois não foi possível obter os valores de limites de liquidez e plasticidade, sendo um material não plástico. Além disso, a densidade seca foi baixa nos ensaios de compactação, com isso, nem a densidade seca

máxima nem a umidade ótima foram determinadas, concluindo que é um material sem estabilidade e resistência.

Logo, após a abordagem de pesquisas envolvendo as cinzas de carvão mineral e da lenha para fins de pavimentação, será feito o estudo para analisar a viabilidade do emprego de misturas solo/cinza têxtil como camadas de sub-base.

3 METODOLOGIA

Foram realizadas as coletas e preparações das amostras de solo e cinza têxtil. A mistura entre os dois materiais foi elaborada em diferentes proporções para que o comportamento mecânico da cinza fosse melhor analisado. Os ensaios de caracterização geotécnica, química e mecânica foram executados. Vale salientar que os ensaios foram realizados nas dependências físicas do Laboratório de Construção Civil (LCC) e do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LAMSP), ambos pertencentes a Universidade Federal do Ceará (UFC) do Campus Russas.

Com os experimentos, foi possível analisar a empregabilidade da cinza têxtil proveniente de fornos cerâmicos para fins de pavimentação, sendo os primeiros estudos na literatura sobre esse tema. A Figura 5 apresenta a metodologia utilizada neste estudo.

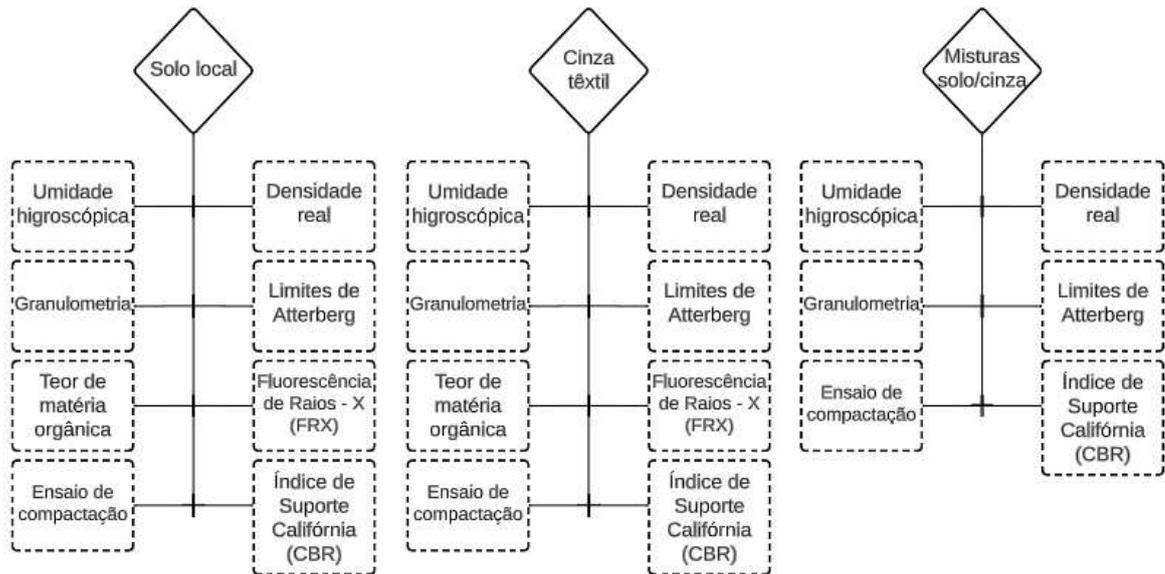


Fonte: Elaborada pela autora (2023).

3.1 Programa experimental

Este tópico tem o objetivo de apresentar os ensaios de caracterização que foram realizados no solo local, na cinza têxtil e nas misturas solo/cinza. A Figura 6 mostra a esquematização desse programa de ensaios.

Figura 6 – Programa experimental



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

3.1.1 Caracterização geotécnica

Na caracterização geotécnica foram realizados os ensaios normatizados de umidade higroscópica, granulometria por peneiramento e sedimentação, densidade real, e limites de Atterberg.

a) Umidade higroscópica

O ensaio de umidade higroscópica foi realizado de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a) - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Assim sendo, realizou-se o ensaio em triplicata e considerou-se a média aritmética dos valores obtidos como o resultado final.

b) Limites de Atterberg

Os ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) foram realizados, respectivamente, de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2016b) - Solo - Determinação do Limite de Liquidez, e NBR 7180 (ABNT, 2016c) - Solo - Determinação do Limite de Plasticidade.

c) Granulometria por peneiramento e sedimentação

Os ensaios de peneiramento grosso, fino e sedimentação foram realizados conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016d) - Solo - Análise Granulométrica. O conjunto de peneiras utilizado para cada peneiramento está descrito a seguir:

- Peneiramento grosso: 38 mm, 25,4 mm, 19,1 mm, 9,52 mm, 4,76 mm e 2 mm;

- Peneiramento fino: 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm.

A sedimentação foi executada com a solução defloculante hexametáfosfato de sódio de concentração 45,7 g/L, e pH 8,5.

d) Densidade real

A densidade real foi realizada segundo a ME 093 (DNER,1994a). O solo local e a mistura de 30% cinza têxtil foram ensaiados a uma temperatura de 25°C, no LASMP, enquanto a cinza têxtil e as demais misturas tiveram o ensaio realizado em temperatura de 29°C, no LCC. Com isso, corrigiu-se a temperatura conforme a preconização da norma supracitada.

3.1.2 Caracterização química

Para a caracterização química executaram-se os ensaios de espectrometria de Fluorescência de Raios - X e de teor de matéria orgânica.

a) Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX)

Esta é uma técnica não destrutiva que consiste na identificação dos elementos químicos. Esse ensaio foi realizado para as amostras de solo local e cinza têxtil em parceria com o Laboratório de Caracterização dos Materiais da UFC Campus Russas. Ademais, as amostras preparadas foram passadas na peneira de granulometria 0,075 mm e armazenadas, cada uma, em *ependorfs*. O equipamento usado para a realização do FRX foi o ZSX Mini II – Rigaku.

b) Teor de matéria orgânica

O ensaio foi executado com aproximadamente 5 gramas das amostras de solo local e de cinza têxtil, preparadas conforme o método, de 2017, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Em seguida, as quantidades de cada material foram colocadas em cadinhos de porcelana na estufa durante 24 horas a uma temperatura de 65°C. Após as 24 horas em estufa, as amostras de solo e cinza foram retiradas e seguiu-se o previsto por Embrapa (2017), com a utilização da mufla a 600°C durante 6 horas e a pesagem dos resíduos nos cadinhos.

3.1.3 Caracterização mecânica

Para esta caracterização, foram realizados os ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia nas amostras de solo local, cinza têxtil e de suas misturas. Esses ensaios serão abordados ao final da metodologia.

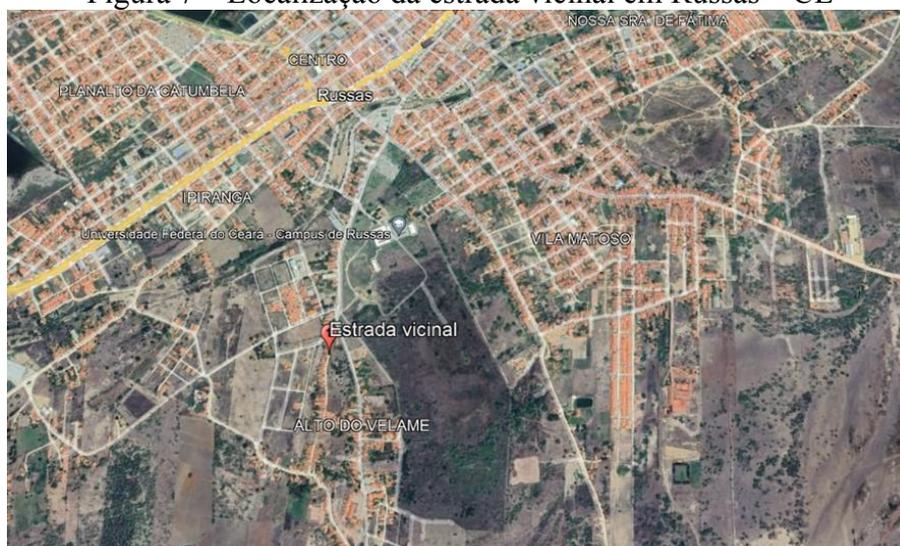
3.2 Materiais

Os materiais usados para os experimentos desta pesquisa estão descritos nos itens 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3.

3.2.1 Solo local (SI)

As amostras do solo local (SI) foram coletadas em uma estrada vicinal, ou seja, via sem revestimento asfáltico, localizada no bairro Cidade Universitária, município de Russas-CE. A coleta foi realizada manualmente com o auxílio de enxada e pá, além disso, houve restos de vegetação junto ao solo coletado. Ademais, o transporte se deu de forma segura em baldes disponibilizados pela UFC Campus Russas. Após a coleta e o acondicionamento em baldes plásticos, as amostras foram transportadas e armazenadas no LCC. A Figura 7 representa a localização da estrada vicinal, com coordenadas geográficas 4°57'03.44"S e 37°58'34.54"O.

Figura 7 – Localização da estrada vicinal em Russas – CE



Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2023).

O Quadro 1 apresenta um resumo dos ensaios realizados com o solo local. Ademais, na Figura 8 estão ilustradas as etapas de coleta e peneiramento desse solo.

Quadro 1 – Ensaio de caracterização do solo local

Ensaio	Método
Preparação de amostras	NBR 6457/2016
Umidade higroscópica	NBR 6457/2016
Densidade real	DNER – ME 093/94
Granulometria por peneiramento e sedimentação	NBR 7181/2016
Limite de Liquidez	NBR 6459/2016
Limite de Plasticidade	NBR 7180/2016
Composição química	Fluorescência de Raios - X
Matéria orgânica	Embrapa (2017)

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 8 – Coleta e peneiramento do solo local: a) Coleta do solo local na estrada vicinal; b) Peneiramento grosso do solo local; c) Peneiramento fino do solo local.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

3.2.2 Cinza têxtil (Ct)

A cinza têxtil (Ct) foi obtida a partir da queima de tecidos de redes em fornos cerâmicos. As amostras de cinza foram doadas pela Cerâmica do Liro, também localizada em Russas-CE, distante a 9 km do Campus de Russas da UFC. A Figura 9 exhibe a localização dessa fábrica, com coordenadas geográficas 4°58'12.77"S e 37°56'25.85"O.

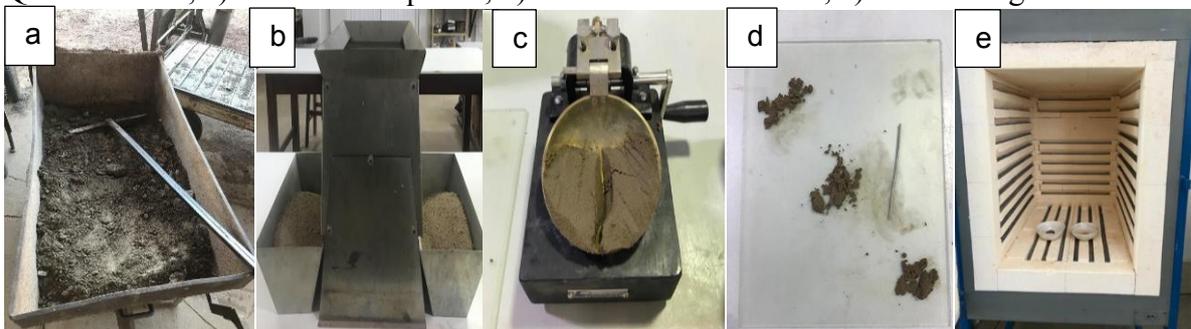
Figura 9 - Localização da fábrica da Cerâmica do Liro em Russas – CE



Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2023).

Os colaboradores da fábrica explicaram que os tecidos são fornecidos à cerâmica por uma indústria localizada no município de Jaguaruana-CE, que se localiza a 29 km do município russo. Em relação a coleta das cinzas têxteis, realizou-se com a ajuda da equipe de funcionários da cerâmica, sendo transportadas em sacos de *nylon* e armazenadas no LCC. Ademais, foi realizado o mesmo passo a passo que a caracterização do solo local. Na Figura 10 estão dispostas imagens da coleta e algumas etapas da caracterização da cinza têxtil.

Figura 10 – Coleta e ensaios de caracterização da cinza têxtil: a) Obtenção da cinza; b) Quarteamento; c) Limite de Liquidez; d) Limite de Plasticidade; e) Matéria orgânica.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

3.2.3 Misturas SI e Ct

Após a caracterização dos materiais SI e Ct, seguiu-se para a caracterização das misturas solo/cinza. Os teores usados foram baseados nos estudos de Farias (2005), com as proporções de cinza em 30%, 50% e 70%, denominadas, respectivamente, de M30, M50, M70, conforme encontra-se descrito na Tabela 1. Ademais, os ensaios de caracterização química não foram realizados para as misturas.

Tabela 1 - Proporções de solo local e cinza têxtil para as misturas M30, M50 e M70

Mistura	SI (%)	Ct (%)
M30	70	30
M50	50	50
M70	30	70

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

3.3 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação foi executado considerando a energia intermediária, com 26 golpes por camada. Essa energia foi a escolhida pelo fato de as análises das amostras estudadas serem para aplicação do material em camada de sub-base. Lima (2019) alega que essa energia é a mais comum para o material aplicado em pavimentação. Após a realização do ensaio, obtiveram-se os dados de umidade ótima e de massa específica aparente seca máxima. Visando a obtenção da curva de compactação, repetiu-se o ensaio cinco vezes.

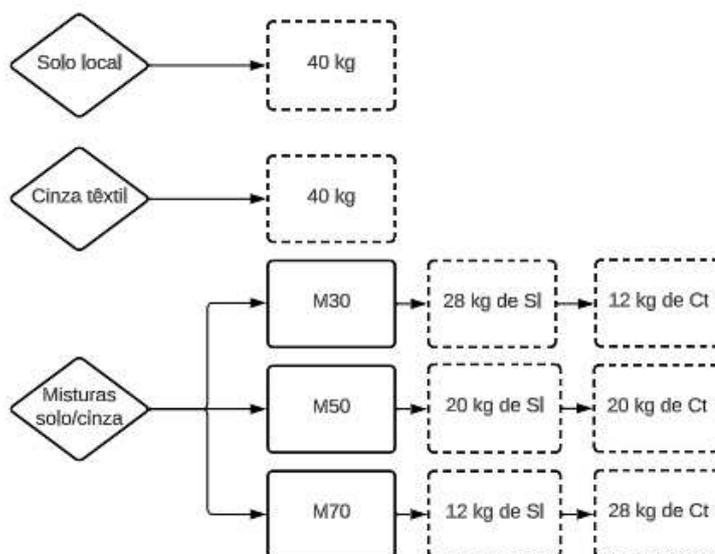
Por fim, as compactações do solo local, cinza têxtil e misturas M30, M50 e M70 foram realizadas em parceria com a construtora Samaria LTDA, na cidade de Fortaleza-CE, utilizando as preconizações do ME 129 (DNER, 1994b), que trata sobre a compactação de solos utilizando amostras não trabalhadas.

3.4 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia, conhecido na língua inglesa como *California Bearing Ratio* (CBR), também foi realizado em parceria com o laboratório da Samaria LTDA. Executou-se o ensaio para o SI, a Ct, e as três proporções de misturas M30, M50 e M70. A logística de transporte entre o Campus de Russas da UFC e a construtora se deu da seguinte forma: o solo e a cinza foram colocados em baldes, devidamente limpos, lacrados e identificados para evitar a contaminação e as perdas do material, enquanto as misturas M30, M50 e M70 foram transportadas e armazenadas em sacos de *nylon*, limpos e identificados.

As quantidades escolhidas para o material do CBR foram pensadas nas eventuais perdas de material e repetição do ensaio. Na Figura 11 encontra-se ilustrado o detalhamento das quantidades de material utilizadas nesse experimento.

Figura 11 - Quantidades preparadas para o ensaio do Índice de Suporte Califórnia

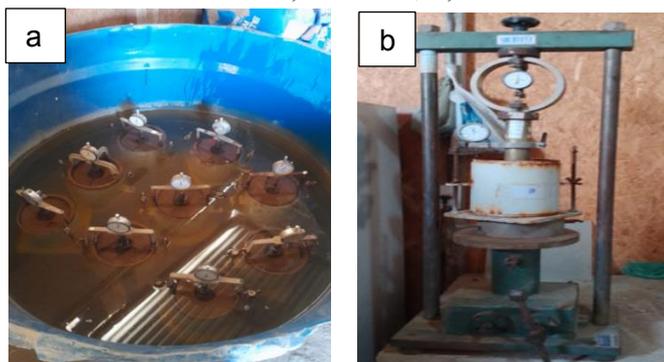


Fonte: Elaborada pela autora (2023).

O ensaio foi executado conforme a norma ME 049 (DNER, 1994c), que trata sobre a determinação do Índice de Suporte Califórnia em solos, utilizando amostras não trabalhadas. Segundo Souza Júnior (2005), este é um ensaio de resistência à penetração em que se relaciona a uma resistência padronizada para as penetrações de 2,5 e 5 mm, em que o corpo de prova é rompido após 4 dias imersos na água. Além disso, o autor afirma que os principais fatores que interferem nos resultados do ensaio são a umidade, a densidade e a textura do material.

Após o ensaio, a capacidade de suporte das amostras forneceu a análise da viabilidade da aplicação da cinza têxtil na camada de sub-base. Na Figura 12 encontram-se ilustradas algumas etapas do ensaio.

Figura 12 – Ensaio CBR: a) Imersão; b) Prensa usada no ensaio.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico será feita a apresentação dos resultados bem como a análise relacionada aos ensaios de caracterização das amostras de solo local, cinza têxtil, e misturas M30, M50 e M70. Cada ensaio foi feito de acordo com as normas descritas no item 3.1 da seção anterior.

4.1 Caracterização geotécnica

a) Umidade higroscópica

O ensaio de umidade foi realizado para as amostras de solo local, cinza têxtil, e misturas M30, M50 e M70. Os resultados encontram-se dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de umidade higroscópica do SI, Ct, e misturas M30, M50 e M70

Umidade higroscópica (%)				
SI	Ct	M30	M50	M70
0,52	0,67	0,61	0,58	0,68

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Entende-se que quanto menor a umidade higroscópica, menor é a capacidade de retenção de água, devido à predominância da fração arenosa presente na composição granulométrica. Ademais, apesar de a umidade ter aumentado com o incremento da cinza têxtil, o material continua apresentando baixa retenção de água, o que é ideal para sua função como sub-base de pavimento.

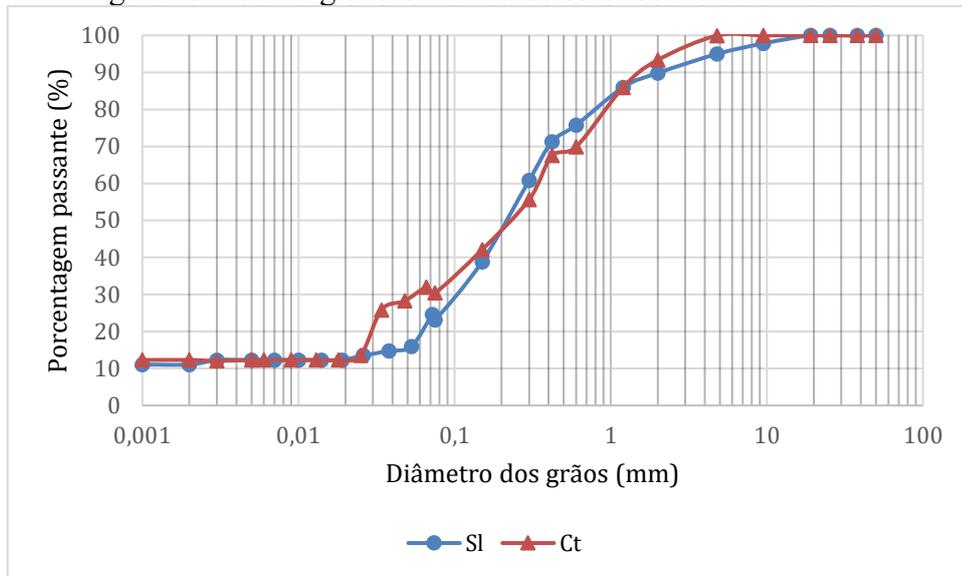
b) Limites de Atterberg

Com a obtenção desses limites, concluiu-se que o solo local, a cinza têxtil, e as misturas M30, M50 e M70 são não plásticos e não líquidos. Logo, o índice de plasticidade (IP) é zero, já que sua obtenção resulta da diferença entre o LL e o LP. Entende-se que um material com baixos valores de plasticidade e liquidez apresentam menores deformabilidade e trabalhabilidade, aspectos adequados na pavimentação.

c) Granulometria por peneiramento e sedimentação

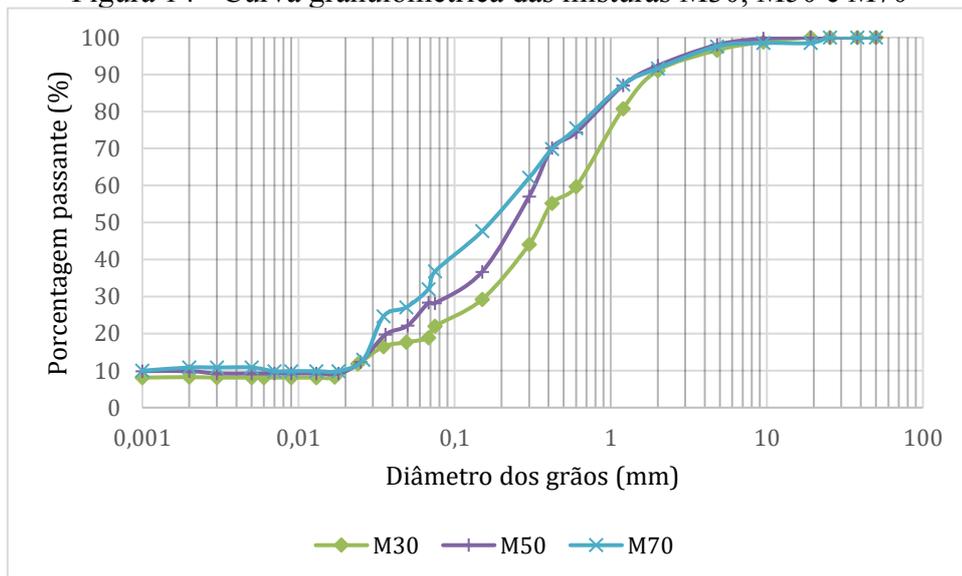
As curvas granulométricas do solo local e da cinza têxtil estão ilustradas na Figura 13, enquanto a Figura 14 ilustra a granulometria das misturas M30, M50 e M70.

Figura 13 - Curva granulométrica do solo local e da cinza têxtil



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 14 - Curva granulométrica das misturas M30, M50 e M70



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A partir da granulometria, limites de Atterberg e índice de grupo, foi possível classificar o solo, a cinza têxtil e as misturas utilizando a classificação do TRB, como consta na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação TRB das amostras Sl, Ct, e misturas M30, M50 e M70

CLASSIFICAÇÃO TRB					
Descrição	Sl	Ct	M30	M50	M70
% passante na peneira 2,0 mm	89,822	93,334	91,015	92,375	91,648
% passante na peneira 0,42 mm	71,229	67,511	55,239	70,092	69,832
% passante na peneira 0,075 mm	23,128	30,453	24,974	28,228	36,797
IP (%)	0	0	0	0	0
IG	0	0	0	0	7
Classificação	A-3	A-3	A-3	A-3	A-4
Denominação	Areia fina	Areia fina	Areia fina	Areia fina	Silte

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Assim sendo, o solo local, a cinza têxtil, e as misturas M30 e M50 são classificados como areia fina, enquanto a mistura M70 se classifica como silte. Além disso, nota-se o aumento da quantidade de finos com a incorporação da cinza têxtil ao solo.

Ademais, tem-se que o índice que retrata o aspecto de plasticidade e graduação das partículas, ou seja, o índice de grupo (IG), deve ser zero para a aplicação do material em camada de sub-base, de acordo com o DNIT (2006). Considerando a classificação do TRB, apenas a mistura M70 não pode ser empregada como sub-base devido ao IG de 7.

d) Densidade real dos grãos

Os resultados obtidos de densidade real para o solo local, a cinza têxtil e as misturas estão ilustrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Densidade real do Sl, Ct, e misturas M30, M50 e M70

Densidade real dos grãos				
Sl	Ct	M30	M50	M70
2,56	2,73	2,82	2,67	2,64

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Percebe-se que a cinza têxtil teve uma densidade real maior que o solo local. Além disso, vale ressaltar que ao analisar as misturas M30, M50 e M70, percebe-se que os valores de densidade real diminuíram com o aumento do teor da cinza têxtil.

4.2 Caracterização química

a) Teor de matéria orgânica

Os resultados encontrados para o teor de matéria orgânica do solo local e cinza têxtil estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Matéria orgânica do SI e Ct

Teor de matéria orgânica (g/kg)	
SI	Ct
25,79	79,68

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

De acordo com os parâmetros apresentados por Sobral *et al* (2015), o valor assumido para a matéria orgânica do solo local se caracteriza como médio, o que pode estar relacionado com os vestígios de vegetação rasteira presentes na coleta do solo.

Já a cinza têxtil possui alta quantidade de matéria orgânica, o que pode ser atribuído às impurezas que não foram queimadas no forno cerâmico devido a não uniformidade da queima.

b) Espectrometria de fluorescência de Raios - X (FRX)

A Tabela 6 apresenta a análise semi-quantitativa do solo local.

Tabela 6 - FRX do solo local

Elemento	% em massa
Si	61,92
Al	16,97
K	7,26
Ca	5,64
Fe	5,19
Mg	1,83
Ti	1,02
S	0,10
Sr	0,05
Rb	0,03

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Percebe-se que a porcentagem de silício é predominante, seguido por alumínio. Possivelmente, o silício é devido à presença de quartzo no solo, enquanto o alumínio seja, provavelmente, devido à caulinita.

Em relação às cinzas, a técnica de espectrometria de Fluorescência de Raios - X já foi bastante aplicada para a caracterização. Em Irigon (2021), a cinza pesada proveniente das termoelétricas de carvão mineral apresentou o FRX com predominância da sílica (68,01%), seguida por alumina (16,91%) e óxido férrico (8,16%), além disso, constatou-se baixos teores de óxido de cálcio (3,22%) e óxido de potássio (1,85%).

Tratando-se da cinza de madeira, estudos feitos por Silva *et al* (2020) com as cinzas de lenha obtidas de forno de olaria, apresentam o FRX com maior predominância em óxido de cálcio, e em seguida, pela sílica, com teores de 39,35% e 2,13%, respectivamente. Obteve-se apenas 1,29% de óxido férrico. Já a cinza têxtil proveniente da queima dos tecidos de redes em fornos cerâmicos, tem em sua composição altos teores de cálcio (60,49%), seguido por magnésio (12,77%) e silício (10,8%). Ademais, o restante dos minerais soma aproximadamente 15,94% da composição da amostra. A Tabela 7 apresenta todos os elementos químicos obtidos com o FRX da cinza têxtil.

Tabela 7 - FRX da cinza têxtil

Elemento	% em massa
Ca	60,49
Mg	12,77
Si	10,80
K	2,42
Fe	2,12
Mn	2,09
Al	2,05
P	1,99
Cl	1,88
S	1,51
Ba	0,98
Ti	0,56
Sr	0,28
Zn	0,07

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

De acordo com Beltrame (2000), os corantes diretos têm baixo custo e fácil aplicabilidade, mas possuem baixa solidez em relação a lavagem, dessa forma, realiza-se um tratamento de fixação, em que são lavados em água dura após o tingimento, com isso, formam-se sais de cálcio e magnésio, o que pode explicar o fato de estes serem os principais compostos da cinza. Em relação aos demais elementos, podem ser provenientes dos pregos e grampos que são usados para auxiliar no transporte dos tecidos das redes, e acabam sendo prensados e incinerados juntos com os tecidos.

4.3 Caracterização mecânica

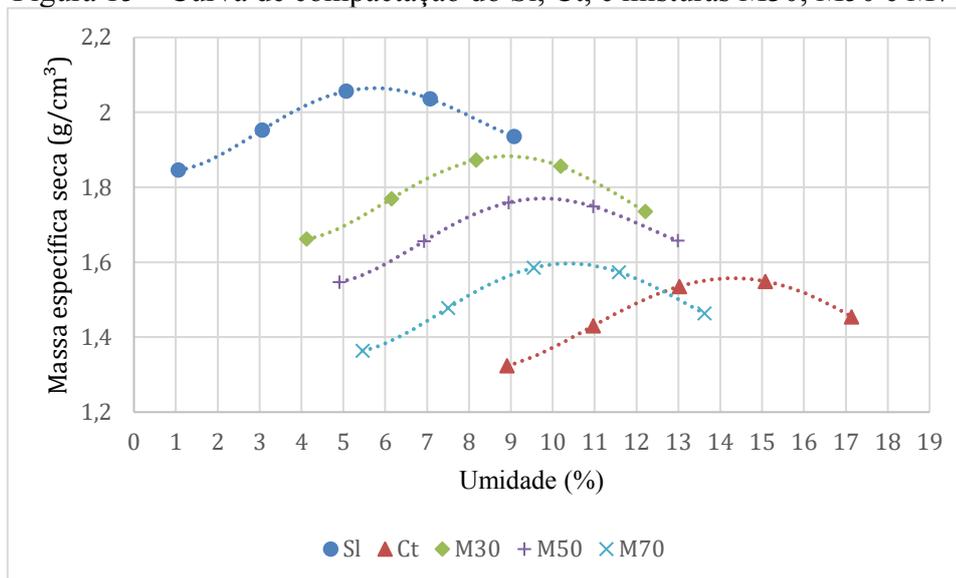
Os resultados obtidos a partir desta caracterização serão detalhados nos itens 4.3.1 e 4.3.2.

4.3.1 Ensaio de compactação

A Figura 15 mostra a curva de compactação de cada amostra usada na pesquisa, retratando que o aumento do teor de cinza têxtil na mistura diminuiu a massa específica aparente seca máxima, afirmando o mesmo comportamento visto em Farias (2005) quando analisou-se o comportamento mecânico da mistura de cinzas pesadas no solo não laterítico argiloso para aplicação em pavimentos. Ademais, Giannotti (2013) também obteve essa mesma tendência de resultado na aplicação de cinzas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em obras geotécnicas.

Em relação a umidade ótima, foi necessário adicionar mais água para atingir a densidade máxima na cinza pura e na mistura M70, ou seja, com o aumento da quantidade de cinza têxtil na mistura, maior foi a umidade ótima, obtendo um padrão proporcional entre cinza e umidade, comportamento diferente do que foi apresentado por Giannotti (2013), pois na pesquisa foram usadas as proporções de cinza em 20%, 30% e 40%, e na mistura de 30%, o teor de umidade ótima diminuiu em relação a de 20% e aumentou na proporção de 40%.

Figura 15 – Curva de compactação do Sl, Ct, e misturas M30, M50 e M70



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os resultados de massa específica seca máxima do solo local, cinza têxtil, e misturas M30, M50 e M70 estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da umidade ótima e massa específica seca máxima do SI, Ct, e misturas M30, M50 e M70

Amostras	Energia de compactação	Umidade ótima (%)	Massa específica seca máxima (g/cm ³)
SI	Intermediária	5,8	2,064
Ct	Intermediária	14,3	1,557
M30	Intermediária	8,9	1,883
M50	Intermediária	9,8	1,770
M70	Intermediária	10,4	1,597

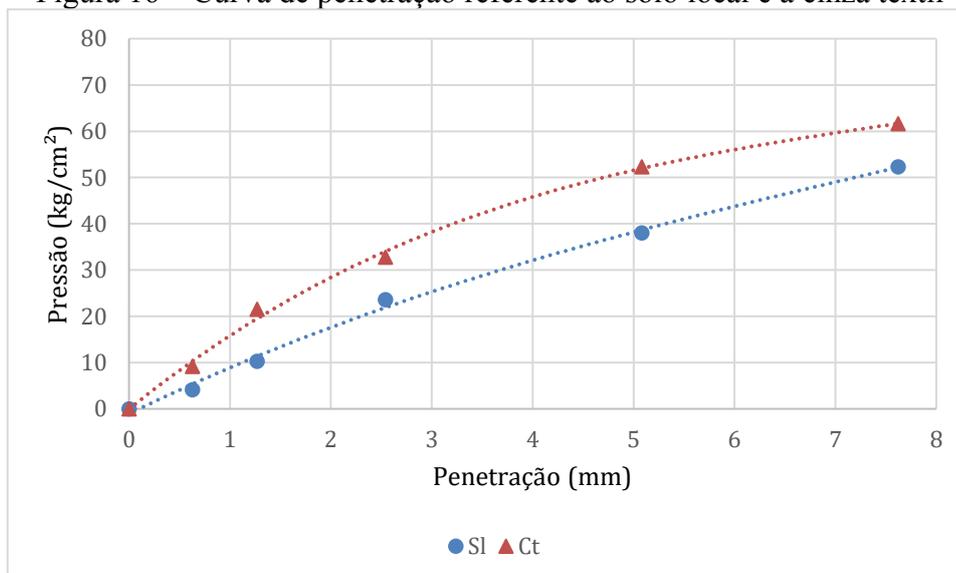
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

4.3.2 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O DNIT (2006) estabeleceu que para empregar um material na camada de sub-base deve-se atender ao $CBR \geq 20\%$, $IG = 0$ e expansão $\leq 1\%$.

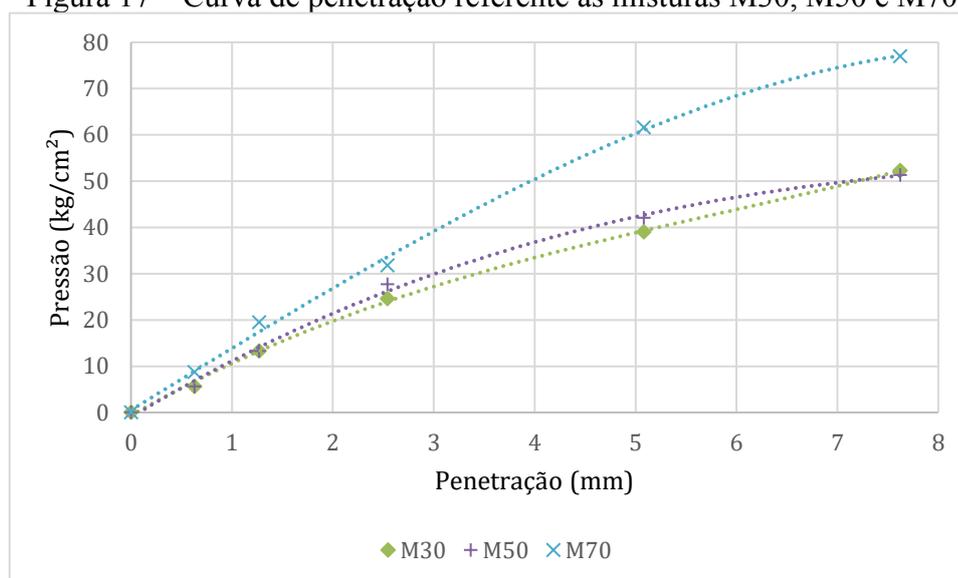
Em relação ao CBR, o DNIT (2006) tem tabelado prováveis valores de acordo com a classificação TRB, dessa forma, o solo local, a cinza têxtil, e as misturas de 30% e 50% devem apresentar CBR entre 15-40%, enquanto a mistura de 70% deve apresentar de 4-25%. Dessa forma, a Figura 16 representa a curva de penetração para o solo local e a cinza têxtil, enquanto a Figura 17 diz respeito à curva para as misturas M30, M50 e M70.

Figura 16 – Curva de penetração referente ao solo local e a cinza têxtil



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 17 – Curva de penetração referente às misturas M30, M50 e M70



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os resultados da expansão e CBR das amostras estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Expansão e CBR do SI, Ct, e misturas M30, M50 e M70

Amostras	Expansão (%)	CBR (%)
SI	0,1	36,2
Ct	0,1	49,8
M30	0,1	37,1
M50	0,1	40,1
M70	0,1	58,6

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Percebeu-se que o solo local, a cinza têxtil, e as misturas M30, M50 e M70 atenderam aos valores estabelecidos para a expansibilidade e CBR. Em relação aos possíveis valores que o DNIT (2006) tem tabelado para a classificação TRB, as amostras do grupo A-3 atenderam a esses valores de CBR, sendo que a mistura M50 passou por pouco do valor limite de 40%.

Em relação à mistura M70, classificada como A-4, o CBR obtido ultrapassou significativamente o valor máximo tabelado para o grupo. Portanto, é viável destacar que existem resultados da cinza têxtil que destoaram dos parâmetros normativos, o que pode ser relacionado à ausência de uma caracterização própria para as cinzas.

Ademais, em Farias (2005), as misturas solo/cinza pesada propiciaram melhorias geotécnicas no solo, pois aumentou-se o valor de capacidade de suporte e diminuiu-se a

expansibilidade. Apesar de ter aumentado a resistência do solo, a cinza têxtil não diminuiu a expansão. Com isso, e como já considerado anteriormente, os ensaios de caracterização do solo podem não ser adequados para explicar o comportamento de expansão da cinza têxtil em contato com a água.

Portando, considerando o CBR, a expansão, e o índice de grupo visto no item 4.1 dessa seção, a mistura M50 é a mais adequada para ser incorporada como camada de sub-base, pois atendeu a esses parâmetros, e apresentou maior capacidade de suporte dentre as misturas analisadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste tópico será abordada a conclusão obtida a partir dos objetos geral e específicos estabelecidos para esta pesquisa.

5.1 Conclusão

Por meio da revisão bibliográfica, apresentaram-se as cinzas industriais aplicadas na pavimentação para o melhoramento de solos. As cinzas de carvão mineral e de lenha foram abordadas devido à grande quantidade de pesquisas encontradas na literatura, trazendo como resultados o aumento da resistência do solo, que por vezes, apesar desse aumento, não tornou possível a aplicação em dadas camadas do pavimento por não atingirem a capacidade de suporte prevista em normativas.

Os resultados obtidos a partir da caracterização física, química e mecânica, apresentaram que a cinza têxtil se comporta como uma areia fina quando classificada pelo TRB, e como é característica de materiais granulares, essa cinza é não líquida e não plástica. Ademais, a cinza apresentou uma umidade ótima de 14,3%, com a massa específica aparente seca máxima de 1,557 g/cm³, além de expansibilidade de 0,1%, e CBR de 49%.

O aumento da proporção da cinza têxtil nas misturas com o solo diminuiu a massa específica aparente seca máxima, ao passo que tornou necessário aumentar os valores de umidade ótima. Ademais, as misturas possuíram a mesma expansibilidade de 0,1%, mas a capacidade de suporte aumentou com a adição dos teores de cinza, dessa forma, as misturas M30, M50 e M70 apresentaram, respectivamente, os seguintes valores de CBR: 37%, 40% e 58%. Dessa forma, apesar da mistura M70 possuir a maior capacidade de suporte, não se torna adequada para ser aplicada como sub-base devido ao Índice de Grupo dessa mistura ser igual a 7, destoando dos requisitos estabelecidos pelo DNIT (2006). Portanto, a mistura M50 é a mais adequada para a empregabilidade como camada de sub-base de pavimentos.

5.2 Recomendações para futuras pesquisas acadêmicas

- Dimensionar o pavimento com a aplicação da mistura M50 como camada de sub-base;
- Comparar economicamente o uso de materiais convencionais em relação à mistura solo/cinza têxtil na pavimentação;
- Avaliar as interações ambientais da mistura solo/cinza têxtil com os ensaios de lixiviação, solubilização e percolação;

- Analisar a adição de cal ou cimento na mistura solo/cinza têxtil para correlacionar com os parâmetros de resistência;
- Realizar a caracterização mineralógica do solo local, cinza têxtil, e as misturas M30, M50 e M70.
- Realizar o ensaio de Módulo de Resiliência.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. P.; GOMES, W. C. Reutilização das cinzas volantes de carvão mineral na fabricação de cimento de Portland. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.8, p.375-386, 2021.
- ALMEIDA, F. M. **Energias para compactação de solos destinados a estruturas de pavimentos asfálticos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- ALMEIDA, R.C. **Estudo comparativo das cinzas provenientes da Usina Termelétrica do Pecém com outras cinzas existentes no Brasil e no exterior, no cenário da construção civil**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- ANDRADE, C. **Materiais para construção civil à base de cinzas de madeira, lodo de eta e resíduos da produção de cal**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: amostras de solos: preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419**: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. São Paulo: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA - ANICER. **Cartilha ambiental cerâmica vermelha**. Rio de Janeiro: ANICER, 2014.
- AVELAR, N. V. **Potencial dos resíduos sólidos da indústria têxtil para fins energéticos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

BARGA, C.; DAL FABRO, T.; REIS, E. A. P. Cerâmica Vermelha: definição e aplicação. In: Encontro Toledo de Iniciação Científica Prof. Dr. Sebastião Jorge Chammé, 12., 2016, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2016.

BARROS, E. T.; MELLO, M. A. S. Estudo da viabilidade mecânica da adição da cinza proveniente da queima de pinus no concreto asfáltico flexível. **Ignis**, Caçador, v.6, n.3, p. 113- 133, 2017.

BARROS, K. S. **Estudo de cinzas volantes de uma Termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza-CE para aplicação em camadas granulares de pavimentos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

BASTIAN, E. Y. O.; ROCCO, J. L. S. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil**. São Paulo: CETESB: SINDITÊXTIL, 2009.

BELTRAME, L.T.C. **Caracterização de Efluente Têxtil e Proposta de Tratamento**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000.

BERNUCCI, L. B.; *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2ª edição, 2022.

BORLINI, M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE, R. A.; PINATTI, D. G.; MONTEIRO, S. N. Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. parte I: características da cinza. **Cerâmica**, [S.L.], v. 51, n. 319, p. 192-196, set. 2005. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132005000300004>>. Acesso em: 20/10/2023.

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

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: DOU, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução Conama n. 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília: DOU, 2002.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. **Circular técnica**, São Paulo, n. 52, 1979.

CÂNDIDO, F. E. A.; *et al.* Caracterização química das cinzas do carvão para classificação quanto sua periculosidade. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 7., 2016, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande, 2016.

CARVALHO, J. P.F. As Bases e o Desenvolvimento da Silvicultura – Ao Encontro da Sustentabilidade. **História da Ciência e Ensino: construindo interfaces**, [S.L.], v. 20, p. 222-

237, 29 dez. 2019. Pontifical Catholic University of Sao Paulo (PUC-SP). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.23925/2178-2911.2019v20espp222-237>>. Acesso em: 20/10/2023.
CHERIAF, M.; CAVALCANTE, J. R. Caracterização dos resíduos industriais do 1 estiado de Santa Catarina e as possibilidades de valorização na construção civil. In: Encontro Nacional de Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1., 1997, Canela. **Anais** [...]. Canela, 1997.

CORRÊA, R.; RIBEIRO, H. C. M. Economia circular sob a ótica de relatórios de sustentabilidade. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 176-194, 21 set. 2022. Anima Educação. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.59306/rgsa.v11e32022176-194>>. Acesso em: 21/10/2023.

DAS, B.M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Thomsom Learning, tradução da 6ª edição norte-americana. São Paulo, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994) **DNER-ME 049**: solos: determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas: método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994) **DNER-ME 093**: solos: determinação da densidade real: método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994) **DNER-ME 129**: solos - compressão utilizando amostras não trabalhadas - método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT. **Manual de Pavimentação Rodoviária**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DIAS, D.K.R. **Reutilização do resíduo cerâmico oriundo do Polo Oleiro de Iranduba e Manacapuru para emprego como elemento constituinte de base e sub-base de pavimento**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

DIAS, J. F. **Avaliação dos resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. 2004. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

DIMTER, S.; *et al.* Construction Of Economical Pavement Structures With Wood Ash. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 1202, n. 1, p. 012048, 1 nov. 2021. IOP Publishing. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/1202/1/012048>>. Acesso em: 20/10/2023.

ELIAS, D.S.; BORGHETTI SOARES, A; SOUSA, H.P. Caracterização geotécnica de cinzas de carvão mineral e sua utilização como barreiras impermeabilizantes. **Revista Matéria**, v.26, n.3, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 3 ed. Brasília, 2017.

FARIAS, E. R. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

FROENER, M. S. **Valorização de cinza de fundo por meio da síntese de ligantes geopoliméricos: otimização de traços em pasta e avaliação dos sistemas em argamassas.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

GIANNOTTI, M. M. S.; **Estudo experimental de misturas de solo e cinza de fundo de resíduo sólido urbano para aplicação em obras geotécnicas.** XXI Seminário de Iniciação Científica da PUC RIO, agosto, 2013.

GOOGLE. **Google Earth Pro**, serviços de mapas, 2013.

GRIGOLETTI, G. C. **Caracterização de impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha no estado do Rio Grande do Sul.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2001.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção da Extração Vegetal e Silvicultura 2022.** Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

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, BR-RS, 2021.

JARDIM, N.S. *et al.* **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas e Compromisso Empresarial para Reciclagem, 1995. 278p.

KIHARA, Y. **O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: origem, características e qualidade.** 1983. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

LI, L.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H. (2009). Properties of pavement geomaterials stabilized with fly ash. **World of Coal Ash (WOCA) Conference**, Lexington, KY, USA.

LIMA, K. S.; BARROS, S. T.; JESUS, S. L. P. **Caracterização da cinza de eucalipto para aplicação em pavimentos flexíveis.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Transportes) – Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2021.

LIMA, T. V. **Estudo comparativo entre o comportamento mecânico de misturas solo-brita com calcário e granito para uso em pavimentação.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará, Russas, 2019.

MACIEL, F. L.; GONÇALVES, C. L. Análise das cinzas de carvão mineral como alternativa sustentável para aplicação na pavimentação asfáltica. In: Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 3., Workshop de Engenharia de Petróleo, 5., 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador, 2018.

MANCINI, S. D.; *et al.* Circular Economy and Solid Waste Management: challenges and opportunities in brazil. **Circular Economy And Sustainability**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 261-282, 26 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s43615-021-00031-2>>. Acesso em: 20/10/2023.

MEDINA, J.M.; MOTTA, L.M.G. **Apostila de Estabilização de Solos**. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

NERI, J. T. C. F. 2004. **Um Enfoque sobre o Projeto Cerâmicas do CTGás**. Centro de Tecnologias do Gás - CTGás / RN, 2004.

NETO, E.; ROCHA, M. S.; Política Nacional de Resíduos Sólidos: princípios, objetivos e a educação ambiental como um dos instrumentos. **Revista Acadêmica**, ano 2, n.6, abril-junho, 2015. ISSN 2357-8173.

NEVES, C. M. M; *et al.* **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – práticas de campo**. Rede Ibero-americana PROTERRA, 2009. Disponível em <<http://www.redproterra.org>>. Acessado em 20/10/2023.

OLIVEIRA, S. **Gestão dos resíduos sólidos urbanos na microrregião homogênea Serra de Botucatu: Caracterização física dos resíduos sólidos domésticos na cidade de Botucatu/SP**. 1997. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

POZZOBON, C. E. **Aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no complexo termelétrico Jorge Lacerda**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

REBELO, E. P. **Estudo de mistura solo-emulsão para a região de Urucu, Coari-AM**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Amazonas, 2009.

ROZA, A. E. D. **Contribuição para projeto mecanístico – empírico de pavimentos asfálticos na região Norte do estado do Mato Grosso**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SALES, J. C.; *et al.* Os fornos na indústria cerâmica no Ceará. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 56., Congresso Latino-Americano de Cerâmica, 1., Brazilian Symposium on Glass and Related Materials, 9., 2012, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba, 2012.

SANT'ANA FILHO, R. Importância dos serviços de limpeza urbana. In: Administração dos serviços de limpeza urbana, 1., 1991, Belo Horizonte. **Anais [...]** Belo Horizonte, 1991, p.1-41.

SANTOS, A. P. L.; FERNANDES, D. S. Análise do impacto ambiental gerados no ciclo de vida de um tecido de malha. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, Florianópolis, SC, Brasil, v. 4, n. 7, p. 1-17, 2012.

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B. Estabilização dos solos com cal e betume. In: Reunião de pavimentação urbana, 6., 1995, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 1995.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS - SEBRAE. **Cerâmica vermelha: estudo de mercado**. Brasília: SEBRAE, 2008.

SILVA, L.H.P.; *et al.* Caracterização da cinza de forno de olaria para aplicação em cimento pozolânico. **Revista Matéria**, v.25, n.1, 2020. ISSN 1517-7076.

SILVA, N. I.; *et al.* Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. **Cerâmica**, [S.L.], v. 45, n. 296, p. 184-187, dez. 1999. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69131999000600004>>. Acesso em: 21/10/2023.

SIQUEIRA, J. S. **Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: produção de argamassas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

SOBRAL, L. F.; *et al.* **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos**. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, 2015.

SOTAYO, A.; GREEN, S.; TURVEY, G. Carpet recycling: a review of recycled carpets for structural composites. **Environmental Technology & Innovation**, [S.L.], v. 3, p. 97-107, abr. 2015. Elsevier BV. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2015.02.004>>. Acesso em: 20/10/2023.

SOUZA JÚNIOR, J. D. **O efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do estado do Ceará**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SOUZA PINTO, C. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1., 2006, 356p.

SOUZA, J. M. **Solo estabilizado com cinza do bagaço da cana de açúcar álcali-ativada na pavimentação**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

TAVAREZ, P. T.; ATHAYDE JÚNIOR, G. B. Disposição final dos resíduos sólidos em 90 municípios paraibanos – análise da condição atual frente às exigências da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **GESTA**, v. 2, n. 1, p. 38-52, 2014.

TONIOLLO, M.; ZANCAN, N. P.; WÜST, C. Indústria têxtil: sustentabilidade, impactos e minimização. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 6., 2015, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre, 2015.

VASCONCELOS, S. D.; *et al.* Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica na construção de pavimentos. **Transportes**, [S.L.], v. 27, n. 2, p. 73-88, 31 ago. 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v27i2.1592>>. Acesso em: 20/10/2023.

VICENTE, G. O. **Estabilização de solo com adição de resíduo de celulose para aplicação em pavimentação rodoviária**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2021.

YALCIN-ENIS, I.; KUCUKALI-OZTURK, M.; SEZGIN, H. Risks and Management of Textile Waste. **Nanoscience And Biotechnology For Environmental Applications**, [S.L.], p. 29-53, 2019. Springer International Publishing. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-97922-9_2>. Acesso em: 20/10/2023.

ZIMAR, Z.; *et al.* Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: a review. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 312, p. 114926, jun. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114926>>. Acesso em: 21/10/2023.