



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AMBIENTAIS - DECAM
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

AMANDA CARLA DE ANDRADE SILVA

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO REGIONAL DE MOSSORÓ/RN A PARTIR DO
USO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS
GRANULARES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

MOSSORÓ/RN

2022

AMANDA CARLA DE ANDRADE SILVA

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO REGIONAL DE MOSSORÓ/RN A PARTIR DO
USO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS
GRANULARES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Bruno Tiago Angelo da Silva,
Prof. Me.

MOSSORÓ/RN

2022

© Todos os direitos estão reservados a Uniersidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S586e Silva, Amanda Carla de Andrade.
ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO REGIONAL DE MOSSORÓ/RN
A PARTIR DO USO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL PARA
APLICAÇÃO EM CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS / Amanda Carla de Andrade Silva. - 2022.
86 f. : il.

Orientador: Bruno Tiago Angelo da Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2022.

1. Pavimentação. 2. Resíduo Industrial. 3.
Sustentabilidade. 4. Dimensionamento de
Pavimentos. I. Silva, Bruno Tiago Angelo da ,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

AMANDA CARLA DE ANDRADE SILVA

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO REGIONAL DE MOSSORÓ/RN A PARTIR DO
USO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS
GRANULARES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 15/06/2022.

BANCA EXAMINADORA

Bruno Tiago Angelo da Silva, Prof. Me. (UFERSA)
Presidente



Marília Pereira de Oliveira, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

WENDEL SILVA
CABRAL:00990257444

Assinado de forma digital por
WENDEL SILVA
CABRAL:00990257444
Dados: 2022.06.24 10:54:36 -03'00'

Wendel Silva Cabral, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Dedico este trabalho a Deus.
Aos meus pais, Vânia e Amancio.
Ao meu irmão, Allan.
À minha eterna companheira, Lilla.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me capacitar e instruir ao longo desta jornada, por me guiar e me manter firme diante de todas as dificuldades e por acreditar nos meus sonhos, antes de mim mesma.

Ao meu orientador, Me. Bruno Angelo, por todo o apoio, disponibilidade e compreensão. Um grande exemplo de pessoa e profissional que tive a honra de conhecer, espelhar-me e poder usar como referência para a minha vida profissional. Sou imensamente grata pela confiança, dedicação e encorajamento.

Ao técnico do Laboratório de Mecânica dos Solos, Augusto César, por toda a assistência na execução dos ensaios laboratoriais.

Aos meus colegas do Laboratório de Física e Manejo do Solo, do curso de Agronomia, em especial à professora Jeane Portela, pela paciência e incentivo e a Isaque Leite.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) e ao professor Walney Gomes por conceder o uso do laboratório de Construção Civil para a realização de um dos ensaios.

A todos os professores que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

Por fim, um agradecimento especial aos meus pais, Vânia e Amancio, ao meu irmão, Allan, e à minha falecida cadela, Lilla, que foi um verdadeiro presente em minha vida e me tornou uma pessoa melhor. Amo-os incondicionalmente.

Como sou pouco e sei pouco, faço o pouco que
me cabe me dando por inteiro.

Ariano Suassuna

RESUMO

As obras de pavimentação apresentam uma grande demanda por recursos naturais para aplicação nas camadas de base e sub-base de pavimentos, ocasionando, por vezes, a escassez desses insumos em determinadas regiões. Esta demanda, por sua vez, pode estar associada ao crescimento dos centros urbanos que, necessariamente, atrai investimentos para o setor rodoviário. No sentido de suprir essa escassez, materiais alternativos em substituição aos materiais tradicionais ou até mesmo como matéria-prima secundária têm sido estudados para avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de seu uso para obras de pavimentação. As cinzas de carvão mineral representam uma alternativa à estabilização de solos que, inicialmente, não possuem as especificações adequadas e são utilizadas mundialmente com esta finalidade. Além disso, as termelétricas que utilizam o carvão mineral como combustível fóssil produzem uma grande quantidade de resíduos sólidos, os quais podem ser aproveitados na construção de pavimentos sustentáveis e econômicos, além de garantir uma disposição final segura e a redução de impactos ambientais. Assim, o objetivo geral desta pesquisa consiste em analisar o efeito da estabilização de um solo do município de Mossoró/RN por meio da utilização de cinzas de carvão mineral provenientes da Usina Termelétrica Energia Pecém, localizada na Região Metropolitana de Fortaleza/CE, em camadas granulares de pavimentos. Para tanto, foram utilizados cinzas de carvão mineral, solo e cal hidratada, de modo a produzir misturas com comportamento mecânico satisfatório. O procedimento metodológico é composto por quatro etapas. A primeira consiste na coleta de dados de pesquisas publicadas acerca da caracterização mecânica, física, química e ambiental das cinzas da termelétrica em questão. A segunda etapa, por sua vez, diz respeito a caracterização física e mecânica do solo regional, a partir de ensaios laboratoriais e a terceira etapa consiste nas mesmas caracterizações das misturas idealizadas, a fim de determinar o material com melhores comportamentos técnicos e econômicos para o seu emprego nas camadas granulares de pavimentos. Na etapa final, foi realizado um dimensionamento de um pavimento flexível teórico com o uso das misturas selecionadas. Como resultados, observou-se que o solo *in natura* (SN), pode ser utilizado em camadas de sub-base de pavimentos, ao passo que as misturas M1, constituída de 50% de solo e 50% de cinza, e a M2, composta por 49% de solo, 49% de cinza e 2% de cal, podem ser empregadas para a construção de bases de pavimentos de rodovias de baixo, médio e alto tráfego. Neste sentido, verificou-se que o emprego das cinzas de carvão mineral na construção de pavimentos é viável tanto do ponto de vista técnico, quanto ambiental, uma vez que, além de estabilizarem granulometricamente o solo, as cinzas podem ter, no âmbito da pavimentação, um destino final adequado e ambientalmente sustentável.

Palavras-chave: Pavimentação. Resíduo Industrial. Sustentabilidade. Dimensionamento de Pavimentos.

ABSTRACT

The paving works present a great demand for natural resources for application in the base and sub-base layers of pavements, causing, sometimes, the scarcity of these inputs in certain regions. This demand, in turn, can be associated with its urban growth, which necessarily attracts investments to the road sector. In order to overcome this shortage, alternative materials to replace traditional materials or even as secondary raw materials have been studied to assess the technical, economic and environmental feasibility of their use for paving works. Coal ash represents an alternative to soil stabilization that, initially, does not have adequate specifications and is used worldwide for this purpose. In addition, thermoelectric plants that use coal as fossil fuel produce a large amount of solid waste, which can be used in the construction of sustainable and economical pavements, in addition to guaranteeing a safe final disposal and the reduction of environmental impacts. Thus, the general objective of this research is to analyze the effect of soil stabilization in the municipality of Mossoró/RN through the use of coal ash from the Pecém Thermoelectric Power Plant, in the Metropolitan Region of Fortaleza/CE, in granular layers of pavements. For this purpose, coal ash, soil and hydrated lime were used, in order to produce mixtures with satisfactory behavior. The methodological procedure consists of four steps. The first consists of collecting data from published research on the mechanical, physical, chemical and environmental characterization of the ash from the thermoelectric plant in question. The second stage, in turn, concerns the physical and mechanical characterization of the regional soil, based on laboratory tests and a third step consists of the same characterizations of the ideal mixtures, in order to determine the material with the best technicians and for its use in the granular layers of pavements. In the final step, a design of a theoretical flexible pavement was carried out using the selected mixtures. As a result, it was observed that the soil in natura (SN) can be used in sub-base layers of pavements, while the mixtures M1, consisting of 50% soil and 50% ash, and M2, composed of 49% soil, 49% ash and 2% lime, can be used for the construction of low, medium and high traffic road pavement bases. In this sense, it was found that the use of coal ash in the construction of pavements is viable both from a technical and environmental point of view, since, in addition to stabilizing the soil granulometrically, the ash can have, in the paving context, an adequate and environmentally sustainable final destination.

Keywords: Paving. Industrial Waste. Mineral. Sustainability. Paving Sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização das Usinas Termelétricas Energia Pecém e Pecém II.....	21
Figura 2 -	Esteira transportadora de carvão instalada do Porto do Pecém até a Termelétrica Energia Pecém	22
Figura 3 -	Esquema do processo de geração de energia elétrica através da combustão do carvão mineral em termelétricas.....	24
Figura 4 -	Etapas de formação do carvão mineral.....	27
Figura 5 -	Geração de energia elétrica mundial por fonte em 2019.....	27
Figura 6 -	Geração de energia elétrica no Brasil por fonte em 2021.....	28
Figura 7 -	Problema ambiental ocasionado pelo derramamento de cinzas nos Estados Unidos.....	29
Figura 8 -	Cinza de carvão mineral (a), escória de aciaria (b) e RCD (c), respectivamente.....	35
Figura 9 -	Construção da primeira estrada do Ceará que reutiliza cinzas de carvão mineral.....	37
Figura 10 -	Determinação de espessuras do pavimento pelo método do DNIT.....	46
Figura 11 -	Jazida de solo explorada.....	49
Figura 12 -	Localização da jazida do solo regional.....	49
Figura 13 -	Localização da Termelétrica Energia Pecém em relação à Fortaleza	50
Figura 14 -	Módulo I de armazenagem das cinzas de carvão mineral.....	51
Figura 15 -	Módulo I de armazenagem das cinzas de carvão mineral.....	52
Figura 16 -	Execução do ensaio de densidade real do solo.....	54
Figura 17 -	Peneiramento grosso (a) e sedimentação do solo regional (b).....	56
Figura 18 -	Amostra de solo utilizada no ensaio de limite de plasticidade.....	57
Figura 19 -	Corpo de prova moldado no ensaio de compactação Proctor.....	58
Figura 20 -	Execução do ensaio do Índice de Suporte Califórnia.....	60
Figura 21 -	Corpos de prova imersos, à esquerda, e rompimento de um corpo de prova, à direita.....	61
Figura 22 -	Misturas M1 (a) e M2 (b) homogeneizadas, respectivamente.....	62
Figura 23 -	Curva granulométrica das cinzas de carvão mineral.....	65
Figura 24 -	Imersão das cinzas para realização do ensaio de RCS.....	66
Figura 25 -	Curva granulométrica do solo regional.....	68

Figura 26 -	Curva de compactação do solo regional.....	69
Figura 27 -	Curva granulométrica da mistura M1.....	70
Figura 28 -	Curva de compactação da mistura M1.....	71
Figura 29	Curva de compactação da mistura M2.....	71
Figura 30 -	Simbologia usada no dimensionamento do pavimento teórico	74
Figura 31 -	Dimensionamento de H20 e H12.....	75
Figura 32 -	Representação do pavimento teórico dimensionado.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW).....	20
Tabela 2 -	Valores de expansão e CBR estabelecidos pelo DNIT (2006).....	44
Tabela 3 -	Coeficiente de equivalência estrutural.....	45
Tabela 4 -	Espessura mínima de revestimento betuminoso.....	45
Tabela 5 -	Ensaio e normas utilizadas para a caracterização das cinzas.....	52
Tabela 6 -	Ensaio e normas utilizadas para a caracterização do solo regional.....	53
Tabela 7 -	Definição das misturas idealizadas a serem ensaiadas em laboratório.....	62
Tabela 8 -	Resumo em percentual da análise granulométrica das cinzas.....	64
Tabela 9 -	Resumo em percentual da análise granulométrica do solo regional.....	67
Tabela 10 -	Resumo dos valores encontrados nos ensaios de caracterização mecânica do solo.....	69
Tabela 11 -	Resultados dos ensaios de caracterização mecânica das misturas.....	72
Tabela 12 -	Dados dos materiais empregados no dimensionamento.....	74
Tabela 13 -	Espessuras das camadas determinados no dimensionamento.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highways and Transportation Officials
ABCM	Associação Brasileira de Carvão Mineral
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBR	California Bearing Ratio
CE	Ceará
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEA	International Energy Agency
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
M1	Mistura 1
M2	Mistura 2
MR	Módulo de Resiliência
RCS	Resistência à Compressão Simples
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RN	Rio Grande do Norte
SN	Solo natural
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido

LISTA DE SÍMBOLOS

#	Peneira
%	Porcentagem
°C	Grau Celsius
µm	Micrômetro
cm	Centímetro
km	Quilômetro
ml	Mililitro
mm	Milímetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	Estrutura do trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Geração de energia elétrica no Brasil	19
2.1.1	Geração de energia elétrica no estado do Ceará	20
2.1.1.1	Complexo do Pecém	20
2.2	Usina termelétrica como fonte geradora de energia	26
2.2.1	Carvão como combustível em usinas termelétricas.....	25
2.2.2	Cinzas de carvão mineral e o meio ambiente	28
2.3	Estabilização de solos aplicada à pavimentação	30
2.3.1	Estabilização física	31
2.3.2	Estabilização mecânica	32
2.3.2.1	Estabilização mecânica por compactação	32
2.3.2.2	Estabilização granulométrica	33
2.3.3	Estabilização química	33
2.4	Materiais alternativos para estabilização de solos	34
2.4.1	Utilização de cinzas na pavimentação.....	36
2.5	Uso de cal como agente estabilizador de solos	38
2.5.1	Encapsulamento de contaminantes	41
2.6	Dimensionamento de pavimentos flexíveis	42
2.6.1	Dimensionamento pelo método do DNIT	44
2.7	Considerações Finais	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1	Materiais	49
3.1.1	Jazida de solo	49
3.1.2	Cinzas de carvão mineral	50
3.1.3	Cal	51
3.2	Métodos	51

3.2.1	Caracterização das cinzas de carvão mineral	51
3.2.2	Caracterização do solo regional	53
3.2.2.1	Ensaio de caracterização do solo	53
3.2.2.1.1	Densidade real do solo	53
3.2.2.1.2	Análise granulométrica	54
3.2.2.1.3	Limites de Atterberg	56
3.2.2.1.4	Compactação Proctor	57
3.2.2.1.5	Índice de Suporte Califórnia	59
3.2.2.1.6	Resistência à compressão simples (RCS)	60
3.2.3	Caracterização das misturas idealizadas	61
3.2.4	Dimensionamento de um pavimento teórico	63
3.3	Considerações Finais	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	Resultados dos ensaios de caracterização das cinzas de carvão mineral.	64
4.1.1	Ensaio de caracterização física das cinzas	64
4.1.2	Ensaio de caracterização mecânica das cinzas de carvão mineral.....	65
4.1.3	Ensaio para caracterização ambiental e química das cinzas	66
4.1.4	Aplicação das cinzas em camadas de base e sub-base dos pavimentos.....	67
4.2	Resultados dos ensaios de caracterização do solo regional	67
4.2.1	Ensaio de caracterização física do solo regional	67
4.2.2	Ensaio de caracterização mecânica do solo regional	69
4.2.3	Ensaio de resistência à compressão simples do solo regional (RCS)	69
4.2.4	Uso do solo regional em camadas de base e sub-base dos pavimentos	70
4.3	Resultados dos ensaios de caracterização das misturas idealizadas	70
4.3.1	Ensaio de caracterização das misturas	70
4.3.2	Ensaio de resistência à compressão simples da mistura idealizada (RCS)	72
4.3.3	Uso da mistura idealizada em camadas de base e sub-base dos pavimentos .	72
4.3.4	Análise dos valores encontrados nos ensaios de caracterização das misturas	72
4.4	Dimensionamento de um pavimento teórico.....	73
4.5	Considerações Finais	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	78
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

Os materiais tradicionalmente utilizados nas camadas de base e sub-base de pavimentos não são renováveis e, em contrapartida, a demanda por recursos naturais nas obras de infraestrutura viária é elevada, o que, muitas vezes, representa um fator limitante para o uso de solos que não atendem às especificações normativas (LAV E LAV, 2010 apud VASCONCELOS, 2018).

Na tentativa de mitigar este problema surge a necessidade de se estudar materiais alternativos que apresentem viabilidade técnica, econômica e ambiental em substituição a escassez de materiais, de modo a oferecer matéria-prima secundária para o setor rodoviário, reduzir os custos de tratamento e garantir disposição final adequada para os resíduos, minimizando os impactos ao meio ambiente (VASCONCELOS, 2018).

De acordo com Vasconcelos (2018), as cinzas de carvão mineral têm sido utilizadas mundialmente para diversos fins, dentre eles como material alternativo para a construção das camadas granulares de pavimentos, além de servir como matéria-prima na fabricação de cimento e concreto, podendo ser usado como filer em revestimentos asfálticos e em obras de aterro.

O carvão mineral é largamente utilizado como combustível fóssil para a produção de energia elétrica no mundo e, em decorrência deste fator, grandes quantidades de resíduos são geradas a partir do seu processo de queima, tornando necessária a adoção de práticas sustentáveis para a gestão desses resíduos (VASCONCELOS, 2018). Estudos recentes têm mostrado a viabilidade técnica do uso de cinzas de carvão mineral como material estabilizador de solos, demonstrando que o aproveitamento dos rejeitos pode contribuir tanto para a redução de impactos ambientais quanto para a construção de pavimentos mais econômicos.

Vasconcelos (2016) desenvolveu uma pesquisa com a finalidade de avaliar a utilização das cinzas de carvão mineral produzidas pela Usina Termelétrica Energia Pecém, localizada na Região Metropolitana de Fortaleza/CE, nas camadas granulares de pavimentos. Vasconcelos (2018) estudou misturas compostas de solo-cinza, cinza-cal e solo+cinza+cal, na proporção de 1%, 3% e 5% do estabilizante químico e considerando tempos de curas de 0, 7, 14 e 28 dias para verificar se o emprego destas misturas com fins de uso em pavimentação é viável.

O problema desta pesquisa se enquadra na necessidade de se estudar materiais alternativos que, quando estabilizados com o solo, ou mistura de solos, atendam às especificações normativas vigentes para uso nas camadas granulares de pavimentos,

contribuindo, além disso, na tentativa de suprir a escassez de materiais naturais. Como problema secundário, cita-se a crescente demanda por destinação adequada das cinzas de carvão mineral provenientes de termelétricas, tendo em vista que sua disposição inadequada implica em danos e prejuízos não só ao meio ambiente, mas também para o poder público, considerando os custos elevados, e para a sociedade de modo geral.

Neste sentido, o objetivo geral desta pesquisa é analisar o efeito da estabilização de um solo do município de Mossoró/RN por meio da utilização de cinzas de carvão mineral provenientes da Usina Termelétrica Energia Pecém para emprego em camadas de base e sub-base de pavimentos. Dentre os objetivos específicos, cita-se a realização da caracterização das misturas de solo, cinza de carvão mineral e cal, a avaliação das propriedades mecânicas, técnicas e ambientais do uso das cinzas de carvão mineral no solo, a determinação de misturas com resultados satisfatórios para aplicação nas camadas granulares de pavimentos e o dimensionamento de um projeto estrutural de um pavimento com o uso das melhores misturas através do método do DNIT.

Para a realização deste trabalho, utilizou-se um solo regional de Mossoró/RN, extraído de uma jazida situada no final do campus leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), cinzas de carvão mineral, oriundas da Usina Termelétrica Energia Pecém, e de cal hidratada. A metodologia foi dividida em quatro etapas principais, sendo elas a caracterização física, mecânica e ambiental das cinzas estudadas por Vasconcelos (2016 e 2018), bem como as mesmas propriedades do solo regional, denominado SN, a caracterização física e mecânica da mistura M1, composta por 50% de solo e 50% de cinza e da mistura M2, constituída por 49% de solo, 49% de cinza e 2% de cal para a determinação dos materiais com melhores comportamentos mecânicos, para, na quarta etapa, ser realizado o dimensionamento de um pavimento flexível teórico com os dados de CBR das misturas selecionadas.

Como resultado desta pesquisa, concluiu-se que o uso das cinzas de carvão mineral na construção de pavimentos rodoviários é viável do ponto de vista técnico e ambiental, uma vez que além de estabilizar granulometricamente o solo, o emprego de cinzas também encontra, na pavimentação, uma destinação final segura para as mesmas.

1.1 Objetivos

Levando em conta a problemática de pesquisa e a sua justificativa anteriormente explanadas, traçaram-se os seguintes objetivos para a execução desta pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o efeito da estabilização de um solo do município de Mossoró/RN por meio da utilização de cinzas de carvão mineral provenientes de uma usina termelétrica, para emprego nas camadas de base e sub-base de pavimentos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar a caracterização das misturas de solo, cinzas de carvão mineral e cal;
- b) Avaliar as propriedades mecânicas, técnicas e ambientais do uso das cinzas de carvão mineral no solo;
- c) Determinar as misturas com resultados satisfatórios para aplicação nas camadas granulares dos pavimentos;
- d) Dimensionar um projeto estrutural de pavimentos contendo as misturas através do método do DNIT.

1.2 Estrutura do trabalho

Esta monografia está dividida em cinco capítulos.

No capítulo 1, Introdução, foi apresentado o trabalho desenvolvido a partir de uma contextualização sobre o tema, o problema da pesquisa, a justificativa e os objetivos do estudo.

No capítulo 2, Revisão Bibliográfica, foi realizada uma revisão de literatura, na qual foram tratados tópicos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa.

No capítulo 3, Materiais e Métodos, foram descritos e detalhados os materiais e os procedimentos metodológicos usados para se atingir os objetivos propostos.

No capítulo 4, Resultados e Discussão, foram apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais realizados, além de uma discussão fundamentada na comparação com estudos já publicados.

No capítulo 5, Considerações Finais, foram explanadas as conclusões obtidas a partir deste estudo, bem como as principais dificuldades encontradas e sugestões para trabalhos futuros.

As Referências Bibliográficas estão apresentadas após os capítulos desta monografia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Realizou-se, neste capítulo, uma discussão a partir de conceitos baseados na literatura acerca da estabilização de solos com fins de pavimentação, sobre o uso de cinzas de carvão mineral proveniente de uma termelétrica como material estabilizador de solos, sobre o cenário da geração de energia elétrica no Brasil e no Ceará, dando ênfase ao uso do carvão como fonte de energia, sobre o emprego de cal para a estabilização química de solos e encapsulamento de contaminantes. Discutiu-se também a respeito dos problemas ambientais decorrentes do uso inadequado dos resíduos das cinzas volantes e pesadas.

2.1 Geração de energia elétrica no Brasil

Conforme o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2021), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no qual foram divulgados os dados referentes ao consumo de energia elétrica no Brasil nos últimos cinco anos, com ênfase no ano de 2020, a capacidade instalada de geração de energia aumentou em 2,7% entre os anos de 2019 e 2020, sendo a energia hidráulica a principal fonte contribuinte.

No ano de 2020 foram gerados 621 TWh de energia elétrica, considerando uma redução de 0,8% entre os anos de 2019 e 2020, na qual as maiores quedas percentuais foram na geração térmica a carvão, a gás natural e nuclear com redução de 22,1%, 11,1% e 12,9%, respectivamente. A energia hidráulica também apresentou redução de 0,4%. Em contrapartida, a produção de energia à base dos derivados de petróleo, solar, biomassa e eólica aumentaram em 9,1%, 61,1%, 6,7% e 1,9%, respectivamente, elevando a participação destas fontes na matriz elétrica nacional (ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021).

As usinas termelétricas que produzem energia a partir da queima de carvão tiveram uma redução na capacidade de geração de energia de 0,8% entre 2019 e 2020, com uma participação de 1,8% na capacidade já instalada de geração de energia elétrica no Brasil, conforme apresenta a Tabela 1. As usinas solares foram as responsáveis pelo maior crescimento percentual na capacidade de geração de energia elétrica no país, embora as mesmas possuam participação de apenas de 1,9% na capacidade já instalada.

Tabela 1 - Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW)

	2016	2017	2018	2019	2020	Δ 2020/2019	Part. % 2020
Total	150.338	157.112	164.503	170.118	174.737	2,7	100,0
Usinas Hidrelétricas	91.499	94.662	98.287	102.999	103.027	0,0	59,0
PCH	4.941	5.020	5.157	5.291	5.429	2,6	3,1
CGH	484	594	695	768	816	6,2	0,5
Gás Natural	12.965	12.980	13.359	13.385	14.927	11,5	8,5
Derivados do Petróleo	8.845	8.792	7.549	7.670	7.696	0,3	4,4
Carvão	3.389	3.324	2.858	3.228	3.203	-0,8	1,8
Usinas Nucleares	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	0,0	1,1
Biomassa	13.913	14.289	14.569	14.703	15.011	2,1	8,6
Usinas Eólicas	10.124	12.823	15.378	15.378	17.131	11,4	9,8
Solar	24	935	2.473	2.473	3.287	32,9	1,9
Outras	2.163	2.243	2.188	2.234	2.221	-0,6	1,3

Fonte: Adaptado de Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2021); Elaboração EPE

Observa-se ainda que as usinas hidrelétricas mantiveram seu potencial de participação como fonte geradora de energia, apresentando 59% na capacidade já instalada no Brasil e as outras fontes geradoras, representadas pelo gás de coqueria, outras secundárias, outras não renováveis, outras renováveis e biodiesel, também apresentaram redução na capacidade de geração de energia de 0,6%.

2.1.1 Geração de energia elétrica no estado do Ceará

Segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2021), para o ano base de 2020, o Ceará teve uma redução na geração de energia elétrica de 28,1% em relação ao ano de 2019, gerando em torno de 10.345 GWh, apresentando participação de 1,7% no território nacional na produção de energia elétrica, ocupando a posição de quinto estado gerador.

O estado do Ceará possui 22 empreendimentos de geração de energia elétrica, sendo 1 hidrelétrica, 3 centrais eólicas e 18 centrais térmicas, estando, a maioria, situada na Região Metropolitana de Fortaleza/CE (SEINFRA, 2016 apud VASCONCELOS, 2016).

2.1.1.1 Complexo do Pecém

O Complexo do Pecém, criado em 1995, fica situado entre os municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante, a aproximadamente 50 km de Fortaleza, ocupa uma área de 13.337 hectares e é um dos grandes responsáveis pelo desenvolvimento econômico, industrial

e social do estado do Ceará. Atualmente, o Complexo é constituído por 30 empresas, sendo 22 em operação e as demais em fase de implantação (COMPLEXO DO PECÉM, 2022). As empresas de maior destaque do Complexo do Pecém são as centrais termelétricas Energia Pecém e Pecém II.

A Usina Termelétrica Energia Pecém está localizada no município de São Gonçalo do Amarante/CE, possui uma capacidade total de 720 MW e sua principal finalidade é atender ao crescimento da demanda por energia elétrica no Ceará, no Nordeste e do SIN, Sistema Interligado Nacional (EDP, 2022).

A Usina Termelétrica Pecém II, também situada no município de São Gonçalo do Amarante/CE, apresenta uma capacidade instalada de 365 MW, contribui significativamente para a geração de energia no Ceará, além de ser responsável por boa parte do abastecimento do subsistema Nordeste do Sistema Interligado Nacional (ENEVA, 2022). A Figura 1 mostra a localização dessas termelétricas.

Figura 1 – Localização das Usinas Termelétricas Energia Pecém e Pecém II



Fonte: Google Earth (2022)

Ambas as usinas utilizam o carvão mineral como fonte geradora de energia, o qual é importado da Colômbia, preferencialmente, ou dos Estados Unidos, Rússia, China e Japão. De acordo com Barros (2015), o descarregamento do carvão mineral, através de guindastes especiais, ocorre no Porto do Pecém, de onde este é levado para uma espécie de esteira fechada, que interliga o porto à usina, conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 - Esteira transportadora de carvão instalada do Porto do Pecém até a Termelétrica Energia Pecém



Fonte: Barros (2015)

Esta esteira, a qual possui cerca de 12,7 km de extensão, é fechada para que a matéria-prima não fique exposta às intempéries e também para que não haja contaminação do meio ambiente. Comumente, cada navio descarrega no porto em torno de 75 mil toneladas de carvão e, chegando ao pátio, o mesmo é empilhado e armazenado em grandes carreiras, tomando-se todos os cuidados pertinentes ao que se refere à contaminação do lençol freático, ao solo e ao meio ambiente de forma geral (BARROS, 2015).

Ainda de acordo com Barros (2015), o carvão mineral, antes de ser queimado, é transportado por outras esteiras, às quais o levam até os silos, onde o material é pulverizado e preparado para a queima. Outra matéria-prima necessária para a geração de energia é a água e, pelo fato da termelétrica estar situada nas proximidades do reservatório da Companhia de Recursos Hídricos (COGERH), é possível encontrar água em abundância.

Basicamente, o pó de carvão mineral é queimado na caldeira e o calor gerado aquece a água formando um vapor superaquecido, o qual faz a turbina girar, transformando energia térmica em mecânica. A turbina faz o eixo de um gerador girar, gerando energia elétrica e, ao passar pela turbina, o vapor é condensado por um condensador para poder ser bombeado de volta à caldeira, a partir da qual o processo se repete. A cinza oriunda da Termelétrica Energia Pecém é derivada do carvão do tipo sub-betuminoso e, neste sentido, possui porcentagem significativa de cálcio em sua composição (BARROS, 2015).

Os resíduos mais densos e que ficam no fundo da caldeira produzidos pelas termelétricas, também denominados cinzas pesadas, são coletados e reaproveitados para a

produção de cimento por uma fábrica cimenteira localizada nas proximidades do Complexo do Pecém. As cinzas leves são levadas pela fumaça que sai da caldeira, passando pelo dessulfurizador, para reduzir a emissão de dióxido de enxofre ao meio ambiente e, em seguida, a fumaça passa por filtros cônicos, nos quais mais de 99% das cinzas são removidas antes de seguir para a atmosfera por altas chaminés. As chaminés da termelétrica Energia Pecém possuem altura de 110 m. (BARROS, 2015).

As tecnologias modernas de combustão pulverizada alcançam, geralmente, quase 100% de eficiência no processo de combustão, enquanto a conversão de energia térmica em calor pode atingir uma eficiência em torno de 40% (VASCONCELOS, 2016). De acordo com Barros (2015), a Termelétrica Energia Pecém utiliza a tecnologia de combustão pulverizada e seu rendimento de conversão possui uma eficiência de 33% a 35%.

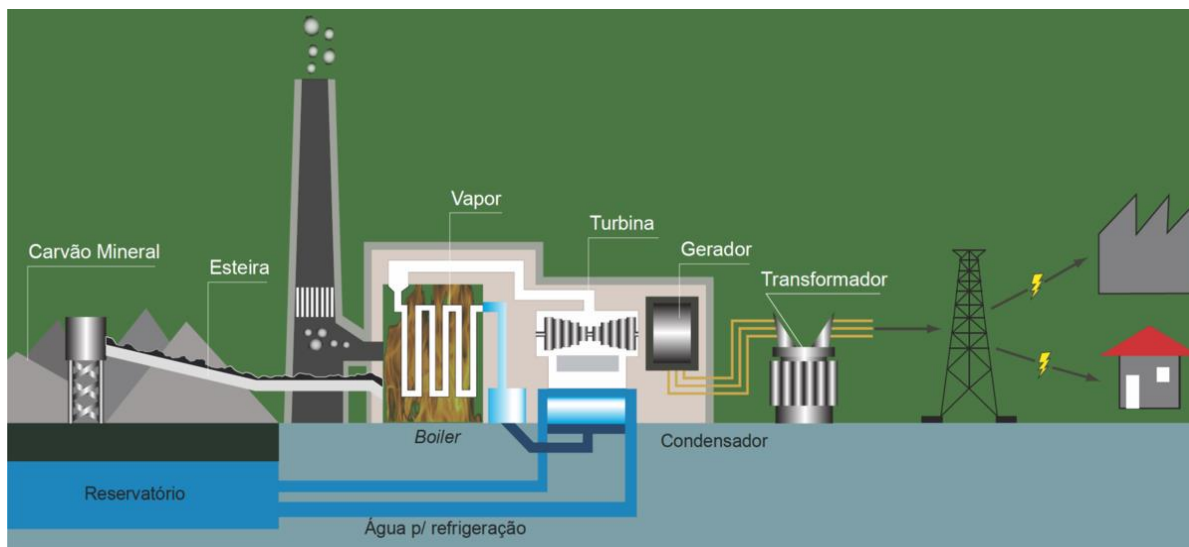
2.2 Usina termelétrica como fonte geradora de energia

Usina termelétrica consiste em uma instalação industrial usada para produzir energia elétrica a partir do calor gerado pela queima de combustíveis fósseis, tais como o carvão mineral, óleo, gás, entre outros, ou ainda por outras fontes. No território brasileiro, o carvão mineral é a fonte mais empregada como combustível nas termelétricas, considerando sua abundância e custos mais baixos para obtenção (LIMA; SOUZA, 2014).

O carvão, inicialmente, é retirado da terra através das minas e, ao ser conduzido da mina, em geral por via férrea, chega à usina com o auxílio de esteiras rolantes e é armazenado em silos. Posteriormente, é moído nos moinhos até atingir uma granulometria bem fina. O material resultante é levado, com o auxílio de grandes ventiladores, para a caldeira, onde será queimado em um local denominado fornalha ou câmara de combustão e a energia química contida nele é transformada em energia térmica, isto é, em calor (BARROS, 2015).

Ainda de acordo com Barros (2015), o calor gerado através da queima do carvão aquece a caldeira, produzindo vapor à alta pressão e temperatura, movimentando os geradores de energia que produzem a energia elétrica. A seguir, a energia é transportada por linhas de alta tensão aos centros de consumo, ao passo que o vapor é resfriado em um condensador, de modo a ser convertido novamente em água para iniciar um novo ciclo. A Figura 3 ilustra o perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral em termelétricas.

Figura 3 - Esquema do processo de geração de energia elétrica através da combustão do carvão mineral em termelétricas



Fonte: ANEEL (2008)

De acordo com a ANEEL (2008), a geração e a transmissão de energia elétrica em termelétricas ocorrem em três etapas. A primeira consiste na queima de um combustível, a exemplo, do carvão, óleo ou gás, na qual a água é transformada em vapor a partir do calor produzido nas caldeiras. A segunda etapa corresponde ao uso do calor, em alta pressão e temperatura, para rotacionar a turbina, à qual aciona o gerador elétrico. Por fim, na terceira etapa, o vapor é condensado, retornando a água para a caldeira, finalizando o ciclo.

Embora o uso de carvão mineral como combustível para a geração de energia elétrica em termelétricas seja responsável pelo desenvolvimento econômico e social de uma região, seus resíduos podem causar efeitos adversos ao meio ambiente devido a grande quantidade de substâncias tóxicas, tais como hidrocarbonetos aromáticos polinucleares, além de inúmeras espécies químicas inorgânicas (BARROS, 2015).

Ainda conforme Barros (2015), os resíduos provenientes do processo de queima do carvão, por sua vez, podem ser do tipo leve ou volante (*fly ash*) ou pesada (*bottom ash*). Com a finalidade de reduzir os efeitos contaminantes da combustão sobre uma região, as usinas normalmente possuem uma chaminé de altura elevada, além de precipitadores que retêm as cinzas e outros resíduos voláteis da combustão.

Para Silva *et al.* (1997), os resíduos de cinza volante são muito empregados na fabricação de cimento pozolânico, porém a maior parte destes é disposta no solo, sem possuir um destino final realmente apropriado e com todos os cuidados pertinentes no que se refere à questão ambiental, ficando estocados em grande volume. Internacionalmente, estes resíduos

possuem aplicação mais ampla, como, por exemplo, como material de construção para a produção de artefatos cerâmicos, sintetizados e de concreto, podendo ser usado como fíler em misturas betuminosas e nas indústrias de plástico, na construção de aterros estruturais, entre outros. A composição granulométrica das cinzas volantes se situam, geralmente, entre 5 μm e 200 μm , com um tamanho médio de 30 μm a 50 μm , não necessitando serem submetidas à trituração antes de serem utilizadas.

A cinza pesada, por sua vez, consiste em um material granular, poroso e com distribuição granulométrica predominantemente de areia. Este material resulta da queima de carvão mineral pulverizado no interior das caldeiras de combustão das termelétricas, sendo geradas a partir da aglomeração dos grãos semifundidos que vão se depositando no fundo das caldeiras e são transportados por arraste hidráulico até as bacias de sedimentação. Sua composição química, em geral, é composta por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), as quais correspondem a cerca de 50% e 30%, respectivamente, na composição em massa do material e o restante é constituído por outros óxidos e traços de metais como chumbo, mercúrio e sulfatos (LEANDRO; FABBRI, 2009).

Conforme Barros (2015), uma termelétrica de porte médio gera centenas de toneladas de cinzas por dia, às quais possuem características físicas e químicas diferenciadas em decorrência do tipo de carvão e dos fornos utilizados.

O carvão mineral, os derivados do petróleo e o gás natural consistem em combustíveis fósseis não renováveis, uma vez que levam milhões de anos para se regenerar, podendo ser usados como matéria-prima para produzir calor, eletricidade e força motriz em diversos tipos de indústrias além das termelétricas, a exemplo das siderúrgicas, químicas e petroquímicas (BARROS, 2015).

2.2.1 Carvão como combustível em usinas termelétricas

O carvão é uma rocha sedimentar combustível constituída de material heterogêneo que passou por processos de soterramento e compactação em bacias pouco profundas ao longo dos anos. Devido à ação da pressão e temperatura em ambientes em que o ar é escasso, ocorrem transformações significativas da matéria orgânica original, tornando-a rica em carbono, ao longo do tempo geológico (AGUIAR; BALESTIERI, 2007).

De acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil da ANEEL (2010), Agência Nacional de Energia Elétrica, na natureza existem dois tipos básicos de carvão, os quais podem ser vegetal e mineral. O carvão vegetal é um material obtido a partir da queima ou

carbonização da madeira, consiste em um carvão leve, muito usado nas siderúrgicas para a produção de aço, além de ser muito empregado como combustível em aquecedores, lareiras, churrasqueiras e fogões à lenha.

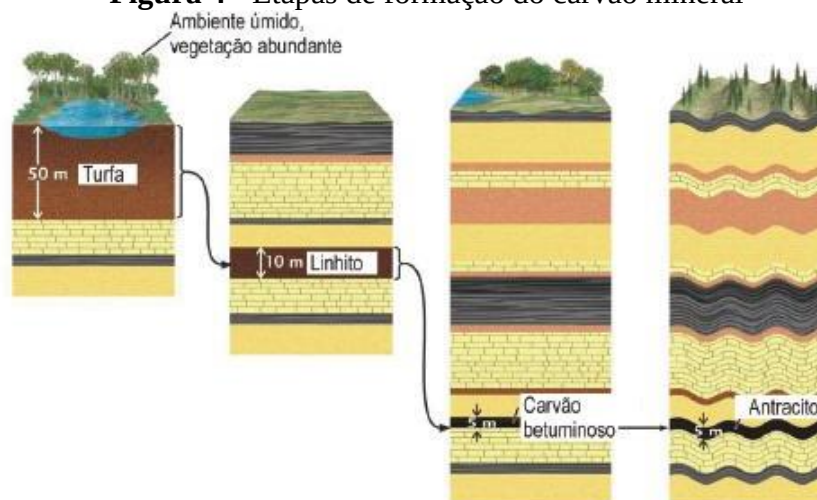
O carvão mineral, por sua vez, é um combustível fóssil extraído da terra por meio de mineração, sendo um dos combustíveis naturais mais abundantes no mundo. Ambos os tipos de carvão podem ser utilizados na indústria, principalmente na siderúrgica e na produção de energia elétrica, porém o carvão vegetal é pouco empregado, com exceção do Brasil, o qual é o maior produtor mundial, ao passo que o carvão mineral é muito consumido em outros países e possui grande relevância na matriz energética mundial (BARROS, 2015).

Para Vasconcelos (2018), o carvão mineral consiste em um combustível fóssil obtido a partir da decomposição da matéria orgânica ao longo de milhões de anos e é basicamente constituído por átomos de carbono, oxigênio, nitrogênio e enxofre e minerais, como a pirita e outros elementos rochosos, como arenitos e diamictitos.

O carvão mineral apresenta uma cor preta ou marrom e textura lisa, macia e quebradiça e pode ser encontrado em grandes profundidades ou perto da superfície, sendo oriundos da decomposição de depósitos de restos de árvores e plantas há milhões de anos. Com o tempo, estes depósitos foram cobertos por solo, causando o soterramento gradual que resultou no aumento da pressão e temperatura da matéria orgânica, expulsando o oxigênio e hidrogênio e concentrando o carbono (BARROS, 2015).

O carvão vegetal possui um poder calorífico baixo e uma grande quantidade de impurezas em sua composição, enquanto que no carvão mineral o poder calorífico e a existência de impurezas variam, determinando sua subdivisão em minério de baixa ou alta qualidade. Geralmente, quanto maiores as condições de pressão e temperatura nas quais a matéria orgânica de origem foi submetida e maior o tempo de duração deste processo, maior será o grau de carbonização e, conseqüentemente, melhor a qualidade do carvão (ANEEL, 2010).

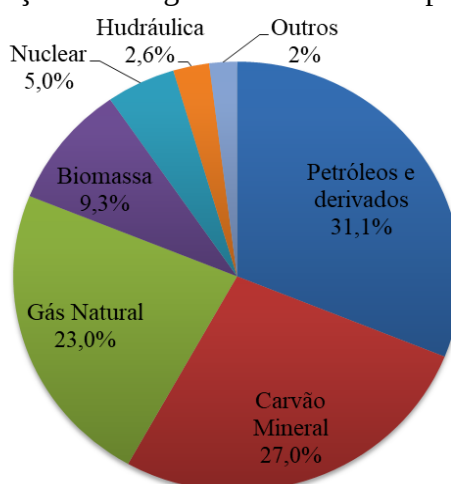
Conforme a ABCM (2014), Associação Brasileira de Carvão Mineral, existem quatro estágios na formação do carvão mineral, sendo eles turfa, linhito, carvão betuminoso (hulha) e antracito, os quais dependem de fatores como pressão e temperatura, além da profundidade de sua formação, sendo a qualidade definida, dentre outros métodos, pelos estágios de desenvolvimento do mineral. A Figura 4 ilustra as etapas de formação do carvão e as respectivas profundidades em que cada estágio se encontra no subsolo.

Figura 4 - Etapas de formação do carvão mineral

Fonte: Adaptado de Press *et al.* (2006)

A turfa, um dos primeiros estágios do carvão, tem baixo poder calorífico, possuindo teor de carbono em torno de 45% de sua constituição. O linhito apresenta um percentual de carbono que varia de 60% a 75%, o carvão betuminoso (hulha), que é o mais usado como combustível, possui cerca de 75% a 85% de carbono e o antracito, o estágio mais puro, possui teor de carbono acima de 90% (ABCM, 2014).

De acordo com dados da IEA (2021), *International Energy Agency*, para o ano de 2019, o carvão é a segunda fonte mais utilizada para a geração de energia elétrica no mundo, respondendo por 27% da produção total, conforme mostra a Figura 5.

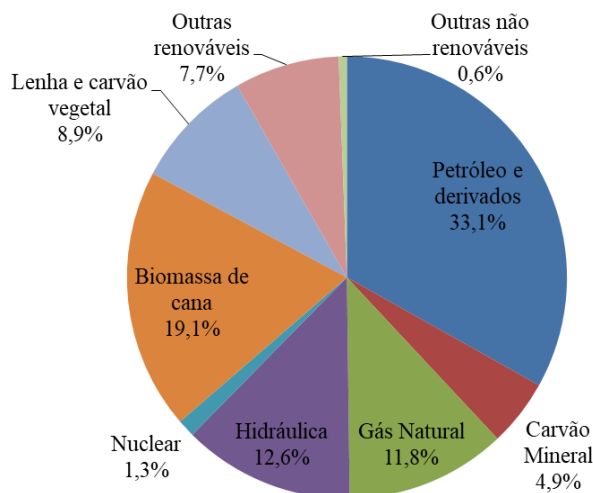
Figura 5 - Geração de energia elétrica mundial por fonte em 2019

Fonte: Adaptado de IEA (2021)

Conforme o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional para o ano base de 2020, da EPE (2021), Empresa de Pesquisa Energética, a lenha e o carvão vegetal ocupam

8,9% da matriz energética do Brasil, ao passo que o carvão mineral detém apenas 4,9%, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Geração de energia elétrica no Brasil por fonte em 2021



Fonte: Adaptado de EPE (2021)

Para Santos (2015), a principal limitação no uso do carvão é o grande impacto socioambiental gerado em todas as etapas tanto do processo de produção quanto no consumo, provocando, por exemplo, a degradação das áreas de mineração e a emissão de gás carbônico durante a combustão. Para mitigar estes efeitos têm sido desenvolvidos projetos e investimentos em tecnologia, *clean coal technologies*, para reverter ou controlar este cenário.

2.2.2 Cinzas de carvão mineral e o meio ambiente

As cinzas geradas por termelétricas à base de carvão mineral consistem em resíduos industriais, cujo potencial poluidor depende dos teores e concentrações de constituintes tóxicos e do grau de solubilização destes no ambiente natural. O desenvolvimento dos critérios de controle por parte das agências ambientais, associado à necessidade de se adotar práticas sustentáveis, estimula o reaproveitamento desses resíduos para outros propósitos (LOPES, 2011).

A exploração de carvão mineral pode gerar grandes problemas ambientais, os quais são oriundos da geração de elevadas quantidades de resíduos sólidos que, se depositados e dispostos de forma inapropriada, podem ocasionar impactos ambientais significativos no solo e no lençol freático, por causa da lixiviação de constituintes tóxicos existentes em sua composição (BARROS, 2015).

Para Goethe (1990), as cinzas de carvão mineral possuem em sua composição metais pesados, sendo, por este motivo, necessária a realização de ensaios de caracterização ambiental, como o de lixiviação. Embora o seu uso implique em algumas ressalvas, as cinzas podem ser empregadas com o objetivo de estabilização de resíduos, conforme diversos trabalhos e pesquisas têm comprovado nos últimos anos (POZZOBON, 1999).

Nos Estados Unidos, antigamente, as cinzas eram liberadas no ar através de chaminés, porém, hoje em dia, as leis exigem que as emissões de cinzas volantes sejam recolhidas e armazenadas por dispositivos de controle de poluição. Na década de 1960 já havia, neste país, uma política para resíduos denominada *Resource Conservation and Recovering Act* (RCRA), que é uma lei federal que rege o descarte de resíduos sólidos perigosos e não perigosos. Atualmente, as cinzas são dispostas perto das próprias usinas ou ainda em aterros sanitários, e, por este motivo, a lixiviação de elementos tóxicos existentes nos resíduos representa o maior problema ambiental do país (IEA, 2017 apud VASCONCELOS, 2018).

A Figura 7 mostra o colapso de um aterro em uma represa para armazenamento de cinzas volantes da usina *Kingston Fossil Plant*, nos Estados Unidos, em dezembro de 2008.

Figura 7 – Problema ambiental ocasionado pelo derramamento de cinzas nos Estados Unidos



Fonte: Wikiwand (2022)

Este colapso ocasionou a liberação de 5,4 milhões de metros cúbicos de cinzas volantes, as quais fluíram em direção a um rio importante, contaminando a água subterrânea e o solo da região. O fato ocasionou a completa destruição de 3 casas e atingiu outras 23.

Nunes *et al.* (1996, apud Farias, 2005) analisaram o emprego da cinza pesada proveniente da queima de carvão mineral, além de outros resíduos, na pavimentação e, como resultado, o estudo propôs benefícios para a reutilização das cinzas, tais como uma redução da demanda por materiais primários e convencionais, uma diminuição dos custos energéticos referentes à extração e transporte de agregados convencionais, uma redução dos custos ambientais e a recuperação dos passivos ambientais gerados pela exploração de jazidas de materiais convencionais, uma diminuição dos problemas ambientais e econômicos com a estocagem e disposição final dos resíduos, além de benefícios comerciais oriundos do uso de materiais residuais.

2.3 Estabilização de solos aplicada à pavimentação

A escassez de materiais tradicionalmente utilizados nas camadas granulares dos pavimentos que atendam aos critérios e orientações das normas vigentes representa um fator limitante na engenharia rodoviária, uma vez que o solo e as demais matérias-primas consistem em recursos não renováveis (ARAÚJO, 2009).

Por ser um material complexo e apresentar características variáveis, dependendo de sua localização, o solo natural é muito utilizado nas obras de engenharia, principalmente por apresentar baixo custo e disponibilidade e ocorrência universal. No entanto, muitas das vezes os solos encontrados *in loco* não atendem as especificações normativas para seu uso em determinada obra, devendo ser realizada a sua estabilização (NÚÑEZ, 1991).

De acordo com Baptista (1976), a estabilização de solos é um processo de natureza física, físico-química ou mecânica, adotado para conferir estabilidade ao solo para sua utilização, considerando as ações de cargas externas e alterações climáticas. Para Ingles e Metcalf (1972), estabilizar um solo é um método a partir do qual se procura melhorar as suas características comportamentais, essencialmente no que se refere às questões de resistência, deformabilidade, durabilidade e permeabilidade.

Para Medina e Motta (2015), a estabilização de solos tem como finalidade alterar algumas propriedades do solo no âmbito da engenharia, a exemplo da resistência ao cisalhamento, permeabilidade e compressibilidade.

Conforme Vogt (1971), estabilizar um solo consiste em conferir-lhe a capacidade de resistir e suportar as cargas e os esforços provenientes do tráfego que incidem sobre o pavimento e também suportar as ações erosivas, as mudanças climáticas e os efeitos das intempéries. Para tanto, deve-se recorrer a processos naturais e artificiais para adequar as

propriedades de resistência mecânica e garantir que essa melhora se mantenha ao longo de toda a vida de projeto das obras de engenharia.

Para que um solo possa ser utilizado nas camadas de base e sub-base dos pavimentos é necessário que este atenda as especificações normativas mínimas, como, por exemplo, boa resistência mecânica e capacidade de suporte, além de baixa expansão. Assim, a estabilização de solos se apresenta como uma das técnicas empregadas para a melhoria de algumas destas propriedades, de modo a tornar o solo mais adequado para sua aplicação (VASCONCELOS, 2016).

Conforme Senço (2001), ao se utilizar um dado solo com fins voltados à pavimentação, devem ser realizados estudos prévios de qualidade e controle no decorrer de sua aplicação, uma vez que estudos acerca da localização da jazida, considerando a disponibilidade de materiais locais ou sobre qual tipo de estabilização empregar, por exemplo, consistem em atividades fundamentais dos engenheiros de pesquisas.

De acordo com Cristelo (2001), um dos principais empregos da estabilização de solos é nas camadas de base e sub-base de pavimentos, além de camadas de desgaste de estradas e aeródromos. Como muitas das vezes os solos disponíveis para as obras de engenharia não possuem as propriedades necessárias e não atendem as exigências mínimas das normas vigentes, surge a necessidade de adotar métodos e técnicas de melhoramento dessas propriedades, principalmente da capacidade mecânica.

Os processos de estabilização de solos podem ser de natureza física, mecânica ou química, devendo a escolha da técnica a ser utilizada baseada no propósito da obra, nas propriedades e características do solo natural e na viabilidade econômica (VASCONCELOS, 2016).

2.3.1 Estabilização física

O processo de estabilização física consiste em modificar as propriedades do solo, geralmente, através do calor e da eletricidade, podendo ser dividido em estabilização por eletro-osmose e estabilização térmica por aquecimento. Esta última se dá por meio elétrico ou ainda por meio da queima de um combustível colocado em um tubo, a partir do qual a zona do solo é aquecida e a água é evaporada (DIAS, 2012).

A estabilização por eletro-osmose ocorre a partir da passagem de uma corrente elétrica entre dois eletrodos dispostos em uma amostra de solo. A finalidade é fazer com que ocorra a passagem da água do solo no sentido do eletrodo positivo para o negativo, onde será realizada

a sua remoção, permitindo, assim, a consolidação do solo através da diminuição da quantidade de água (CRISTELO, 2001).

Ainda conforme Dias (2012), apesar da estabilização física está sendo muito estudada e testada nos últimos anos, apresenta como desvantagem um maior custo quando em comparação com os demais métodos, sendo, de fato, adotada quando não se é possível a utilização dos demais tipos de estabilização de solos.

2.3.2 Estabilização mecânica

Por vezes, os solos usados nas obras de engenharia rodoviária necessitam de uma melhoria e adequação na sua estabilidade mecânica, visando conferir uma maior durabilidade aos pavimentos, além de propiciar a alteração de seus volumes potenciais (LITTLE, 1995).

Segundo Nascimento (1970), a estabilização de natureza mecânica de solos tem como finalidade conferir maior estabilidade por meio de um conjunto de operações mecânicas realizadas no solo, ou numa mistura de solos, a fim de modificar a granulometria ou o arranjo das partículas do solo, normalmente através da adição ou retirada de algumas frações de materiais.

A estabilização mecânica de solos pode ser realizada a partir de duas técnicas principais, sendo elas por compactação e por estabilização granulométrica. Considerando todos os métodos de estabilização, o de natureza mecânica se apresenta como sendo o de menor complexidade e o mais viável economicamente (DIAS, 2012).

2.3.2.1 Estabilização mecânica por compactação

A estabilização mecânica por compactação é a técnica de estabilização de solos mais usada e consiste na variação da energia de compactação, a qual pode ser normal, intermediária ou modificada, além de ser responsável pela adequação da estabilidade mecânica de quase todo tipo de solo. No entanto, apenas a compactação não é suficiente para estabilizar solos muito coesivos ou de granulometria muito fina (LITTLE, 1995).

Este método é executado com o auxílio de equipamento mecânico, normalmente um rolo compactador ou até mesmo soquetes manuais nos casos de pequenas valetas. A estabilização mecânica por compactação consiste em um processo que confere ao solo, ou mistura de solos, uma melhoria na sua condição de densificação máxima, referente a uma umidade ótima e uma energia de compactação. A densificação é comumente utilizada na

execução das camadas de pavimentos e, em geral, associada a outros meios de estabilização (VASCONCELOS, 2016).

2.3.2.2 Estabilização granulométrica

A estabilização granulométrica consiste na utilização de um material, ou na mistura de materiais, de modo a garantir que o solo atenda às exigências mínimas normativas, resultando no aumento da resistência através do contato entre os grãos maiores e os grãos menores, proporcionando uma melhoria na permeabilidade e uma maior densidade (GONDIM, 2008).

Conforme Santos *et al.* (1995), a estabilização por correção granulométrica propicia a melhoria das propriedades do solo por meio da adição ou subtração de materiais, isto é, esta técnica garante que o solo atenda os requisitos normativos através da mistura do solo original com outro(s) solos(s).

Para Villibor (1982), a estabilização granulométrica diz respeito à manipulação e combinação de solos, em proporções específicas, objetivando aumentar a estabilidade do solo inicial e garantir que seu uso atenda às exigências de um caso particular. Vale salientar que a natureza das partículas dos solos tem influência direta no comportamento da composição granulométrica final.

Normalmente, a estabilização por compactação e a granulométrica são executados em conjunto, sendo inicialmente realizada a correção granulométrica, seguida da compactação da mistura, visando-se obter um material mais compacto e menos deformável (VASCONCELOS, 2016).

2.3.3 Estabilização química

A estabilização química consiste na adição de substâncias químicas ao solo, com a finalidade de proporcionar uma melhoria nas propriedades de resistência mecânica, deformabilidade e permeabilidade, sendo os aditivos mais utilizados o cimento *Portland*, cal, materiais betuminosos, pozolanas e resinas (SANTOS *et al.*, 1995).

No processo de estabilização química ocorrem reações químicas entre os aditivos empregados e os minerais do solo ou com a água existente nos poros desses minerais. Os materiais mais utilizados para a estabilização de solos finos e argilosos com altos teores de matéria orgânica são o cimento e a cal, os quais, ao serem misturados com o solo, conferem

resistência a este por meio da cimentação dos grãos entre si ou ainda através do aumento das forças coloidais que unem esses grãos (VASCONCELOS, 2016).

De acordo com o IFG (2005), *International Focus Group on Rural Road Engineering*, a estabilização química consiste na adição de agente estabilizador ao solo, de modo que este adquira uma umidade ótima, compactação e cura adequadas para que se obtenha como resultado um solo com resistência satisfatória.

No processo da estabilização química ocorrem reações químicas entre as partículas minerais do solo e os aditivos empregados, podendo ocorrer ainda com a água presente nos poros dos minerais. O aditivo atua de modo a conferir resistência ao solo através da cimentação dos grãos entre si ou através do aumento das forças coloidais que unem os grãos, sendo a cal e o cimento os aditivos mais utilizados para estabilizar solos finos e argilosos com grande percentual de matéria orgânica (VASCONCELOS, 2016).

No âmbito da pavimentação, utilizam-se muito os materiais betuminosos como aditivos na técnica de estabilização química. Para Senço (2001), a estabilização química com o uso de materiais betuminosos é realizada, basicamente, adicionando um material betuminoso ao solo, ou mistura de solos, com a finalidade de melhorar as propriedades deste(s).

2.4 Materiais alternativos para estabilização de solos

Considerando que os materiais tradicionais utilizados na pavimentação não são renováveis, torna-se necessário que se pesquise materiais alternativos para sua substituição. Para tanto, é necessário que sejam desenvolvidos estudos que garantam uma finalidade adequada a diversos materiais que, até então, não apresentavam uma função específica. Diversos materiais são estudados com o objetivo de avaliar a viabilidade de seu uso nas camadas granulares de pavimentos flexíveis, variando desde materiais naturais aos que sofreram alguma modificação devido à ação humana (SILVA; SANTOS, 2021).

É cada vez mais comum a realização de pesquisas com o objetivo de empregar materiais alternativos com uso viável na construção de pavimentos rodoviários, sendo que já existem vários estudos que indicam a viabilidade de vários materiais, tais como resíduos sólidos de construção e demolição (RCD), cinzas de carvão mineral, cal, cascas de grãos, como arroz e soja, cerâmica vermelha, aço-brita, escória de aciaria, entre outros (SILVA; SANTOS, 2021). As Figuras 8 (a), (b) e (c) apresentam imagens de alguns destes materiais.

Figuras 8 – Cinza de carvão mineral (a), escória de aciaria (b) e RCD (c), respectivamente



Fonte: EBC (2012); *Researchgate* (2017); ABRECON (2016)

Atualmente, muito se discute acerca de medidas para reduzir os problemas que envolvem as questões ambientais, como o descarte incorreto de lixo, aumento do uso de fontes de energias poluentes, uso excessivo de materiais não renováveis etc. Muitos dos materiais empregados na pavimentação não são renováveis e o uso de materiais alternativos vem se tornando cada vez mais frequente, a partir de estudos que mostram sua viabilidade técnica, econômica e ambiental, uma vez que além de atender à escassez de matéria-prima também são dados destinos adequados a materiais gerados por diferentes atividades produtivas (ARAÚJO, 2008).

A cinza volante é um resíduo gerado a partir da queima de carvão mineral em termelétricas e vêm sendo muito pesquisada em misturas com solo e cal. Devido às suas propriedades pozolânicas e sua abundância, a cinza é muito utilizada em vários países, sendo no Brasil seu principal uso voltado à fabricação de cimento pozolânicas. A cal, por sua vez, é utilizada desde a antiguidade, é econômica e representa uma ótima opção de estabilizador químico.

2.4.1 Utilização de cinzas na pavimentação

O emprego de cinzas de carvão mineral como aglomerante em camadas de pavimentos se expandiu muito desde a década de 1960 e em diversos países, como Inglaterra, França, Suécia e Rússia, o uso de cinzas no âmbito da pavimentação faz parte das alternativas convencionais utilizadas. O uso de cinzas mais conhecido no mundo é sua aplicação no concreto, sendo o primeiro grande uso de cinzas volantes na restauração do túnel vertedouro da barragem Hoover. A sua utilização mais conhecida, por sua vez, foi no reparo da barragem Backer em 1947, no Colorado (Rohde *et al.*, 2006).

No Brasil, o emprego das cinzas provenientes da queima de carvão mineral vem sendo estudada há algumas décadas. Nardi (1975) analisou o comportamento de misturas de solo e cinza volante leve, quando adicionados a compostos aglomerantes, como o cimento e a cal. O trabalho feito pelo autor foi complementado por Marcon (1977), o qual comprovou a viabilidade da estabilização de areia com cinza volante, com o uso de cal como estabilizante químico. O trabalho realizado por Nardi (1975) e Marcon (1977) serviu de base para a implantação de um trecho experimental situado às margens da BR-101, no município de Imbituba/SC, no qual sobre o subleito de areia foi construída uma sub-base estabilizada a partir do uso da cinza e cal.

Farias (2005) analisou o uso de misturas de solos do município de Tubarão/SC e cinzas pesadas da termelétrica Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo/SC, com a finalidade de avaliar a sua utilização em camadas estruturais de pavimentos. Tais cinzas apresentaram expansão e CBR de 0% e 5%, respectivamente. O autor também estudou o comportamento de misturas com o uso de cal, concluindo que a estabilização de misturas de solo, cinza pesada e cal melhorou consideravelmente a capacidade de suporte das misturas.

Câmara (2011) investigou a viabilidade do reaproveitamento das cinzas volantes e pesadas de carvão mineral do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, no município de Capivari de Baixo/SC em misturas com solo regional do Rio de Janeiro, objetivando verificar se a prática traria benefícios ao solo e analisar o efeito das cinzas sobre a microbiota de um solo tropical. Em seu estudo foram adicionados 5% de cinzas ao solo e, a partir disso, concluiu-se que por não apresentar nenhuma alteração considerável em sua composição e na atividade da microbiota, a cinza é adequada para fins de engenharia no solo empregado.

Barros (2015) analisou o uso de cinzas volantes provenientes da Termelétrica Energia Pecém do município de São Gonçalo do Amarante/CE em camadas granulares de pavimentos,

realizando ensaios de caracterização física, mecânica e ambiental da cinza e do solo estudados. Também foram realizados ensaios em misturas estabilizadas granulometricamente com solo e cinza e em misturas estabilizadas quimicamente com solo, cinza e cal.

Vasconcelos (2016) realizou um estudo visando avaliar, por meio de ensaios laboratoriais, a viabilidade do uso de cinzas de carvão mineral oriundas também da Termelétrica Energia Pecém, localizada na Região Metropolitana de Fortaleza/CE, em camadas de base e sub-base de pavimentos. Foram executados ensaios de caracterização ambiental, física e mecânica do solo regional e das cinzas e da mistura destes materiais na proporção de 50% de solo e 50% de cinzas. Como resultado, concluiu-se que o uso de cinzas na pavimentação representa uma ótima alternativa para a engenharia, além de dar uma finalidade técnica e ambientalmente sustentável aos rejeitos produzidos pelas termelétricas.

Dois anos depois, Vasconcelos (2018), investigou o emprego de cinzas de carvão mineral da Termelétrica Energia Pecém em camadas granulares de pavimentos, por meio de ensaios de laboratório e de análise mecanística-empírica. Já em posse dos dados da caracterização física, mecânica e ambiental do solo e da cinza estudados anteriormente, a autora realizou ensaios para a caracterização de diferentes misturas de solo, cinza e cal para a estabilização de solos. Também foi executado um dimensionamento de um pavimento idealizado através do método mecanístico-empírico. A autora concluiu que o uso dos resíduos da termelétrica na pavimentação é viável do ponto de vista técnico-financeiro e ambiental.

A Figura 9 mostra o uso de cinzas de carvão mineral do Complexo Termelétrico de Pecém para a construção da primeira estrada do Ceará que reutiliza este material na pavimentação, a qual foi finalizada em 2019.

Figura 9 – Construção da primeira estrada do Ceará que reutiliza cinzas de carvão mineral



Fonte: Atrai Aditivos (2019)

O projeto foi feito em parceria com a Universidade Federal do Ceará da Agência Canal Energia Compartilhar, a partir do qual as cinzas foram usadas em duas camadas que constituem a base da estrada, sendo que em uma delas o material substituiu 50% do solo e na outra substituiu 95% da composição (ATRAI ADITIVOS, 2019).

2.5 Uso de cal como agente estabilizador de solos

O emprego de cal para a obtenção da estabilização ou melhoria de solos instáveis consiste em uma das técnicas mais antigas adotadas pelo homem. De acordo com Guimarães (2002), a estabilização com cal, também chamada de solo-cal, é realizada a partir de uma mistura de solo, cal e água em proporções previamente estabelecidas em ensaios laboratoriais.

A cal é muito utilizada para a melhoria de solos argilosos e siltosos, os quais tendem a possuir plasticidade e expansão elevadas, além de uma capacidade de suporte reduzida. A adição de cal como agente estabilizador melhora a trabalhabilidade, aumenta a resistência e diminui a expansibilidade do solo (SANTOS, 2004).

Conforme Teng Júnior (2001), o óxido de cálcio (CaO), mais conhecido por cal, é obtido pela decomposição térmica, seja pela queima ou calcinação, de rochas calcárias moídas em diferentes fornos a uma temperatura em torno de 900 °C. Representa um dos materiais de construção mais antigos do mundo e possui emprego muito amplo, seja na construção civil, na construção de estradas, siderurgia e metalurgia, indústria química, agricultura, saúde, preservação ambiente, entre outros.

Imediatamente ao serem misturados, iniciam-se reações químicas na mistura de solo-cal que modificam as propriedades geotécnicas do solo, a exemplo da plasticidade, a quantidade de material fino e capacidade de suporte, sendo que estas características dependem também de outros aspectos, como o tipo de solo, a quantidade de cal a ser usada, o tempo, a temperatura de cura, entre outros (SOUZA, 2014).

Conforme Santos (2004), solos classificados como A-5, A-6, A-7 e alguns A-2-6 e A-2-7 de acordo com o sistema TRB, *Transportation Research Board*, atualmente chamado de sistema AASHTO, *American Association of State Highways and Transportation Officials*, e solos classificados como CH, CL, MH, ML, CLML, SC, GC e GM5 pelo SUCS, Sistema Unificado de Classificação de Solos, são exemplos de solos considerados potencialmente estabilizáveis a partir do uso de cal.

A mistura de solo-cal consiste numa mistura entre solo, cal e água em quantidades pré-estabelecidas e, nesta técnica, ocorrem reações químicas e físico-químicas entre a cal e os materiais constituintes do solo, principalmente a fração mais fina (AZEVEDO *et al.*, 1998).

De acordo com Mallela *et al.* (2004), o solo apresenta inúmeras características e propriedades que influenciam a sua reatividade com a cal, como a mineralogia da fração de argila, o pH do solo, a presença de carbonatos e/ou sulfatos, a relação sílica/alumínio, a relação sílica/sesquióxidos, o grau de intemperismo, a quantidade de matéria orgânica, a drenagem natural, a presença em excesso de sódio permutável e o ferro que pode ser extraído.

A cal virgem, ou cal viva, é o produto inicial resultante da queima de rochas calcárias, o qual é constituído majoritariamente de óxidos de cálcio e magnésio. O seu uso, por demandar cuidados com a segurança dos trabalhadores, vem sendo substituído pela cal hidratada. A cal hidratada, por sua vez, é uma combinação de cal virgem com água e é resultante da hidratação dos óxidos de cálcio e/ou cálcio-magnésio, obtida na forma de pó seco, com cerca de 17% a 19% de água combinada (GUIMARÃES, 2002).

A cal hidratada é classificada em função de sua composição química, podendo ser do tipo CH-I, CH-II ou CH-III, conforme a ABNT NBR 7175 (2003). Para Azevedo *et al.* (1998), a diferença entre os tipos de cales hidratadas está nos teores de cálcio, isto é, quanto maior o teor de cálcio, mais próxima a cal do CH-I e nos teores de carbonatos, isto é, quanto menor o teor de carbonato, mais próxima a cal do CH-I.

Caso o solo possua algum tipo de contaminante, a cal pode atuar nas misturas com solo como um encapsulante de resíduos e, desta maneira, a estabilização química através da técnica de encapsulamento de resíduos potencialmente perigosos ocasiona a redução da superfície de contato do contaminante com o ambiente em que este se encontra, tornando, assim, o resíduo menos agressivo ao meio ambiente, sendo possível sua reincorporação em camadas de pavimentos (BARROS, 2015).

Existem diversos estudos acerca do uso de cal como agente estabilizador de solos. Rabassa *et al.* (2006) realizaram ensaios de resistência à compressão simples (RCS) em misturas de solo-cal nos teores de 3%, 5%, 7%, 9% e 11%, moldadas na energia Proctor Normal e os corpos de prova foram rompidos aos 3, 7, 14 e 28 dias, com e sem imersão prévia em água por quatro horas, a partir dos quais foi possível verificar a viabilidade do uso de cal como estabilizador do solo, considerando os valores satisfatórios de resistência à compressão simples com o tempo de cura.

O primeiro estudo utilizando a mistura de solo-cal em camadas granulares dos pavimentos no estado do Ceará foi realizado por Loiola e Nobre Júnior (2001), no qual foi

projetado um trecho com extensão de 1 km a partir do uso da técnica de mistura com o espalhamento manual de sacos de cal. Este trecho fazia parte do segmento de 8,72 km para ligar o município de Limoeiro do Norte ao Distrito de Flores, em Russas. Anos depois, em 2007, Loiola e Barroso (2007) concluíram em seu trabalho que a mistura com 5% de cal utilizada numa camada de base em solo-cal apresentou um valor de resistência à compressão simples de aproximadamente 0,7 MPa, após 60 dias de cura e imersão de 4 horas antes do rompimento.

Araújo (2009), por sua vez, analisou solos do Baixo Jaguaribe/CE, que de início não atendiam às especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para uso em pavimentos. Em seu trabalho, foram estudados dois tipos de solos, um de Aracati e outro de Morada Nova, estabilizados quimicamente com a cal, em pó e em pasta, com teores de 3%, 5% e 7%.

Barros (2015) realizou um estudo sobre o uso de cinzas volantes de uma termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza/CE para aplicação em camadas granulares de pavimentos e, para tanto, realizou caracterização física, mecânica e ambiental das cinzas, do solo local e de misturas estabilizadas granulometricamente por solo e cinza e misturas estabilizadas quimicamente por solo, cinza e cal, com um teor de 5%. As misturas foram avaliadas em tempos de cura de 0, 7, 14 e 28 dias para os ensaios de Índice de Suporte Califórnia (CBR), Módulo de Resiliência (MR), Resistência à Compressão Simples (RCS) e Resistência à Tração (RT). Os resultados obtidos neste trabalho demonstraram a viabilidade do emprego das cinzas volantes em camadas granulares dos pavimentos.

Vasconcelos (2018), em sua dissertação, tratou acerca da avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos, no qual foram produzidas misturas de solo-cinza com 50% de solo e 50% de cinza, cinza-cal e de solo, cinza e cal, na proporção de 1%, 3% e 5% do estabilizante químico. Para tais misturas, foram executadas, nos tempos de cura de 0, 7, 14 e 28 dias, ensaios de compactação Proctor, CBR (*California Bearing Ratio*), MR (Módulo de Resiliência), RCS (Resistência à Compressão Simples), RTCD (Resistência à Tração por Compressão Diametral), além de ensaios de avaliação da qualidade da imprimação betuminosa. A autora concluiu que o reaproveitamento dos resíduos da termelétrica na pavimentação é viável tanto do ponto de vista técnico, quanto do econômico e ambiental.

2.5.1 Encapsulamento de contaminantes

A estabilização química é utilizada com a finalidade de melhorar e adequar as propriedades e características físico-químicas e mecânicas dos materiais de construção no que se refere às exigências mínimas normativas para a sua aplicação. Contudo, a estabilização química de solos com cal ou com cimento também representa uma ótima alternativa do ponto de vista ambiental, uma vez que o agente estabilizador pode ser usado como encapsulante para tratamento de solos ou resíduos contaminados (BARROS, 2015).

Segundo Oliveira *et al.* (2003), o processo de encapsulamento de contaminantes, também chamada de solidificação/estabilização, é uma boa alternativa para tratar e gerenciar resíduos potencialmente perigosos, além de adequar suas propriedades físicas e características toxicológicas.

A técnica de encapsulamento envolve a adição de um agente cimentante, a exemplo de cal ou cimento, a fim de promover a redução da solubilização de contaminantes presentes no solo ou resíduos provenientes de indústrias. O agente cimentante, por sua vez, gera uma massa solidificada de resíduo, o que possibilita uma maior integridade estrutural e praticidade no manuseio ou transporte do material (WILES, 1987).

A solidificação, por sua vez, diz respeito ao processo em que o resíduo é encapsulado na forma de um material sólido, o que limita a migração de contaminantes através da redução da área superficial exposta ao processo de lixiviação e solubilização e/ou reveste os resíduos com materiais pouco permeáveis (IBAÑÉZ *et al.*, 1998).

De acordo com a ABNT NBR 10004 (2004), os resíduos sólidos podem ser classificados em decorrência dos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente em resíduos perigosos (classe I) ou não perigosos (classe II). Os não perigosos podem ainda ser divididos em não inertes (classe II A) e inertes (classe II B).

Conforme Barros (2015), os resíduos perigosos, em decorrência de sua inflamabilidade, corrosividade, reatividade e/ou toxicidade, geram riscos à saúde pública e podem provocar efeitos adversos ao meio ambiente quando empregados ou dispostos de maneira inadequada, justificando o uso da técnica de encapsulamento.

Os agentes estabilizadores mais utilizados no processo de encapsulamento são a cal e o cimento *Portland*. Do ponto de vista químico, ambos agem de maneira a alcalinizar o ambiente, aumentando o pH do composto e diminuindo a solubilidade dos contaminantes. Do ponto de vista físico, a cal demonstra uma resposta a um intervalo de tempo bem maior do que o cimento, uma vez que sua cura se dá em mais tempo (CABERLON, 2005).

Para Braga *et al.* (2002), existem inúmeros processos de encapsulamento, os quais podem ter como agente cimento *Portland*, cal, polímeros, polímeros orgânicos, autosolidificação, técnicas de encapsulamento superficial, transformação em vidros e/ou cerâmicas e baseadas em argilas naturais modificadas. Apesar do cimento e da cal serem os agentes encapsulantes mais utilizados e conhecidos, Barros (2015) cita a cinza volante, o cloreto de cálcio e o sulfonato de lignina como outros aditivos que podem ser utilizados para o encapsulamento de contaminantes, tornando-os menos danoso ao meio ambiente.

Para avaliar o processo de encapsulamento é essencial a execução de alguns ensaios laboratoriais de caracterização física, como os de densidade, compactação, permeabilidade, resistência à compressão simples e durabilidade e de caracterização química, como o ensaio de lixiviação (SUTHERSAN, 1997).

De acordo com Ruver *et al.* (2003), a técnica de encapsulamento é um resultado de interações físicas e químicas. A interação física diz respeito ao encapsulamento do contaminante, gerando melhorias nas características e propriedades, como resistência e permeabilidade, ao passo que a interação química consiste na alteração das propriedades químicas do contaminante, de modo a reduzir ou impossibilitar sua lixiviação.

2.6 Dimensionamento de pavimentos flexíveis

O dimensionamento de um pavimento consiste na determinação das espessuras das camadas e a composição dos materiais a serem utilizados, de modo que a estrutura tenha a capacidade de suportar o carregamento proveniente de um dado volume de tráfego, além das condições climáticas a que estará sujeita (BALBO, 2007).

As espessuras das camadas e os materiais empregados em um pavimento devem resistir aos esforços e suportar um dado número de repetições de carga durante sua vida útil, isto é, as diferentes camadas e materiais devem resistir aos esforços solicitantes e transferi-los às camadas posteriores, devendo as estruturas do pavimento ser projetada com a finalidade de resistir as múltiplas solicitações de carga, dentro do horizonte de projeto estabelecido (BENEVIDES, 2000).

Os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis podem ser classificados em empíricos ou mecanísticos. O método empírico se baseia no desempenho ao longo do tempo das estruturas de um pavimento, através de experiências observadas *in loco*, ao passo que o método mecanístico é fundamentado na teoria elástica considerada adequada para a

interpretação de fenômenos. Existe ainda, o método mecanístico-empírico que consiste numa associação dos dois modelos (SENÇO, 2007 apud Hartmann, 2009).

Conforme Coutinho (2011) e Motta (1991), o início da execução de pavimentos flexíveis se deu efetivamente na década de 1950, no período em que o engenheiro Murillo Lopes de Souza propôs um método de dimensionamento de pavimentos, baseado em uma adaptação dos conceitos obtidos em testes de campo e em pistas experimentais do Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE) e da AASHO/AASHTO, que atualmente é o método empírico de dimensionamento adotado pelo DNIT.

Este método adota coeficientes de equivalência estrutural tomando por base os resultados obtidos na pista experimental da AASHTO com algumas alterações que foram consideradas oportunas. A capacidade de suporte do subleito e dos materiais que compõem os pavimentos é determinada pelo ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*), ou ISC (Índice de Suporte Califórnia), o qual é preconizado pela norma DNER – ME – 172/2016, a partir da qual são moldados corpos de prova em laboratório para as condições de massa específica aparente e umidade especificada para o serviço (DNER, 2006).

Ainda conforme o DNER (2006), o subleito e as demais camadas do pavimento devem ser compactadas de acordo com valores estabelecidos nas “Especificações Gerais”, sendo recomendado que o grau de compactação, em nenhum caso, deve ser inferior a 100% do que foi especificado. No caso de solos granulares com granulação grossa deve ser utilizada a energia de compressão correspondente ao Proctor modificado.

O método do DNIT é essencialmente empírico, entretanto muito utilizado na área rodoviária brasileira. Nos últimos anos, tem se verificado um rompimento prematuro da malha, o qual pode estar correlacionado com a questão da repetição das aplicações das cargas (MEDINA; MOTTA, 2015).

Conforme Cabral (2021), no Brasil, a maior parte dos pavimentos ainda é dimensionada empiricamente, levando-se em conta informações pouco representativas da realidade estrutural das camadas do pavimento em relação às solicitações das cargas dos veículos, uma vez que estes dados são obtidos através de ensaios baseados na aplicação de cargas estáticas. No entanto, nota-se que esforços têm sido realizados no sentido de desenvolver e validar a adoção de técnicas mais racionais. É o caso do método MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), apresentado pelo DNIT há alguns anos, o qual permite dimensionar pavimentos incluindo dados mecânicos obtidos por meio de ensaios dinâmicos.

O método MeDiNa foi iniciado por Motta (1991) e atualizado por Medina e Motta (2015) e representou um grande avanço para o Brasil, uma vez que leva em consideração dados com o valor do Módulo de Resiliência (MR) dos solos e da camada de revestimento asfáltico, a análise estrutural através de programa em Elementos Finitos (MEF), a análise de desempenho em função da fadiga, a tensão vertical no topo do subleito, entre outras considerações. Medina e Motta apresentaram o método por meio de pesquisas desenvolvidas na Rede Tecnológica de Asfaltos (RTA), incluindo parâmetros de deformabilidade plástica no pavimento asfáltico em todas as camadas, tornando possível o entendimento da estrutura com suas deformações permanentes totais (SANTIAGO, 2017).

O uso de métodos mecanísticos para o dimensionamento de pavimentos flexíveis apresenta como vantagens uma melhor confiabilidade no projeto, a possibilidade de prever defeitos específicos e consequências devido um novo carregamento, além de uma melhor utilização dos materiais disponíveis. O método MeDiNa, por sua vez, apresenta melhores resultados na mensuração de pavimentos flexíveis e apresenta uma redução no custo total da estrada, com camadas mais esbeltas, e no seu tempo de execução (FRANÇA, 2018).

2.6.1 Dimensionamento pelo método do DNIT

A Tabela 2 apresenta os valores de expansão e CBR estabelecidos pelo DNIT (2006), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, para as camadas de um pavimento, considerando um volume de tráfego pesado.

Tabela 2 – Valores de expansão e CBR estabelecidos pelo DNIT (2006)

CAMADAS	EXPANSÃO (%)	CBR (%)
Subleito	$\leq 2,0$	$\geq 2,0$
Reforço do subleito	$\leq 1,0$	> que o do subleito
Sub-base	$\leq 1,0$	$\geq 20,0$
Base	$\leq 0,5$	$\geq 80,0$
Rodovias vicinais	$\leq 0,5$	$\geq 60,0$

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

O DNIT (2006) destaca ainda que se o limite de liquidez do material for maior que 25% e/ou o índice de plasticidade for superior a 6%, este pode ser utilizado em bases de pavimentos, desde que atendam as demais condições e que o equivalente de areia seja maior que 30%.

Após a caracterização dos materiais a serem utilizados nas camadas de um pavimento a partir do ensaio de CBR, segue-se com o dimensionamento empírico, utilizando-se as melhores misturas estudadas em camadas granulares. O dimensionamento de um pavimento, além dos materiais adotados, leva em conta o efeito destrutivo do tráfego, o qual é representado pelo número N, isto é, o número equivalente de operações de um eixo tomado como padrão, durante a vida de projeto adotado. O número N, por sua vez, é determinado a partir do cálculo do volume total de tráfego (DNIT, 2006).

Em posse destas informações, determinam-se os coeficientes de equivalência estrutural (K) para os diferentes materiais que irão compor o pavimento, em uma relação conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficiente de equivalência estrutural

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

A partir disso, determina-se a espessura mínima do revestimento, a qual está diretamente relacionada com o número N. A Tabela 4 apresenta as espessuras mínimas de revestimento betuminoso em função do número N, segundo recomendações do DNIT (2006).

Tabela 4 – Espessura mínima de revestimento betuminoso

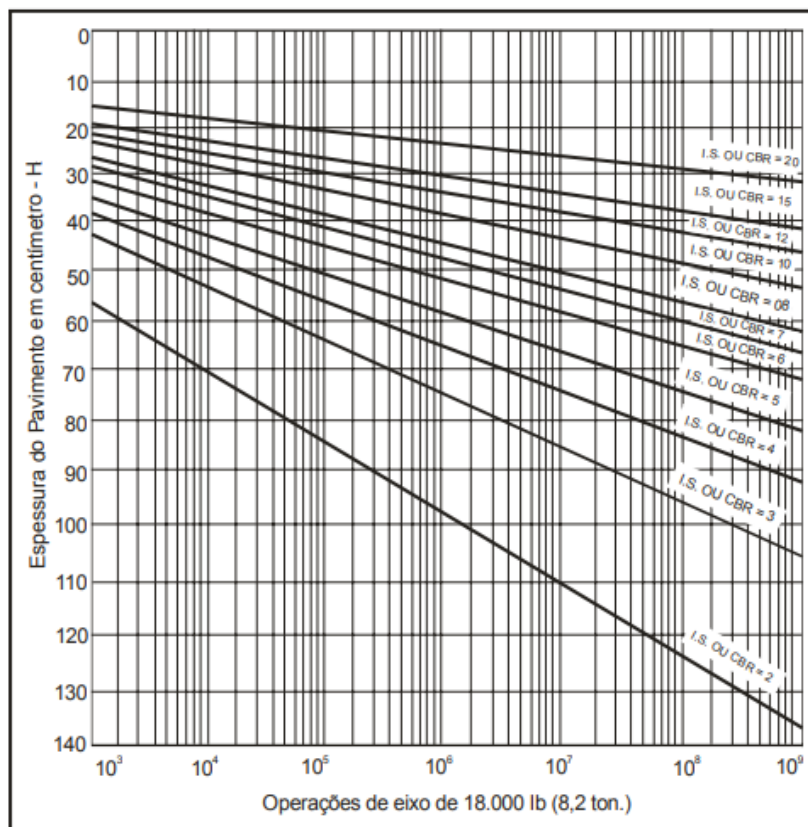
N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

Em seguida, realiza-se o dimensionamento propriamente dito do pavimento, determinando-se as espessuras das camadas usando inequações estabelecidas no próprio

método e o ábaco da Figura 10, os quais consideram a capacidade de suporte dos materiais e os parâmetros do tráfego.

Figura 10 – Determinação de espessuras do pavimento pelo método do DNIT



Fonte: DNIT (2006)

Inicialmente, entra-se com o valor do número N , nas abscissas, procedendo-se verticalmente até encontrar a reta representativa do CBR, rebatendo-a horizontalmente, de modo a encontrar a espessura do pavimento, nas ordenadas. A espessura dada por este gráfico é em termos de base granular, isto é, $K = 1,0$.

De acordo com o DNIT (2006), deve-se supor sempre que a drenagem superficial é adequada e que o lençol d'água subterrâneo foi rebaixado a 1,50 metros, no mínimo, em relação ao greide de regularização e, no caso de materiais com CBR menor que 2,0%, recomenda-se que seja feita sua substituição com uma espessura de 1,0 metro, no mínimo, por algum material com CBR superior a 2,0%.

Vale salientar que as espessuras máximas e mínimas de compactação das camadas granulares são, respectivamente, de 20 cm e 10 cm, sendo a espessura mínima construtiva para estas camadas iguais a 15 cm. Além disso, mesmo que o CBR da sub-base seja maior que 20%, a espessura do pavimento necessária para protegê-la é definida considerando esse

valor de 20%, usando-se os símbolos H_{20} e h_{20} para as espessuras de pavimento sobre a sub-base e a espessura de sub-base, respectivamente (DNIT, 2006).

2.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordados, por meio de uma revisão de literatura, assuntos que dizem respeito à estabilização de solos com fins de pavimentação a partir do uso de cinzas de carvão mineral provenientes de usinas termelétricas e de cal. Inicialmente, discutiu-se acerca dos métodos de estabilização de solos, sobre materiais alternativos para a estabilização de solos, dando ênfase ao uso de cinzas e de cal como materiais estabilizadores, sobre os potenciais impactos ambientais decorrentes de seu uso, sobre a utilização do carvão como fonte de energia em termelétricas, sobre o cenário de geração de energia elétrica no Brasil e no Ceará, além de tratar acerca dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

No capítulo seguinte foram explanados os materiais utilizados e a metodologia adotada neste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho teve como finalidade uma pesquisa aplicada ou tecnológica, uma vez que, a partir da caracterização de um solo regional de Mossoró/RN e estabilização do mesmo a partir de sua mistura com cinza de carvão mineral e cal, buscou-se produzir conhecimentos úteis para a ciência e contribuir no que se refere à solução de problemas reais do cotidiano. Conforme Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa aplicada é aquela que além de gerar conhecimento para aplicação prática, busca também encontrar soluções para as necessidades e problemas específicos encontrados na realidade, envolvendo, por vezes, verdades e interesses locais.

Quanto à natureza, utilizou-se uma pesquisa experimental, através da qual foram realizados diversos ensaios laboratoriais visando à estabilização de um solo. De acordo com Menezes *et al.* (2019), o método experimental é aquele que envolve algum tipo de experimento e que efetua pesquisas com seleção de amostras e com controle de variáveis e análise dos dados de forma mais precisa, no qual o pesquisador participa de forma ativa.

No que se refere à forma de abordagem, fez-se uso de uma pesquisa analítica, a qual se caracteriza por buscar explicar a relação entre causa e efeito, envolvendo uma avaliação aprofundada de informações coletadas em um dado estudo, seja ele observacional ou experimental, de modo a explicar o contexto de um fenômeno (MARCONI; LAKATOS, 2005).

Quanto aos objetivos, utilizou-se uma pesquisa explicativa, a qual foi baseada em experimentos, envolvendo hipóteses especulativas. De acordo com Gil (1999), a pesquisa explicativa busca estabelecer os fatores que determinam ou contribuem para a sucessão de um fenômeno, aprofundando o conhecimento da realidade e justificando as relações de causa e efeito dos fenômenos.

No que diz respeito aos procedimentos técnicos, adotou-se uma pesquisa laboratorial, tendo em vista que todo o estudo foi realizado em ambiente e situações controladas, com o uso de instrumentos precisos e específicos de coleta e análise dos dados.

Neste capítulo foram apresentados os materiais e as metodologias utilizadas para a concretização desta pesquisa e, desta forma, alcançar os objetivos estabelecidos.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram o solo regional do município de Mossoró/RN, cinzas de carvão mineral e cal hidratada.

3.1.1 Jazida de solo

O solo adotado para esta pesquisa é oriundo de uma jazida localizada no final do campus leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), nas proximidades do Abatedouro Frigorífico Industrial de Mossoró (AFIM), no município de Mossoró/RN. A Figura 11 ilustra a jazida explorada para a extração do solo regional.

Figura 11 – Jazida de solo explorada



Fonte: Autoria própria (2022)

A localização exata da jazida tem coordenadas geográficas de 5°12'34" S 37°18'59" W, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Localização da jazida do solo regional



Fonte: Google Earth (2022)

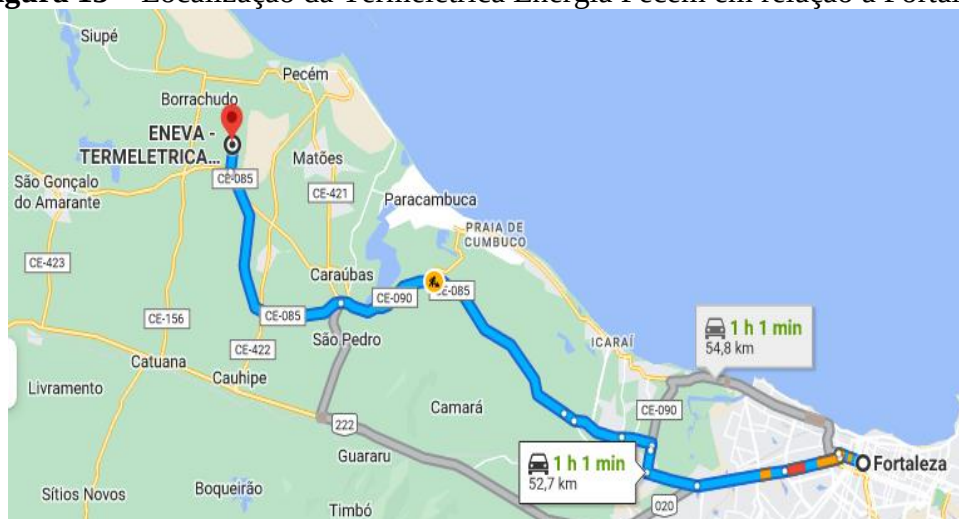
A microrregião de Mossoró, conforme Guilherme (2016), caracteriza-se por apresentar potencial natural e industrial no que diz respeito à produção de petróleo, sal, calcário e cimento, além de se encontrar em uma posição geográfica privilegiada, uma vez que está localizada entre as capitais do Rio Grande do Norte e do Ceará, estimulando os investimentos na área de Infraestrutura de Transportes e Logística.

3.1.2 Cinzas de carvão mineral

As cinzas de carvão mineral empregadas neste trabalho foram as mesmas estudadas por Vasconcelos (2016 e 2018) em seus trabalhos de monografia e dissertação, respectivamente. Vale ressaltar que as cinzas utilizadas foram coletadas no mesmo módulo de armazenagem e mesmo período de tempo que a autora, tornando válido, desta forma, o uso dos dados de caracterização das cinzas obtidos pela mesma.

Este material é oriundo da Usina Termelétrica Energia Pecém, localizada no município de São Gonçalo do Amarante, na Região Metropolitana de Fortaleza/CE, e está instalada no Complexo do Pecém. De acordo com Figura 13, a termelétrica está situada a uma distância de um pouco mais de 50 km de Fortaleza, no sentido litoral oeste (VASCONCELOS, 2016).

Figura 13 – Localização da Termelétrica Energia Pecém em relação à Fortaleza



Fonte: Google Maps (2022)

Esta termelétrica possui dois módulos para a disposição das cinzas. Como o Módulo I, ilustrado na Figura 14, já se encontrava com sua capacidade máxima de material armazenado atingida, Vasconcelos (2016) optou por utilizar as cinzas deste módulo em seu estudo.

Figura 14 – Módulo I de armazenagem das cinzas de carvão mineral



Fonte: Vasconcelos (2018)

Em algumas partes do módulo, as cinzas se encontravam mais soltas, facilitando a coleta manualmente com o uso de enxadas, picaretas e pá. Em outros locais, por sua vez, as cinzas se apresentavam em um estado mais compactado, havendo a necessidade de utilização de mini escavadeira e escavadeira hidráulica (VASCONCELOS, 2018).

3.1.3 Cal

Com a finalidade de estabilizar quimicamente as misturas do trabalho em questão, utilizou-se a cal hidratada calcítica comercial, visando sua atuação como encapsulante de possíveis materiais contaminantes presentes nas cinzas. O tipo de cal escolhido foi a classificada como CH-I, considerando que esta apresenta grau de pureza elevado.

3.2 Métodos

O processo metodológico desta pesquisa foi dividido em quatro etapas principais, sendo elas descritas em detalhes abaixo.

3.2.1 Caracterização das cinzas de carvão mineral

A primeira etapa consistiu na coleta de dados provenientes dos ensaios laboratoriais realizados por Vasconcelos (2016) e Vasconcelos (2018) para a caracterização e análise da heterogeneidade das cinzas de carvão mineral produzidas pela Termelétrica Energia Pecém.

Para todas as amostras coletadas, a autora citada realizou os ensaios de caracterização

física, como o de análise granulométrica e os limites de Atterberg, ensaios mecânicos, como compactação Proctor, CBR, caracterização ambiental, como solubilização e lixiviação e caracterização química, como fluorescência de Raio X. Para tanto, Vasconcelos (2016) utilizou as normas apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Ensaios e normas utilizadas para a caracterização das cinzas

PROCEDIMENTOS	ENSAIOS	MÉTODOS
Caracterização Física	Limite de Liquidez	DNER - ME 122/1994
	Limite de Plasticidade	DNER - ME 082/1994
	Granulometria	DNER - ME 051/1994
Caracterização Mecânica	Compactação Proctor	DNER - ME 162/1994
	CBR	DNER - ME 049/1994
Análise Ambiental	Solubilização	NBR 10006:2004
	Lixiviação	NBR 10005:2004

Fonte: Adaptado de Vasconcelos (2016)

A partir dos dados obtidos com os referidos ensaios foi realizada uma análise estatística com a finalidade de verificar a heterogeneidade das cinzas, conforme descreve o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), por meio da qual foi possível obter os valores de média, desvio padrão, valor mínimo provável e valor máximo provável para cada amostra (VASCONCELOS, 2016). Para a realização deste trabalho, as cinzas de carvão mineral foram transportadas de Fortaleza/CE a Mossoró/RN em balde.

Após sua secagem ao ar, as cinzas foram destorroadas e quarteadas para serem realizados os ensaios de caracterização das misturas idealizadas. A Figura 15 mostra as cinzas utilizadas antes da preparação de amostras.

Figura 15 – Cinzas de carvão mineral utilizadas



Fonte: Autoria própria (2022)

Após sua secagem ao ar, as cinzas foram destorroadas e quarteadas para serem realizados os ensaios de caracterização das misturas idealizadas.

3.2.2 Caracterização do solo regional

A segunda etapa consistiu na caracterização física e mecânica do solo regional adotado para esta pesquisa. Para a caracterização física foram executados os ensaios de análise granulométrica e os limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade) e os ensaios mecânicos de compactação Proctor, CBR e resistência à compressão simples (RCS). A Tabela 6 apresenta as normas usadas para a caracterização do solo.

Tabela 6 – Ensaios e normas utilizadas para a caracterização do solo regional

PROCEDIMENTOS	ENSAIOS	MÉTODOS
Caracterização Física	Limite de Liquidez	DNER - ME 122/1994
	Limite de Plasticidade	DNER - ME 082/1994
	Análise Granulométrica	DNER - ME 051/1994
Caracterização Mecânica	Compactação Proctor	DNER - ME 162/1994
	CBR	DNER - ME 049/1994
	Resistência à Compressão Simples (RCS)	DNER - ME 201/1994

Fonte: Autoria própria (2022)

É importante ressaltar que todos os ensaios especificados na Tabela 06 também foram os mesmos utilizados para caracterizar as misturas contendo solo, cinza e solo, cinza e cal. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFERSA.

3.2.2.1 Ensaios de caracterização do solo

Para a realização da caracterização do solo foi executada, inicialmente, a preparação das amostras conforme o disposto na norma DNER ME – 041/1994 – Solos – Preparação de amostras para ensaios de caracterização. As amostras de solos foram secas, destorroadas, quarteadas e ensacadas, para, posteriormente, serem executados os ensaios descritos a seguir.

3.2.2.1.1 Densidade real do solo

Por se tratar de uma característica importante para a execução do ensaio de análise granulométrica, determinou-se a densidade real do solo a partir das orientações estabelecidas

na norma DNER – ME – 093/1994 – Solos – Determinação da densidade real, realizada através do método do picnômetro.

Para determinar a densidade real do solo, foram tomadas três amostras de, no mínimo, 10 gramas de solo seco em estufa em uma faixa de temperatura de 105 °C a 110 °C até constância de massa. Primeiramente, pesou-se um picnômetro vazio, seco e limpo com capacidade de 50 mL e, em seguida, foi colocada a amostra no picnômetro, pesando-o novamente. Logo após, colocou-se água destilada no picnômetro até cobrir com excesso a amostra. A partir disso, aqueceu-se o picnômetro para que todo o ar presente entre as partículas do solo seja expulso, deixando-o ferver por, no mínimo, 15 minutos. A Figura 16 ilustra o picnômetro dentro da manta térmica durante o seu aquecimento.

Figura 16 – Execução do ensaio de densidade real do solo



Fonte: Autoria própria (2022)

Após isso, encheu-se totalmente o picnômetro com água destilada, colocando-o em um banho de água à temperatura ambiente para esfriá-lo, para pesá-lo novamente. Após a limpeza do picnômetro, seguiu-se com a pesagem do mesmo após enchê-lo completamente de água destilada. Por fim, em posse dos valores das pesagens, realizou-se o cálculo da densidade (DNER, 1994).

3.2.2.1.2 Análise granulométrica

Foram realizados os procedimentos para a análise granulométrica de solos por peneiramento e por sedimentação. Neste sentido, para o procedimento de peneiramento fez-se

uso da norma DNER – ME – 080/1994 – Solos – Análise granulométrica por peneiramento e para a sedimentação foi utilizada a norma DNER – ME – 051/1994 – Solos – Análise granulométrica.

Para a realização do ensaio de peneiramento, secou-se a amostra de solo ao ar, realizou-se o destorroamento e, em seguida, o quarteamento do mesmo, separando uma amostra representativa de 2,0 kg, pois o solo utilizado neste trabalho é arenoso. Inicialmente, calculou-se a umidade higroscópica a partir de três amostras de cerca de 50 gramas de material seco ao ar.

Para realizar o procedimento chamado de peneiramento grosso, fez-se passar os 2,0 kg de solo na peneira de 2,0 mm, lavando o material retido nesta peneira de modo a eliminar o material fino e, posteriormente, secou-o em estufa até constância de massa. Posteriormente, passou-se o material nas peneiras de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,8 mm e 2,0 mm, pesando-se o material retido em cada uma destas e fazendo a relação entre massas a fim de se encontrar as porcentagens retidas e passantes em cada uma delas.

Para o ensaio de sedimentação, tomou-se uma amostra de 120 gramas de solo do material passante na peneira de 2,0 mm, e transferiu-a para um béquer contendo 125 ml de solução de hexametáfosfato de sódio por, no mínimo, 12 horas. Dado este tempo, verteu-se todo o material em um copo de dispersão, adicionando-se água destilada até que seu nível ficasse 5,0 cm abaixo da borda do copo e, feito isso, submeteu-se a mistura à ação do aparelho dispersor por 5 minutos, uma vez que o solo é arenoso e possui índice de plasticidade igual a zero. Após isso, transferiu-se a mistura para uma proveta, em banho, e completou-se com água destilada até atingir a marca dos 1000 ml.

Após atingir a temperatura de equilíbrio, retirou-se a proveta do banho e tampou-lhe a boca com uma das mãos, realizando movimentos de rotação durante 1 minuto. Logo após a agitação, retornou-se a proveta ao banho e foi anotada a hora de início da sedimentação, mergulhando-se o densímetro na suspensão. Foram realizadas leituras com o densímetro nos tempos de 30 segundos, 1 e 2 minutos, mantendo o densímetro na suspensão e, após estas leituras, retirou-se o densímetro. Foram feitas as leituras subsequentes de 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 4, 8 e 25 horas contando do início da sedimentação. A norma orienta que o densímetro deve ser mergulhado cerca de 15 a 20 minutos antes da leitura.

Para o peneiramento fino, verteu-se e lavou-se o material usado na suspensão na peneira de 0,075 mm (#200), removeu-se o excesso de água, levando o material retido na peneira para a estufa até constância de massa. Posteriormente, passou-se o mesmo nas peneiras de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,30 mm, 0,15 mm e 0,075, anotando-se as massas

acumulados em cada peneira. As Figuras 17 (a) e (b) mostra a série de peneiras utilizadas no peneiramento grosso no agitador de partículas e a proveta contendo a amostra usada no ensaio de sedimentação do solo regional.

Figuras 17 – Peneiramento grosso (a) e sedimentação do solo regional (b)



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir da obtenção dos dados e feitas as considerações dispostas nas normas, traçou-se a curva de distribuição granulométrica, marcando-se nas abscissas, em escala logarítmica, os diâmetros das partículas e nas ordenadas, em escala aritmética, as porcentagens das partículas maiores do que os diâmetros considerados (DNER, 1994).

3.2.2.1.3 Limites de Atterberg

Limites de Atterberg, ou limites de consistência, são métodos de avaliação da natureza de solos em que se é possível definir o limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e o limite de contração (LC) de um solo. Este último, porém, é muito menos utilizado. O limite de liquidez foi determinado a partir do uso da norma DNER – ME – 122/1994 – Determinação do limite de liquidez – Método de referência e método expedito. Para a determinação do limite de plasticidade fez-se uso da norma DNER – ME – 082/1994 – Determinação do limite de plasticidade.

Para a realização do ensaio de limite de liquidez, tomou-se cerca de 70 gramas de solo passante na peneira de 0,42 mm, colocou-se a amostra numa cápsula de porcelana e acrescentou-se 15 ml de água destilada, homogeneizando a mistura, por um período de 15 a

30 minutos, com uma espátula. Tomou-se uma porção suficiente da mistura, colocando-a na concha, de forma que mesma ocupasse cerca de 2/3 da superfície da mesma. Realizou-se uma canelura na mistura com um cinzel de maneira que a espessura da massa na parte central fosse de 1 cm. Golpeou-se a concha com a mistura contra a base do aparelho de Casagrande, pelo acionamento da manivela, e como não se conseguiu a abertura da ranhura ou o seu fechamento com mais de 25 golpes, considerou-se o solo como não apresentando limite de liquidez.

Para a determinação do limite de plasticidade do solo, tomou-se cerca de 50 gramas de solo passante na peneira de 0,42 mm, colocou-se a amostra numa cápsula e juntou-se, aos poucos, água destilada na tentativa de se obter uma massa plástica homogeneizada. Como se trata de um solo arenoso com pouco teor de finos, não foi possível a obtenção de uma massa plástica, classificando o solo como não plástico (DNER, 1994). A Figura 18 ilustra a amostra de solo utilizada no ensaio de limite de plasticidade.

Figura 18 – Amostra de solo utilizada no ensaio de limite de plasticidade



Fonte: Autoria própria (2022)

É importante ressaltar que os limites de Atterberg são essenciais para a classificação dos solos de acordo com o sistema TRB.

3.2.2.1.4 Compactação Proctor

Para realizar o ensaio de compactação, utilizou-se a norma regulamentadora DNER – ME – 162/1994 – Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas, no qual se

fez uso de energia de compactação intermediária. Para a moldagem de cada corpo de prova foram realizadas cinco camadas e sobre cada uma delas foram aplicados 26 golpes.

Inicialmente, tomou-se uma amostra de solo seca ao ar, destorroada no almofariz com o auxílio da mão de gral, homogeneizada e quarteada até se obter uma amostra representativa de 7,0 kg. Esta amostra passou totalmente na peneira de 19,0 mm. Caso a amostra não tivesse passado em sua totalidade, o material retido deveria ser substituído por quantidade em massa igual de material passante na peneira de 19,0 mm e retido na de 4,8 mm.

Separada a amostra, seguiu-se com a homogeneização da mesma com 4% de umidade, da massa do solo, e iniciou-se a compactação no cilindro padrão com o disco espaçador com o fundo falso, em cinco camadas iguais, de maneira a se obter uma altura total do corpo de prova de cerca de 12,5 cm, após a compactação. Utilizou-se a energia de compactação intermediária e foram aplicados 26 golpes por camada.

Posteriormente, removeu-se o cilindro complementar e, com uma régua biselada, rasou-se o excesso de material na altura do molde para, depois, determinar a massa do material úmido compactado mais o molde e, por subtração da massa do molde, determinar a massa do material úmido compactado. Em seguida, com o auxílio do extrator de amostra, removeu-se o corpo de prova do molde cilíndrico e retirou-se de sua parte central três amostras para determinação da umidade, às quais foram secas em estufa à temperatura entre 105 °C e 110 °C, até constância de massa. Foi desmanchado o material do corpo de prova e adicionado água nas porcentagens de 2%. Esta operação foi realizada cinco vezes.

A Figura 19 apresenta um dos corpos de prova moldado na execução do ensaio de compactação Proctor, para posterior retirada de cápsulas para a determinação da umidade.

Figura 19 – Corpo de prova moldado no ensaio de compactação Proctor



Fonte: Autoria própria (2022)

Com os resultados obtidos para cada corpo de prova, a partir de considerações e cálculos dispostos na norma, traçou-se a curva de compactação, marcando-se, nas abscissas, os teores de umidade correspondentes e, nas ordenadas, as massas específicas aparentes do solo seco. A partir disso, foi possível obter o valor de umidade ótima e a massa específica seca máxima do solo (DNER, 1994).

3.2.2.1.5 Índice de Suporte Califórnia

A determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR) foi realizada através do preconizado na norma DNIT – ME – 172/2016 – Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.

Para a realização deste ensaio, foram moldados três corpos de prova a partir da homogeneização do solo com a porcentagem de umidade ótima definida no ensaio de compactação Proctor. Feitas as moldagens, o disco espaçador de cada molde foi removido e os moldes foram invertidos e fixados em seus respectivos pratos-base perfurados.

Em cada corpo de prova foram colocadas hastes de expansão com pesos anelares de massa superior a 4,536 kg. Na haste foi adaptado um extensômetro fixo ao tripé porta-extensômetro, colocado na borda superior do cilindro para medir as expansões ocorridas a cada 24 horas, devendo os corpos de prova permanecerem imersos por 96 horas, isto é, 4 dias, para considerar a situação de campo mais desfavorável.

Terminado esse período, os moldes com os corpos de prova foram retirados cerca de 15 minutos para escoar o excesso de água e levados para a penetração, a qual foi realizada em uma prensa. Para a penetração, removeram-se as hastes de expansão e foram colocadas novamente no topo de cada corpo de prova, as mesmas sobrecargas utilizadas na expansão. Acionou-se a manivela da prensa com velocidade de aproximadamente 1,27 mm/min e foram realizadas as leituras com 30 segundos, 1, 2, 3, 4, 6, 8 e 10 minutos.

As Figuras 20 (a) e (b) ilustram, respectivamente, os três corpos de prova imersos para a realização das leituras de expansão nos extensômetros e, 96 horas depois, execução da penetração.

Figuras 20 – Execução do ensaio do Índice de Suporte Califórnia
(b)



Fonte: Autoria própria (2022)

Foram realizados os cálculos e considerações normativas, traçou-se a curva de penetração, em escala logarítmica, por pressão aplicada no pistão, em escala aritmética. A determinação do CBR é dada adotando o maior dos valores obtidos nas penetrações entre 2 e 4 minutos, a partir da razão entre a pressão calculada pela pressão padrão multiplicada por 100 (DNIT, 2016).

3.2.2.1.6 Resistência à compressão simples (RCS)

O ensaio de resistência à compressão simples (RCS) foi executado de acordo com o estabelecido na norma DNER – ME – 201/1994 – Solo-cimento – Compressão axial de corpos de prova cilíndricos e a moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com a norma DNER – ME – 202/1994 – Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndrico.

Para a moldagem dos corpos de prova, tomou-se uma amostra de solo seca ao ar, destorroada no almofariz com mão de gral, homogeneizada e quarteada até se obter uma amostra representativa de 2,5 kg, passantes na peneira 4,8 mm. Foram moldados três corpos de prova, a partir da homogeneização do solo com a quantidade de água referente à sua umidade ótima.

A norma orienta que os corpos de prova sejam imersos em água por 4 horas, porém isto não foi possível, pois o solo utilizado era uma areia média sem coesão e não apresentou

resistência, desintegrando-se. Neste sentido, foram rompidos os corpos de prova sem imersão, conforme apresenta as Figuras 21 (a) e (b).

Figuras 21 – Corpo de prova antes e depois do rompimento no ensaio de RCS
(a) (b)



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a moldagem foram executadas 3 camadas, aplicando-se 25 golpes em cada uma. Os corpos de prova foram removidos com o extrator de amostra e foram envoltos com papel filme por um período de 24 horas para poder seguir com o rompimento.

Os corpos de prova foram colocados, um por vez, sobre o prato da prensa de forma que o eixo vertical do cilindro se alinhasse com o centro de carga do prato rotulado e fez-se com que este encostasse suavemente no corpo de prova. O carregamento foi, então, iniciado com uma velocidade de aproximadamente 1,0 mm/min. Para encontrar a resistência à compressão solo, dividiu-se o valor da carga de ruptura pela seção transversal do corpo de prova (DNER, 1994).

3.2.3 Caracterização das misturas idealizadas

A terceira etapa compreendeu a definição de misturas a serem ensaiadas em laboratório, de forma a estudar o seu aproveitamento nas camadas granulares dos pavimentos.

Visando analisar o efeito da estabilização do solo, foram estudadas três tipos de materiais. O primeiro material, denominado SN, é composto por 100% de solo regional, de modo a se conhecer as suas propriedades físicas e mecânicas, o segundo material, mistura M1,

formado por 50% de solo e 50% de cinza e o terceiro material, mistura M3, constituído por 49% de solo, 49% de cinza e 2% de cal, a partir do processo de homogeneização destes materiais.

A Tabela 7 apresenta, de forma resumida, as misturas idealizadas para o estudo. Na composição das misturas, os números que antecedem os nomes dizem respeito à porcentagem adotada de material.

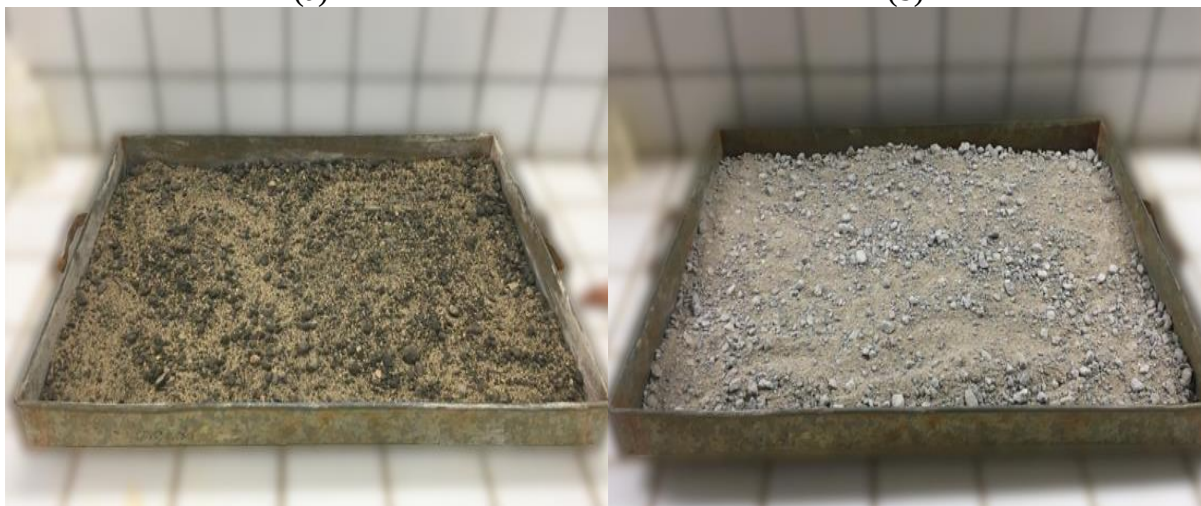
Tabela 7 – Definição das misturas idealizadas a serem ensaiadas em laboratório

MATERIAIS	SOLO (%)	CINZA (%)	CAL (%)	COMPOSIÇÃO
SN	100	0	0	100 Solo + 0 Cinza
M1	50	50	0	50 Solo + 50 Cinza
M2	49	49	2	49 Solo + 49 Cinza + 2 Cal

Fonte: Autoria própria (2022)

As Figuras 22 (a) e (b) mostra as misturas M1 e M2 homogeneizadas, antes da realização dos ensaios de caracterização mecânica.

Figuras 22 – Misturas M1 e M2 homogeneizadas, respectivamente
(a) (b)



Fonte: Autoria própria (2022)

Os ensaios executados em todas as misturas foram realizados conforme a metodologia estabelecida nas normas do DNIT. A maioria das normas é do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), extinguido em 2001. Todas as misturas foram submetidas aos mesmos ensaios realizados no solo regional, detalhados na Tabela 06. De posse dos resultados, determinou-se a mistura com o melhor comportamento mecânico no que diz respeito ao uso nas camadas de base e sub-base de pavimentos.

3.2.4 Dimensionamento de um pavimento teórico

Após a caracterização das misturas anteriormente descritas foram selecionadas as que apresentaram melhores comportamentos considerando os critérios técnicos, ambientais e econômicos para serem empregadas nas camadas granulares de pavimentos. Neste sentido, seguiu-se com o dimensionamento de um pavimento teórico, considerando os dados das misturas selecionadas, a ser construído no município de Mossoró/RN. Para tanto, realizou-se o dimensionamento baseado no método empírico do DNIT.

Como revestimento para este pavimento, adotou-se o tratamento superficial betuminoso e um $N = 1 \times 10^6$, dados que refletem em um padrão dos pavimentos locais, conforme estudos realizados por Cabral (2021).

3.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os materiais empregados para a realização desta pesquisa, bem como a metodologia utilizada, a qual foi dividida em quatro etapas, sendo elas a caracterização das cinzas de carvão mineral, a partir dos estudos de Vasconcelos (2016 e 2018), a caracterização do solo regional, a caracterização das misturas idealizadas e o dimensionamento de um pavimento teórico, baseado no método empírico do DNIT, a partir do uso das misturas que apresentaram os melhores comportamentos mecânicos. No capítulo seguinte, Resultados e Discussão, foram detalhados e discutidos os resultados dos ensaios realizados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais realizados ao longo deste trabalho, para os materiais experimentados. Por último, foram expostos os resultados do dimensionamento de um pavimento idealizado, constituído pela mistura selecionada, considerando os critérios técnicos e ambientais, para serem empregadas em camadas de base e sub-base de pavimentos.

4.1 Resultados dos ensaios de caracterização das cinzas de carvão mineral

Conforme mencionado, para a caracterização das cinzas de carvão mineral da Termelétrica Energia Pecém foram realizados ensaios de caracterização física, como o de análise granulométrica e limites de Atterberg, ensaios de caracterização mecânica, como o de compactação Proctor e CBR e ensaios de análise ambiental, como o de solubilização e lixiviação. É importante destacar que os dados da caracterização mecânica e a análise ambiental das cinzas foram coletados a partir dos estudos de Vasconcelos (2016 e 2018).

4.1.1 Ensaio de caracterização física das cinzas

A partir da realização do ensaio de análise granulométrica, verificou-se que a cinza analisada foi classificada, de acordo com o sistema SUCS, como uma areia bem graduada. Já considerando o método do TRB, a amostra foi classificada como um material granular do tipo A-1-b. O resumo do resultado, em percentual, da análise granulométrica da cinza utilizada está apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo em percentual da análise granulométrica das cinzas

AMOSTRA	PEDREGULHO (%)	AREIA (%)			SILTE + ARGILA (%)
		GROSSA	MÉDIA	FINA	
Cinza	14,77	19,43	46,90	15,10	3,80

Fonte: Autoria própria (2022)

A partir do ensaio, verificou-se que as cinzas apresentam um percentual de 3,80% passante na peneira de 0,075 mm (#200). De acordo com Vasconcelos (2016), a densidade real da cinza homogeneizada foi de 2,40 g/cm³ e, em decorrência da grande quantidade de material granular em sua constituição e ausência de características plásticas para a execução

Para o ensaio de resistência à compressão simples (RSC), observou-se que os corpos de prova não resistiram à imersão, desintegrando-se totalmente antes de 2 horas, conforme ilustra a Figura 24.

Figura 24 – Imersão das cinzas para realização do ensaio de RCS



Fonte: Vasconcelos (2016)

Neste sentido, foram rompidos os corpos de prova de cinza homogeneizada sem imersão e foram obtidos valores de 0,10 MPa no ensaio de RCS. Isto já era esperado, haja vista que a cinza homogeneizada consiste em um material de baixa coesão.

4.1.3 Ensaio para caracterização ambiental e química das cinzas

A partir do ensaio de lixiviação, observou-se que o nível de fluoreto (F^-) estava abaixo do valor máximo aceitável de 150 mg/L e, como os parâmetros do extrato lixiviado atende a norma da ABNT NBR 10005 (2004), as cinzas homogeneizadas foram classificadas como não perigosas e, conseqüentemente, como aptas do ponto de vista ambiental para uso em camadas de base e sub-base de pavimentos (Vasconcelos, 2016).

Vasconcelos (2018) observou periculosidade em seis amostras analisadas e as demais foram classificadas como Resíduo Classe II - A, isto é, não inertes. Neste sentido, 18,75% das amostras não devem ser utilizadas nas camadas granulares de pavimentos por se apresentarem como perigosas.

Com relação à análise química, a partir de ensaios de fluorescência de Raio X, Vasconcelos (2016) verificou que os materiais mais encontrados nas amostras de cinzas foram os compostos de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de cálcio (CaO), representando valores superiores a 80% da constituição desses resíduos. Neste sentido,

percebeu-se que, do ponto de vista de sua composição química, as cinzas também se caracterizaram como muito heterogêneas. (VASCONCELOS, 2016).

4.1.4 Aplicação das cinzas em camadas de base e sub-base dos pavimentos

O DNIT estabelece como requisito mínimo valores de $\text{CBR} \geq 20\%$ e expansão máxima de 1%, para emprego nas camadas de sub-base, considerando um volume de tráfego médio. Já para bases, o valor de CBR, dependendo do número N, deve ser maior ou igual a 40%, ao passo que a expansão máxima deve ser 0,5%. O valor de CBR de projeto (valor mínimo provável) encontrado para as cinzas analisadas foi de 1%, o qual se encontra bem abaixo do valor exigido pelo DNIT. A expansão média foi de 2%, neste caso, acima do limite estabelecido (VASCONCELOS, 2016).

Ainda conforme Vasconcelos (2016), as cinzas de carvão mineral estudadas, *in natura*, não podem ser usadas nas camadas de base e sub-base dos pavimentos. Para tanto, deve-se recorrer a técnicas de estabilização a fim de homogeneizá-las e enquadrá-las nos requisitos mínimos estabelecidos dentro da engenharia de pavimentação.

4.2 Resultados dos ensaios de caracterização do solo regional

A segunda etapa deste trabalho consiste na caracterização física e mecânica de um solo regional de Mossoró/RN, o qual foi coletado em uma jazida localizada no final do campus leste da UFERSA, nas proximidades do abatedouro AFIM.

4.2.1 Ensaios de caracterização física do solo regional

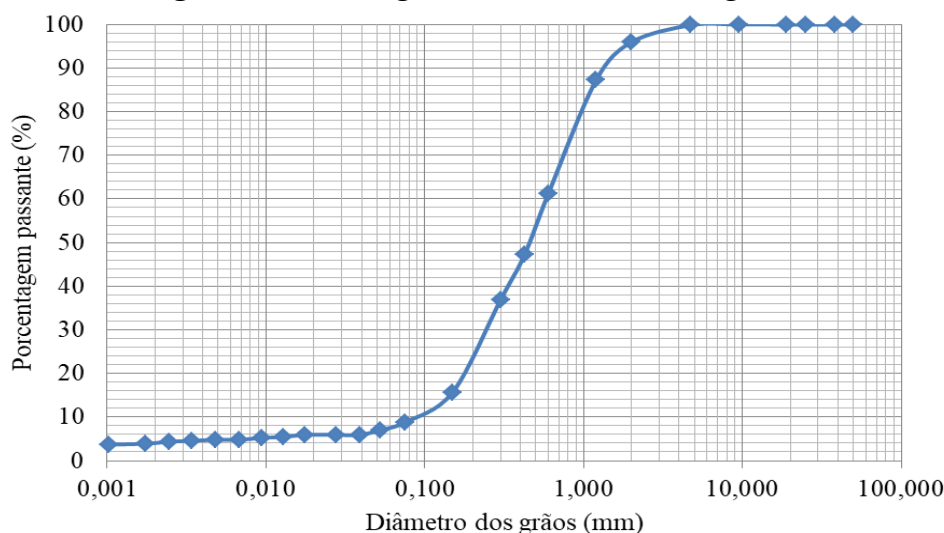
O resumo do resultado, em percentual, da análise granulométrica do solo regional (SN) utilizado está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Resumo em percentual da análise granulométrica do solo regional

MATERIAL	PEDREGULHO (%)	AREIA (%)			SILTE + ARGILA (%)
		GROSSA	MÉDIA	FINA	
SN	0,10	4,00	48,70	38,40	8,80

Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 25 ilustra a curva granulométrica do solo estudado.

Figura 25 – Curva granulométrica do solo regional

Fonte: Autoria própria (2022)

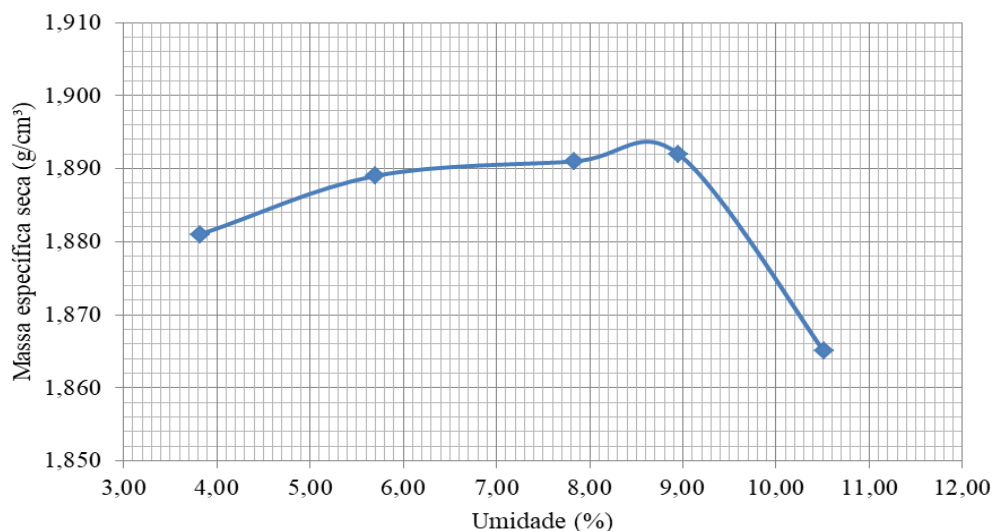
A partir do ensaio de densidade real pelo método do picnômetro, encontrou-se uma densidade de 2,64 g/cm³. Com relação aos limites de Atterberg, o solo regional não apresentou limite de liquidez (NL) nem limite de plasticidade (NP), classificando-se como um material não plástico.

O Diâmetro Efetivo (D₁₀), isto é, o diâmetro da abertura da peneira que permite a passagem de 10% da amostra do material granular, é de 0,09 mm. O Coeficiente de Uniformidade (C_u) do solo, definido pela razão entre o diâmetro que 60% do material passa no peneiramento (D₆₀) e o diâmetro efetivo é de 6,67. O Coeficiente de Curvatura (C_c), que mede a graduação do solo com base nos diâmetros D₃₀, D₆₀ e D₁₀ é de 1,16. De acordo com Caputo (1996), solos com C_u entre 5 e 15 são classificados como solos de uniformidade média e solos com C_c entre 1 e 3 são solos bem graduados.

A partir da curva granulométrica e da determinação dos limites de Atterberg foi possível classificar o solo a através do SUCS e do sistema TRB. De acordo o SUCS, o solo analisado é classificado como SW-SM, isto é, areia bem graduada, siltosa. Pela classificação do sistema TRB, o solo é do tipo A-1-b. Este é um solo granular, do tipo areia média, com aproximadamente 9,0% de material passante na peneira #200, de 0,075 mm, caracterizado como um material de comportamento de bom à excelente como subleito.

4.2.2 Ensaios de caracterização mecânica do solo regional

A Figura 26 apresenta a curva de compactação do solo estudado, obtida a partir do ensaio de compactação Proctor.

Figura 26 – Curva de compactação do solo regional

Fonte: Autoria própria (2022)

Conforme a Figura 26, o solo regional possui umidade ótima de 8,60% e massa específica seca máxima de 1,894 g/cm³. Com relação ao ensaio de CBR, o solo apresentou valor zero de expansão e um valor de CBR igual a 27%.

4.2.3 Ensaio de resistência à compressão simples do solo regional

Os corpos de prova não resistiram à imersão, desintegrando-se, devido ao fato de que o solo é do tipo A-1-b, uma areia média não coesiva. Vale salientar que esta condição de imersão estabelecida na norma tem como objetivo analisar a resistência do solo na situação mais desfavorável, quando o solo está saturado.

A Tabela 10 apresenta um resumo dos valores encontrados de umidade ótima, massa específica seca máxima (γ_s), expansão, CBR e RCS para o solo regional *in natura*.

Tabela 10 – Resumo dos valores encontrados nos ensaios de caracterização mecânica do solo

MATERIAL	UMIDADE ÓTIMA (%)	γ_s (g/cm³)	EXPANSÃO (%)	CBR (%)	RCS (MPa)
SN	8,6	1,894	0	27	0,012

Fonte: Autoria própria (2022)

Como resultado, obteve-se um valor de RCS de 0,012 MPa. Este é um valor muito baixo, entretanto já esperado, uma vez que o solo não apresenta coesão entre suas partículas.

4.2.4 Uso do solo regional em camadas de base e sub-base dos pavimentos

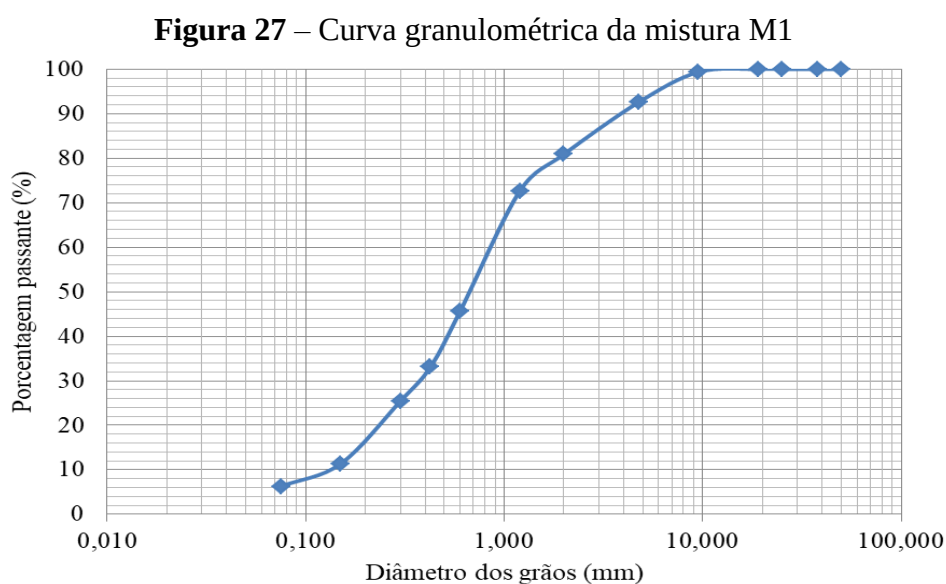
Quanto ao uso desse material em camadas de base e sub-base na construção de pavimentos, pode-se afirmar que o solo regional (SN) pode ser utilizado apenas na camada de sub-base, uma vez que este apresentou uma expansão de valor zero e CBR de 27%.

4.3 Resultados dos ensaios de caracterização das misturas idealizadas

A terceira etapa deste trabalho consiste na caracterização das misturas M1 e M2.

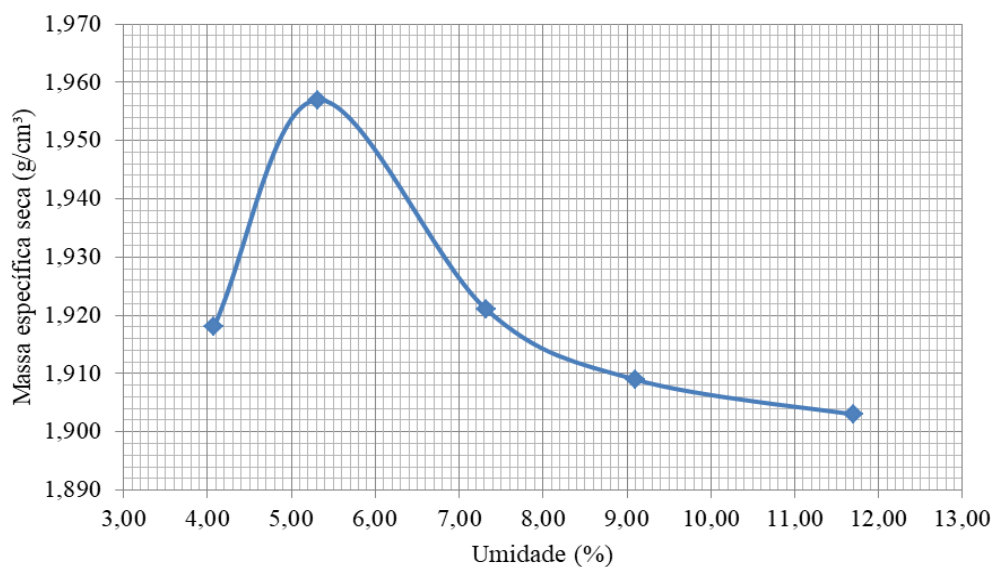
4.3.1 Ensaios de caracterização das misturas

A Figura 27 apresenta a curva granulométrica da mistura M1.



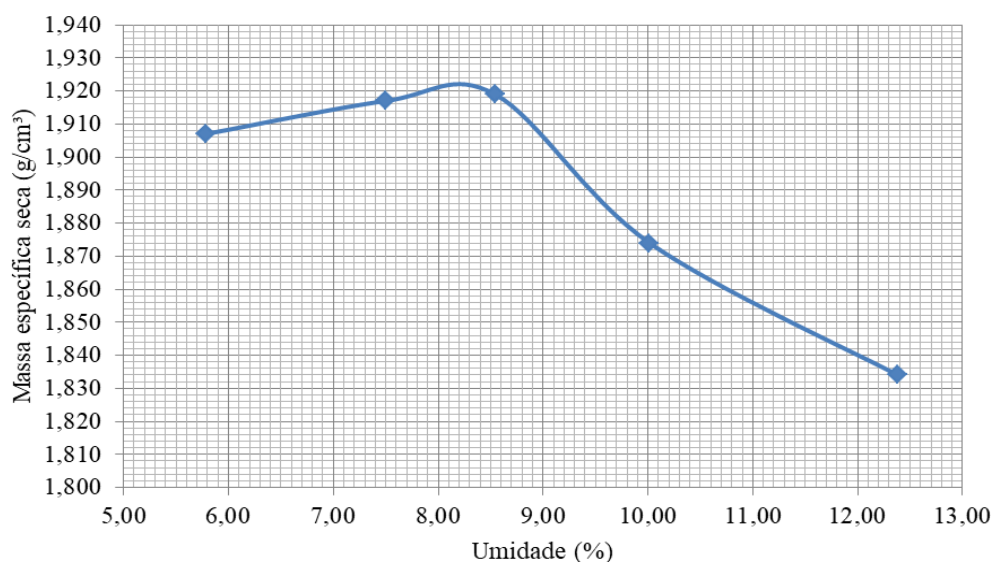
Fonte: Autoria própria (2022)

A curva da mistura M1 apresenta um Coeficiente de Uniformidade (Cu) de 6,07 e um Coeficiente de Curvatura (Cc) de 1,15, o que indica que a mistura possui uma uniformidade média e é bem graduada. Com relação aos ensaios de limites de Atterberg, a mistura se classificou como não plástica (NP). A Figura 28 ilustra a curva de compactação da mistura M1. Observa-se que M1 possui umidade ótima de 5,30% e massa específica seca máxima de 1,957 g/cm³. No que se refere ao ensaio de CBR, a mistura apresentou um valor de 90% e uma expansão de 0,02%.

Figura 28 – Curva de compactação da mistura M1

Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 29 apresenta a curva de compactação da mistura M2. De acordo com a curva, M2 possui umidade ótima de 8,20% e massa específica seca máxima de 1,923 g/cm³. No que se refere ao ensaio de CBR, a mistura de solo, cinza e cal apresentou um valor de 102% e uma expansão de 0,03%.

Figura 29 – Curva de compactação da mistura M2

Fonte: Autoria própria (2022)

É válido destacar que os corpos de prova foram moldados sem efeito de cura.

4.3.2 Ensaio de resistência à compressão simples das mistura idealizadas

Os corpos de prova moldados com a mistura M1 (contendo 50% de solo e 50% de cinza) foram rompidos sem imersão e, como resultado, obteve-se um valor de RCS de 0,028 MPa. Já os corpos de prova contendo a mistura M2, (49% de solo, 49% de cinza e 2% cal), também rompidos sem imersão, apresentaram um valor de RCS de 0,036 MPa.

4.3.3 Uso da mistura idealizada em camadas de base e sub-base dos pavimentos

Tanto a mistura M1 quanto a mistura M2 podem ser utilizadas na construção de camadas de base de pavimentos, uma vez que apresentaram CBR maior que 40% e expansão inferior a 0,5%, obedecendo às recomendações normativas.

4.3.4 Análise dos valores encontrados nos ensaios de caracterização das misturas

A Tabela 11 apresenta um resumo dos valores encontrados para as respectivas misturas idealizadas. Os resultados dos ensaios de CBR e expansão da mistura M3 foram realizados sem consideração de efeito de cura.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica das misturas

MATERIAIS	COMPACTAÇÃO		EXPANSÃO (%)	CBR (%)	RCS (MPa)
	UMIDADE ÓTIMA (%)	γ_s (g/cm ³)			
SN	8,6	1,894	0,00	27	0,012
M1	5,3	1,957	0,02	90	0,028
M2	8,2	1,923	0,03	102	0,036

Fonte: Autoria própria (2022)

No que se refere ao ensaio de compactação, observou-se que quanto maior o teor de cinza adicionado à mistura, menor a umidade ótima desta. O material SN apresentou uma massa específica seca máxima menor, ao passo que a mistura M1 apresentou uma massa específica seca máxima maior. A mistura M2 apresentou uma massa específica seca máxima intermediária.

Analisando os dados referentes ao ensaio de CBR das misturas, verificou-se que SN pode ser utilizado na construção de camadas de sub-base de pavimentos, uma vez que apresentou um CBR maior que 20% e expansão inferior a 1%. As misturas M1 e M2, por sua

vez, podem ser utilizadas para a construção de bases de pavimentos de rodovias de tráfego leve ($\text{CBR} \geq 40\%$), médio ($\text{CBR} \geq 60\%$) e pesado ($\text{CBR} \geq 80\%$), apresentando, além disso, expansões inferiores a 0,5%.

A adição de 50% de cinza ao solo, na M1, e a adição de 49% de cinza e 2% de cal ao solo, na M2, conferiu um aumento do CBR em mais de 3 vezes o valor do CBR do solo *in natura*. As misturas M1 e M2 apresentaram valores de CBR mais próximos, porém caso a mistura M2 tivesse sido imersa considerando tempos de cura, provavelmente o CBR aumentaria de valor, uma vez que a cal, quando entra em contato com a cinza, dá origem a reações pozolânicas, as quais se desenvolvem com o tempo, resultando na formação de compostos de cimentação e, conseqüentemente, aumentando a resistência da mistura.

Em seu trabalho, Vasconcelos (2016) encontrou um CBR de 21% para uma mistura contendo 50% de solo e 50% de cinza, o que é justificado pelo fato da cinza utilizada possuir uma grande quantidade de finos. Neste trabalho, porém, a cinza se classificou como uma areia média do tipo A-1-b, de acordo com o sistema TRB, o que justifica uma umidade ótima menor e um CBR maior quando em comparação com os resultados obtidos no trabalho da autora.

Com relação ao ensaio de RCS, todas as misturas apresentaram valores muito baixos, porém, observou-se que a resistência à compressão simples da mistura M2 é mais de 2 vezes maior que a mistura M1, ao passo que a mistura M3 apresenta resistência à compressão simples 3 vezes maior que a mistura M1. Os valores de RCS mínimos exigidos pelo *Illinois Highway Department* para emprego de misturas de solo e cal em camadas de base é de 1,034 MPa, porém isso não foi observado em nenhuma das misturas (LITTLE, 1995 apud VASCONCELOS, 2018).

Vasconcelos (2016), a partir de suas pesquisas, também encontrou valores muito baixos de RCS para suas misturas, às quais também eram constituídas também por um solo arenoso. Em 2018, a autora verificou que as resistências das misturas aumentaram a medida que se aumentaram os teores de cal e os tempos de cura.

4.4 Dimensionamento de um pavimento teórico

Para o dimensionamento do pavimento foi utilizado o método empírico do DNIT, a partir do qual foram determinadas as espessuras das camadas de um pavimento pelo número N e pelo valor do CBR. Com o auxílio do ábaco de dimensionamento foi definida a espessura

total do pavimento e os revestimentos foram determinados conforme a tabela de espessuras mínimas disposta no manual de pavimentação do DNIT.

Os coeficientes de equivalência estrutural para os diferentes materiais constituintes do pavimento (K) e o CBR de cada camada estão dispostos na Tabela 12. O número N adotado, por sua vez, foi determinado conforme a Tabela 4, que relaciona a espessura mínima de revestimento betuminoso com o número N. Com estes dados e com o uso das inequações dispostas no manual do DNIT, realizaram-se os cálculos para a determinação das espessuras de todas as camadas.

Tabela 12 - Dados dos materiais empregados no dimensionamento

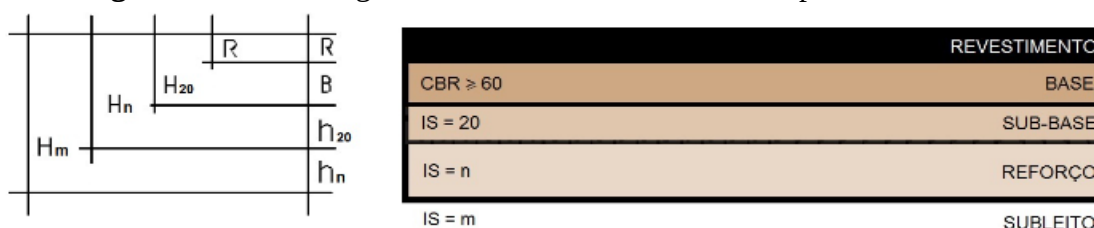
CAMADAS	K	CBR (%)	MATERIAIS
Revestimento	1,2	-	Tratamento superficial betuminoso
Base	1,0	102	M2 (49% solo, 49% cinza e 2% cal)
Sub-base	1,0	27	SN (100% solo)
Subleito	1,0	12	Terreno natural

Fonte: Autoria própria (2022)

A sub-base é constituída de um solo do tipo A-1-b, sendo classificado como uma areia média, com CBR de 27%. Utilizou-se os materiais da mistura M2, composta de 49% de solo, 49% de cinza e 2% de cal na base do pavimento. Para o subleito, adotou-se um valor de CBR igual a 12%. O revestimento adotado foi o tratamento superficial betuminoso, com $N = 1 \times 10^6$, o qual possui espessura de 2,5 cm.

As informações tanto do tipo de revestimento, quanto o de tráfego (N), foram coletadas de Cabral (2021). De acordo com esse autor, após o estudo do perfil rodoviário da microrregião de Mossoró/RN, tais dados refletem em um padrão dos pavimentos locais. Devido a isso, foi a condição adotada para o tipo de pavimento dimensionado nesta pesquisa. Além disso, este autor encontrou um CBR de 11,3% para um solo natural de Mossoró/RN, o que justifica o valor adotado para o subleito deste trabalho. A partir disso, determinou-se a altura total do pavimento (H_m), conforme a Figura 30, através do ábaco da Figura 10.

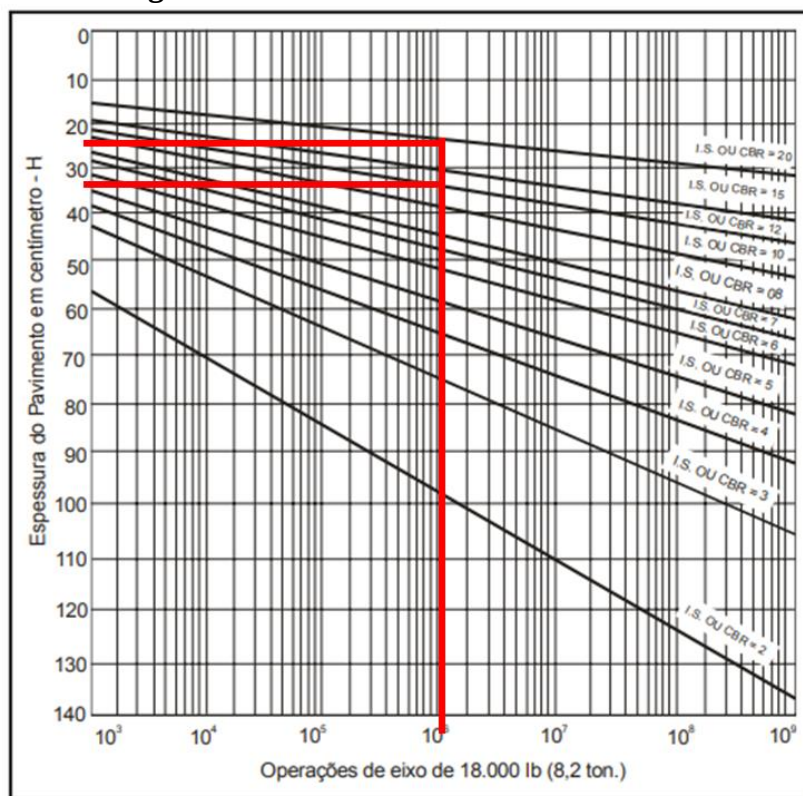
Figura 30 – Simbologia usada no dimensionamento do pavimento teórico



Fonte: Guia de Engenharia (2019)

O CBR da sub-base é 27% e não 20%, no entanto é importante destacar que, pelo método do DNIT (2006), mesmo que o valor do CBR da sub-base seja maior que 20%, que é o que ocorre neste exemplo, a espessura do pavimento necessária para protegê-la é determinada como se o CBR fosse igual a 20%. Esta representa uma limitação do método adotado, uma vez que ele não aproveita materiais que apresentam valores de CBR maiores (CABRAL, 2021). A Figura 31 apresenta a determinação das espessuras H20 e H12.

Figura 31 – Dimensionamento de H20 e H12



Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

Neste sentido, os valores encontrados para H20 e H12 foram, respectivamente, 25 cm e 35 cm, de acordo com a Figura 33.

O valor do coeficiente de equivalência estrutural (K) foi determinado de acordo com a Tabela 3. Para o revestimento superficial betuminoso usou-se $K_R = 1,2$ e para as camadas granulares usaram-se $K_B = K_{SB} = 1,0$.

Para o cálculo da espessura da base, utilizou-se a seguinte inequação.

$$R.K_R + B.K_B \geq H_{20}$$

$$2,5.1,2 + B.1,0 \geq 25$$

$$B \geq 22 \text{ cm}$$

Para o cálculo da espessura da sub-base, usou-se a inequação abaixo.

$$R.K_R + B.K_B + h_{20}.K_{SB} \geq H_{12}$$

$$2,5.1,2 + 22.1,0 + h_{20}.1,0 \geq 35$$

$$h_{20} \geq 10 \text{ cm}$$

Como a espessura da sub-base foi menor do que 15 cm, que é a espessura compactada mínima para camadas granulares, considerou-se a espessura da sub-base como 15 cm. Assim, recalculou-se a espessura da base.

$$R.K_R + B.K_B + h_{20}.K_{SB} \geq H_{12}$$

$$2,5.1,2 + B.1,0 + 15.1,0 \geq 35$$

$$B \geq 17 \text{ cm}$$

A Tabela 13 apresenta um resumo dos valores encontrados para as espessuras das camadas.

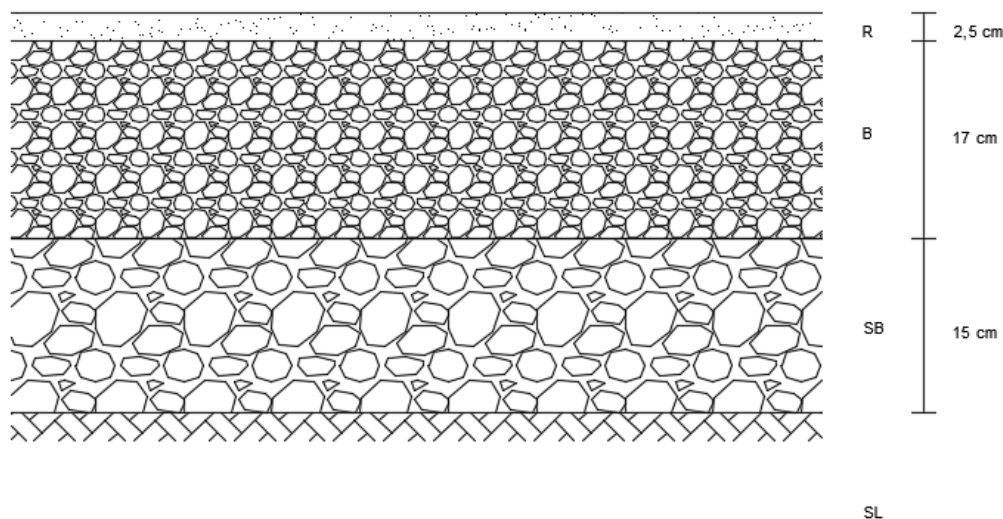
Tabela 13 – Espessuras das camadas determinados no dimensionamento

ESTRUTURA DO PAVIMENTO	ESPESSURAS DAS CAMADAS (cm)
Revestimento ($N = 1 \times 10^6$)	2,5
Base	17
Sub-base	15

Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 32 ilustra uma representação do pavimento teórico dimensionado.

Figura 32 – Representação do pavimento teórico dimensionado



Fonte: Autoria própria (2022)

Assim sendo, pelo dimensionamento do método do DNIT (2006), o revestimento, a base e a sub-base do pavimento deverá ter espessuras de 2,5 cm, 17 cm e 15 cm, respectivamente, totalizando uma altura de 34,5 cm. Vale salientar que, segundo tendências observadas em pesquisas realizadas, a exemplo de Cabral (2021), estas espessuras seriam reduzidas se o pavimento teórico tivesse sido dimensionado pelo método mecanístico-empírico MeDiNa, uma vez que este leva em conta o módulo de resiliência, além de parâmetro de deformação permanente, em seu dimensionamento.

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram explanados e discutidos os resultados obtidos nas quatro etapas do processo metodológico adotado. O capítulo a seguir apresenta as considerações finais, tratando a respeito das principais conclusões extraídas deste trabalho, bem como as principais dificuldades encontradas ao longo de sua realização e sugestões para trabalhos futuros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo inicialmente proposto de analisar o efeito da estabilização de um solo do município de Mossoró/RN por meio da utilização de cinzas de carvão mineral e de cal para aplicação em camadas de base e sub-base dos pavimentos foi atingido com êxito, uma vez que o solo empregado foi estabilizado granulometricamente pela cinza, saindo de um CBR igual a 27% (solo *in natura*), para um CBR de 90% (solo e cinza). A cal atuou como encapsulante, na mistura M3, de possíveis contaminantes da cinza.

Tendo em vista os resultados mencionados, concluiu-se que a o material SN, composto por 100% de solo, pode ser empregado nas camadas de sub-base de pavimentos, uma vez que apresentou um CBR maior que 20% e expansão menor que 1%. Já a mistura M1, constituída por 50% de solo e 50% de cinza, e a mistura M2, composta por 49% de solo, 49% de cinza e 2% de cal, podem ser usadas para a construção de bases de pavimentos de rodovias para baixo, médio e alto volume de tráfego.

Os valores de CBR calculados para as misturas M2 e M3 foram muito próximos, o que pode ser explicado pelo fato de que a mistura M3, que contém cal, não passou por nenhum efeito de cura. Além disso, os valores encontrados no ensaio de RCS para todas as misturas foram muito baixos, inferiores ao estabelecido pelo *Illinois Highway Department* para emprego de misturas de solo e cal em camadas de base.

Além disso, é importante destacar que, além de estabilizar granulometricamente o solo, a utilização de cinzas de carvão mineral na composição das camadas de pavimentos representa uma ótima alternativa para conferir uma destinação apropriada e ambientalmente sustentável para as mesmas, indicando, assim, a viabilidade técnica e ambiental de seu uso, uma vez que, comumente, há uma dificuldade de se encontrar locais adequados para a sua disposição.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

Como os valores de CBR das misturas M1 e M2, às quais foram compactadas usando a energia intermediária, foram muito elevados, sugere-se que seja analisada a compactação utilizando a energia normal, o que além de promover a diminuição do CBR ainda traria benefícios econômicos para a obra. Como não houve diferença significativa entre os valores de CBR das misturas M2 e M3, concluiu-se que a cal atuou apenas como encapsulante de possíveis contaminantes da cinza.

Levando em conta que os valores de CBR das misturas M1 e M2 foram próximos e os valores de RCS foram muito baixos, sugere-se que sejam executados novos ensaios de CBR com misturas contendo diferentes teores de cal e a realização da imersão e penetração dos corpos de prova em diferentes tempos de cura, haja vista que as reações pozolânicas que ocorrem pela mistura de cinza e cal se desenvolvem ao longo do tempo e, conseqüentemente, tendem a aumentar a resistência das misturas em tempos de cura maiores.

Neste sentido, propõe-se que sejam realizados ensaios de CBR para diferentes teores de cal e tempos de cura de 0, 7, 14 e 28 dias, para avaliar a influência do teor de cal na resistência das misturas em diferentes tempos de cura. Além disso, sugere-se que seja realizado um dimensionamento mecanístico-empírico de um pavimento flexível pelo método MeDiNa para as misturas de melhor comportamento técnico e ambiental.

REFERÊNCIAS

ABRECON. **Resíduos da construção e demolição: Geração de emprego e renda**. 2016. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/residuos-da-construcao-e-demolicao-geracao-de-emprego-e-renda/>>. Acesso em: 30 maio 2022.

AGUIAR, C.D.; BALESTIERE, P.A.J. **Carvão Mineral: um estudo sobre o consumo nacional e respectivas emissões de CO₂**. In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. A energia que move a produção: um diálogo sobre integração, projeto e sustentabilidade. Paraná, Brasil. 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª ed. Brasília. 236p. 2008. Disponível em: <aneel.gov.br>. Acesso em: 27 maio 2022.

_____. Atlas de energia elétrica do Brasil, 2010. Disponível em: <aneel.gov.br>. Acesso em: 27 maio 2022.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA. Elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 24 maio 2022.

ARAUJO, A. F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do Estado do Ceará**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

ARAUJO, W. E. L. **Aproveitamento de resíduos da extração de micaxisto em pavimentos flexíveis**. 2008. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CARVÃO MINERAL – ABCM. Reservas de carvão mineral. 2014. Disponível em: <<http://www.carvaomineral.com.br/>>. Acesso em: 27 maio 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

_____. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ATRAI ADITIVOS. **EDP e Eneva inauguram estrada no Ceará construída com cinzas de carvão**. 2019. Disponível em: <<https://www.atrai.com.br/blog/2019/06/edp-e-eneva-inauguram-estrada-no-ceara-construida-com-cinzas-de-carvao>>. Acesso em: 30 maio 2022.

AZEVEDO, A.L.C.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.; PEDROSA, R.A.A.; RAMALHO, R.W. **Estabilização de Solos com Adição de Cal**. Revista Vias Gerais, Publicação do Centro de Transferência de Tecnologia do PIH/IPC – DER/MG, Minas Gerais. 1998.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, projeto e restauração**. Oficina de Textos. São Paulo, SP, 2007.

BAPTISTA, C. F. N. **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 1976.

BARROS, K.S. **Estudo de Cinzas Volantes de uma Termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza-CE para Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

BENEVIDES, S. A. S. **Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos – empírico do DNER e resiliência COPPE/UFRJ – em rodovias do Ceará**. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

BRAGA, F. S.; FONSECA, M. H. G. P.; AGOSTINI, R. M.; SILVA, V. V.; LOPES, V. L.; **Encapsulamento: uma alternativa para o tratamento e destinação final de resíduos oleosos – um enfoque ambiental (estudos preliminares)**. VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Set, Vitória, ES, 2002.

CABERLON, R. C.; HEINECK, K. S.; CONSOLI, N. C. **Adição de cal de carbureto em um solo contaminado encapsulado com cimento Portland**. III GEORS - Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, 2005.

CABRAL, W. S. **Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da Microrregião de Mossoró/RN**. 2021. 181f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2021.

CÂMARA, L. D. O. **Estudo do comportamento de materiais alternativos e suas aplicações na engenharia geotécnica. Iniciação Científica**. (Graduanda em Engenharia Ambiental) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande, 2011.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 6ª edição, 1996.

CARVALHO, L. O. R.; DUARTE, F. R.; MENEZES, A. H. N.; SOUZA, T. E. S. et al. **Metodologia científica: teoria e aplicação na educação a distância/Petrolina-PE**, 2019.

COMPLEXO DO PECÉM. **Conheça o Complexo do Pecém**. Disponível em: <<https://www.complexodopecem.com.br/>>. Acesso em: 24 maio 2022.

COUTINHO, João Camilo Penna. **Dimensionamento de pavimentos asfáltico: comparação do método do DNER com o método mecanístico – empírico aplicada a um trecho**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, MG

CRISTELO, N. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**.

Dissertação de Mestrado Departamento de Engenharia Civil Estruturas, Geotecnia e Fundações. Universidade do Minho, Guimarães – 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.

_____. **DNER-ME 041:** Solos – Preparação de amostras para caracterização. 1994.

_____. **DNER-ME 049:** Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia para não amostras trabalhadas. 1994.

_____. **DNER-ME 051:** Solos – Análise granulométrica. 1994.

_____. **DNER-ME 082:** Solos – Análise granulométrica por peneiramento. 1994.

_____. **DNER-ME 082:** Solos – Determinação do limite de plasticidade. 1994.

_____. **DNER-ME 093:** Solos – Densidade Real. 1994.

_____. **DNER-ME 122:** Solos – Determinação do limite de liquidez – Método de referência e método expedito. 1994.

_____. **DNER-ME 162:** Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. 1994.

_____. **DNER-ME 201:** Solos-cimento – Compressão axial de corpos de prova cilíndricos. 1994.

_____. **DNER-ME 202:** Solos-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos. 1994.

_____. **Manual de Pavimentação.** 2006.

_____. **DNIT-ME 172:** Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. 2016.

DIAS, J. Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas. Caparica: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - FCT-UNL, 2012.

EBC. Pesquisadores do Cetem usam cinzas de carvão mineral no tratamento de efluentes. 2012. Disponível em: <<https://memoria.ebc.com.br/2012/09/pesquisadores-do-cetem-usam-cinzas-de-carvao-mineral-no-tratamento-de-efluentes>>. Acesso em: 30 maio 2022.

EDP. Pecém – A usina. Disponível em: <<https://pecem.brasil.edp.com/pt-br/power-plant>>. Acesso em: 24 maio 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 24 maio 2022.

ENEVA. **Pecém II**. Disponível em: <<https://eneva.com.br/nossos-negocios/geracao-de-energia/pecem-ii/>>. Acesso em: 24 maio 2022.

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

FRANÇA, J. L. A. **Estudo comparativo entre o método vigente de dimensionamento de pavimentos e o novo método MeDiNa**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Ceuma, São Luiz, 2018.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5.ed. São Paulo: Atlas, 1999

GONDIM, L. M. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 213 fl, 2008.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>. Acesso em: 24 maio 2022.

GOOGLE MAPS. **Localização da UTE Energia Pecém**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/>>. Acesso em: 24 maio 2022.

GUIA DE ENGENHARIA. **Dimensionamento de pavimento flexível: exemplo prático**. 2019. Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/pavimento-flexivel-exemplo/>>. Acesso em: 12 jun 2022.

Guilherme, A. T. P. **Análise comparativa de modelos para previsão e mapeamento de propriedades geotécnicas dos solos da microrregião de Mossoró-RN**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.

GUIMARÃES, J.E.P. **A cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2ª Ed. São Paulo: PINI, 2002.

HARTMANN, Diego Arthur. **Análise dos defeitos e da irregularidade de pavimentos flexíveis a partir do Guia da AASHTO de 2004**. 2009. 75p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.

IBAÑÉZ, R.; ANDRÉS, A.; ORTIZ, I.; IRABIEN, J. A. Experimental study of the waste binder anhydrite in the solidification/stabilization process of heavy metal sludge. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 57, p. 155-168, 1998.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2015. Disponível em: <<http://www.iea.org/>>. Acesso em: 27 maio 2022.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Sidney: Butterworths. 374p, 1972.

INTERNATIONAL FOCUS GROUP ON RURAL ROAD ENGINEERING (2005).
Cement and Lime Stabilisation. 2005.

LIMA, M. T. S. L.; SOUZA, M. C. **Discorrendo Sobre o Uso das Termelétricas no Brasil.** In: Ciência e Natura, Santa Maria. Ed. Especial UFVJM. Vol 37. 2014.

LITTLE, D. N. **Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime,** Published by Kendall/Hunt Publishing Company, 1995.

LITTLE, D. N. **Evaluation of Stuctrural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates.** Volume 1: Summary of Findings. Prepared for the National Lime Association, 1999.

LOIOLA, P. R. R.; BARROSO, S. H. A. **Aplicação da técnica de solo cal na construção da rodovia do melão no estado do Ceará.** Anais da 37º Reunião Anual de Pavimentação. Goiânia, GO, 2007.

LOIOLA, P. R. R; NOBRE JÚNIOR, E. F. **Trecho experimental utilizando mistura de solo-cal no município de Limoeiro do Norte-Ceará.** In: VI ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA. Brasília, Distrito Federal, 2001.

MALLELA, J.; QUINTUS, P.E.H.V.; SMITH, K.L. **Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design.** Prepared for The National Lime Association, 2004.

MARCON, A. F. **Durabilidade e módulo de elasticidade de misturas areia-cal-cinza volante.** Tese (Mestre em ciência). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. UFRJ. 119p. 1977.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica.** 6ª ed. São Paulo, SP: Atlas, 2005.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Inter Ciência, 2015.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critérios de confiabilidade e ensaios de carga repetidas.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ, 1991.

NASCIMENTO, U. **Estabilização de solos.** Curso de Especialização 108, LNEC, Lisboa, 1970.

NARDI, J.V. **Estabilização de areia com cinza volante e cal – Efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura.** Dissertação (Mestrado). COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 1975.

NÚÑEZ, W. P. (1991) **Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando Seu Emprego na Pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGE/UFRGS, Porto Alegre. 150p.

OLIVEIRA, D. M.; CASTILHOS, J.; MEIOTELLO, E. **Avaliação da solidificação/estabilização de borras oleosas utilizando caulinita e vermiculita como materiais adsorventes**. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinville, 2003.

PRESS, S. F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra**. 4 ed. Trad. R. Menegat, P.C.D. Fernandes, L.A.D. Fernandes, C.C. Porcher. Porto Alegre: Bookman. 656p. 2006.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. F. **Metodologia do Trabalho Científico** [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RABASSA, C. M.; SANTOS, L. C.; BASTOS, C. A. B. **Estabilização físico-química de um solo arenoso fino com cal e cimento**. XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2006.

RESEARCHGATE. **Estudo do processo de lixiviação controlada da escória de aciaria em extrator soxhlet visando emprego em pavimentos**. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Escoria-de-aciaria-utilizada-nesta-pesquisa-Agregado-01_fig1_317353168>. Acesso em: 30 maio 2022.

RHODE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N.I.W. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil – Aspectos técnicos e ambientais**. vol.1. Porto Alegre: CIENTEC, 2006.

RUVER, C.A.; CRUZ, R.C.; KNOP, A.; CONSOLI, N.C.; HEINECK, K.S. Uso do equipamento de lixiviação em coluna para análise da eficiência do método de solidificação e estabilização de solos contaminados. In: XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia (CRICTE2003), 2003, Itajaí/SC. **Anais do XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia**. Itajaí/SC, Univali, 2003.

SANTOS, J. **Estabilização de uma argila laterítica do Distrito Federal para uso em rodovias de baixo volume de tráfego**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-127/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

SANTIAGO, L. S. **Contribuições para um desenvolvimento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SANTOS, M.; LIMA, D.; BUENO, B. **Estabilização dos solos com cal e betume**. 6ª Reunião de Pavimentação Urbana, p.74-97. Santos, 1995.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Volume II. 1ª Edição. Editora Pini. São Paulo, 2001.

SILVA, M. V. D.; SANTOS, R. O. G. **Uso de materiais alternativos em camadas de pavimentos asfálticos: uma análise bibliográfica**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ed. 05, Vol. 06. 2021.

SILVA, N. I. W.; CHIES, F.; ZWONOK, O. **Usos de cinzas de carvão na construção civil**. Anais 1º Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1997.

SOUZA, A. N. de S. **Estudo de mistura solo-cal para base de pavimento rodoviário**. 2014. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Brasília – Df, 2014.

SUTHERSAN, S. S. **Remediation engineering: Design concepts**. 2nd ed. Flórida: CRC Press INC, 1997.

TENG JÚNIOR, C. T. **Estudo da influência do calcário cru e cinzas volantes nas propriedades físico-químicas e mecânicas do cimento Portland produzido em Moçambique**. Universidade Eduardo Mondlane. Faculdade de Ciências. Departamento de Química, 2001.

VASCONCELOS, S. D. **Avaliação da heterogeneidade de cinzas de carvão mineral advindas da Termelétrica Energia Pecém e sua aplicação em camadas granulares de pavimentos**. 2016. 120 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

VASCONCELOS, S. D. **Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos**. 2018. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

VILLIBOR, D. F. **Estabilização Granulométrica ou Mecânica**. GRÁFICA EESC – USP, São Carlos, SP, 1982.

VOGT, J. C. **Estabilização Betuminosa**. In: 7º Simpósio sobre pesquisas rodoviárias. Rio de Janeiro, 1971.

WIKIHAND. **Fly Ash**. 2017. Disponível em: <http://www.wikiwand.com/en/Fly_ash>. Acesso em: 25 maio 2022.

WILES, C. C. A review of solidification/stabilization technology. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 14, p. 5-21, 1987.