



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

SARAH DENISE VASCONCELOS

**AVALIAÇÃO DAS CINZAS DE CARVÃO MINERAL PRODUZIDAS EM USINA
TERMELÉTRICA PARA CONSTRUÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTOS**

FORTALEZA

2018

SARAH DENISE VASCONCELOS

AVALIAÇÃO DAS CINZAS DE CARVÃO MINERAL PRODUZIDAS EM USINA
TERMELÉTRICA PARA CONSTRUÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Profª. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- V451a Vasconcelos, Sarah Denise.
Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos / Sarah Denise Vasconcelos. – 2018.
132 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Suelly Helena de Araújo Barroso.
1. Pavimentação. 2. Projeto. 3. Estabilização. 4. Cinzas. 5. Sustentabilidade. I. Título.

CDD 388

SARAH DENISE VASCONCELOS

AVALIAÇÃO DAS CINZAS DE CARVÃO MINERAL PRODUZIDAS EM USINA
TERMELÉTRICA PARA CONSTRUÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 19/02/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dra. Michéle Dal Toé Casagrande

Universidade de Brasília (UnB)

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ph.D. Jorge Barbosa Soares

Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, pelas realizações pessoais e profissionais no ano de 2017 e pela força e coragem durante toda esta caminhada.

À minha orientadora, Dra. Suelly Barroso, minha eterna gratidão. Minha admiração e respeito vão muito além de qualquer orientação acadêmica. Um grande exemplo de mulher e de profissional, muito me orgulha ter sido sua aluna e orientanda. Grata por todos os ensinamentos e conselhos e também pela confiança, empenho e dedicação.

Agradeço aos professores, Michéle Dal Toé Casagrande, Jorge Barbosa Soares e Francisco Heber Lacerda de Oliveira, que gentilmente aceitaram ao convite para participar da banca avaliadora. Grata pela disponibilidade e pelos conhecimentos compartilhados.

Um agradecimento muito especial à Usina Termelétrica Energia Pecém, representada pelos senhores Jaime Nomura, Willamy Conde e Gabriel Travagini. Muito obrigada pelo financiamento desta pesquisa e pelo apoio técnico, logístico e financeiro necessários para que este estudo fosse realizado.

Ao laboratorista do grupo de solos do LMP, Ricardo, pelo auxílio ao desenvolvimento deste estudo. Você faz toda a diferença dentro do laboratório.

Agradecimento muito especial às amigas, Raimi e Regilene, com os quais tive o prazer de conviver e aprender durante o mestrado. Muito grata pelo companheirismo e incentivo durante esta caminhada.

Aos amigos do LMP grata pela convivência durante todo o ano de 2017 e por toda ajuda sempre que eu precisava. Agradecimento especial ao Boris por todo o auxílio ao desenvolvimento deste trabalho e a Annie pela amizade e por estar sempre disponível a toda e qualquer dúvida. Vocês são demais!

Agradeço também aos pesquisadores, professores e alunos, das outras linhas de pesquisas do projeto. Vocês muito auxiliaram neste trabalho, fornecendo informações que complementaram este estudo. Agradecimento especial a todos que ajudaram na realização dos ensaios ambientais: Prof. André Santos, Prof. Anderson Borghetti, Ricardo e Francisco (do LABOSAN), Dêyvid e Juliene (do LAT).

Aos meus pais e ao meu irmão, vocês são essenciais em minha vida. Muito obrigada pelo incentivo e pelos sábios conselhos ao longo de toda minha vida. Sem vocês nada disso seria possível.

Ao meu namorado, Assis, toda minha gratidão. Com você essa caminhada se tornou bem menos árdua. Muito obrigada por estar sempre ao meu lado, por vibrar comigo em cada conquista. Grata por todo carinho e amor.

À CAPES pela concessão de bolsa de estudo utilizada para realização desta pesquisa.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação: o meu muito obrigada.

RESUMO

O aproveitamento de rejeitos produzidos em centrais termelétricas pode representar uma excelente alternativa para construção de pavimentos econômicos e ambientalmente sustentáveis. Esta pesquisa tem por objetivo avaliar a utilização das cinzas de carvão mineral provenientes de uma termelétrica, localizada na Região Metropolitana de Fortaleza, em camadas granulares dos pavimentos. De forma inicial, investigou-se a heterogeneidade das cinzas dispostas em uma bacia de sedimentação a partir da sondagem de 32 furos e realização dos ensaios de caracterização física, química, ambiental, bem como ensaios mecânicos em todas as amostras coletadas. Em virtude da grande heterogeneidade dos resultados mecânicos obtidos e da necessidade ambiental de inertização do resíduo, foi selecionado um solo regional e a cal como estabilizante químico a fim de se produzir em laboratório misturas que apresentassem propriedades mecânicas e hidráulicas adequadas para emprego em camadas granulares dos pavimentos. Assim, foram produzidas misturas de solo-cinza (50% solo + 50% cinza), cinza-cal e solo+cinza+cal, na proporção de 1%, 3% e 5% do estabilizante químico. Para essas misturas, realizaram-se, em diferentes tempos de cura (0, 7, 14 e 28 dias), ensaios de 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. Constatou-se, a partir dos ensaios realizados, que as misturas M3 (50% solo + 50% cinza), M4 (95% cinza + 5% cal) e M5 (47,5% cinza + 47,5% solo + 5% cal) apresentaram comportamento mecânico compatível para utilização em camadas granulares dos pavimentos. Para essas misturas, realizaram-se ensaios de deformação permanente e ensaios ambientais em amostras no estado solto (lixiviação e solubilização) e no estado compactado (lixiviação em coluna). Posteriormente, foi dimensionado pelo método mecanístico-empírico estruturas de pavimentos, para diferentes volumes de tráfego, com as melhores misturas investigadas, procedendo-se uma análise comparativa de custos. Concluiu-se que o reaproveitamento dos resíduos da termelétrica na pavimentação é viável do ponto de vista técnico-financeiro e ambiental, representando uma excelente alternativa para a proposição de um projeto estrutural de pavimento mais econômico e sustentável.

Palavras-chave: Pavimentação, Projeto, Estabilização, Cinzas, Sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of residues produced in thermoelectric plants can represent an alternative for the construction of economical and environmentally sustainable pavements. This research aims to evaluate the use of mineral coal ashes from a thermoelectric plant in granular layers of pavements, from laboratory studies and mechanistic-empirical analysis. Initially, the heterogeneity of the ashes arranged in a landfill was investigated from a 32-hole drilling and physical, chemical and environmental characterization tests, as well as mechanical tests on all collected samples. Due to the heterogeneity, the mechanical results obtained and the environmental necessity to inert the residue, a regional soil and a chemical stabilizer were selected to produce in laboratory stabilized mixtures that presented adequate mechanical and hydraulic properties for granular layers of pavements. Thus, mixtures of soil-ash (50% soil + 50% ash), ash-lime and soil + ash + lime were produced, in the proportion of 1%, 3% and 5% of the chemical stabilizer. For these mixtures, Proctor, CBR (California Bearing Ratio), MR (Resilience Module), RCS (Simple Compression Resistance) and RTCD (Tensile Strength by Diametral Compression) tests were carried out at different curing times (0, 7, 14 and 28 days). In addition, bituminous prime coat quality tests were conducted. It was verified, from the tests performed, that M3 (50% soil + 50% ash), M4 (95% ash + 5% lime) and M5 (47,5% ash + 47,5% soil + 5% lime) showed compatible mechanical behavior for use in layers of pavements. For these mixtures, Permanent Deformation tests and environmental tests were performed on samples in the loose state (leaching and solubilization) and in the compacted state (leaching in Column). Subsequently, pavement structures were designed by a mechanistic-empirical method, for different volumes of traffic, with the best mixtures investigated, proceeding a comparative cost analysis. It was concluded that the reutilization of thermoelectric residues in paving is feasible from the technical-financial and environmental point of view, representing potential alternative for proposing a more economical and sustainable pavement structural design.

Keywords: Paving, Project, Stabilization, Ash, Sustainability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração de cinzas em usinas termelétricas.....	20
Figura 2 – Partículas de cinzas volantes (ampliação de 2000 vezes).....	21
Figura 3 – Partículas de Cinzas Pesadas	23
Figura 4 – Utilização de Cinzas de Carvão na China.....	25
Figura 5 – Utilização de cinzas volantes nos EUA	26
Figura 6 – Utilização de cinzas pesadas nos EUA	27
Figura 7 – Polos regionais de geração de cinzas no Sul do Brasil	28
Figura 8 – Geração de cinzas no Sul do Brasil.....	29
Figura 9 – Problemas Ambientais oriundos do Derramamento de Cinzas.....	34
Figura 10 – Ensaio Lixiviação em Coluna	37
Figura 11 – Aterro construído com cinzas ligando os municípios de São Jerônimo/RS e General Câmara/RS	48
Figura 12 – Localização da UTE Energia Pecém em relação ao <i>campus</i> do Pici.....	49
Figura 13 – Ilustração do Módulo I de armazenagem.....	50
Figura 14 – Coleta das cinzas no Módulo I de armazenagem.....	50
Figura 15 – Localização da jazida de solo	51
Figura 16 – Aspecto visual do solo coletado.....	52
Figura 17 – Fluxograma Metodológico.....	53
Figura 18 – Plano de Amostragem	54
Figura 19 – Fluxograma da 1ª Etapa Metodológica	55
Figura 20 – Fluxograma da 2ª etapa metodológica	57
Figura 21 – Preparação das Amostras	58
Figura 22 – Ilustração da realização do ensaio de MR.....	59
Figura 23 – Ilustração da realização dos ensaios de RCS e RT	60
Figura 24 – Corpo-de-prova do ensaio de Imprimação.....	60
Figura 25 – Etapas do ensaio de Imprimação.....	61
Figura 26 – Fluxograma experimental da 4ª Etapa Metodológica	63
Figura 27 – Ilustração da realização do ensaio de lixiviação	64
Figura 28 – Ilustração do ensaio de solubilização.....	64
Figura 29 – Ensaio de lixiviação em amostra compactada	65

Figura 30 – Trecho experimental a ser construído com o uso de cinzas.....	66
Figura 31 – Levantamento Planialtimétrico	67
Figura 32 – Reconhecimento do subleito local	67
Figura 33 – Reconhecimento de Subleito (Coleta de Amostras)	68
Figura 34 – Classificação Ambiental das Cinzas	71
Figura 35 – Análise química das amostras	72
Figura 36 – Curvas granulométricas do solo e da cinza homogeneizada.....	74
Figura 37 – Curvas de Compactação de todas as misturas.....	75
Figura 38 – Resultados dos Ensaios de CBR para todas as misturas ensaiadas.....	77
Figura 39 – Influência do acréscimo de cal nas misturas M2 e M3.....	78
Figura 40 – Variação do CBR com o tempo de cura para todas misturas de M4 a M9.....	78
Figura 41 – Resultados da expansão para todas as misturas ensaiadas.....	79
Figura 42 – Aspecto dos corpos de prova de RCS da Mistura M2 após 7 e 14 dias de cura..	81
Figura 43 – Resultados dos ensaios de RCS	81
Figura 44 – Variação do RCS com o tempo de cura para as misturas de M4 a M9.....	82
Figura 45 – Resultados de RTCD.....	83
Figura 46 – Variação da RTCD com o tempo de cura para as misturas de M4 a M9.....	84
Figura 47 – Penetração betuminosa das misturas idealizadas	85
Figura 48 – Influência do acréscimo do teor de cal na mistura M2	86
Figura 49 – Influência do Acréscimo do Teor de cal na mistura M3.....	87
Figura 50 – Representação do MR (M2).....	89
Figura 51 – Representação do MR (M3).....	89
Figura 52 – Efeito da Estabilização Granulométrica sobre o MR.....	90
Figura 53 – Comportamento do MR da mistura M4 para diferentes tempos de cura	91
Figura 54 – Comportamento do MR da mistura M5 para diferentes tempos de cura	91
Figura 55 – Comportamento do MR da mistura M6 para diferentes tempos de cura	92
Figura 56 – Comportamento do MR da mistura M7 para diferentes tempos de cura	92
Figura 57 – Comportamento do MR da mistura M8 para diferentes tempos de cura	93
Figura 58 – Comportamento do MR da mistura M9 para diferentes tempos de cura	93
Figura 59 – Efeito dos diferentes teores de cal na mistura M2	94
Figura 60 – Efeito dos diferentes teores de cal na mistura M3	94
Figura 61 – Deformação permanente da amostra M2	97

Figura 62 – Deformação permanente da amostra M3	98
Figura 63 – Deformação permanente da mistura M4 com tempo de cura de 0 dia.....	98
Figura 64 – Deformação permanente da mistura M4 com 7 dias de cura.....	99
Figura 65 – Deformação permanente da mistura M5 com 0 dia de cura	99
Figura 66 – Deformação permanente da mistura M5 com 7 dias de cura.....	100
Figura 67 – Influência da cal na deformação permanente da amostra M2.....	100
Figura 68 – Influência da cal na deformação permanente da amostra M3.....	101
Figura 69 – Comparação das concentrações dos parâmetros no extrato lixiviado (M2 e M2C).....	105
Figura 70 – Comparação das concentrações dos parâmetros no extrato lixiviado (M3 e M3C).....	105
Figura 71 – Comparação das concentrações dos parâmetros no extrato lixiviado (M4 e M4C).....	106
Figura 72 – Comparação das concentrações dos parâmetros no extrato lixiviado (M5 e M5C)	106
Figura 73 – Mapa de Declividades do entorno do futuro trecho experimental.....	108
Figura 74 – Modelo 3D do terreno levantado	109
Figura 75 – Perfil longitudinal do trecho experimental a ser construído.	109
Figura 76 – Greide selecionado para o trecho experimental	110
Figura 77 – Estrutura 1 para o pavimento com $N = 10^6$	114
Figura 78 – Estrutura 2 para o pavimento com $N = 10^7$	114
Figura 79 – Comparativo dos preços das camadas de base das estruturas propostas	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns estudos nacionais para viabilização de cinzas na pavimentação	43
Tabela 2 – Normas empregadas para os ensaios realizados na 1ª Etapa.....	55
Tabela 3 – Misturas idealizadas	56
Tabela 4 – Normas utilizadas para os ensaios realizados na 2ª Etapa.....	57
Tabela 5 – Relação dos pares de tensões no ensaio de Deformação Permanente	62
Tabela 6 – Análise estatística dos parâmetros dos ensaios físicos e mecânicos	73
Tabela 7 – Porcentagens de pedregulho, areia, siltes e argilas nos dois materiais.....	74
Tabela 8 – Resultados dos Ensaios de Compactação para todas as misturas ensaiadas	75
Tabela 9 – Resultados dos ensaios de CBR e expansão para todas as misturas ensaiadas ...	77
Tabela 10 – Resultados de RCS para todas as misturas ensaiadas.....	80
Tabela 11 – Resultados de RTCD para todas as misturas ensaiadas.....	83
Tabela 12 – Penetração betuminosa das misturas estabilizadas.....	85
Tabela 13 – Resultados dos Ensaios de MR.....	88
Tabela 14 – Resultados dos Ensaios de Deformação Permanente	96
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de Lixiviação para as amostras estudadas	102
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de Solubilização para as amostras estudadas.....	103
Tabela 17 – Comparação do lixiviado das amostras no estado solto e no estado compactado	104
Tabela 18 – Classificação da região levantada quanto à declividade.....	108
Tabela 19 – Caracterização física das amostras representativas do subleito	110
Tabela 20 – Caracterização mecânica das amostras representativas do subleito	111
Tabela 21 – Análise estatística das amostras representativas do subleito.....	111
Tabela 22 – Dimensionamento de Pavimentos	113
Tabela 23 – Custo para construção da camada de base (EST 1 – $N = 10^6$)	115
Tabela 24 – Custo para construção da camada de base (EST 2 – $N = 10^7$)	115
Tabela 25 – Comparativo dos preços das camadas de base	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highways and Transportation Officials</i>
ACAA	<i>American Coal Ash Association</i>
ABCM	Associação Brasileira de Carvão Mineral
CBR	<i>California Bearing Ratio</i> (Índice de Suporte Califórnia)
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
DER	Departamento de Estradas e Rodagem
DET	Departamento de Engenharia de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LP	Limite de Plasticidade
MR	Módulo de Resiliência
NDRC	<i>National Development and Reform Commission</i>
RCS	Resistência à Compressão Simples
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RT	Resistência à Tração
SEINFRA	Secretaria da Infraestrutura do Ceará
UFC	Universidade Federal do Ceará
UTE	Usina Termelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema de pesquisa	17
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivos	17
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	17
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	18
1.4	Organização do trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Considerações iniciais	19
2.2	Cinzas volantes (<i>fly ash</i>)	21
2.3	Cinzas pesadas (<i>bottom ash</i>)	22
2.4	Cenário mundial de geração e utilização de cinzas de carvão	24
2.5	Cenário nacional de geração e utilização de cinzas de carvão	27
2.6	Cenário do estado do Ceará de geração e utilização de cinzas de carvão	29
2.7	Generalidades sobre a estabilização química de cinzas com a cal	30
2.8	As cinzas e o meio ambiente	32
<i>2.8.1</i>	<i>Caracterização ambiental</i>	34
<i>2.8.2</i>	<i>Técnica de encapsulamento de contaminantes</i>	35
2.9	Alguns estudos internacionais para aplicação de cinzas na pavimentação	38
2.10	Estudos nacionais para aplicação de cinzas na pavimentação	40
2.11	Experiências internacionais de aplicação de cinzas na pavimentação	44
2.12	Experiências nacionais de aplicação de cinzas na pavimentação	46
2.13	Considerações finais	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Materiais	49
<i>3.1.1</i>	<i>Cinzas de carvão mineral</i>	49
<i>3.1.2</i>	<i>Jazida de solo</i>	51
<i>3.1.3</i>	<i>Cal</i>	52
3.2	Métodos	52
<i>3.2.1</i>	<i>Primeira etapa do programa experimental</i>	54
<i>3.2.2</i>	<i>Segunda etapa do programa experimental</i>	56

3.2.2.1	<i>Preparação das misturas</i>	57
3.2.2.2	<i>Ensaio realizados na segunda etapa do programa experimental</i>	58
3.2.2.2.1	Ensaio de compactação Proctor e de Índice de Suporte Califórnia (CBR).....	58
3.2.2.2.2	Ensaio de módulo de resiliência (MR).....	58
3.2.2.2.3	Ensaio de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RTCD)	59
3.2.2.2.4	Ensaio de imprimação.....	60
3.2.3	<i>Terceira etapa do programa experimental</i>	62
3.2.4	<i>Quarta etapa do programa experimental</i>	63
3.2.5	<i>Quinta Etapa do programa experimental</i>	66
3.2.6	<i>Considerações finais</i>	69
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	70
4.1	Primeira etapa do programa experimental	70
4.2	Segunda etapa do programa experimental	73
4.2.1	<i>Ensaio de Proctor</i>	74
4.2.2	<i>Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR)</i>	76
4.2.3	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)</i>	79
4.2.4	<i>Ensaio de Resistências à Tração por Compressão Diametral (RTCD)</i>	82
4.2.5	<i>Ensaio de Imprimação</i>	84
4.2.6	<i>Ensaio de Módulo de Resiliência</i>	87
4.2.7	<i>Seleção das melhores misturas para camadas de pavimentos</i>	94
4.3	Terceira etapa do programa experimental	95
4.4	Quarta etapa do programa experimental	102
4.5	Quinta etapa do programa experimental	107
4.5.1	<i>Estudos topográficos</i>	107
4.5.2	<i>Estudos geotécnicos</i>	110
4.5.3	<i>Dimensionamento das estruturas de pavimento</i>	112
4.5.4	<i>Análise financeira</i>	115
4.6	Considerações finais	116
5	CONCLUSÕES	117
5.1	Principais contribuições	117
5.2	Principais constatações	117
5.2.1	<i>Primeira etapa do programa experimental</i>	117

5.2.2	<i>Segunda etapa do programa experimental</i>	118
5.2.3	<i>Terceira etapa do programa experimental</i>	119
5.2.4	<i>Quarta etapa do programa experimental</i>	120
5.2.5	<i>Quinta etapa do programa experimental</i>	120
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	121
	REFERÊNCIAS	123

1 INTRODUÇÃO

Em virtude de um contexto global de estímulo a uma política de conscientização sustentável e adoção de sistemas industriais ecologicamente aceitos, um dos grandes desafios atuais é a melhor gestão dos resíduos produzidos em regiões industriais. Todo processo industrial gera resíduos, muitas vezes tóxicos e perigosos, que ao serem simplesmente dispostos na natureza causam danos à saúde humana e ao meio ambiente, poluindo a água e o solo e alterando os ciclos ecológicos. Nesse sentido, dada a demanda atual por sistemas seguros de disposição final para rejeitos produzidos, é de grande interesse transformar resíduos industriais em co-produtos aplicáveis em processos construtivos e/ou industriais.

É crescente a participação de usinas termelétricas como fonte geradora de energia no território nacional, o que tem desencadeado um aumento na geração de resíduos oriundos no processo de queima do carvão mineral. O carvão é uma importante fonte de combustível mundial para a produção de eletricidade, sendo a fonte de energia fóssil mais abundante no planeta e a mais utilizada para geração de energia elétrica no mundo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015). No entanto, impactos ambientais surgem durante o beneficiamento do carvão mineral, decorrentes da geração de toneladas diárias de rejeitos sólidos, a priori sem valor comercial, depositados em áreas inapropriadas, como bacias de sedimentação e aterros de resíduos industriais (YADAV e YADAV, 2017).

Em centrais termelétricas, a geração de energia elétrica utilizando como combustível fóssil o carvão mineral gera importantes resíduos sólidos, como cinzas leves (*fly ash*), cinzas pesadas (*bottom ash*) e resíduos provenientes da dessulfurização do gás da chaminé (FGD). As propriedades e as características físicas, químicas e mineralógicas desses resíduos dependem de vários fatores, como a qualidade do carvão e do tipo e da eficiência do sistema de controle de emissões (ROCHA *et al.*, 1999; MUDGAL *et al.*, 2011; SABEDOT *et al.*, 2011).

A cinza volante é um resíduo finamente dividido que resulta da combustão do carvão pulverizado, apresentando em geral propriedades pozolânicas. Algumas pesquisas têm sido desenvolvidas visando um uso mais nobre para esse tipo de cinza, como a proposição de sua utilização em substituição parcial do cimento Portland na forma de fíler (HARDJITO e RANGAN, 2005), como aditivo mineral na fabricação de cimento pozolânico (MALMANN, 1996; SNIC; ABCP, 2010), como material geopolimérico (LIVI, 2015) ou na pavimentação, como base e sub-base de pavimentos flexíveis (NARDI, 1975; DAWSON *et al.*, 1993; BARROS, 2015).

Ao sofrer a combustão, o carvão mineral gera também cinzas pesadas, produzidas a partir da aglomeração de partículas semifundidas que se depositam no fundo das caldeiras. De acordo com Santa (2002), após processadas em tamanho de partículas adequado, essas cinzas podem se transformar em material pozolânico, podendo ser utilizadas em diversas aplicações. A cinza pesada é frequentemente usada na produção de blocos de concreto (SALVADOR *et al.*, 2006; KNISS *et al.*, 2011; HOLMES *et al.*, 2016) e como camada de base na construção de estradas (GHAFOORI e BUCHOLC, 1997; RANGANATH, 1998, LEANDRO, 2005).

No âmbito da engenharia rodoviária, tem-se um estímulo para aplicação de resíduos industriais em camadas de pavimentos. O mercado rodoviário, com seus recursos naturais cada vez mais escassos e sua capacidade de assimilação de grandes volumes de materiais, está em uma posição importante para fornecer soluções seguras e econômicas para emprego de resíduos industriais (GHAFOORI e BUCHOLC, 1996). Rohde *et al.* (2006) reforçam que a aplicação de cinzas na pavimentação se difundiu muito desde a década dos anos 60, sendo objeto de vários estudos nacionais e internacionais realizados (NARDI, 1975; DAWSON *et al.*, 1993; ROHDE *et al.*, 2006; LOPES, 2011; BARROS, 2015; VASCONCELOS, 2016).

Tendo em vista essa realidade, procurou-se desenvolver nesta pesquisa uma investigação em uma usina termelétrica localizada na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) para que os resíduos de carvão produzidos fossem melhor estudados e aplicados como camadas granulares de pavimentos. Nessa termelétrica existem duas células de armazenagem de resíduos que custaram juntas cerca de 10 milhões de reais para serem construídas. A célula de armazenamento denominada de Módulo I já se encontra em capacidade máxima (315 mil m³ de volume de cinzas). Relatos de técnicos da empresa afirmam que as cinzas foram armazenadas no Módulo I sem planejamento prévio, estando também depositados alguns outros materiais, como pirita, material orgânico e, inclusive, águas servidas das instalações da própria termelétrica.

Dado o avanço contínuo dos critérios de controle por parte das agências ambientais e aos altos custos para armazenamento desses resíduos este trabalho tem, assim, como desafio motivador viabilizar o reaproveitamento desses rejeitos de termelétrica em projetos estruturais de pavimentos, com adequabilidade técnica, ambiental e econômica.

1.1 Problema de pesquisa

A problemática se resume na limitação de áreas para armazenagem das cinzas na termelétrica investigada, altos custos para estocagem desses resíduos, na grande heterogeneidade dos resíduos dispostos nessa termelétrica e nos problemas ambientais oriundos da disposição inadequada desses rejeitos. Além disso, há um cenário de escassez de jazidas naturais cujas características se enquadrem nas especificações técnicas tradicionais para o uso em pavimentação.

1.2 Justificativa

Existe uma demanda crescente no cenário internacional por materiais rodoviários, porém o fornecimento de materiais tradicionais de construção em camadas granulares de pavimentos está diminuindo, à medida que ocorre o esgotamento dos materiais disponíveis e que regulamentações governamentais restringem operações de jazidas, pedreiras ou outras fontes de ocorrência de material para pavimentação (LAV e LAV, 2010).

Com o aproveitamento de misturas estabilizadas de cinzas em camadas de pavimentos, é possível diminuir os custos de tratamento e disposição final do resíduo, reduzir os impactos ambientais, além de oferecer matéria-prima secundária ao mercado rodoviário. No caso da termelétrica investigada, a estabilização pode atuar também na redução da significativa heterogeneidade dos resíduos dispostos no módulo de armazenagem e na redução dos problemas ambientais oriundos da lixiviação de elementos tóxicos existentes nos resíduos.

1.3 Objetivos

Diante da problemática observada e conforme justificativa apresentada, foram delineados alguns objetivos para esta pesquisa.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é avaliar, por meio de ensaios laboratoriais e de análise mecanística-empírica, a utilização das cinzas de carvão mineral de uma termelétrica,

localizada na Região Metropolitana de Fortaleza, em camadas de bases e sub-bases dos pavimentos.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) realizar análise técnica e ambiental do emprego das cinzas em camadas granulares dos pavimentos;
- b) analisar diferentes mecanismos para o encapsulamento de possíveis contaminantes existentes nas cinzas para aplicação na área de pavimentação;
- c) avaliar as propriedades mecânicas de misturas com cinzas, estabilizadas granulometricamente e quimicamente, para aplicação em camadas granulares dos pavimentos;
- d) definir as melhores misturas, contendo cinzas, para a construção de camadas granulares dos pavimentos;
- e) avaliar a qualidade da imprimação betuminosa de bases granulares contendo cinzas;
- f) dimensionar pavimentos teóricos contendo cinzas e proceder uma análise financeira das estruturas dos pavimentos propostas.

1.4 Organização do trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos: Capítulo 1, no qual foi apresentada uma contextualização da temática, o problema de pesquisa, a justificativa e os objetivos do estudo; Capítulo 2 consta de uma revisão bibliográfica, na qual se abordarão alguns tópicos relevantes para este estudo, dando ênfase aos estudos laboratoriais nacionais e internacionais que analisaram a aplicação de misturas de cinzas em camadas de pavimentos e às experiências práticas, em âmbito mundial, que consolidaram a utilização de cinzas em trechos de pavimentos; Capítulo 3, com a descrição dos materiais e métodos escolhidos para se atingir os objetivos propostos; Capítulo 4, no qual constam a apresentação e a análise dos resultados preliminares obtidos a partir do procedimento experimental realizado; Capítulo 5, estão apresentadas as conclusões obtidas deste estudo, dispendo também de sugestões e recomendações para trabalhos futuros. Por fim, as referências bibliográficas estão apresentadas após os capítulos desta dissertação de mestrado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será feita uma discussão sobre os tipos de cinzas geradas na queima do carvão mineral em centrais termelétricas, com enfoque nas suas propriedades físico-químicas e no cenário de produção e de utilização desses resíduos em âmbito internacional e nacional. Será abordado também o mecanismo de estabilização química, abordando o seu efeito nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais e sua influência no processo de lixiviação dos contaminantes. Para finalizar, será feita uma discussão sobre a utilização de cinzas no cenário rodoviário, com ênfase em experiências brasileiras e internacionais nesse tema.

2.1 Considerações iniciais

A geração de energia em centrais termelétricas a carvão mineral ocorre com a produção de cinzas que são resíduos sólidos formados pela combustão direta do carvão. Rohde *et al.* (2006) afirmam que o carvão é constituído por duas frações intimamente misturadas, sendo uma orgânica, composta de matérias voláteis mais carbono fixo, e uma fração mineral, composta principalmente por argilas, quartzos, piritas e carbonatos. A ação do calor no processo de combustão do carvão transforma a fração orgânica em voláteis e coque, enquanto a fração inorgânica originam as cinzas. Nardi (1975) afirma que as cinzas se constituem em componentes não combustíveis do carvão, além de partículas que não foram queimadas devido a uma combustão incompleta do carvão mineral.

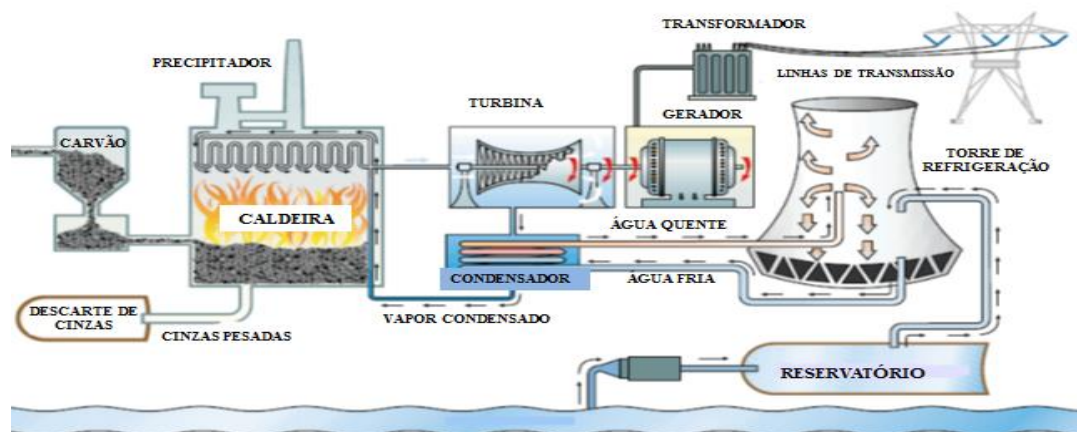
As propriedades físico-químicas das cinzas oriundas da combustão do carvão são influenciadas por diversos fatores, tais como a composição do carvão utilizado; o grau de beneficiamento e de moagem do carvão; o tipo, o projeto e a operação da caldeira e o sistema de extração e manuseio das cinzas (GOETHE, 1990; ROCHA *et al.*, 1999; MUDGAL *et al.*, 2011; SABEDOT *et al.*, 2011). Devido a esses fatores, as cinzas variam consideravelmente em sua composição e em suas propriedades físico-químicas.

Conforme o processo de queima do carvão, as cinzas se apresentam de diferentes formas, classificando-se predominantemente como cinzas volantes (*fly ash*) e cinzas pesadas (*bottom ash*). Em termelétricas, em média 80% dos resíduos são cinzas volantes e 20% cinzas pesadas (ZWONOK, CHIESS e SILVA, 1996).

Trichês *et al.* (2006) relatam que no processo de queima do carvão ocorre inicialmente a pulverização do combustível, para aumentar a eficiência no interior da câmara de combustão. O carvão pulverizado é então insuflado para a fornalha da caldeira que está a uma temperatura de cerca de 1300 °C. Durante a queima do carvão, as cinzas volantes, as quais representam boa parte do material inorgânico não eliminado na combustão, são recuperadas nas tubulações de exaustão por meio do fluxo dos gases de combustão. Essa cinza é um resíduo sólido industrial seco, com elevado valor comercial devido ao seu potencial pozolânico. As cinzas volantes são muito utilizadas em concretos e na fabricação de cimentos pozolânicos. Em âmbito internacional, uma parcela considerável desse resíduo é utilizada também na construção de bases e sub-bases de pavimentos (LEANDRO, 2005; FHWA, 2017).

A menor parcela do material inorgânico não eliminado são as cinzas pesadas, que possuem granulometria mais grossa, gerada a partir da aglomeração de grãos semifundidos no interior da câmara de combustão (FARIAS, 2005). Essas cinzas, em geral, caem para o fundo das fornalhas e de gaseificadores, de onde são retiradas por fluxo d'água. Depois de passar por um sistema de redução do tamanho de suas partículas, elas são destinadas até os tanques de decantação, onde são sedimentadas e tornam-se aptas para uso. Singh e Siddique (2013) afirmam que as cinzas pesadas podem ser utilizadas em diferentes aplicações, como em base e sub-base de pavimentos, em preenchimento estrutural e como agregados para concreto e alvenaria. As cinzas pesadas, no entanto, ainda têm sido pouco reaproveitadas no Brasil, com parcela dessas cinzas ainda descartada de forma inadequada em grandes bacias de sedimentação. A Figura 1 ilustra o processo de geração de resíduos em centrais termelétricas.

Figura 1 - Geração de cinzas em usinas termelétricas



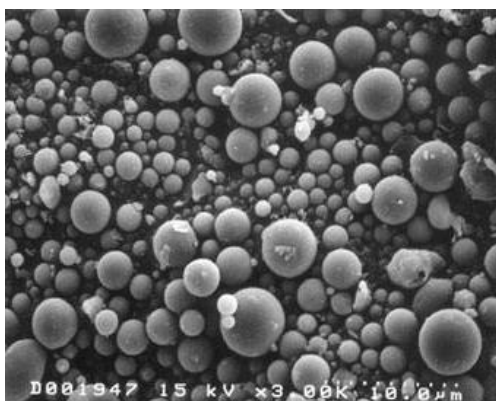
Fonte: Adaptado de Georgia Power (2016)

2.2 Cinzas Volantes (*Fly Ash*)

As cinzas volantes constituem-se de partículas finas, inorgânica, de cor cinza claro devido a menor presença de carbono, com partículas esféricas e com tamanho dos grãos similares aos dos siltes naturais (LEANDRO, 2005). Em geral, essas cinzas são materiais pozolânicos por apresentarem potencial de reação com a cal em presença de água, originando compostos hidratados estáveis com propriedades aglomerantes (PINTO, 1971). De acordo com a norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM C618), a pozolana constitui um material silicoso ou sílico-aluminoso que quando finamente dividido e na presença de umidade reagem com hidróxidos alcalinos para formar compostos com propriedades aglomerantes.

As cinzas volantes são materiais particulados sílico-aluminosos, tipicamente mais finos do que o cimento Portland, formada por partículas esféricas, tipicamente variando em tamanho entre 10 e 100 microns. A finura é uma das propriedades importantes que contribuem para a reatividade pozolânica das cinzas volantes (KIATTIKOMOL *et al.*, 2001; FELEKOGLU, 2009; FHWA, 2017). Na Figura 2 estão ilustradas partículas de cinzas volantes obtidas a partir de microscopia eletrônica.

Figura 2 - Partículas de cinzas volantes (ampliação de 2000 vezes)



Fonte: FHWA (2017)

As especificações mais frequentemente usadas para cinzas volantes são as da ASTM C 618 que classifica as cinzas volantes conforme o percentual de óxido de cálcio em sua composição. As cinzas volantes de classe F são normalmente produzidas a partir do carvão do tipo antracite ou betuminoso, que são carvões que apresentam um maior percentual de carbono em sua constituição (acima de 80%). Carvões do tipo linhito a sub-betuminoso dão origem às cinzas de Classe C, possuindo em sua composição teor considerável de cal. As

cinzas volantes Classe C geralmente possuem propriedades cimentícias, além de propriedades pozolânicas, devido à presença de cal em sua constituição. Já as de Classe F raramente possuem propriedade cimentícia quando misturada com água (ISMAIL, HUSSIN e IDRIS, 2007).

Quanto às características químicas, as cinzas volantes são, em geral, constituídas por sílica, alumina e óxido de ferro, além de óxido de cálcio, magnésio, sódio, potássio, titânio e outros elementos em menores teores. Kihara (1983) afirma que as cinzas volantes são materiais muito complexos e heterogêneos, cujas características composicionais e microestruturais dependem das condições de combustão e das características do carvão utilizado. Simon e Jeffery (1960) ressaltam que o carvão pulverizado é constituído de partículas muito heterogêneas, quanto à mineralogia e ao poder calorífico. Algumas partículas são constituídas essencialmente de material carbonoso e outras de mistura íntima entre a matéria carbonosa e mineral. Dessa forma, cada partícula de carvão apresenta comportamentos diferentes quanto à viscosidade, ponto de fusão e conteúdo químico, resultando em cinzas com aspectos químicos, físicos e mineralógicos distintos.

Quanto às características físicas, as cinzas volantes são normalmente caracterizadas por granulometria de tamanho de silte, por consistência não plástica e materiais não coesivos. Rohde *et al.* (2006) afirmam que a massa específica dos grãos em geral varia entre 2050 kg/m³ e 2200 kg/m³. A mineralogia das cinzas é diversificada, uma vez que varia de acordo com a composição do carvão, ambiente de armazenamento e condições de calcinação (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Porém, de forma geral, as cinzas volantes constituem-se, predominantemente, de material vítreo de natureza sílico-aluminosa e em menor proporção de compostos cristalizados.

2.3 Cinzas Pesadas (*Bottom Ash*)

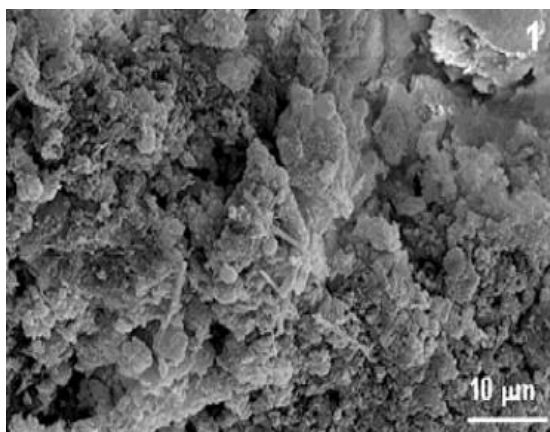
No processo de queima do carvão mineral, as cinzas de fundo são coletadas em recipiente com água, colocado embaixo da câmara de combustão. Com auxílio de jato de água de alta pressão, as cinzas são retiradas e conduzidas por canal de limpeza para tanques de disposição ou bacias de decantação para a diminuição da elevada umidade (FARIAS, 2005).

Goethe (1990) afirma que as propriedades físico-químicas das cinzas pesadas também variam com a composição do carvão, com o grau de moagem do beneficiamento na pré-queima e com o sistema de extração e transporte da cinza após a queima. Em geral, as cinzas pesadas são constituídas por sílica, alumina e óxido de ferro, com menores proporções

de cálcio, magnésio e sulfatos (LEANDRO, 2005). Farias (2005) afirma que a sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), correspondem, em média, a cerca de 50% e 30%, respectivamente, na composição em massa do material.

A variação das cinzas pesadas é significativa, mas na maioria dos casos essas cinzas têm características granulares, com boa parte dos grãos na fração areia e silte e baixos teores de argila. Lopes (2011) afirma que as cinzas pesadas são, em geral, não plásticas e não coesivas. Turiel *et al.* (2004), ao estudarem cinzas pesadas advindas de uma termelétrica na Grécia, observaram que elas eram compostas de aglomerados friáveis, de cor cinza escuro (devido à ocorrência de um conteúdo de lignites não queimados). Por meio de um exame de microscopia eletrônica de varredura foi observado que as cinzas pesadas eram compostas de aglomerados de partículas de carvão não queimado e matéria inorgânica, com tamanhos em geral menores que 10 μm . A Figura 3 ilustra aglomerados de partículas de cinzas de fundo, obtida a partir da microscopia eletrônica de varredura.

Figura 3 - Partículas de Cinzas Pesadas



Fonte: Turiel *et al.* (2004)

À temperatura ambiente, mesmo que em menor grau que as cinzas volantes, as cinzas pesadas também apresentam capacidade de reação com a cal, em presença de água, formando compostos cimentícios (ROHDE *et al.*, 2006). Dessa forma, esses resíduos são utilizados mundialmente em diferentes aplicações, como na produção de cimento Portland, como agregado em unidades de alvenaria de concreto, como agregados para base e sub-base de estrada e como material de preenchimento estrutural. Silva (2006) destaca que a considerável aplicação de cinzas pesadas para obras de pavimentação em outros países, está relacionada ao tipo do carvão que está sendo queimado. Em países como Dinamarca, Alemanha e Estados Unidos, não é necessário à pulverização do carvão fóssil para permitir

uma melhor queima. Como o carvão brasileiro possui menor poder calorífico ele necessita de um processo de moagem mais intenso no processo de queima, para resultar em resíduos de menor granulometria (ROCHA *et al.*, 1999).

2.4 Cenário mundial de geração e utilização de cinzas de carvão

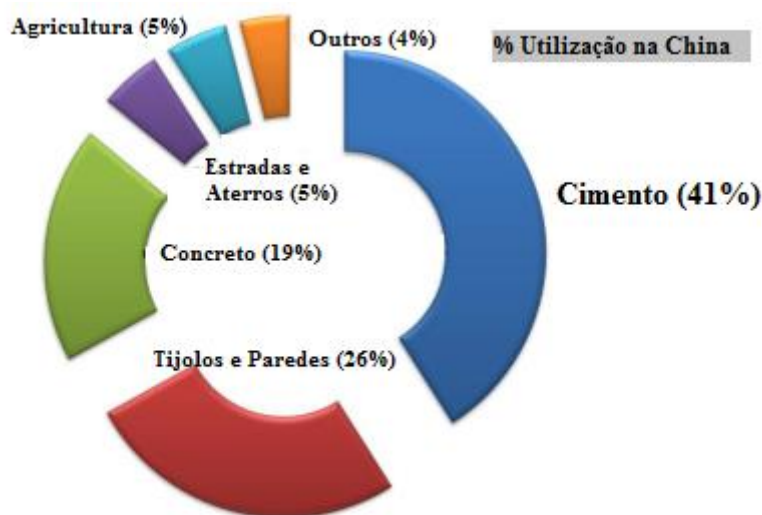
As necessidades energéticas do homem estão em constante evolução, o que obriga a viabilizar fontes alternativas de energia que possam suprir as necessidades existentes. O carvão mineral foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas em larga escala pelo homem. Segundo dados da *International Energy Agency* (IEA) de 2015, o carvão é a fonte de energia fóssil mais abundante no planeta e a fonte mais utilizada para geração de energia elétrica no mundo, representando mais de 40% da geração total de energia. Algumas razões explicam o uso abundante do carvão para geração de energia, como a abundância e facilidade na extração do carvão, o domínio da tecnologia de queima desse minério e a não existência de alternativas que superem, em termos econômicos e tecnológicos, o carvão para as próximas 2 a 3 décadas (ZWONOK, CHIESS e SILVA, 1996). O cenário de produção e utilização mundial de carvão e o histórico sobre a utilização desse combustível como fonte de energia estão explanados com maiores detalhes em Vasconcelos (2016).

Desde que o carvão mineral começou a ser utilizado em larga escala para geração de energia, por volta da década de 1920, milhões de toneladas de cinzas e de outros resíduos foram gerados. Na década dos anos 90, Clarke (1993) compilou dados extensivos sobre a produção e utilização de cinzas de carvão no mundo. Os países que estão marchando em direção a uma rápida industrialização, como a China e a Índia, mostravam uma crescente demanda por carvão, resultando em altas quantidades de cinzas produzidas. Dados de 2015 revelam que China, Estados Unidos e Índia são responsáveis por cerca 70% do consumo mundial de carvão para geração elétrica, de forma que a produção de resíduos oriundas da queima do carvão mineral nesses países também assume destaque mundial (WORLD COAL INSTITUTE, 2015).

Na China, de acordo com dados divulgados pela *National Development and Reform Commission* (NDRC), a geração e utilização de cinzas de carvão foram, respectivamente, de 540 e 367 milhões de toneladas em 2014. Nesse país se observa a maior taxa de reaproveitamento de cinzas (67,96%), superior ao dos EUA (46,74%) e Índia (55,79%), de acordo com Jow *et al.* (2015). Das cinzas volantes que são reaproveitadas nesse país, em geral, destinam-se 60% para cimento e concreto, 26% para tijolos e paredes, 5% para

pavimento rodoviário, 5% para agricultura e reabastecimento de minas e 4% para extração mineral e outras aplicações. A Figura 4 ilustra os setores que absorvem as cinzas de carvão produzidas na China.

Figura 4 - Utilização de Cinzas de Carvão na China



Fonte: Adaptado de Jow *et al.* (2015)

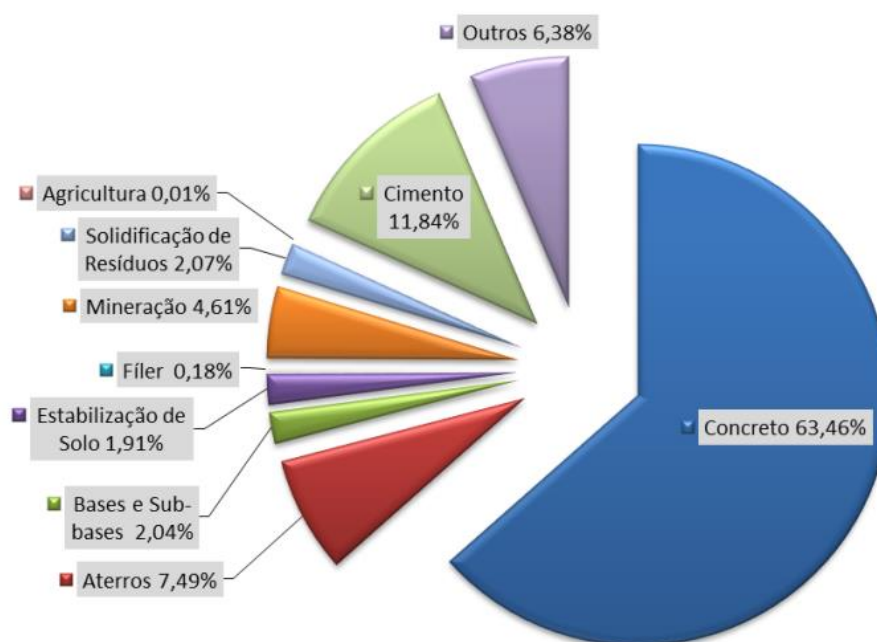
Na Índia, apenas no primeiro semestre do ano de 2017, mais de 85 milhões de toneladas de cinzas foram produzidas, sendo que cerca de 60% desse montante foi reaproveitado em diferentes aplicações, como na fabricação de concreto, alteração do solo, síntese de zeólitas e na construção de camadas de bases e sub-bases de pavimentos (SURABHI, 2017). O restante, no entanto, foi desperdiçado, sendo os resíduos depositados em lagoas ou aterros sanitários. Surabhi (2017) destaca que a Índia produz aproximadamente 180 milhões de toneladas de cinzas volantes por ano. A alta produção resulta do fato de que 70% da demanda por eletricidade do país é atendida por produtos térmicos à base de carvão. O carvão indiano é de baixa qualidade com o conteúdo de cinzas da ordem de 30-45% em comparação com carvões importados com baixo teor de cinzas (10-15%). Aproximadamente, 40% da cinza volante ainda não estão sendo utilizadas no país (HALEEM *et al.*, 2016).

Nos Estados Unidos (EUA), de acordo com a *American Coal Ash Association* (ACAA, 2017), 60,2 milhões de toneladas de produtos de combustão de carvão foram utilizadas de forma benéfica em 2016, a partir de 107,4 milhões de toneladas de cinzas produzidas. Embora a taxa de utilização de cinzas tenha aumentado de 52% para 56%, o volume total de material utilizado se manteve, uma vez que ocorreu um declínio da produção.

No que se refere às cinzas volantes, o percentual de utilização foi de cerca de 60%, enquanto as cinzas pesadas foram de 38%.

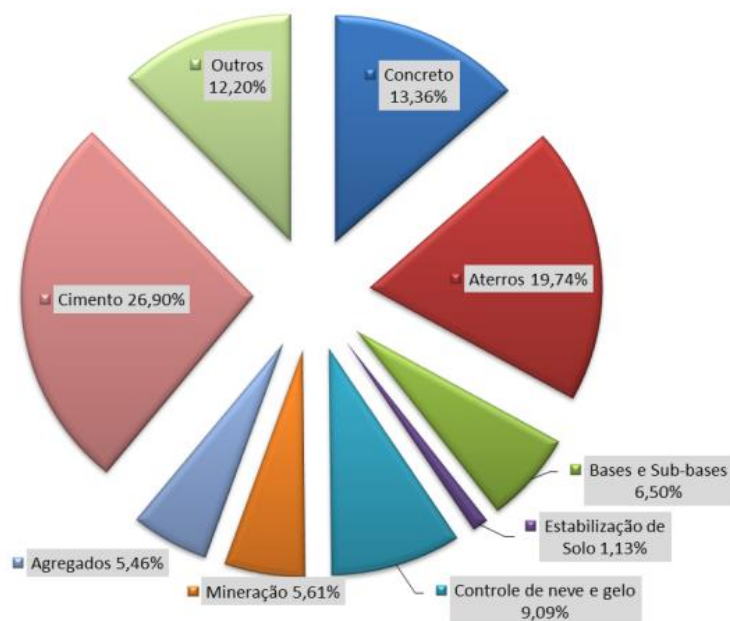
A principal utilização das cinzas volantes nos EUA é na fabricação de concreto e em cimento. Na área da pavimentação, 0,18% das cinzas volantes produzidas foram utilizadas como fíler em revestimento e 2,04% foram utilizadas na construção de bases e sub-bases de pavimentos. A Figura 5 ilustra as principais utilizações de cinzas volantes nos EUA no ano de 2016.

Figura 5 - Utilização de cinzas volantes nos EUA



Fonte: Adaptado de ACAA (2017)

No que se referem às cinzas pesadas, foram produzidas em 2016, em torno 10 milhões de toneladas, sendo as principais aplicações na indústria cimentícia, na produção de concreto e na construção de aterros, conforme visualizado na Figura 6. Foram utilizadas 6,5% das cinzas pesadas produzidas em camadas granulares de pavimentos.

Figura 6 - Utilização de cinzas pesadas nos EUA

Fonte: Adaptado de ACAA (2017)

A África do Sul é reconhecida como o quarto maior produtor de cinzas volantes, depois de China, EUA e Índia. O país possui uma produção média de 30 mega toneladas por ano, no entanto, apenas 6% da produção anual é reaproveitada. Um dos principais fatores que contribuem para a sua baixa utilização é a preocupação ambiental com a contaminação da superfície e águas subterrâneas durante o processo de lixiviação. (HEYNS, ADEDEJI e HASSAN, 2016).

Em resumo, globalmente as cinzas estão sendo usadas para diferentes finalidades, tais como: matéria-prima na produção de cimento e de concreto, fíler em revestimentos asfálticos, obras de aterro e materiais alternativos para construção de bases e sub-bases de pavimentos.

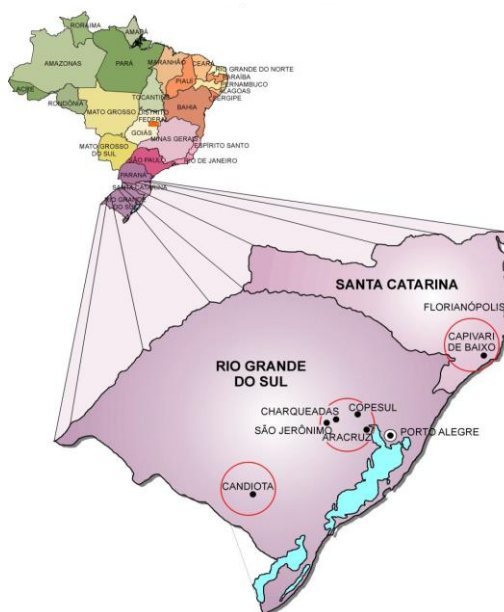
2.5 Cenário nacional de geração e utilização de cinzas de carvão

O carvão mineral de origem brasileira utilizado em complexos energéticos e industriais no país contém altos teores de matéria mineral (até 60%), responsável pela alta geração de resíduos (CHIESS, SILVA, e ZWONOK, 2003).

No Brasil, as reservas de carvão mineral são estimadas em 32 bilhões de toneladas (MARGON, 2002), concentrando-se, principalmente, no Rio Grande do Sul, representando 89% do total nacional e Santa Catarina, com cerca de 10% (ABCM, 2014). O carvão fóssil

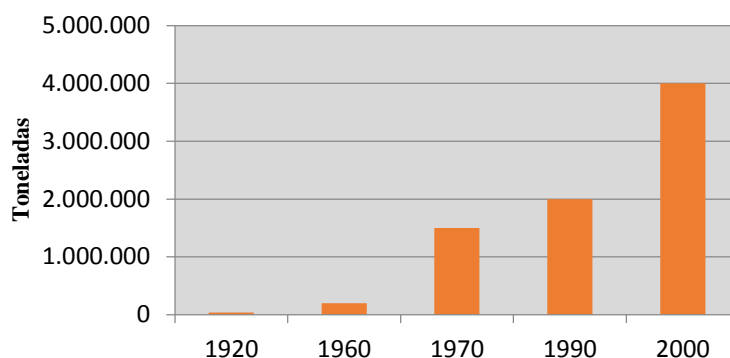
brasileiro possui características de baixo poder calorífico, alto teor em matéria inorgânica e um significativo teor em enxofre, de forma que sua utilização é concentrada na geração de energia em usinas termelétricas (CHIESS, SILVA e ZWONOK, 2003). Na Figura 7 são destacados os principais polos consumidores de carvão mineral como combustível no Brasil, e, por consequência, os principais geradores de cinzas resultantes de sua combustão.

Figura 7 - Polos regionais de geração de cinzas no Sul do Brasil



Fonte: Mallmann e Zwonok (2013)

A produção de cinzas no sul do Brasil teve, desde a década de 1920 até a década de 2000, uma evolução, conforme mostrado na Figura 8. Em 2000, a geração de cinzas no sul do país foi de 4 milhões de toneladas. Considerando a nova unidade de 350 MW no Rio Grande do Sul, que está em fase de testes, e mais quatro unidades já com os projetos aprovados (três no Rio Grande do Sul e uma em Santa Catarina) e que deverão entrar em operação em 2018, haverá um incremento na produção de cinzas em cerca de 6 milhões de toneladas (MALLMANN e ZWONOK, 2013).

Figura 8 - Geração de cinzas no Sul do Brasil

Fonte: Adaptado de Mallmann e Zwonok (2013)

A Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) vem desenvolvendo por meio de pesquisas ao longo das últimas três décadas diferentes tecnologias para o emprego das cinzas como materiais de construção. A partir de estudos de laboratório e experimentos de campo, tem sido demonstrado o grande potencial das cinzas como materiais para a construção de pavimentos, elementos de alvenaria, aterros estruturais, dormentes de vias férreas, bem como matérias-primas para a extração de novos produtos, como zeólitas (CIENTEC, 2016).

Apesar da possibilidade de aplicação em diferentes campos, estima-se que apenas 40% das cinzas volantes produzidas no Estado do Rio Grande do Sul são reutilizadas, sendo absorvidas principalmente pela indústria cimenteira (CIENTEC, 2016). O Complexo Termelétrico Jorge Lacerda se destaca no reaproveitamento das cinzas volantes, uma vez que 100% das cinzas leves produzidas são absorvidas pelas indústrias cimenteiras. Já as cinzas de fundo são armazenadas em bacias de decantação localizadas no interior do complexo.

2.6 Cenário do estado do Ceará de geração e utilização de cinzas de carvão

O Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) é um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento industrial e empresarial do estado do Ceará. Dentre as empresas instaladas no CIPP, têm-se as duas mais importantes centrais termelétricas do estado do Ceará: Energia Pecém e UTE Pecém II, estando localizadas no município de São Gonçalo do Amarante, no estado do Ceará. Atualmente, essas usinas recebem em média 3 navios de carvão mineral por mês, sendo 2 deles destinados para UTE Energia Pecém I, que possui uma potência instalada de 720 MW (2 turbinas de 360 MW) e 1 navio para UTE Pecém II, com

potência instalada de 365 MW. As duas usinas operam com carvão colombiano, com teor médio de 8-10% de cinzas.

O consumo de carvão por geração de energia na UTE Energia Pecém I é, em média, de 8,58 t/MW enquanto na UTE Pecém II o consumo é em torno de 9,28 t/MW. O valor médio do poder calorífico do carvão encontra-se na faixa de 6090 cal/g e a faixa de temperatura de queima do combustível na caldeira é de 1.000°C na saída da câmara de combustão (informação verbal¹).

Conforme estudo de janeiro a setembro de 2017, foram produzidas nessas termelétricas em média 11415 t de cinzas mensais, das quais cerca de 13% correspondem a cinzas pesadas e 87% às cinzas volantes. Das cinzas volantes produzidas, 40% foram destinadas para uma cimenteira da região e 60% foram armazenadas no pátio da própria usina (informação verbal²).

Na UTE Energia Pecém existem dois módulos de armazenagem em que são despejadas as cinzas oriundas do processo de queima do carvão mineral. O Módulo I já atingiu toda sua capacidade de 315 mil m³ estando atualmente totalmente preenchido com cinzas. O Módulo II se encontra parcialmente preenchido com cinzas. Do volume disposto no Módulo II, cerca de 11% são correspondentes às cinzas pesadas e 89% às cinzas leves (informação verbal³).

2.7 Generalidades sobre a estabilização química de cinzas com a cal

A estabilização química consiste na adição de substâncias químicas ao solo, de forma a provocar mudanças que influenciam nas suas propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade (SANTOS *et al.*, 1995). Os aditivos costumeiramente empregados nesse tipo de estabilização são o cimento Portland, cal, pozolanas, materiais betuminosos e resinas.

O exemplo mais comum de estabilização química é o uso da cal e do cimento para estabilizar solos finos e argilosos com elevados teores de matéria orgânica. Na estabilização química ocorrem reações químicas entre os aditivos utilizados, os minerais do solo e a água. O uso desses aditivos pode conferir resistência ao solo ou por meio da cimentação dos grãos

¹ Informações verbais¹ foram repassadas por e-mail pelo Sr. Willamy Siqueira Conde, representante da UTE Energia Pecém.

^{2,3} Informações verbais^{2,3} foram repassadas por e-mail pelo Sr. Willamy Siqueira Conde, representante da UTE Energia Pecém.

entre si ou através do aumento das forças coloidais que unem esses grãos (ROBNETT e THOMPSON, 1969).

A cal como agente estabilizante é uma das mais antigas técnicas utilizadas pelo homem para obter melhorias nas características e propriedades dos solos. No âmbito rodoviário, a cal vem sendo utilizado desde a época dos romanos, há mais de 2000 mil anos. No ano de 312 a.C. os romanos iniciaram a obra da famosa “Via Ápia”, considerada uma das pioneiras no uso da técnica de estabilização de solos com a adição da cal. Todos os trechos da muralha da China, datado de 228 a.C., também foram construídos com misturas de solo-cal.

A estabilização de solo com a cal é uma mistura íntima de solo, cal e água, em proporções pré-determinadas. Essa técnica é fundamentada por reações químicas e físico-químicas entre a cal e os constituintes do solo, principalmente com a fração argila. (AZEVEDO, 2010). A cal hidratada é recomendada para melhoria de solos argilosos ou muito siltosos, que apresentem em geral altas plasticidade e expansão, além de baixa capacidade de suporte (SANTOS, 2004).

A cal é um aglomerante resultante do processo de calcinação de rochas constituídas, predominantemente, por carbonato de cálcio e/ou carbonato cálcio e de magnésio. Oliveira (2001) relata que, no processo de calcinação, o carbonato de cálcio é decomposto em óxidos de cálcio (CaO) e anidridos carbônicos (CO₂), sendo a cal virgem (CaO) muito utilizada para a estabilização química de solos instáveis.

Existem dois tipos de cales normalmente utilizadas para estabilizar solos coesivos: óxido de cálcio (CaO) e cal hidratada (Ca(OH)₂). As maiores resistências foram observadas com o uso do óxido de cálcio, porém esse elemento tem uso restrito devido a sua alta causticidade (MARCON, 1977; BARROS, 2015). No Brasil, a cal hidratada, é a mais utilizada para tratamento de solos, sendo resultante da combinação dos óxidos de cálcio e/ou cálcio-magnésio com a água (17% a 19% em peso de água combinada).

De acordo com Barenberg e Thompson (1976) existem dois tipos diferentes de reações que ocorrem quando a cal e a cinza volante são misturadas com solo. O primeiro tipo de reação é entre a cal e o solo. Nesse caso, a cal age por meio da troca catiônica, flocculação e aglomeração de partículas argilosas do solo e, também, por meio da carbonatação com o dióxido de carbono do ar (MARCON, 1977). Na troca iônica, a cal misturada com a água resulta em cátions de cálcio livres, os quais podem substituir outros cátions. Quanto mais elevado for o teor de cal maior a troca catiônica e a formação de produtos cimentantes. Não existe, no entanto, um teor ótimo de cal a ser adotado para todos os solos, sendo a experiência de campo e os ensaios laboratoriais decisivos para sua escolha.

O outro tipo de reação é entre a cal e a cinza volante, mecanismo complexo que estabiliza o material por meio da formação de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminatos hidratados de cálcio (C-A-H). A reação crítica é entre o hidróxido de cálcio e os minerais de alumina e sílica presentes na cinza volante, produzindo os compostos com propriedades cimentícias (MASSAZA, 1998). Tais reações podem ser simplificada e representadas conforme as Equação 1 e 2.



Em que SiO_2 e Al_2O_3 representam as componentes de sílica e de alumina presentes no solo e CSH e CAH, representam os produtos cimentantes formados, denominados, respectivamente, de silicato hidratado de cálcio e aluminato hidratado de cálcio.

Na reação pozolânica, quando o hidróxido de cálcio é adicionado à água ocorre a liberação dos íons cálcio, que entram em solução. Alhberg e Barenberg (1975) comprovaram que a solubilidade do hidróxido de cálcio decresce de forma linear com o aumento da temperatura. Para que essas reações ocorram é necessária uma dissolução da sílica e da alumina, sendo essa solubilidade dependente da alcalinidade da água da mistura. A sílica pode se apresentar em uma forma cristalizada ou amorfa. Em um solo arenoso apenas a sílica amorfa entrará na reação pozolânica (MARCON, 1977). Dessa forma, o tratamento de solos com cal não é eficiente em solos com baixo ou nenhum teor de argila, uma vez que o melhoramento das propriedades mecânicas é produzido pelas reações entre a cal e os minerais argílicos.

Os materiais estabilizados quimicamente por meio de reações pozolânicas possuem propriedades que dependem da qualidade dos seus componentes, das condições de cura, da proporção dos materiais na mistura, da energia de compactação e do processo de homogeneização da mistura (MATEOS, 1961). Nardi (1975) e Marcon (1977) ressaltam que as reações pozolânicas não se verificam quando não se tem água suficiente na mistura.

2.8 As cinzas e o meio ambiente

As cinzas de carvão mineral são resíduos industriais, cujo potencial poluidor é dependente das concentrações dos elementos tóxicos e do grau de solubilização deles no

ambiente natural (LOPES, 2011; OLIVEIRA, 2011). A exploração do carvão ocasiona sérios problemas ambientais. Esses problemas são decorrentes da geração de significativas quantidades de resíduos sólidos inorgânicos que, quando depositados inadequadamente, podem gerar impactos ambientais significativos no solo e nas águas subterrâneas, devido à lixiviação de elementos tóxicos presentes em sua composição química.

Na China, as cinzas volantes se tornaram uma grave ameaça para o meio ambiente e para a saúde pública. As cinzas volantes, devido a sua granulometria fina, são fáceis de gerar poeira, causando poluição ambiental devido ao mau gerenciamento dos resíduos no país (JUN, 2004; SUN *et al.*, 2009). Além disso, os metais pesados perigosos, como o chumbo, o cádmio, o arsênico e o mercúrio, quando lixiviados acabam por poluir a superfície das águas superficiais, águas subterrâneas e terras cultivadas. O relatório intitulado “*The true cost of coal: an investigation into coal ash in China*” (GREENPEACE, 2010) tornou público os graves problemas ambientais oriundos da disposição inadequada dos resíduos de termelétrica na China. O governo chinês atribui grande importância à poluição por cinzas volantes, introduzindo incentivos para uma melhor gestão dos resíduos e criando padrões de prevenção de poluição e especificações técnicas.

Nos Estados Unidos as cinzas volantes eram, no passado, liberadas no ar por meio de chaminés, no entanto as leis atuais obrigam que as emissões de cinzas volantes sejam capturadas por dispositivos de controle de poluição. Nesse país, ainda na década dos anos 60, já existia uma política para resíduos chamada de *Resource Conservation and Recovering Act* (RCRA) que era uma lei pública com diretrizes para o bom manejo de resíduos sólidos perigosos e não perigosos. Atualmente, as cinzas são geralmente armazenadas perto de usinas ou colocadas em aterros sanitários, sendo a lixiviação dos elementos tóxicos presentes nos resíduos o principal problema ambiental observado no país (IEA, 2017). A Figura 9 ilustra os problemas oriundos do colapso de um aterro de um reservatório para armazenamento de cinzas, da usina *Kingston Fossil Plant*, nos EUA. Isso causou uma liberação de 5,4 milhões de metros cúbicos de cinzas volantes, destruindo três casas e danificando outras 23 e fluindo para um rio da região, contaminando água subterrânea e o solo local.

Figura 9 - Problemas Ambientais oriundos do Derramamento de Cinzas



Fonte: Wikiwand (2017)

2.8.1 Caracterização ambiental

No Brasil não existe normatização ambiental específica para as cinzas advindas da queima de carvão. A classificação ambiental dos solos e/ou resíduos utilizados no mercado rodoviário é realizada por meio da norma NBR 10004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). De acordo com essa norma, os resíduos são classificados em dois tipos: Classe I (Perigosos) e Classe II (Não Perigosos). Os resíduos perigosos apresentam características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Segundo Barros (2015), em função dessas características, os resíduos provenientes das indústrias petroquímicas geralmente recebem essa classificação, apresentando riscos ao meio ambiente e à saúde pública, quando dispostos de forma inadequada.

Os resíduos de Classe II (não perigosos) são subdivididos em duas classificações: Classe II-A (Não Inertes) e Classe II-B (Inertes). Os resíduos de Classe II-B são aqueles que em água destilada ou desionizada não possuem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água. Os resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduos Classe I (Perigosos) ou de resíduos Classe II-B (Inertes) são classificados como os de Classe II-A (Não inertes) e podem apresentar algumas propriedades, como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

De forma a se obter uma classificação adequada dos resíduos sólidos, alguns ensaios laboratoriais podem ser realizados, como o ensaio de solubilização (NBR 10006/2004) e de lixiviação (NBR 10005/2004). O ensaio de solubilização avalia o potencial

do resíduo de liberar seus componentes constituintes para a água pura, comparativamente ao padrão de potabilidade. O ensaio de lixiviação avalia o potencial do resíduo de liberar parte dos seus componentes para o meio ambiente, verificando seu potencial de impactar solos e águas subterrâneas.

Oliveira (2011), Lopes (2011), Sundstron (2012), Barros (2015) e Vasconcelos (2016) ao estudarem cinzas volantes e pesadas, classificaram-nas como resíduos Classe II-A (não inertes). Lopes (2011) afirma que a classificação das cinzas volantes em resíduo não inerte não reprova sua utilização na pavimentação, desde que no ensaio de lixiviação, que representa o potencial de percolação e de infiltração das águas das chuvas no solo, todos os parâmetros analisados encontrem-se dentro dos limites permitidos.

Entende-se, também, que é necessário o desenvolvimento de procedimentos específicos que possam ser diretamente aplicados à pavimentação. Por exemplo, ao se executar camadas granulares se aplica a técnica de compactação, a qual pode funcionar como encapsulante dos materiais contaminantes. Farias (2005) ao estudar as interações ambientais em cinzas e em misturas solos + cinzas fez percolar substâncias com características da água da chuva em uma camada de material com espessura e grau de compactação semelhantes aos utilizados em uma estrutura de um pavimento típico de vias urbanas, verificando que a compactação influenciava na redução das taxas de lixiviação e solubilização de compostos químicos perigosos presentes na cinza pesada. A utilização da compactação como encapsulante de materiais contaminantes, no entanto, ainda não está normatizada no Brasil e tem sido pouco investigada nos trabalhos de pesquisa.

2.8.2 Técnica de encapsulamento de contaminantes

A técnica de estabilização química é mundialmente utilizada visando adequar as propriedades físico-químicas e mecânicas dos materiais de construção aos requisitos técnicos exigidos para sua aplicação. Diversos estudos, com ênfase no comportamento mecânico de materiais geotécnicos estabilizados quimicamente, como o solo/cimento e solo/cal, já foram desenvolvidos (PRIETTO, 1996; LEANDRO, 2005; LOPES JUNIOR, 2007; CONSOLI, 2011; LOPES, 2011; CAVALCANTE, 2013; BARROS, 2015). No entanto, a estabilização química de solos com cimento ou cal também se destaca no âmbito ambiental, tornando-se uma excelente alternativa para tratamento de solos ou resíduos contaminados.

A tecnologia de encapsulamento de contaminantes, também conhecida como método estabilização/solidificação, vem se tornando uma excelente alternativa para tratar

resíduos perigosos e gerenciá-los de forma segura e eficaz, melhorando suas propriedades físicas e suas características toxicológicas (OLIVEIRA *et al.*, 2003). De acordo com Passos (2001), o encapsulamento é um estágio de pré-tratamento, no qual os constituintes perigosos de um resíduo são transformados em suas formas menos solúveis ou tóxicas.

Segundo Wiles (1987) o processo de encapsulamento consiste na adição de um agente cimentante, como o cimento ou cal, objetivando propiciar uma menor solubilização de contaminantes existentes em um solo ou resíduos industriais. A adição de agente cimentante gera uma massa solidificada de resíduo, proporcionando maior integridade estrutural e facilidade no manuseio e transporte do material. Com a cimentação das partículas, ocorre uma diminuição da área superficial da mistura, restringindo o transporte de contaminante e limitando sua solubilidade quando exposta a um fluido lixiviante (IBÂÑÉZ *et al.*, 1998). Esse processo melhora a trabalhabilidade, resistência e a durabilidade do material.

Os estabilizantes mais frequentemente utilizados são o cimento Portland e a cal. De acordo com Baird (2002), ambos os estabilizantes alcalinam o ambiente, por meio da elevação do pH, e diminuem a solubilidade dos contaminantes, já que a solubilidade é inversamente proporcional ao pH (HEINECK *et al.*, 2006).

Para avaliação da técnica de encapsulamento, torna-se necessário a realização de alguns ensaios de análise química e física do composto tratado. Suthersan (1997) afirma que os ensaios físicos mais relevantes e usualmente realizados são os de densidade, compactação, permeabilidade, resistência à compressão simples e durabilidade. Quanto ao ensaio de análise química, usualmente utiliza-se o ensaio de lixiviação.

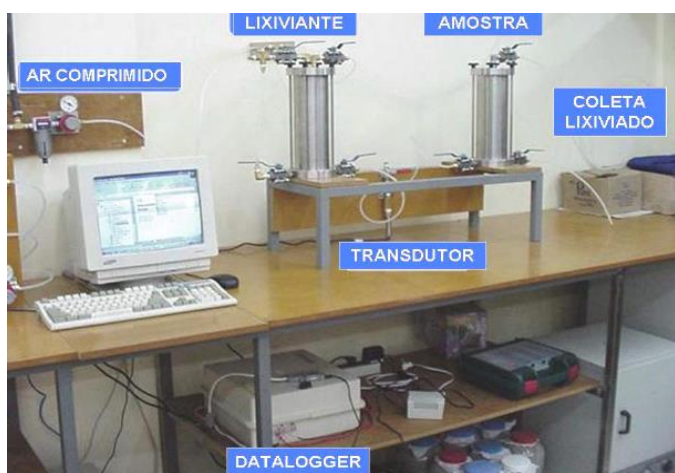
Ruver *et al.* (2003) resumem a técnica de encapsulamento como resultado de interações físicas e químicas. A interação física consiste no encapsulamento do contaminante, originando melhoria das propriedades, como resistência e permeabilidade. Já a interação química consiste na alteração das propriedades químicas do contaminante, diminuindo ou até mesmo impossibilitando sua lixiviação. Cocke (1990) ressalta que o ensaio de lixiviação fornece os parâmetros mais importantes para se determinar a eficiência da técnica de estabilização e solidificação de solos contaminados.

Os ensaios de lixiviação são utilizados para se determinar o comportamento de um material frente aos fenômenos físico-químicos que ocorrem durante uma percolação, sendo mundialmente utilizados para caracterizar a periculosidade de um resíduo. Knop (2003) destaca que vários procedimentos de lixiviação têm sido desenvolvidos para ensaiar rejeitos e solos que passaram pela técnica de encapsulamento.

No Brasil, o ensaio de lixiviação utilizado e o único normatizado é realizado de acordo com a norma NBR 10.005 (ABNT, 2004). Nessa norma, utiliza-se como meio lixiviante a água deionizada e o pH é controlado por soluções com ácido acético. A amostra é submetida à agitação contínua, por um período de 18 h, em um equipamento do tipo *jar-test*. Quando se considera o contexto rodoviário, nessa norma não são simuladas as condições reais de compactação e confinamento dos materiais em campo.

Knop (2003) estudou o ensaio de lixiviação em coluna, conforme a norma americana ASTM D 4874. Esse ensaio é considerado como um simulador de fluxo de percolação do nível de água através dos poros do material granular. A vantagem desse ensaio é a análise de resíduos simulando reais condições que ocorrem em campo, o que não ocorre no ensaio de lixiviação preconizado pela NBR 10.005. No ensaio as amostras estão compactadas e sujeitas a uma fonte de ar comprimido como forma de pressurizar o lixiviante. A Figura 10 ilustra o equipamento utilizado no ensaio de lixiviação em coluna.

Figura 10 - Ensaio Lixiviação em Coluna



Fonte: Knop (2003)

Apesar do ensaio de lixiviação em coluna retratar de forma mais fiel às condições as quais os materiais estão dispostos em campo, no Brasil esse ensaio ainda não é normatizado. A classificação ambiental dos solos e/ou resíduos utilizados no meio rodoviário é realizada através da interpretação dos resultados do ensaio de lixiviação, conforme NBR 10.005.

Diante deste contexto, Brito *et al.* (2004) reforçaram a necessidade de se estabelecer normas e critérios no Brasil para a tecnologia de encapsulamento, de forma que pudesse nortear a disposição de resíduos sólidos industriais, estabilizados e solidificados, em

aterros sanitários. No contexto rodoviário, os materiais estão dispostos de forma compactada e sujeitos a tensões de confinamento. No entanto, Rojas (2015) afirma que pouco se encontra na literatura quanto à influência da compactação para um correto encapsulamento.

2.9 Alguns estudos internacionais para aplicação de cinzas na pavimentação

Em âmbito internacional, vários estudos laboratoriais mostraram que cinzas volantes podem ser utilizadas para melhoria das propriedades geotécnicas de solos, possibilitando o emprego no setor rodoviário, principalmente como camadas de base ou sub-bases de pavimentos (BERGESON *et al.*, 1985; FERGUSON, 1993; TURNER, 1997; EDIL *et al.*, 2002).

Dawson *et al.* (1991) realizaram ensaios de compactação e CBR em cinzas pesadas, provenientes de usinas termelétricas britânicas. A granulometria dessas cinzas era mais grossa quando comparadas as cinzas obtidas de usinas termelétricas brasileiras. Nos seus estudos foram obtidas umidades ótimas em torno de 18% e massa específica aparente seca variando de 0,99 g/cm³ a 1,37 g/cm³. O valor de CBR variou de 27 a 30%. Segundo Farias (2005), são esperadas variações no comportamento geotécnico entre as cinzas pesadas brasileira e britânica, principalmente devido à diferença na granulometria dos dois materiais. Como o carvão brasileiro possui menor poder calorífico, ele necessita de uma moagem mais intensa no processo de queima para resultar em resíduos de menor granulometria.

Dawson *et al.* (1993) descreveram estudos realizados na *University of Nottingham* com dois agregados secundários: cinzas pesadas de carvão mineral e agregados de ardósia. Ambos os materiais foram descritos em termos de produção industrial, localização, propriedades e uso atual na indústria de construção. O autor concluiu que quando comparado com agregados convencionais, os valores da CBR e de rigidez elástica são razoáveis (embora não sejam altos). Objetivando o uso das cinzas pesadas em camadas de sub-base, foi demonstrado que para condições secas, as deformações permanentes na base da camada são maiores do que em camadas com agregados convencionais, porém em condições úmidas as deformações permanentes na base da camada foram semelhantes.

Nicholson e Kashyap (1993) avaliaram o efeito da cinza volante nas propriedades de engenharia de solos tropicais do Havaí. A adição de cinzas volantes diminuiu o limite de liquidez e o índice de plasticidade, aumentou a resistência à compressão não confinada das amostras, alterou os parâmetros de compactação resultando em menor massa específica seca máxima e maiores umidades. A adição de cinzas também aumentou o CBR

consideravelmente, crescendo em mais de 10 vezes comparativamente às amostras de solo tropical. Resultados semelhantes também foram obtidos por outros autores (ABDULJAUWAD, 1995; COKCA, 2001).

Schroeder (1994) estudou a utilização de materiais reciclados na construção de estradas. Em seus estudos, ele relatou a existência de uma pesquisa extensiva sobre a utilização de cinzas de carvão como um material de construção de estradas. Embora a maior parte dessa pesquisa analisasse a sua utilização como adição mineral para concreto de cimento Portland, a pesquisa também foi realizada em uma variedade de outros usos, incluindo concreto compactado a rolo e estabilização de base da estrada. Segundo o autor, em 1988 foi realizado um estudo para avaliar o uso de cinzas como um componente para estabilização de agregados em camadas de bases de pavimentos. As investigações laboratoriais determinaram a melhor combinação como sendo uma mistura com 84% de agregados, 11% de cinzas volantes e 5% de cal. As cinzas de fundo analisadas por Schroeder (1994) tinham uma graduação mais grossa que as cinzas volantes. Conforme pesquisas feitas pelo autor, as cinzas volantes tinham propriedades que permitiam sua utilização como sub-base de pavimentos.

Arora e Aydilek (2005) estudaram a possibilidade da utilização de cinzas volantes estabilizadas com um solo arenoso, cimento e cal em camadas de bases e sub-bases de pavimentos. O solo foi classificado como A-2-4, segundo classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e as cinzas foram classificadas como cinzas volantes de baixa concentração de cálcio (Classe F) advindas de uma termelétrica da Índia. Os autores constataram que as cinzas eram não plásticas, possuindo massa específica de $2,24 \text{ g/cm}^3$ e com 86% das partículas passantes na peneira nº 200. Foram realizados ensaios de resistência à compressão não confinada, CBR e módulo de resiliência visando investigar o efeito do conteúdo de finos, tempo de cura, teor de água de moldagem, tipo de ativador e coesão do solo em parâmetros de engenharia.

Os resultados do estudo mostraram que a resistência de uma mistura é altamente dependente do período de cura, observando-se um aumento da resistência à medida que o tempo de cura aumentou, devido às reações pozolânicas que se desenvolvem em misturas estabilizadas quimicamente. Os valores de CBR, resistência à compressão não confinada e módulo de resiliência aumentaram com o aumento do teor de cimento, no entanto, nas misturas estabilizadas com a cal foi observado uma diminuição da resistência com o acréscimo no teor de cal, para tempos de cura de 7 e 28 dias. Os autores argumentaram que estabilização com a cal é usualmente usada para argilas plásticas para diminuir a plasticidade

e aumentar a resistência da mistura. Os finos do solo natural utilizados no estudo não eram plásticos, e acredita-se que isso tenha sido o motivo do decréscimo de resistência observado.

Kolias *et al.* (2005) estudaram em laboratório a utilização de cinzas volantes (Classe C) com cimento na estabilização de solos argilosos. Foram realizados ensaios de resistência à compressão uniaxial e de resistência à flexão em amostras com diferentes porcentagens de cinzas volantes e cimento. O módulo de elasticidade foi determinado com diferentes tipos de aplicação de carga e valores de CBR, após 90 dias de cura, também foram obtidos. O autor observou melhorias substanciais das propriedades mecânicas do solo natural após a adição de cinzas volantes e o estabilizante químico. Dada a alta rigidez das misturas estabilizadas, ocasionando problemas críticos com relação ao trincamento por fadiga nos pavimentos, o autor reforçou que medidas adequadas devem ser tomadas para evitar ou minimizar o trincamento por fadiga da camada estabilizada, na tentativa de reduzir a espessura total do pavimento. Essa mesma conclusão foi obtida também por Lav *et al.* (2005).

Lav *et al.* (2005) estudaram cinzas volantes (Classe F) estabilizadas com cimento para aplicação em camadas de bases de pavimentos. As porcentagens de cimento utilizadas nas misturas estabilizadas foram 2%, 4%, 8% e 10% em peso total da amostra. Nesse estudo foram realizados alguns ensaios de laboratório. Procedeu-se, de forma inicial, a realização do ensaio triaxial de Texas para um conjunto de amostras contendo 2% de cimento curadas por 7 dias. Nesse ensaio triaxial dinâmico, utiliza-se um conjunto de quatro amostras cilíndricas com um diâmetro de 153 mm e uma altura de 203 mm e em cada amostra são aplicadas tensões laterais e verticais que aumentam até que falhas sejam alcançada. De acordo com os resultados, os autores constataram que a cinza volante estabilizada com cimento era adequada como material de base, procedendo-se então aos ensaios para obtenção do módulo dinâmico e do coeficiente de Poisson. Para caracterizar o desempenho com relação à fadiga das misturas, foi utilizada uma máquina de teste (*Accelerated Loading Facility*) que simulava o carregamento repetido característico dos trechos rodoviários. Com base nos resultados desses ensaios, os autores conseguiram propor diferentes estruturas de pavimentos, dimensionadas pelo método mecanístico-empírico e variando com relação à vida de projeto e à quantidade de cimento presente nas misturas de base.

2.10 Estudos nacionais para aplicação de Cinzas na pavimentação

No Brasil, o estudo do reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na pavimentação iniciou com Pinto (1971). O autor desenvolveu uma das pesquisas pioneiras

nacionais de estabilização de solos com cinzas volantes, comprovando em laboratório a possibilidade de estabilização de solos com resíduos de termelétrica. Nessa pesquisa, foi verificado que o aumento da porcentagem de cinza volante ocasionava um acréscimo da resistência à compressão simples em todos os tempos de cura estudados e que a resistência para os corpos de prova compactados na energia intermediária foram maiores do que os compactados na energia normal. Uma vez que a energia de compactação intermediária é maior, a massa específica aparente também é maior e conseqüentemente há uma maior área de contato e cimentação, o que justifica, assim, as maiores resistências.

Nardi (1975) e Marcon (1977) também comprovaram que a cinza volante pode se constituir em um material complementar na pavimentação, uma vez que foram produzidas misturas com resistências adequadas para uso em camadas de pavimentos. Maiores detalhes dos materiais utilizados e dos parâmetros obtidos nesses estudos estão descritos na Tabela 1. Essa tabela apresenta um resumo dos principais estudos nacionais que objetivaram o reaproveitamento de cinzas de carvão na pavimentação. As características físicas e mecânicas das cinzas estudadas, dos solos e da cal utilizados para estabilização, bem como os resultados obtidos das melhores misturas idealizadas por cada autor também constam nessa tabela resumo. Para informações mais detalhadas desses estudos e dos resultados obtidos pode-se consultar Vasconcelos (2016).

Ceratti (1979) estudou a adição de cal e cinzas volantes a um solo residual, buscando o reaproveitamento dos resíduos em camadas de bases de pavimentos. Para todas as misturas idealizadas pelo autor foi observado o aumento da RCS com o tempo, sendo o aumento dependente da mistura e da energia de compactação. Um dos fenômenos observados pelo autor foi o da auto-cimentação, observando que as amostras sofreram recimentação em suas fissuras, regenerando-se. A auto-cimentação ocorreu devido ao prosseguimento da reação da cal com as cinzas com o tempo.

Leandro (2005) investigou o efeito de cinzas pesadas estabilizadas com solos regionais e cal hidratada, visando o reaproveitamento desses resíduos em camadas de base de pavimentos, constatando que a adição de cinzas pesadas por si só não melhoraram as propriedades mecânicas de misturas solo+cinza pesada. No entanto, com a adição de cal foi verificada uma melhora significativa quanto ao comportamento da mistura, de forma que houve viabilidade de construção de bases e sub-bases de pavimentos compostas de cinzas pesadas em misturas com solo e cal.

Lopes (2011) caracterizou dois tipos de cinzas (pesada e volante) obtidas da queima de carvão mineral em usinas termelétricas, com objetivo de avaliar sua aplicabilidade

em camadas de base de pavimentos rodoviários. A autora constatou que a adição das cinzas volantes ou pesadas no solo estudado, com e sem a adição de cal, resultaram em melhorias em grande parte das propriedades mecânicas do material. O estudo concluiu que a utilização de cinzas em camadas granulares é benéfica, não somente para o meio ambiente, como também para o mercado rodoviário, uma vez que esse rejeito passa a ser um material secundário para o setor da pavimentação.

Meliande (2014) analisou, por meio de ensaios laboratoriais, os efeitos de cinzas volantes, advindas de uma termelétrica do sul do Brasil, quando incorporada em misturas com dois tipos de solos e com adição de cal. A autora constatou, por meio de ensaios de cisalhamento direto, que as propriedades mecânicas das misturas são dependentes do tipo de solo, teor de cinza, teor de cal e tempo de cura. Foi constatado que os parâmetros de resistência para misturas idealizadas com solo argiloso foram melhores do que os obtidos para as com o solo arenoso, devido principalmente às reações entre a cal e a cinza e ao desenvolvimento de reações dos minerais do solo argiloso com a cal. Diversos outros autores estudaram o reaproveitamento de cinzas volantes e pesadas no setor rodoviário (FARIAS, 2005; ROHDE, 2006; BARROS, 2015), comprovando a viabilidade técnica de utilização de cinzas estabilizadas granulométrica e quimicamente na pavimentação.

Vasconcelos (2016) iniciou estudos com as cinzas depositadas no Módulo I da termelétrica Energia Pecém em camadas granulares. Na pesquisa foram coletadas 32 amostras em conformidade com um plano de amostragem previamente elaborado. Para todas as amostras foram realizados ensaios de caracterização física (ensaios de granulometria e limites de liquidez/plasticidade), química, ambiental (ensaios de solubilização e lixiviação), bem como ensaios mecânicos (compactação, CBR). A autora verificou uma significativa heterogeneidade das cinzas dispostas nesse módulo, além de propriedades mecânicas inadequadas para uso em pavimentação. Dessa forma, as cinzas in natura do Módulo I não foram recomendadas para serem utilizadas como base e sub-bases de pavimentos. Para tentar viabilizar a aplicação das cinzas dispostas no módulo de armazenagem em camadas granulares, a autora sugeriu que fossem estudadas tentativas de estabilização das cinzas com solo regional e estabilizante químico.

Tabela 1 - Alguns estudos nacionais para viabilização de cinzas na pavimentação

Estudos Nacionais com Cinzas para Pavimentação			Pinto (1971)	Nardi (1975)	Leandro (2005)	Farias (2005)	Trichês et al., (2006)	Rhode (2006)	Lopes (2011)	Barros (2015)	
CINZA PESADA (CP) OU CINZA VOLANTE (CV)	Amostras	Origem das Cinzas	Usina Termelétrica de Charqueadas/ RS	Capivari de Baixo/ SC	Capivari de Baixo/ SC	Capivari de Baixo/ SC	Capivari de Baixo/ SC	Charqueadas/ RS	Capivari de Baixo/ SC	Energia Pecém/ CE	
		Tipo de Cinzas Estudadas	Cinzas Volantes	Cinzas Volantes	Cinzas Pesadas	Cinzas Pesadas	Cinzas Pesadas	Cinzas Pesadas	Cinzas Pesadas (CP) Cinza Volantes (CV)	Cinzas Volantes	
	Caracterização Física	Límite de Liquidez	-	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico
		Límite de Plasticidade	-	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico
		Massa Específica Real dos Grãos	-	2,15	1,979	1,92	1,92	2,21	1,988 (CP); 2,105 (CV)	2,317	
		Classificação da Cinza	-	-	A-3	-	-	-	A-2-4 (CP); A-4(CV)	A-4	
	Caracterização Mecânica	Umidade Ótima (%)	-	-	-	42	42	49,7	38 (CP); 22,8 (CV)	20	
		Massa Específica Aparente Seca (gcm-3)	-	-	-	0,95	0,95	0,958	1,846 (CP); 1,925 (CV)	1,508	
		Tipo da Energia de Compactação	-	-	-	Normal	Normal	Intermediária	Modificada	Intermediária	
		Índice de Suporte Califórnia ISC (%)	-	-	-	5	5	24	-	26,6	
Caracterização Ambiental	Expansão (%)	-	-	-	0	0	0,2	-	3,72		
	Classificação do Resíduo Sólido	-	-	-	-	-	Classe II-A	Classe II-A	Classe II-B (CP) Classe II-A (CV)	Classe II-A	
SOLO	Caracterização Física	Límite de Liquidez LL (%)	Não Plástico	Não Plástico	51-67	49	49	-	Não Plástico	15	
		Límite de Plasticidade LP (%)	Não Plástico	Não Plástico	32-39	40	40	-	Não Plástico	12	
		Massa Específica Real dos Grãos (gcm-3)	-	2,63	2,632 a 2,688	-	2,772	-	2,772	2,457	
		Classificação do Solo	A-3	A-3	A-7-5 a A-7-6	-	A-5	-	A-2-4	A-2-4	
	Caracterização Mecânica	Teor de Umidade Ótima (%)	-	-	18,7 a 20,6	19	19	-	9,7	9,7	
		Massa Específica Aparente Seca (gcm-3)	-	-	1,720 a 1,724	1,71	1,71	-	2,065	2,075	
		Tipo da Energia de Compactação	-	-	Intermediária	Normal	Normal	-	Modificada	Intermediária	
		Índice de Suporte Califórnia ISC (%)	-	-	10,1 a 25,0	10,6	10,6	-	-	4,3	
ESTABILIZANTE	Características	Expansão (%)	-	-	0,2 - 1,2	3,6	3,6	-	-	0,18	
		Uso de estabilizante?	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	
		Estabilizante Utilizado	Cal	Cal	Cal	Cal	Cal	Cal	Cal	Cal	
MISTURAS (SOLO+CINZA+ESTABILIZANTE)	Caracterização Mecânica	Tipo	Cal Hidratada Dolomítica	Cal Hidratada Calcética	CH-3	Cal Hidratada Calcética	-	-	-	CH-1	
		Melhor Mistura (S/CV/CP/Cal)		69/25/0/6	53/13/0/4/1cimento/ 30brita	65/0/32/3	70/0/30/4	70/0/30/4	0/0/94/4	90/7/0/3	0/95/0/5
		Ensaio Proctor	Teor de Umidade Ótima (%)	17	7	-	19	19	-	11,1	50
			Massa Específica Aparente Seca (gcm-3)	1,64	2,087	-	1,39	1,39	-	1,941	0,975
			Tipo da Energia de Compactação	Normal	Intermediária	Intermediária	Normal	Normal	Intermediária	Modificada	Intermediária
		CBR (%)	7 dias	-	-	43-107	42,8 (4 dias)	-	75	-	110,2
			Expansão (%)	7 dias	-	0	0	0	0	-	0
		RCS (MPa)	0 dia	4,71	25,4	0,509 - 0,662	-	-	-	-	0
			7 dias	12,48	41	-	-	-	-	-	0,97
			14 dias	34,95	68	-	-	-	-	-	1,21
			28 dias	-	-	0,647 - 0,987	0,881 - 0,921	0,9	-	-	3,94
		Módulo de Resiliência	0 dias	-	-	-	-	-	-	K1 = 455	K1 = 237,47
				-	-	-	-	-	-	K2 = 0,52	K2 = 0,259
				-	-	-	-	-	-	K3 = -0,17	K3 = -0,548
28 dias	-		-	-	-	-	-	-	K1 = 1150	K1 = 805,85	
	-		-	-	-	-	-	-	K2 = 0,48	K2 = 0,069	
	-		-	-	-	-	-	-	K3 = 0,01	K3 = -0,305	

Fonte: Autora

2.11 Experiências internacionais de aplicação de cinzas na pavimentação

De acordo com Rohde *et al.* (2006), a utilização das cinzas de carvão mineral como aglomerante em camadas de pavimentos se difundiu muito desde a década dos anos 60. Atualmente, em países como a Inglaterra, Alemanha, França e Rússia, o uso de cinzas na pavimentação faz parte das alternativas convencionais utilizadas. Chandler *et al.* (1994) relatam que na Dinamarca e na Alemanha mais da metade das cinzas geradas na queima do carvão mineral é aproveitada como constituinte de camadas de bases de pavimentos flexíveis.

De acordo Chesner *et al.* (1997), aplicações práticas de cinzas volantes estabilizadas quimicamente em camadas granulares de pavimentos remonta à década de 1950, quando um produto patenteado conhecido como Poz-o-Pac (consistindo de uma mistura de cal, cinzas volantes e agregados) foi originalmente desenvolvido. Na década de 1970, as patentes de Poz-o-Pac foram expiradas, começando a surgir, então, vários estudos de misturas de solo-cinza-cal.

Lav, Lav e Goktepe (2006) relatam que uma das primeiras aplicações de cinzas volantes estabilizadas com cal em camadas de bases e sub-bases de pavimentos foi em 1957, em uma seção de teste, com 1800 km de extensão, construída na região de Jasper, Iowa, EUA. A camada de sub-base, com 15 cm de espessura, foi construída a partir da mistura de solo regional, cinzas volantes e cal. Já a camada de base, com 18 cm de espessura, apresentou em sua composição solo, cinzas volantes, cal hidratada e cimento Portland. Os métodos de construção e os procedimentos de avaliação foram apresentados por Hoover *et al.* (1962). Após a realização de ensaios laboratoriais em amostras retiradas do campo, de ensaios com viga Benkelman e de medições da rugosidade da superfície, os autores observaram que a seção construída resistiu muito bem ao tráfego e à variação climática local, apresentando, após quatro anos de construção, excelentes condições superficiais e estruturais.

Na década dos anos 60, um trecho de estrada de pavimento flexível foi construído no Alabama, EUA, utilizando cinzas volantes estabilizadas com cal em camadas de base. Hester (1967) afirma que, embora a estrada tenha sido submetida a altos volumes de tráfego, devido à presença de uma grande área de mineração de carvão nas proximidades do local, ela permaneceu com boas condições de rolamento.

Schroeder (1994) estudou a utilização das cinzas de carvão mineral em camadas de pavimentos, relatando experiências bem sucedidas, na década dos anos 80, de utilização de cinzas volantes e pesadas em serviços de pavimentação, e.g., bases granulares em 6,4 km da Interstate 79 (rodovia interestadual nos Estados Unidos), bases granulares em 2,9 km da

Saskatchewan Highway 18 (rodovia na província canadense de Saskatchewan) e também bases granulares em 20 km da Highway 47 Estevan (rodovia canadense na cidade de Estevan).

Em meados da década de 80, o *Electric Power Research Institute* (EPRI) financiou três projetos de aplicação, nos estados americanos da Geórgia, Kansas e Michigan, de cinzas de carvão mineral estabilizadas com cal e/ou cimento em camadas de base rodoviária.

O primeiro deles consistiu na utilização de cinzas volantes e pesadas em camadas de bases e sub-bases de pavimentos em uma área de teste construída, em 1985, ao longo de uma seção de derivação de duas pistas da Route 22, perto de Crawfordville, Geórgia, EUA (*U.S. Environmental Protection Agency*, 2005). Foram utilizadas cinzas volantes, Classe F, em três diferentes seções de teste, cada qual com cerca de 300 m de comprimento: a primeira consistiu de uma sub-base de cinzas volantes estabilizadas com cal; a segunda consistiu de uma base de cinza volante estabilizada com cimento; a terceira consistiu de uma base de cinza pesada estabilizada com cimento. Foi realizado um monitoramento pós-construção, de forma a avaliar a resistência das camadas, as condições da superfície da estrada, as deflexões no pavimento e a qualidade das águas subterrâneas obtidas de quatro poços de monitoramento. Todas as seções de teste apresentaram excelente desempenho técnico e, do ponto de vista ambiental, o monitoramento das águas subterrâneas indicaram que o impacto ambiental das seções de teste foi insignificante.

Em 1987, três estradas na região de Kansas, EUA, foram recicladas usando cinzas volantes de Classe C. A superfície de cada estrada existente foi pulverizada, de forma que as cinzas volantes puderam ser espalhadas e misturadas com o material pulverizado. A mistura foi então compactada e revestida com uma camada de concreto asfáltico. Essa experiência incentivou a utilização de cinzas volantes em camadas de pavimentos, de forma que mais de 44 km de reciclagem de pavimentos usando cinzas volantes já foram realizadas em Kansas e Oklahoma (FERGUSON, 1989).

Chesner *et al.* (1997) afirmaram que uma seção de 460 m da rodovia M-54 de Michigan, EUA, foi construída com base composta de cinzas volantes (Classe F) estabilizadas com cimento. Foram utilizadas 690 toneladas da mistura da camada de base, construída com espessura de 25 cm. A resistência da camada após 270 dias foi variável, mas atingiu até 7000 kPa. Após a construção, um programa de monitoramento e teste foi implementado por cinco anos. O desempenho obtido da estrutura foi aceitável, porém fissuras foram observadas após o primeiro ano de execução.

No que se refere à utilização de cinzas pesadas, a *American Road & Transportation Builders Association* (2003) relatou que a primeira aplicação nos Estados Unidos dessas cinzas em bases rodoviárias ocorreu na década dos anos 70. A camada de base construída foi composta de uma mistura de 46% de cinza pesada, 54% de escória de alto forno e 5% de cimento Portland em relação à massa total de agregados. O monitoramento da rodovia foi realizado e constatou-se uma excelente qualidade do pavimento por mais de uma década e uma redução considerável no custo de implantação, comparativamente ao uso de agregados convencionais.

2.12 Experiências nacionais de aplicação de cinzas na pavimentação

No Brasil, a principal utilização das cinzas volantes de carvão mineral ocorreu na fabricação do Cimento Portland, em substituição de parte do clínquer pelo resíduo. Atualmente, 100% das cinzas volantes provenientes do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda, no Estado de Santa Catarina, são consumidas pela indústria cimenteira (LOPES, 2011; CIENTEC, 2016). Na termelétrica Energia Pecém, 40% das cinzas volantes geradas também são destinadas a uma cimenteira da região.

Apesar da enorme potencialidade do uso de cinza volante com adição de estabilizantes químicos na pavimentação, esses resíduos são raramente empregados no Brasil em obras viárias. A partir da década de 1970, o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), o Departamento de Estradas e Rodagem de Santa Catarina (DER-SC) e a COPPE-RJ firmaram parcerias, que culminaram em pesquisas conjuntas sobre estabilização de solos com cinzas volantes e cal hidratada, resultando nos trabalhos dos autores Pinto (1971), Nardi (1975) e Marcon (1977).

Os estudos desenvolvidos por Nardi (1975) comprovaram a viabilidade da estabilização de areia com cinza volante e cal na pavimentação. A pesquisa resultou na implantação de um trecho experimental, localizado às margens da BR-101, no município de Imbituba, estado de Santa Catarina. Nesse trecho foi construída, sobre o subleito de areia, uma sub-base de areia estabilizada com cinzas volante e cal. Lopes (2011) destaca que o trecho foi posteriormente monitorado, por meio da instalação de seções de instrumentação e os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, aprovando o desempenho da mistura com cinzas em sub-bases de pavimentos.

Na década de 1980 surgiu o Projeto CICASOL, com vistas a ampliar a utilização de cinzas volantes na pavimentação. O Projeto CICASOL que consiste no estudo de pavimentos de solos estabilizados com cinza volante e cal, foi desenvolvido pelo CIENTEC em parceria com o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER/RS). A partir de estudos realizados, foi comprovada a viabilidade técnica e econômica do tipo de base com cinzas volantes, solo e cal, de forma que alguns quilômetros de rodovias foram construídas na área do polo petroquímico do Rio Grande do Sul.

De acordo com Mallmann e Zwonok (1996), o Projeto CICASOL culminou na construção de 14 km de pavimento no terminal de Santa Clara (localizado no polo petroquímico de Triunfo/RS), utilizando como base uma mistura de cinza volante + cal + areia. Foram construídas também, com o mesmo tipo de base, ruas da infraestrutura do mesmo polo petroquímico. Outras duas obras registradas que utilizaram bases de solo estabilizado com cinza volante e cal foram: revestimento para quatro bacias de decantação e uma base de arruamento, ambos na Usina de Candiota, no Rio Grande do Sul.

Constatou-se também a utilização de cinzas pesadas em obras de infraestrutura e nas áreas periféricas dos municípios de Charqueadas e São Jerônimo, no Rio Grande do Sul. Rohde *et al.* (2006) relataram que, através de contrato firmado entre o CIENTEC/RS e a Prefeitura Municipal de Charqueadas/RS, em 1999, foi elaborado projeto de pavimentação para trechos experimentais na Rua Castro Alves, onde foi previsto em suas camadas estruturais, a aplicação de cinza pesada pura e cinza pesada estabilizada com a adição de cal.

Na década de 1980, a partir de estudos realizados com cinzas pesadas advindas de termelétrica do estado do Rio Grande do Sul, foi construído um aterro em um segmento de rodovia, com 4 km de extensão, ligando os municípios de São Jerônimo/RS e General Câmara/RS. De acordo com Mallmann e Zwonok (1996), esse aterro consumiu cerca de 500 mil toneladas de cinzas de fundo e escórias provenientes das Usinas Termelétricas de Charqueadas e São Jerônimo. A Figura 11 ilustra o aterro construído.

Figura 11 - Aterro construído com cinzas ligando os municípios de São Jerônimo/RS e General Câmara/RS



Fonte: Mallmann e Zwonok (1996)

2.13 Considerações finais

Neste capítulo foi feita uma discussão acerca dos tipos de resíduos de carvão gerados em termelétricas e sobre o cenário da produção e da utilização de cinzas de carvão mineral em âmbito internacional e nacional. Foi abordado também sobre o efeito da estabilização química nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais e sobre a sua influência no processo de lixiviação de contaminantes, por meio da discussão acerca das técnicas de encapsulamento de contaminantes. Uma discussão sobre a utilização de cinzas no cenário rodoviário, com ênfase em experiências brasileiras e internacionais, complementou o capítulo.

No Capítulo 3 que se segue serão apresentados os materiais utilizados, o programa experimental definido e a metodologia adotada nesta pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão detalhados os materiais utilizados na pesquisa e a metodologia aplicada, bem como o programa experimental realizado, de forma a se atingir os objetivos previamente definidos.

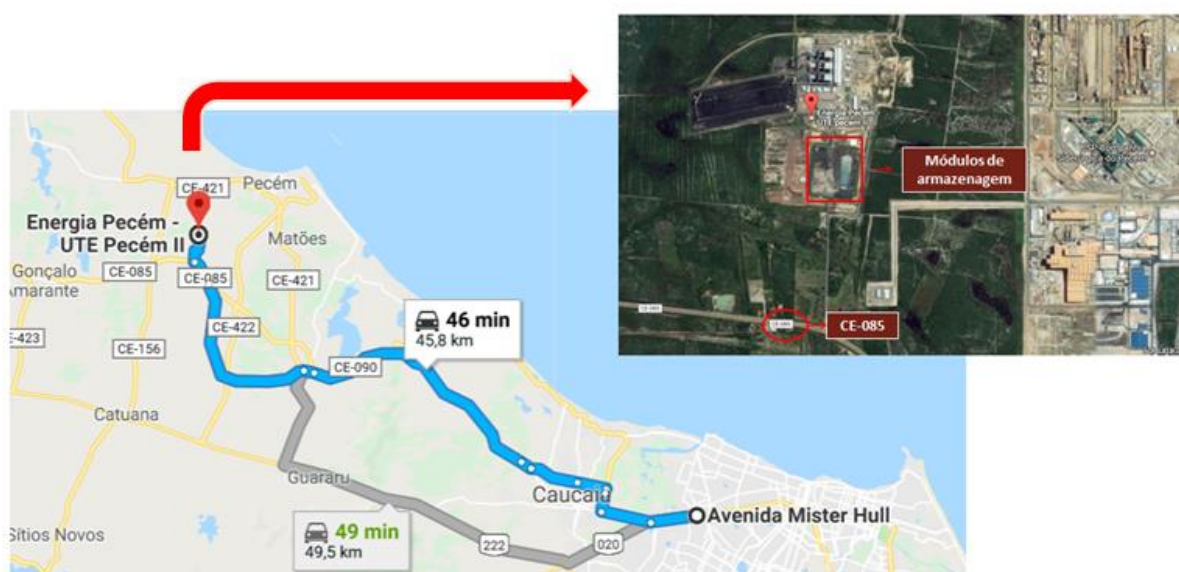
3.1 Materiais

Nesta seção serão apresentadas as características e os procedimentos de coleta dos 3 materiais utilizados neste estudo: cinzas de carvão mineral, solo regional e cal hidratada.

3.1.1 Cinzas de carvão mineral

As cinzas foram provenientes da Usina Termelétrica Energia Pecém, situada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP). A termelétrica investigada está localizada no município de São Gonçalo do Amarante, na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), com distância aproximada de 50 km em relação à capital cearense no sentido litoral oeste, conforme visualizado na Figura 12.

Figura 12 - Localização da UTE Energia Pecém em relação ao *campus* do Pici



Fonte: Google Maps (2017)

As cinzas utilizadas neste estudo foram as disponíveis no Módulo I de armazenagem da termelétrica em função do montante de material armazenado e da condição de capacidade máxima de armazenamento. O Módulo I está ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Ilustração do Módulo I de armazenagem



Fonte: Relatório de Prospecção da Usina Termelétrica Energia Pecém (UFC)

Em algumas partes do Módulo I as cinzas estavam dispostas em um estado mais solto, permitindo a coleta de amostras de forma manual, utilizando-se apenas enxadas, picaretas e pá. Em outras regiões do módulo, no entanto, o material se encontrava em um estado mais compactado, necessitando a utilização de miniescavadeira e escavadeira hidráulica. A Figura 14 ilustra o processo de coleta das cinzas.

Figura 14 - Coleta das cinzas no Módulo I de armazenagem



Fonte: Relatório de Prospecção da Usina Termelétrica Energia Pecém (UFC)

3.1.2 Jazida de solo

O solo utilizado foi proveniente de uma jazida já parcialmente explorada, localizada no município de Caucaia (RMF), distante cerca de 25 km da cidade de Fortaleza e de 20 km da UTE Energia Pecém. O solo foi o mesmo estudado por Vasconcelos (2016), sendo o critério de escolha dessa jazida a maior proximidade com a termelétrica e o potencial ainda significativo para exploração. A Figura 15 ilustra a localização da jazida de solo escolhida. O ponto exato da jazida foi georreferenciado, obtendo-se como coordenadas geográficas -3,64988 S e -38,76698 W e coordenadas UTM (m) 525877 (E) e 9596568 (N).

Figura 15 - Localização da jazida de solo



Fonte: Google Earth (2017)

O solo escolhido é do tipo A-2-4 segundo classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) de solos. O material é um solo granular, do tipo areia-siltosa, com 35% de material passante na peneira nº 200. O aspecto visual do solo está ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Aspecto visual do solo coletado



Fonte: Autora

3.1.3 Cal

A cal utilizada para estabilização química das misturas foi uma cal hidratada calcítica comercial e classificada como do tipo CH-1, obtida de uma empresa localizada no estado do Ceará. Esse tipo de cal foi selecionada por ser abundante no estado do Ceará e em função dos estudos desenvolvidos por Araújo (2009) que comprovaram o seu potencial de estabilizante químico de solos locais.

3.2 Métodos

Objetivando atingir os objetivos pré-estabelecidos nesta pesquisa, adotou-se uma sequência metodológica composta de cinco etapas, conforme Figura 17. Cada etapa contemplou um programa experimental com diferentes ensaios realizados nos materiais em estudo e nas misturas propostas.

A primeira etapa consistiu na avaliação da heterogeneidade de cinzas dispostas no Módulo I de armazenagem da UTE Energia Pecém, verificando a possibilidade de sua aplicação *in natura* em camadas granulares dos pavimentos. Em virtude da grande heterogeneidade observada e visando melhorar o comportamento das cinzas, na segunda etapa foram idealizadas misturas das cinzas com um solo arenoso (A-2-4) e com um estabilizante químico (cal), a fim de se produzir, em laboratório, misturas estabilizadas que apresentassem propriedades mecânicas e hidráulicas adequadas para aplicação em camadas dos pavimentos.

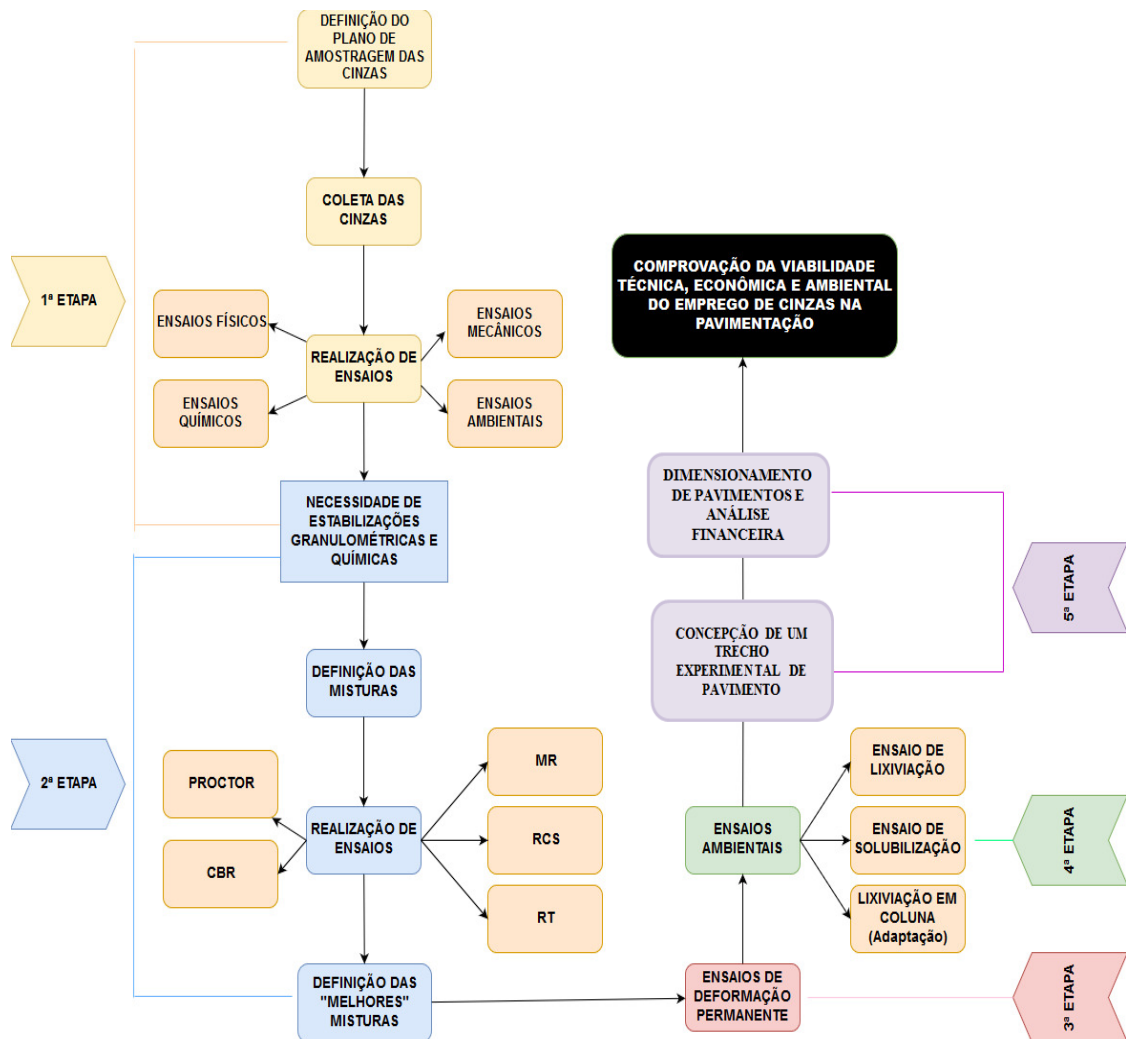
Para proceder a terceira e quarta etapa metodológica, selecionaram-se as misturas avaliadas adequadamente de acordo com os critérios técnicos para uso em camadas

granulares. Na terceira etapa, analisou-se a deformação permanente das misturas selecionadas e na quarta etapa foi realizado um conjunto de análises ambientais nas misturas para verificar a eficiência da estabilização química com a cal e da compactação como possíveis encapsulantes de contaminantes.

Por fim, a quinta e última etapa consistiu na concepção de um trecho experimental de pavimentos a ser construído dentro da usina termelétrica em estudo. Nesta etapa foram realizados os estudos topográficos e geotécnicos. A partir das informações do subleito local, procedeu-se o dimensionamento de estruturas de pavimentos com as melhores misturas idealizadas e uma análise comparativa de custos.

A Figura 17 resume as etapas metodológicas que compõem esta pesquisa.

Figura 17 - Fluxograma Metodológico

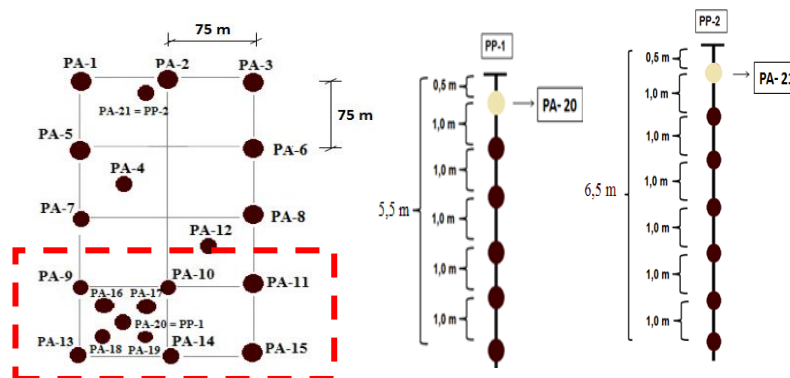


3.2.1 Primeira etapa do programa experimental

O Módulo I (dimensões aproximadas de 300 m de comprimento, 150 m de largura e 7 m de profundidade) de armazenagem das cinzas da UTE Energia Pecém atingiu sua capacidade máxima, totalizando 315.000 m³ de cinza. Para avaliar a heterogeneidade das cinzas dispostas no Módulo I, foi proposta uma malha amostral de 75 m × 75 m (Figura 18), onde foram definidos Pontos Amostrais superficiais (PA) e em Profundidade (PP).

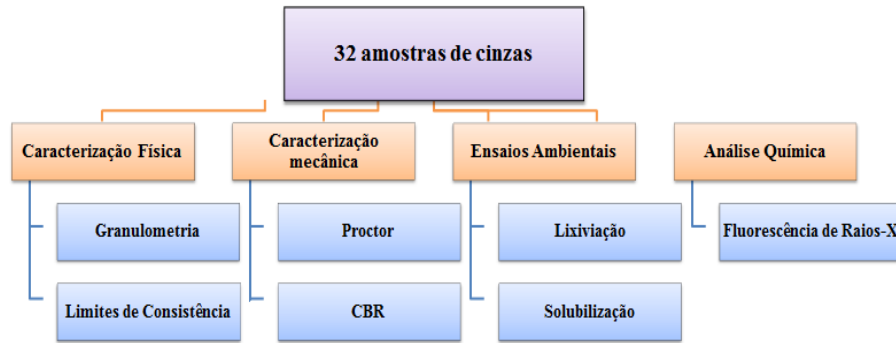
A amostragem de superfície foi composta de 21 pontos (coletados a uma profundidade de 50 cm da superfície) distribuídos sobre a área definida, sendo as amostras identificadas pela sigla PA, seguidas de uma numeração em ordem crescente (PA-1 a PA-21). A amostragem em profundidade foi executada utilizando-se 2 pontos de amostragem, PP-1 e PP-2. As localizações desses dois pontos dentro da malha são correspondentes as das amostras superficiais PA-20 e PA-21, respectivamente. Para esses dois pontos foram executados furos e coletadas amostras a cada 1 m de profundidade, conforme se visualiza na Figura 18. Ressalta-se que o ponto em profundidade PP-1, localiza-se próximo a uma piscina de águas servidas existente no interior do Módulo I. Devido a uma infiltração de água da “piscina” para o interior do furo de amostragem, foi inviabilizada a amostragem até a profundidade desejada de 6,00 m.

Figura 18 - Plano de Amostragem



Fonte: Autora

Vasconcelos (2016) estudou as 32 amostras, realizando ensaios de caracterização física (granulometria completa, densidade real e limites de consistência), química (fluorescência de Raio X), ambiental (ensaios de solubilização e lixiviação) e ensaios mecânicos (Proctor, CBR e expansão), conforme observado no fluxograma disposto na Figura 19. As normas utilizadas para realização dos ensaios estão apresentadas na Tabela 2.

Figura 19 - Fluxograma da 1ª Etapa Metodológica

Fonte: Autora

Tabela 2 - Normas empregadas para os ensaios realizados na 1ª Etapa

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

Fonte: Autora

De posse dos resultados desses ensaios, realizou-se uma análise estatística, por meio das Equações de 3 a 6, utilizando o procedimento sugerido em DNIT (2006), cuja análise é baseada nos seguintes parâmetros: média, desvio padrão, valor mínimo provável e valor máximo provável de cada variável a ser analisada.

$$X_{\text{MAX}} = \bar{X} + \frac{1,29\sigma}{\sqrt{N}} + 0,68\sigma \quad (3)$$

$$X_{\text{MIN}} = \bar{X} - \frac{1,29\sigma}{\sqrt{N}} - 0,68\sigma \quad (4)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X-\bar{X})^2}{N-1}} \quad (6)$$

Nessas equações, tem-se que: X representa o valor individual para cada variável analisada; N = número de amostras; \bar{X} = média aritmética; σ = desvio padrão; X_{MIN} = valor mínimo provável e X_{MAX} = valor máximo provável.

3.2.2 Segunda etapa do programa experimental

Na segunda etapa idealizou-se realizar misturas das Cinzas (C) com Solo (S) regional e com adição de cal em três proporções (1%, 3% e 5%). As cinzas a serem utilizadas nesta etapa foram provenientes da mistura de amostras dispostas na área pontilhada apresentada na Figura 18. Foram selecionados esses pontos amostrais por apresentarem características de baixa periculosidade (com base nos ensaios ambientais) e de melhores resultados dos ensaios mecânicos de CBR e expansão.

Assim, a cinza homogeneizada foi composta da mistura de 11 amostras (PA-9 até PA-20, à exceção da PA-12), sendo separados 40 kg de cada uma delas, procedendo-se a mistura, o quarteamento e a secagem. Em seguida, a cinza homogeneizada foi misturada com o solo coletado e com a cal para que fossem produzidas as nove misturas idealizadas. A Tabela 3 descreve as misturas propostas.

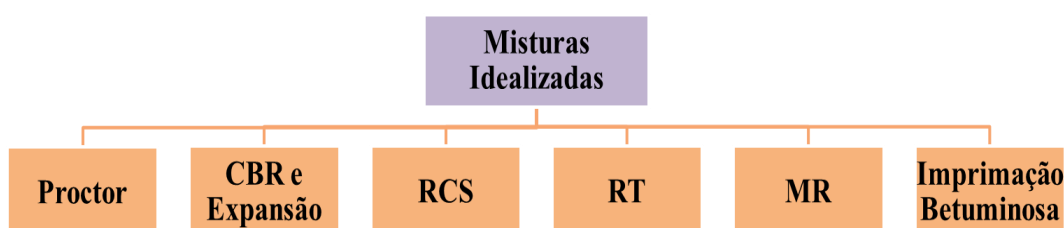
Tabela 3 - Misturas idealizadas

Misturas	Solo (%)	Cinza (%)	Cal (%)	Composição
M1 (solo)	100	0	0	100S + 0C
M2 (cinza)	0	100	0	0S + 100C
M3 (solo+ cinza)	50	50	0	50S + 50C
M4 (M2 + 5CAL)	0	95	5	95C + 5Cal
M5 (M3 + 5CAL)	47,5	47,5	5	47,5S + 47,5C + 5Cal
M6 (M2 + 3CAL)	0	97	3	97C + 3Cal
M7 (M3 + 3CAL)	48,5	48,5	3	48,5S + 48,5C + 3Cal
M8 (M2 + 1CAL)	0	99	1	99C + 1Cal
M9 (M3 + 1CAL)	49,5	49,5	1	49,5S + 49,5C + 1Cal

Fonte: Autora

Todas as 9 misturas foram submetidas aos ensaios de Proctor, CBR, Expansão, Módulo de Resiliência (MR), Resistência à Compressão Simples (RCS) e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) e ensaios de avaliação da imprimação betuminosa, na energia de compactação intermediária, conforme fluxograma disposto na Figura 20. Em misturas com presença de cal, os ensaios foram realizados para tempos de cura de 0, 7, 14 e 28 dias. As normas utilizadas para realização dos ensaios estão apresentadas na Tabela 4.

Figura 20 - Fluxograma da 2ª etapa metodológica



Fonte: Autora

Tabela 4 - Normas utilizadas para os ensaios realizados na 2ª Etapa

ENSAIOS	MÉTODOS
PROCTOR	DNER- ME 162/1994
CBR	DNER- ME 049/1994
MÓDULO DE RESILIÊNCIA	DNER-ME 134/2010
RCS	DNER-ME 180/1994
RT	DNER - ME 138/94
IMPRIMAÇÃO	Conforme Rabêlo (2006)

Fonte: Autora

3.2.2.1 Preparação das misturas

A preparação das misturas foi realizada do seguinte modo: (a) colocou-se o solo natural na bandeja em quantidade pré-definida; (b) adicionou-se a cinza, procedendo-se a uniformização manual dos dois materiais; (c) adicionou-se a cal, procedendo-se com a homogeneização manual da mistura; (c) por fim, adicionou-se a água necessária para se obter o teor ótimo de umidade de cada uma das misturas. A Figura 21 ilustra esses procedimentos.

Figura 21 - Preparação das Amostras



Fonte: Autora

3.2.2.2 Ensaios realizados na segunda etapa do programa experimental

A seguir serão abordados de forma mais detalhada os ensaios que compõem a segunda etapa do programa experimental desta pesquisa.

3.2.2.2.1 Ensaio de compactação Proctor e de Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O solo natural, a cinza homogeneizada e as misturas preparadas com Solo+Cinza+Cal foram submetidas ao ensaio de compactação Proctor na energia intermediária, conforme o método de ensaio estabelecido em DNER (1994a). De posse da umidade ótima e da massa específica seca máxima obtidos do ensaio de compactação, moldaram-se corpos-de-prova (CPs) para o ensaio de CBR.

O ensaio de CBR foi realizado no solo natural, na cinza e nas misturas idealizadas, conforme DNER (1994b). Os CPs foram compactados na energia intermediária e na umidade ótima. Foram moldados 3 CPs para cada mistura e, nas misturas idealizadas com a cal, foram moldados CPs para os tempos de cura de 0, 7, 14 e 28 dias. No total foram moldados 27 CPs para os ensaios de compactação e 81 CPs para os ensaios de CBR.

3.2.2.2.2 Ensaios de módulo de resiliência (MR)

O ensaio de MR foi realizado conforme metodologia estabelecida em DNER (2010), com uso do equipamento triaxial de carga repetida. A moldagem ocorreu no cilindro tripartido, de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, em 10 camadas e com a aplicação de 10 golpes por camada. Foram moldados 3 CPs para cada mistura. Alguns procedimentos de realização do ensaio de MR estão ilustrados na Figura 22.

Figura 22 - Ilustração da realização do ensaio de MR



Fonte: Autora

3.2.2.2.3 Ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

O ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS) foi realizado conforme DNER (1994c), utilizando-se na moldagem o cilindro tripartido, de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com 10 camadas e 10 golpes cada. Nesse ensaio, os CPs foram moldados na umidade ótima e, após a moldagem, envolvidos com um plástico filme até completar o tempo de cura. Antes do rompimento, os CPs ficaram imersos em água por 24 horas. No total foram preparados 81 CPs para o ensaio de RCS.

O ensaio de RTCD foi realizado conforme DNER (1994d). Existe um método de ensaio específico para determinação da resistência à tração por compressão diametral para solos estabilizados com cinza volante DNER (1994e). No entanto, devido a uma limitação de equipamento (não havia suporte adequado na prensa Marshall para promover o rompimento dos CPs com dimensões estabelecidas na norma), optou-se por adotar a DNER (1994d).

Assim, os CPs foram moldados na umidade ótima dentro do cilindro Marshall, com 10 cm de diâmetro e altura entre 3,5 e 6,5 cm. Foram moldadas 3 CPs para cada mistura. No total foram preparados 81 CPs para o ensaio de RTCD.

A Figura 23 ilustra a realização dos ensaios de RCS e RTCD nas misturas idealizadas.

Figura 23 - Ilustração da realização dos ensaios de RCS e RT

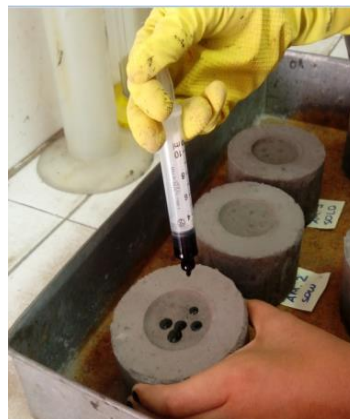


Fonte: Autora

3.2.2.2.4 Ensaios de imprimação

Na segunda etapa metodológica se avaliou também o comportamento da imprimação betuminosa em corpos de prova, simulando bases granulares constituídas das misturas testadas conforme o procedimento recomendado por Rabêlo (2006). Assim, foram moldados corpos-de-prova com as misturas propostas, com o propósito de avaliar a qualidade da imprimação pela penetração do ligante. Os corpos de prova foram moldados com um ressalto no centro do molde convencional para o cilindro Marshall, de forma que, após a desmoldagem esse ressalto se converteu em uma depressão circular para aplicação do ligante betuminoso, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Corpo-de-prova do ensaio de Imprimação



Fonte: Autora

O material aplicado durante o procedimento de imprimação betuminosa foi o asfalto diluído de cura média CM-30 a uma taxa de aplicação de $1,2 \text{ l/m}^2$, taxa usualmente utilizada nos serviços de imprimação no estado do Ceará.

A metodologia de ensaio adotada consistiu em, após a moldagem dos corpos de prova (CPs) com cilindro Marshall adaptado com rebaixo, dispor os CPs em uma bandeja, à temperatura ambiente, até perderem cerca de 50% do teor de umidade. Atingindo-se o teor de umidade, varreu-se a superfície dos CPs para a retirada do pó e posteriormente se irrigou a superfície com água em uma taxa de aproximadamente $0,5 \text{ l/m}^2$.

Após esses procedimentos, imprimou-se os CPs e eles foram mantidos em cura por 48 horas. Depois os CPs foram rompidos diametralmente, de forma manual, medindo-se a penetração 5 pontos ao longo do rebaixo. Utilizou-se como valor de penetração a média aritmética dos valores medidos. A Figura 25 ilustra as etapas do procedimento adotado para determinação da penetração betuminosa.

Figura 25 - Etapas do ensaio de Imprimação



Fonte: Autora

A imprimação foi testada para as misturas estabilizadas (M3 a M9). As misturas naturais de solo (M1) e de cinza (M2) não foram avaliadas, por não apresentarem propriedades mecânicas aptas para aplicação em bases de pavimentos. Foram moldados três corpos-de-prova para cada mistura, em cinco teores diferentes de umidades: umidade ótima, umidade ótima $\pm 2\%$ e umidade ótima $\pm 4\%$. Com isso, pode-se avaliar também a influência do teor de umidade de compactação na qualidade da imprimação betuminosa. No total foram preparados 95 CPs para o ensaio de imprimação.

3.2.3 Terceira etapa do programa experimental

Antes de iniciar a terceira etapa foram selecionadas dentre as misturas estudadas aquelas que, por base nos ensaios laboratoriais realizados, apresentavam melhores comportamentos mecânicos para emprego em camadas granulares de pavimentos. A 3ª etapa metodológica objetivou estudar a deformação permanente nas misturas selecionadas. Para avaliação da deformação permanente, optou-se pela escolha do método de ensaio triaxial de carga cíclica normatizado pela norma europeia BS EN 13286-7: 2004.

Existe um projeto de norma proposto pelo DNIT (DNIT xxx/2017 – IE) para avaliação da deformação permanente em solos. Nessa norma, são realizados ensaios triaxiais de cargas repetidas de longa duração, em que são indicados 9 pares de tensões, devendo-se aplicar no mínimo 150.000 ciclos para cada estado de tensão. Optou-se, no entanto, neste trabalho realizar o ensaio em conformidade com a norma europeia BS EN 13286-7: 2004, uma vez que essa metodologia demanda significativa redução no tempo de ensaio de cada corpo-de-prova e, conseqüentemente, redução dos recursos energéticos.

Essa metodologia consiste na aplicação de 12 pares de tensão, em que em cada par são aplicados 10.000 ciclos. Marangon e Motta (2006), ao realizarem o estudo da deformação permanente de solos para rodovias de baixo volume de tráfego, consideraram o par de tensões desvio e de confinamento igual a $0,70 \text{ kgf/cm}^2$ de ordem de grandeza compatível com os níveis de tensões, sob o eixo padrão, esperados para os pavimentos de baixo tráfego. Haja vista o interesse por parte da termelétrica investigada nesta pesquisa de construção de um trecho experimental de pavimento dentro da empresa, com uma via de natureza de baixo volume de tráfego, optou-se neste estudo por submeter cada amostra aos 4 pares de tensão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Relação dos pares de tensões utilizadas no ensaio de Deformação Permanente

Tensão (kPa)		N
σ_d	σ_3	
40	40	10.000
80		
120		
160		

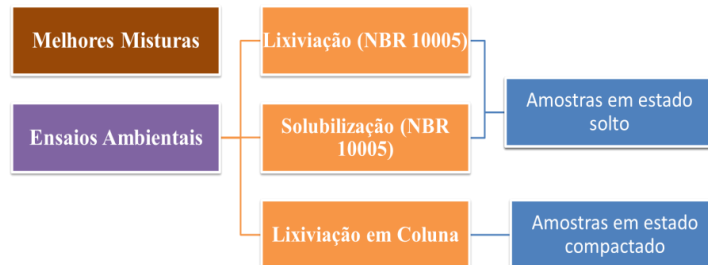
Fonte: Autora

O procedimento utilizado para moldagem dos corpos-de-prova e montagem do aparato de ensaio foi igual ao utilizado para ensaio de MR. No ensaio de DP, no entanto, não deve ser realizado a fase de condicionamento, pois todas as deformações permanentes devem ser contabilizadas na análise.

3.2.4 Quarta etapa do programa experimental

A quarta etapa do programa experimental consistiu na realização de análises ambientais nas misturas selecionadas ao término da 2ª etapa metodológica que por base nos ensaios laboratoriais realizados, apresentavam bons comportamentos mecânicos para emprego em camadas granulares. O objetivo principal desta etapa foi classificar ambientalmente as misturas analisadas e verificar como os processos de compactação e de estabilização química atuaram no encapsulamento de contaminantes. A Figura 26 ilustra o fluxograma experimental desta etapa metodológica.

Figura 26 - Fluxograma experimental da 4ª Etapa Metodológica



Fonte: Autora

Nesta etapa foram realizadas nas misturas selecionadas ensaios tradicionais de lixiviação e solubilização, conforme as normas ABNT (2004) e ABNT (2004b), respectivamente. No ensaio de lixiviação, foi utilizado 2000 ml de uma solução de ácido acético e água (5,7 ml de ácido acético para 1000 ml de solução) que foi adicionada a 100 g de cada amostra analisada. A solução e a amostra foram transferidas para o frasco de lixiviação e colocadas sob agitação durante 18 ± 2 h à temperatura de 25°C no agitador giratório, conforme se pode observar na Figura 27. Após essa etapa, cada amostra passou por um processo de filtragem para obtenção do extrato lixiviado. Os extratos obtidos de todas as amostras foram posteriormente analisados em um cromatógrafo para obtenção das concentrações dos compostos iônicos.

Figura 27 - Ilustração da realização do ensaio de lixiviação



Fonte: Autora

No ensaio de solubilização 250 g de cada amostra foram adicionadas, em um frasco volumétrico, a 1000 mL de água destilada, promovendo-se então uma agitação por 5 min, conforme observado na Figura 28. Posteriormente, o frasco foi coberto com filme de PVC e deixado em repouso por 7 dias, em temperatura de 25°C. Após essa etapa, cada amostra passou por um processo de filtragem para obtenção do extrato solubilizado. Os extratos obtidos foram analisados em um cromatógrafo para obtenção das concentrações dos compostos iônicos.

Figura 28 - Ilustração do ensaio de solubilização



Fonte: Autora

Objetivando identificar o processo de compactação como possível encapsulante de resíduos, realizou-se um ensaio de lixiviação em amostras no estado compactado. Como não existe metodologia brasileira normatizada, os procedimentos para esse ensaio foram realizados com base em ASTM (1995). Essa última é uma metodologia de ensaio de Lixiviação em Coluna que busca simular as condições reais de compactação em campo.

Como não se dispunha dos equipamentos recomendados pela norma supracitada, foi utilizado um permeâmetro, usualmente empregado para determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. O permeâmetro é constituído de um cilindro metálico com aproximadamente 15 cm de diâmetro e 13 cm de altura, composto de uma tampa inferior e uma superior. A tampa inferior é dotada de um orifício que permite a saída do extrato lixiviado. A tampa superior possui dois orifícios, um que permite o controle da saída de ar do cilindro e o outro que é acoplado a uma bureta de vidro graduada, possibilitando a entrada de água dentro do sistema.

Nesse ensaio, uma camada da amostra foi compactada dentro do cilindro do permeâmetro, com cerca de 3 a 5 cm de altura, na energia de compactação intermediária. Uma fina camada de brita foi colocada sobreposta à amostra, de forma a evitar um brusco contato da água com o material ensaiado. O corpo-de-prova foi, então, saturado de água. Após a saturação, adicionava-se água no permeâmetro, por meio da bureta de vidro acoplada ao cilindro. Deixava-se percolar essa água, obtendo-se um extrato lixiviado através do orifício localizado na tampa inferior do cilindro. A Figura 29 ilustra as etapas de realização desse ensaio. O líquido lixiviado obtido foi, então, filtrado, para poder ser analisado em um cromatógrafo iônico.

Figura 29 - Ensaio de lixiviação em amostra compactada



3.2.5 Quinta etapa do programa experimental

Esta etapa metodológica objetivou a elaboração de um projeto estrutural de pavimentos com o uso de cinzas de carvão em camadas granulares. Com base em todo programa experimental supracitado, selecionaram-se as misturas mais adequadas, dentro de critérios técnicos e ambientais, para serem utilizadas em camadas de base e sub-base de um pavimento a ser construído na usina termelétrica investigada.

O trecho experimental terá aproximadamente 1,4 km de extensão e estará localizado dentro da Usina Termelétrica Energia Pecém, conforme se pode visualizar na Figura 30.

Figura 30 - Trecho experimental a ser construído com o uso de cinzas



Fonte: Google Earth (2017)

Inicialmente foi realizado um estudo topográfico do local, o qual se dividiu em duas fases: cadastramento e mapeamento. A técnica utilizada foi a de levantamento no modo diferencial RTK (*Real Time Kinematic*), utilizando-se um receptor geodésico (modelo Trimble R4 – RTK – FULL TIME) juntamente com sua antena remota.

Na primeira fase realizou-se um levantamento cadastral abrangendo todo o entorno do futuro trecho pavimentado, partindo-se da CE-085 e seguindo-se as torres de alta tensão até chegar à outra extremidade do trecho, próxima aos blocos administrativos da empresa.

Na segunda fase foi realizado o mapeamento da região, por meio do levantamento de pontos em seções transversais de 40 m de extensão, espaçadas 10 m entre si, a fim de se

obter uma representação tridimensional do terreno, possibilitando estudo de declividades, volumes de corte e aterro e lançamento de greide. A Figura 31 ilustra a realização do levantamento planialtimétrico.

Figura 31 - Levantamento Planialtimétrico



Fonte: Autora

O reconhecimento do subleito local foi feito por meio de coleta de 10 amostras espaçadas ao longo do eixo da via a ser construída, conforme visualizado na Figura 32.

Figura 32 - Reconhecimento do subleito local



Fonte: Google Earth (2017)

Retirou-se cerca de 25 cm de cobertura vegetal, para então proceder a coleta do material (Figura 33). Com utilização de pás e picaretas, aprofundaram-se os furos de sondagem até cerca de 1 m, de forma a verificar visualmente a ocorrência de mudança de material. Como não foi detectado mudanças, as amostras foram obtidas apenas superficialmente, com profundidades entre 25 cm a 75 cm.

Figura 33 - Reconhecimento de Subleito (Coleta de Amostras)



Fonte: Autora

Nas amostras coletadas, procederam-se a realização de ensaios de caracterização física (granulometria e limites de consistência) e ensaios mecânicos (Proctor e CBR). Os ensaios de Proctor e os de CBR foram realizados na energia normal. Com os resultados desses ensaios, realizou-se uma análise estatística, conforme DNIT (2006).

De posse das informações do subleito local, procedeu-se o dimensionamento mecanístico-empírico do pavimento a ser construído, utilizando-se as melhores misturas investigadas em camadas granulares. Foi realizado um pré-dimensionamento pelo método empírico do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) que determina a espessura das camadas em função do número N (número de operações do eixo simples padrão com rodas duplas, pressão de $5,6 \text{ kg/cm}^2$ por roda e carregamento de 8,2 tf) e do valor de CBR do subleito.

O método do DNIT é essencialmente empírico e bastante usado na área rodoviária. Entretanto, tem se verificado nos últimos anos um rompimento prematuro da malha que pode estar associado à questão da repetição das aplicações das cargas como informado por Medina e Motta (2005). Também é conhecido que os métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos, baseados no conhecimento do Módulo de Resiliência, deverão entrar em vigor no Brasil em um futuro breve. Assim, depois de realizado o pré-dimensionamento pelo método do DNIT, empregou-se análise mecânica dos

pavimentos, cujo dimensionamento foi realizado com o auxílio do programa computacional SisPav (FRANCO, 2007).

Por fim, realizou-se uma avaliação financeira das estruturas idealizadas do pavimento, comparando-as com custos de estruturas convencionalmente utilizadas no estado do Ceará. Para essa avaliação financeira a tabela de custos da Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA-CE) do ano de 2017 foi consultada.

3.2.6 Considerações finais

No presente capítulo foram apresentados os materiais e métodos escolhidos para a realização da pesquisa, detalhando as etapas metodológicas necessárias para atingir os objetivos propostos. Explanou-se sobre cada uma das 5 etapas metodológicas que compõem este estudo e como elas foram necessárias para se atingir os objetivos propostos. No capítulo seguinte serão apresentados e analisados os resultados obtidos a partir da execução das etapas metodológicas descritas anteriormente.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada uma das cinco etapas metodológicas que compõem este estudo.

4.1 Primeira etapa do programa experimental

A primeira etapa do programa experimental consistiu na verificação da heterogeneidade das cinzas, a partir da realização dos ensaios físicos, químicos, mecânicos e ambientais em 32 amostras de cinzas. Os resultados detalhados dessas análises estão dispostos em Vasconcelos (2016) e Vasconcelos *et al.* (2017).

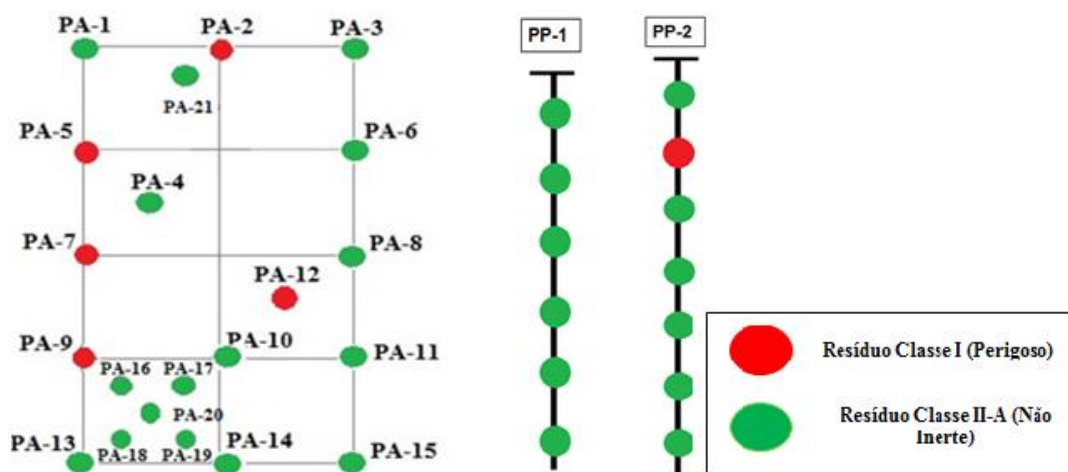
Foi observada periculosidade em seis amostras, sendo as demais classificadas como Resíduo Classe II-A (Não Inerte). Observou-se que as amostras PA-2, PA-5, PA-7, PA-9, PA-12 e PP-2 (na profundidade 1,5-1,75m) apresentaram resultados acima dos valores máximos permitidos (VMP) de Fluoreto (F⁻), chegando a um valor máximo de 341 mg/L, quando a norma permite até 150 mg/L em ensaios de lixiviação. O excesso de fluoreto pode causar vários danos ao organismo humano, como fluorose dentária, queda de cabelos crônica, varizes, catarata, dentre outros problemas de saúde (BARROS, 2015). De acordo com a NBR 10005/2004, quando um ou mais parâmetros do lixiviado estiverem acima dos valores máximos permitidos a amostra é classificada como Resíduo como Classe I (Perigoso). Dessa forma, à luz do ensaio de lixiviação, em 18,75% das amostras a periculosidade foi observada.

As demais amostras foram classificadas como resíduos de Classe II-A (Não Inerte), a partir da detecção de altas Inerte), a partir da detecção de altas concentrações de sulfato (SO₄⁻²) no ensaio de solubilização. Essa classificação de solubilização. Essa classificação de cinzas também foi observada em outros estudos nacionais e internacionais, como e internacionais, como os de Trichês *et al.* (2006), Rohde *et al.* (2006), Lopes (2011) e Barros (2015). A

(2015). A

Figura 34 ilustra a classificação ambiental das amostras das cinzas analisadas.

Figura 34 - Classificação Ambiental das Cinzas



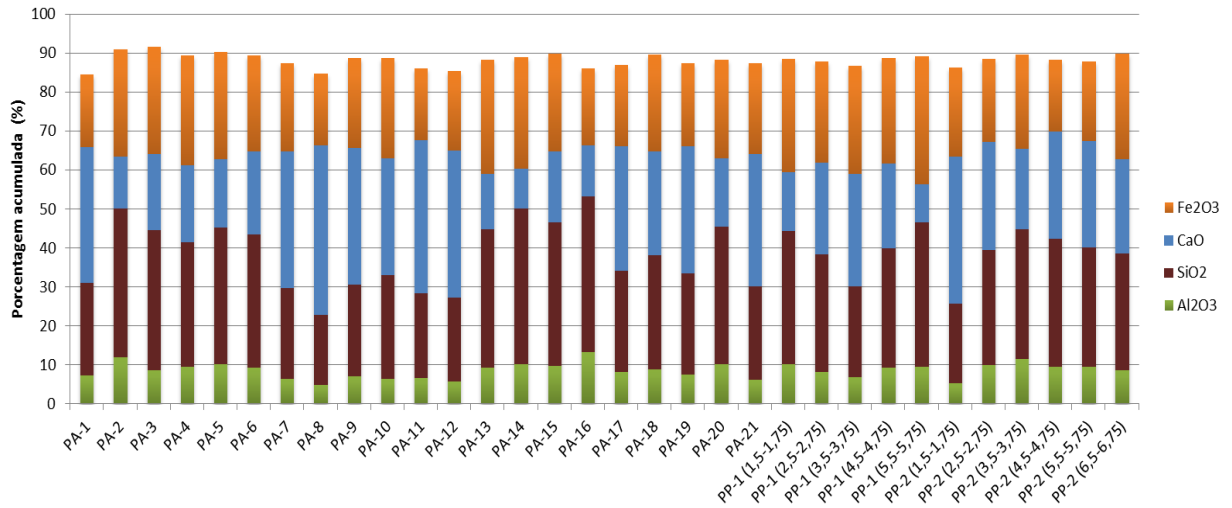
Fonte: Adaptado do Primeiro Relatório Semestral-Projeto de pesquisa sobre a utilização da cinza de carvão mineral na construção civil, pavimentação, e aplicações geotécnicas e ambientais.

Lopes (2011) reforça que a classificação de resíduos como não inertes (Classe II-A) não inviabiliza sua utilização em camadas granulares de pavimentos, desde que no ensaio de lixiviação, que se propõe a representar a infiltração da água da chuva no solo, todos os parâmetros analisados estejam dentro dos limites permitidos. Dessa forma, 18,75% das amostras, por serem classificadas como perigosas, são inviabilizadas para utilização em camadas granulares dos pavimentos.

Vasconcelos (2016) também apresentou os resultados da análise química das amostras a partir de ensaios de Fluorescência de Raios-X. Foi observado que os compostos de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de cálcio (CaO) foram os compostos mais presentes em todas as 32 amostras, juntos representando mais de 80% da composição desses resíduos, conforme se visualiza na Figura 35. Lopes *et al.* (2015), ao estudarem cinzas volantes e pesadas advindas de uma termelétrica do sul do Brasil, também

detectaram como principais componentes das cinzas, tanto pesadas quanto volantes, o silício, o alumínio e o ferro.

Figura 35 - Análise química das amostras



Fonte: Vasconcelos *et al.* (2017)

A Tabela 6 dispõe da análise estatística realizada com base nos resultados dos ensaios físicos e mecânicos das 32 amostras. Com relação aos ensaios mecânicos, obtiveram-se valores de umidade ótima entre 25% e 57% (média de 38%), com um desvio padrão de cerca de 12%, o que demonstra grande heterogeneidade nas cinzas analisadas. No que se refere aos valores de CBR eles foram também variados, oscilando entre 1% e 46%, com mais 80% das amostras apresentando valores abaixo de 20%, mínimo exigido para camadas de sub-base. O desvio padrão no ensaio de CBR foi de 9%, o que reforça a grande heterogeneidade das cinzas estudadas. Os valores de expansão variaram entre 0,2% a 8,6%, sendo 48% das amostras coletadas não atendendo ao valor mínimo estipulado para camada de sub-base (menor que 1%). O desvio padrão dos valores de expansão também foi alto (1,9%), sendo praticamente igual a media obtida (2%).

Concluiu-se que as cinzas dispostas no Módulo I da termelétrica em estudo são bastante heterogêneas. Dada a significativa heterogeneidade, torna-se difícil definir propriedades características ou valores de ensaios representativos para todo o material disposto no módulo.

Tabela 6 - Análise estatística dos parâmetros dos ensaios físicos e mecânicos

	Análise Estatística	Nº de Amostras	Média	Desvio Padrão	Valor Mínimo Provável	Valor Máximo Provável
GRANULOMETRIA (% PASSANTE)	2"	32	100,0	0,0	100,0	100,0
	3/8"	32	100,0	0,0	100,0	100,0
	nº 10	32	100,0	0,0	100,0	100,0
	nº 40	32	91,4	6,8	84,8	98,0
	nº 200	32	91,6	9,3	72,6	90,6
ENSAIOS MECÂNICOS	h_{ot} (%)	32	38,1	11,7	26,8	49,4
	γ_s (g/cm ³)	32	1,2	0,2	1,0	1,3
	Expansão (%)	32	2,0	1,9	0,1	3,9
	CBR (%)	32	9,2	8,8	0,6	17,7

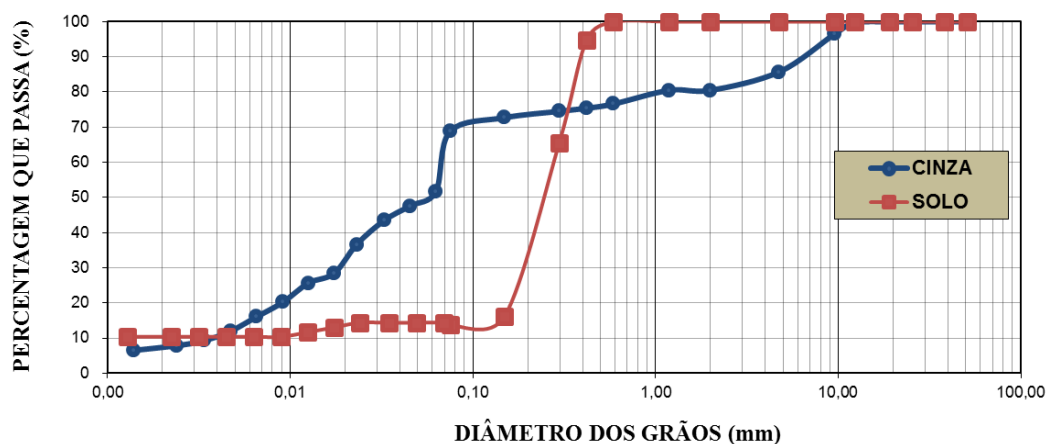
Fonte: Vasconcelos (2016)

4.2 Segunda etapa do programa experimental

Na tentativa de deixar as cinzas mais homogêneas e dentro dos requisitos mínimos para utilização na pavimentação, nesta etapa procedeu-se as estabilizações granulométricas e químicas dos materiais.

A densidade real da cinza homogeneizada utilizada nesta etapa foi de 2,44, enquanto que, devido ao alto teor de material granular em suas composições granulométricas e a ausência de características plásticas para realização dos ensaios de limite de consistência (limite de liquidez e limite de plasticidade), as cinzas foram classificadas como não plásticas. A não plasticidade das cinzas está em consonância com diversos outros estudos, como os de Nardi (1975), Leandro (2005), Farias (2005), Trichês *et al.* (2006), Lopes (2011) e Barros (2015).

O solo apresentou uma densidade de 2,65, com limite de liquidez de 25% e o índice de plasticidade foi 7%. As curvas granulométricas desses materiais estão dispostas na Figura 36. A **Tabela 7** ilustra as porcentagens de pedregulho, areia, siltes e argilas nos dois materiais.

Figura 36 - Curvas granulométricas do solo e da cinza homogeneizada

Fonte: Autora

Tabela 7 - Porcentagens de pedregulho, areia, siltes e argilas nos dois materiais

FRAÇÕES	Cinzas	Solo
% PEDREGULHO (maior do que 4,8 mm)	14,3	0,0
% AREIA GROSSA (entre 4,8mm - 2,0mm)	5,2	0,0
% AREIA MÉDIA (entre 2,00mm - 0,42mm)	5,1	5,2
% AREIA FINA (entre 0,42mm - 0,075mm)	6,6	81,0
% SILTE (entre 0,075mm - 0,005mm)	56,8	3,4
% ARGILA (menor do que 0,005mm)	12,0	10,4

Fonte: Autora

Observa-se que o solo é predominantemente uma areia fina, com alguma presença de silte e argila, sendo classificado pela AASHTO como um solo granular, do tipo A-2-4. Já a cinza homogeneizada possui 69% das partículas passantes na peneira nº 200, com cerca de 57% de siltes (tamanhos entre 0,075 mm a 0,05 mm) e 12% de argilas (abaixo de 0,005 mm), sendo classificada pela AASHTO como um material siltoso, do tipo A-4. Lopes (2011) e Barros (2015) ao estudarem cinzas volantes obtidas de termelétricas brasileiras também as classificaram como do tipo A-4.

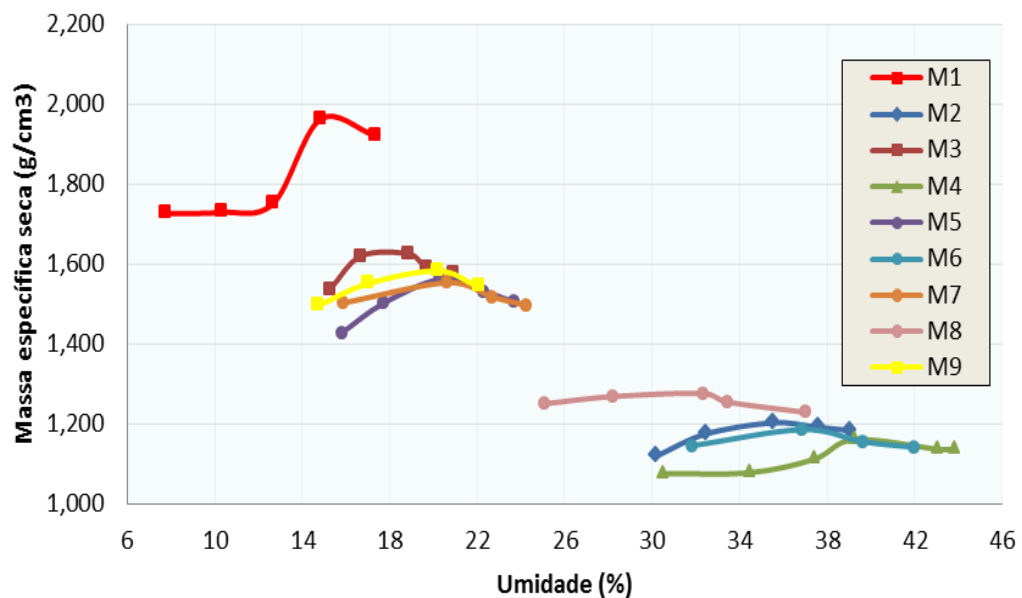
4.2.1 Ensaios de Proctor

Os resultados obtidos dos ensaios de compactação, realizados na energia intermediária, de todas as misturas idealizadas (M1 a M9) podem ser visualizados na Tabela 8 e na Figura 37.

Tabela 8 - Resultados dos Ensaios de Compactação para todas as misturas ensaiadas

Misturas	Solo (%)	Cinza (%)	Cal (%)	Compactação	
				$h_{ót}$ (%)	γ_s (g/cm ³)
M1 (solo)	100	0	0	15,1	1,970
M2 (cinza)	0	100	0	35,5	1,200
M3 (solo+ cinza)	50	50	0	18,0	1,620
M4 (M2 + 5CAL)	0	95	5	39,5	1,180
M5 (M3 + 5CAL)	47,5	47,5	5	20,6	1,550
M6 (M2 + 3CAL)	0	97	3	36,9	1,190
M7 (M3 + 3CAL)	48,5	48,5	3	20,7	1,560
M8 (M2 + 1CAL)	0	99	1	34,4	1,278
M9 (M3 + 1CAL)	49,5	49,5	1	20,4	1,584

Fonte: Autora

Figura 37 - Curvas de Compactação de todas as misturas

Fonte: Autora

É possível verificar que, em geral houve acréscimo da umidade ótima ($h_{ót}$) e diminuição da massa específica seca ($\gamma_{smáx}$) das misturas em função do aumento do teor de cinza. Isso se deve, principalmente, ao fato das cinzas serem mais siltosas e argilosas (conforme verificado na análise granulométrica), absorvendo maiores quantidades de água.

Como as cinzas utilizadas foram obtidas do Módulo I de armazenagem, onde foram depositadas tanto cinzas leves quanto pesadas, elas apresentam traços de comportamentos mecânicos costumeiramente observados nesses dois tipos de cinzas. Foi observada que, com adição de cinzas, as curva de compactação passaram a se apresentar de

forma mais achatada, com pontos de massa específica aparente máxima e umidade ótima não tão bem definidos. Lovell *et al.* (1991) observaram que ensaios de compactação de cinzas pesadas produzem, em geral, curvas mais achatadas, dada a complexa estrutura porosa das partículas que as constituem. Lopes (2011) comprovou também esse fato em seus estudos.

Com a adição da cal, foram observados em geral acréscimos nos valores de umidade ótima e decréscimos nos valores de massa específica aparente máxima. A cal absorve maior quantidade de água e possui densidades menores, o que explica o comportamento observado nas misturas M4, M5, M6 e M7. Com a adição de 1% de cal, devido principalmente à baixa proporção desse estabilizante, essa tendência não foi observada.

4.2.2 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Os resultados dos ensaios de CBR e expansão para todas as amostras e em todos os tempos de cura (0, 7, 14 e 28) estão descritos na Tabela 9.

Sabe-se que o ensaio CBR não deve ser usado para analisar o comportamento de misturas estabilizadas quimicamente para dimensionamento de pavimentos. Entretanto, a ideia de se usar esse ensaio é de verificar o incremento dessa propriedade quando se emprega um estabilizante e o tempo de cura. Ressalte-se que as propriedades usadas (RCS e MR) em dimensionamento de pavimentos serão analisadas nos itens que se seguem.

Observa-se que a cinza (M2) apresenta um baixo valor de resistência à penetração (4%), bem abaixo do que o mínimo exigido pelo DNIT para uso em camadas de sub-base (20%). Ao misturar as cinzas com o solo regional (M3) foi observado que o CBR foi de 21%.

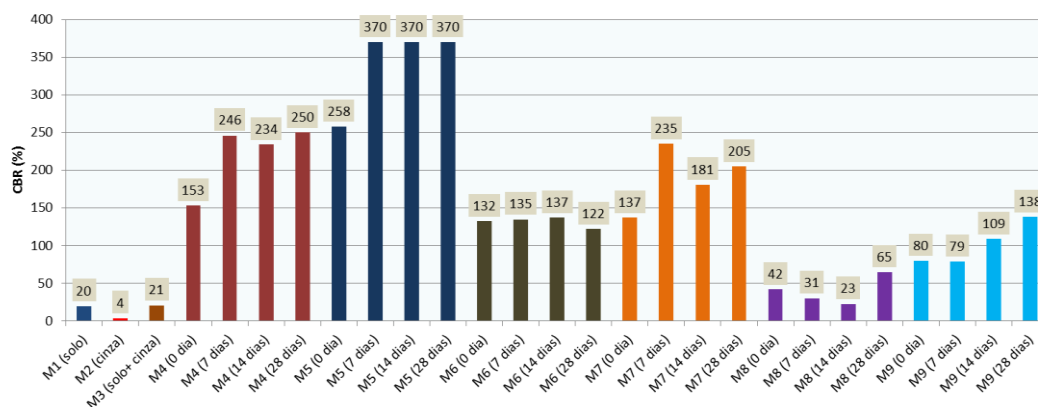
Todos os resultados de CBR estão ilustrados na

Figura 38. As misturas com 3% de cal (M6 e M7) e 5% de cal (M4 e M5) apresentaram altos CBRs. A adição imediata de 5% de cal nas cinzas (M4) acarretou um aumento do CBR de 4% para 153%. A adição desse mesmo teor de cal na mistura granulométrica de solo com cinza (M3) aumentou em mais de 10 vezes o valor de CBR, passando de 21% para 258%, conforme se pode visualizar na Figura 39. A cal em contato com a cinza dá origem às reações pozolânicas, as quais resultam na formação de compostos de cimentação, aumentando assim a resistência das misturas. Ressalta-se que os CPs ficam imersos por 4 dias antes de serem rompidos. Durante esse período de imersão as reações ocorreram rapidamente, de forma que altas resistências puderam ser observadas com tempo de cura imediato.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de CBR e expansão para todas as misturas ensaiadas

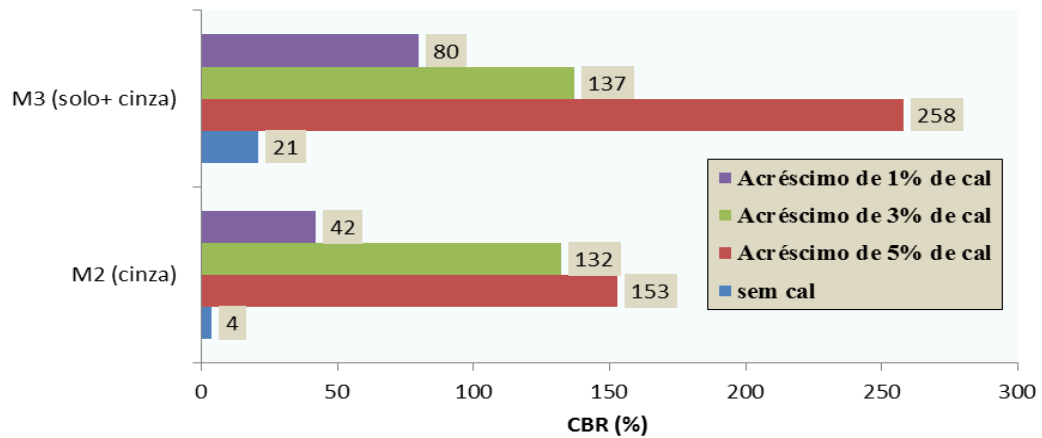
MISTURAS	TEMPOS DE CURA (dias)	CBR (%)	EXPANSÃO (%)
M1 (solo)	0	20	0,00
M2 (cinza)	0	4	1,37
M3 (solo+ cinza)	0	21	0,95
M4 (M2 + 5CAL)	0	153	0,74
	7	246	0,00
	14	234	0,00
	28	250	0,00
M5 (M3 + 5CAL)	0	258	1,50
	7	370	0,00
	14	370	0,00
	28	370	0,00
M6 (M2 + 3CAL)	0	132	0,33
	7	135	0,00
	14	137	0,00
	28	122	0,00
M7 (M3 + 3CAL)	0	137	0,36
	7	235	0,00
	14	181	0,00
	28	205	0,00
M8 (M2 + 1CAL)	0	42	0,25
	7	31	0,10
	14	23	0,00
	28	65	0,00
M9 (M3 + 1CAL)	0	80	0,36
	7	79	0,10
	14	109	0,00
	28	138	0,00

Fonte: Autora

Figura 38 - Resultados dos Ensaios de CBR para todas as misturas ensaiadas

Fonte: Autora

Figura 39 - Influência do acréscimo de cal nas misturas M2 e M3

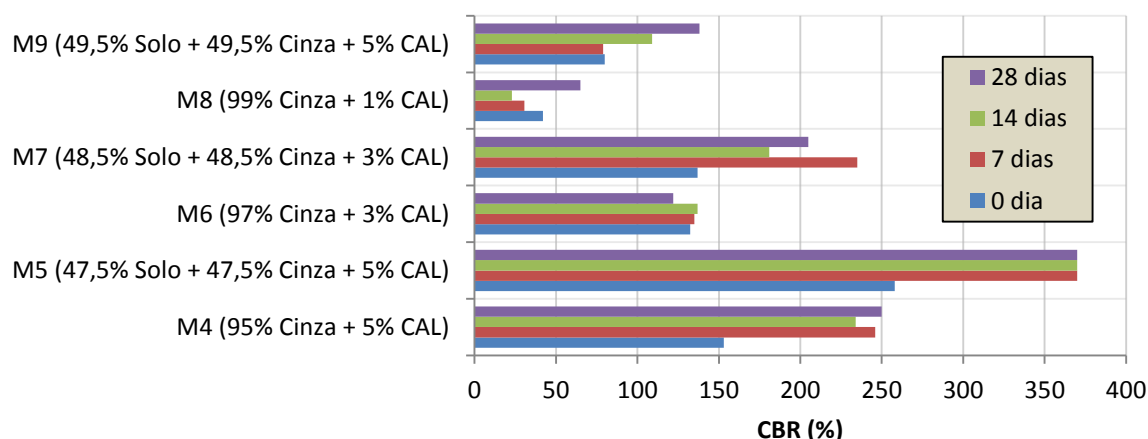


Fonte: Autora

Observa-se na Figura 39 que a resistência aumentou à medida que se aumentam os teores de cal. O que já era esperado, uma vez que as reações pozolânicas ocorrem devido à reação de íons de cálcio (Ca^{+2}) com a sílica e a alumina presentes nas cinzas. Assim, essas reações são proporcionais ao teor de cal na mistura. Salienta-se que, apesar de ter sido observado um aumento nos valores de CBR com a adição de 1% de cal, essa porcentagem foi muito pequena para se promover misturas homogêneas. Todos os ensaios foram realizados em tréplica e com 1% de cal não se verificou repetitividade nos valores dos ensaios.

Como as reações pozolânicas desenvolvem-se ao longo do tempo, foram observados, em geral, aumentos na resistência para maiores tempos de cura. A Figura 40 permite verificar que a parcela mais importante do ganho da resistência ocorreu nos primeiros 7 dias de cura, havendo uma tendência à estabilização a partir dos 14 dias.

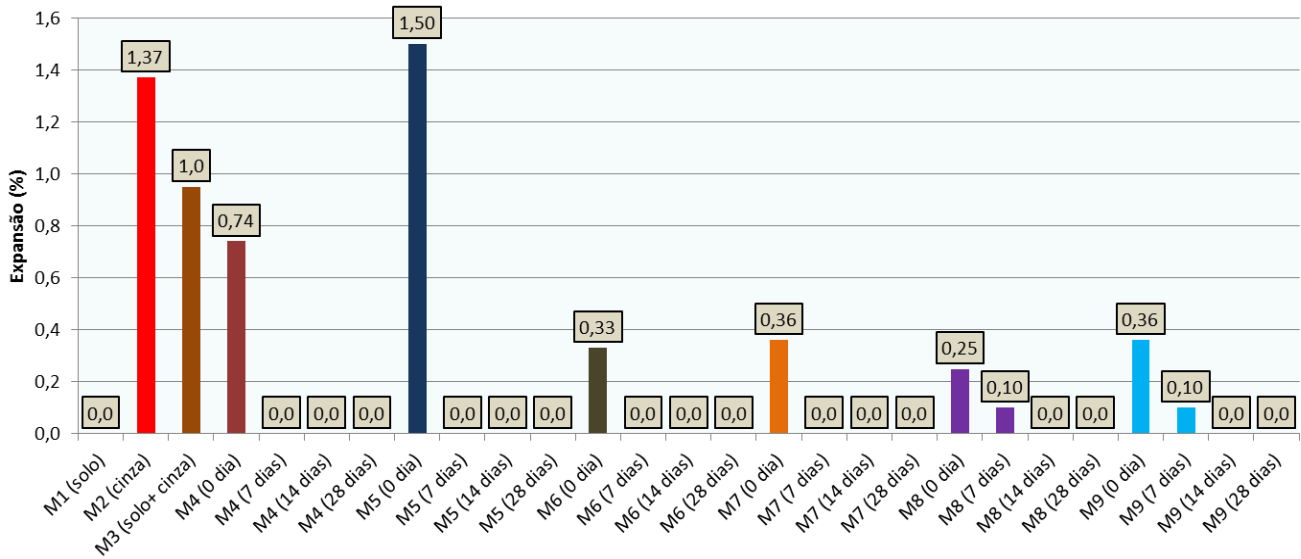
Figura 40 - Variação do CBR com o tempo de cura para todas misturas de M4 a M9



Fonte: Autora

Em alguns casos foram observados decréscimos nos valores de CBR com aumento nos tempos de cura. Como os decréscimos foram pequenos, pressupõe-se que nesses casos as reações estavam estabilizadas e que os decréscimos foram devidos à variabilidade inerente à execução do próprio ensaio de CBR.

Quanto à expansão, o solo natural não apresentou expansão e quando utilizado como estabilizante das cinzas reduziu a expansão desta para 0,95% (abaixo do limite mínimo para sub-base de 1%). Com a adição de cal, observaram-se, em geral, expansões apenas com cura imediata. Com o tempo, a cal em contato com a cinza dá origem às reações pozolânicas, as quais resultam na formação de compostos de cimentação, aumentando a resistência e diminuindo a expansão. A representação gráfica dos resultados de expansão está disposta na Figura 41.

Figura 41 - Resultados da expansão para todas as misturas ensaiadas

Fonte: Autora

4.2.3 Ensaios de resistência à compressão simples (RCS)

Os resultados dos ensaios de Resistência à Compressão Simples para todas as amostras e em todos os tempos de cura estão apresentados na Tabela 10. Os ensaios foram realizados em tréplica e os valores dispostos na tabela foram os valores médios obtidos.

Verificou-se que as misturas idealizadas sem a cal não resistiram à imersão, pelo fato de não apresentarem coesão. Com adição de cal, a partir de 7 dias de cura foram observados acréscimos nos valores de resistência.

Para a mistura de cinza com 1% de cal (M2), para os tempos de cura 0, 7 e 14 dias os corpos-de-prova praticamente não apresentaram coesão com a imersão, conforme visualizado na Figura 42.

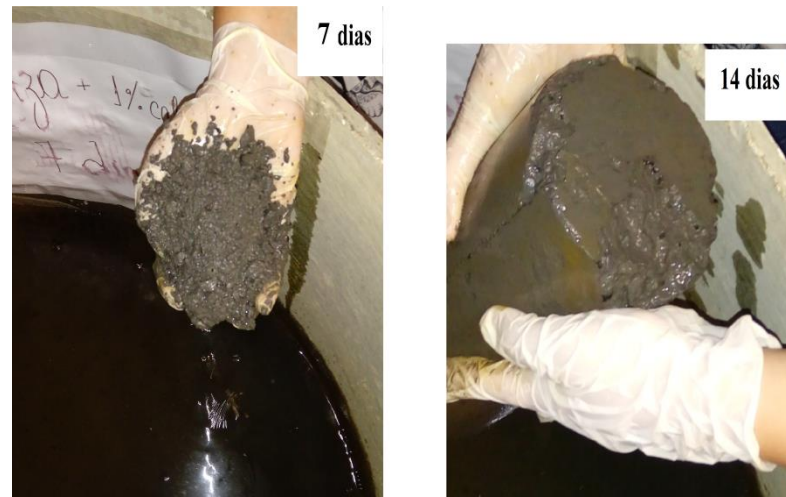
Tabela 10 - Resultados de RCS para todas as misturas ensaiadas

MISTURAS	TEMPOS DE CURA (dias)	RCS (MPa)
M1 (solo)	0	0,00
M2 (cinza)	0	0,00
M3 (solo+ cinza)	0	0,00
M4 (M2 + 5CAL)	0	0,00
	7	2,00
	14	2,20

	28	3,20
M5 (M3 + 5CAL)	0	0,00
	7	2,70
	14	4,50
	28	5,00
M6 (M2 + 3CAL)	0	0,00
	7	0,99
	14	1,11
	28	1,46
M7 (M3 + 3CAL)	0	0,00
	7	2,26
	14	2,10
	28	2,37
M8 (M2 + 1CAL)	0	0,00
	7	0,00
	14	0,00
	28	0,34
M9 (M3 + 1CAL)	0	0,00
	7	0,18
	14	0,20
	28	0,27

Fonte: Autora

Figura 42 - Aspecto dos corpos de prova de RCS da Mistura M2 após 7 e 14 dias de cura

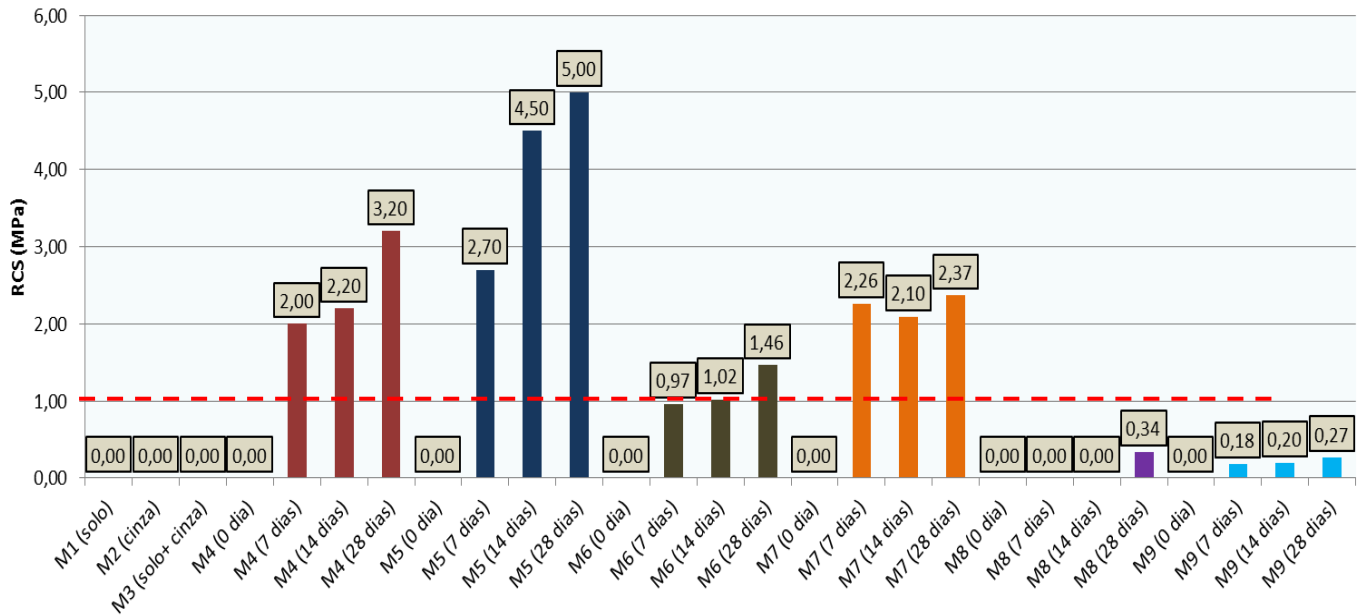


Fonte: Autora

Little (1995) indica que os valores de RCS mínimos exigidos pelo *Illinois Highway Department* para o uso de misturas de solo-cal em camadas de base é 1,034 MPa. Assim, conforme observado na Figura 43, as misturas M4, M5 e M7 apresentaram, com

tempos de cura acima de 7 dias, valores de resistência que possibilitam seu emprego em camadas de base de pavimentos à luz desse critério.

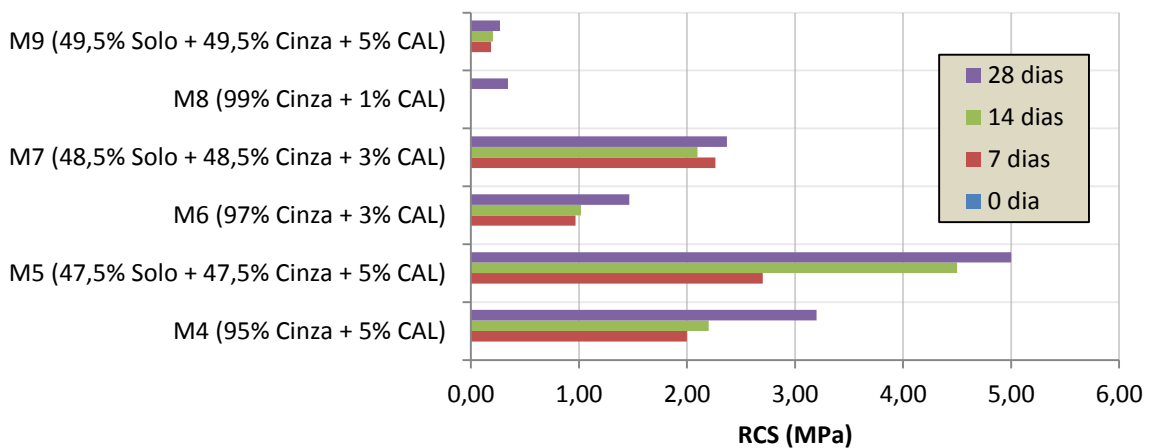
Figura 43 - Resultados dos ensaios de RCS



Fonte: Autora

Foram observados aumentos na resistência à compressão simples com o avanço do tempo de cura. A Figura 44 permite verificar que para os teores de 3% e 5% de cal a parcela mais importante do ganho da resistência ocorreu nos primeiros 7 dias de cura, havendo uma tendência à estabilização a partir dos 14 dias.

Figura 44 - Variação do RCS com o tempo de cura para as misturas de M4 a M9



Fonte: Autora

4.2.4 Ensaio de resistências à tração por compressão diametral (RTCD)

Os resultados dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) estão apresentados na Tabela 11 e na Figura 45.

Os resultados mostraram a mesma tendência observada nos ensaios de RCS. As misturas idealizadas sem a cal também não resistiram à imersão em água por 24 horas. A adição de 5% de cal elevou consideravelmente os valores de RTCD após 7 dias de cura, obtendo-se valores acima dos estipulados na literatura como adequados para uso em camadas de base (0,1 MPa).

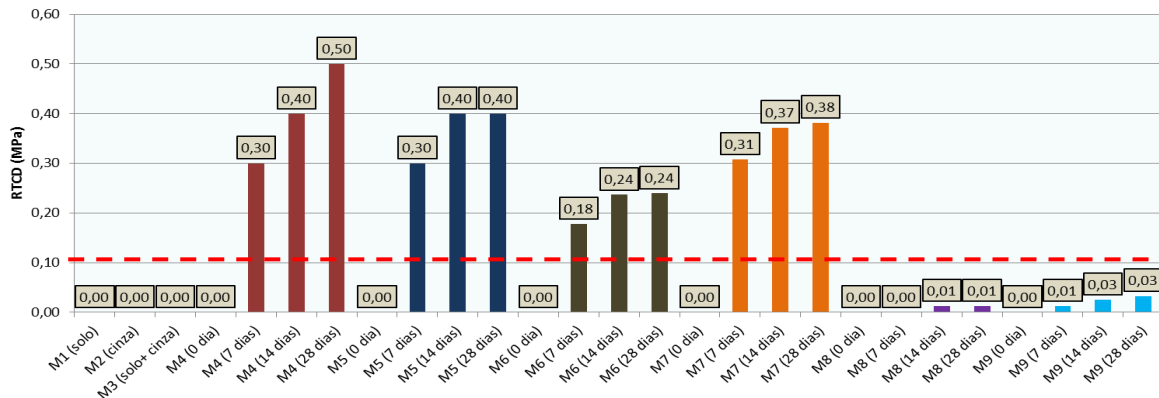
Tabela 11 - Resultados de RTCD para todas as misturas ensaiadas

MISTURAS	TEMPOS DE CURA (dias)	RT (MPa)
M1 (solo)	0	0,00
M2 (cinza)	0	0,00
M3 (solo+ cinza)	0	0,00
M4 (M2 + 5CAL)	0	0,00
	7	0,30
	14	0,40
	28	0,50
M5 (M3 + 5CAL)	0	0,00
	7	0,30
	14	0,40
	28	0,40
M6 (M2 + 3CAL)	0	0,00
	7	0,18
	14	0,24
	28	0,24
M7 (M3 + 3CAL)	0	0,00
	7	0,31
	14	0,37
	28	0,38

M8 (M2 + 1CAL)	0	0,00
	7	0,00
	14	0,01
	28	0,01
M9 (M3 + 1CAL)	0	0,00
	7	0,01
	14	0,03
	28	0,03

Fonte: Autora

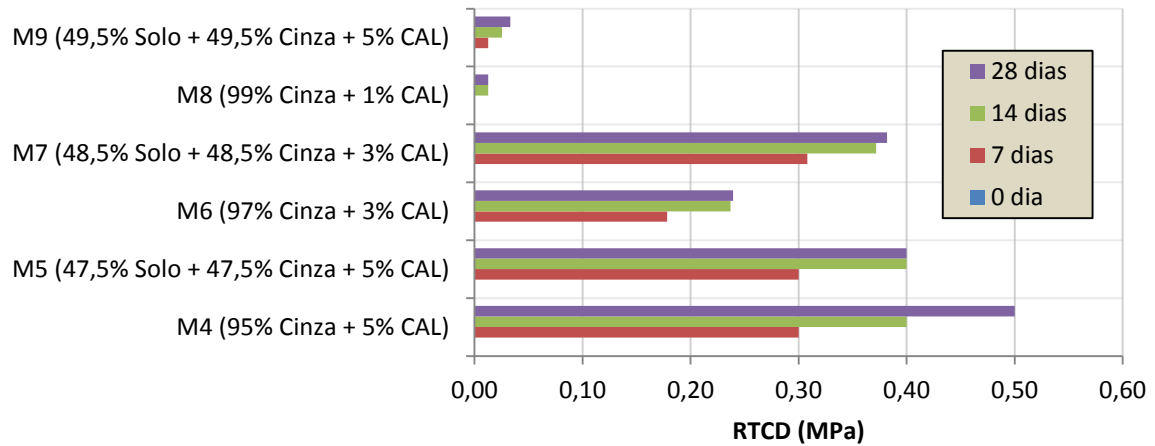
Figura 45 - Resultados de RTCD



Fonte: Autora

Observa-se que as misturas M4, M5, M6 e M7 apresentaram valores de RTCD que a tornaram aptas, de acordo com esse critério, para utilização em camadas de pavimentos. É possível que elevados valores de RTCD representem problemas quanto ao trincamento da camada de base. Sendo assim, a camada estabilizada com cal pode necessitar de algum tipo de tratamento para impedir a reflexão das trincas para o revestimento.

A Figura 46 ilustra o comportamento da RTCD com o aumento do tempo de cura, observando-se um comportamento semelhante ao obtido nos ensaios de RCS.

Figura 46 - Variação da RTCD com o tempo de cura para as misturas de M4 a M9.

Fonte: Autora

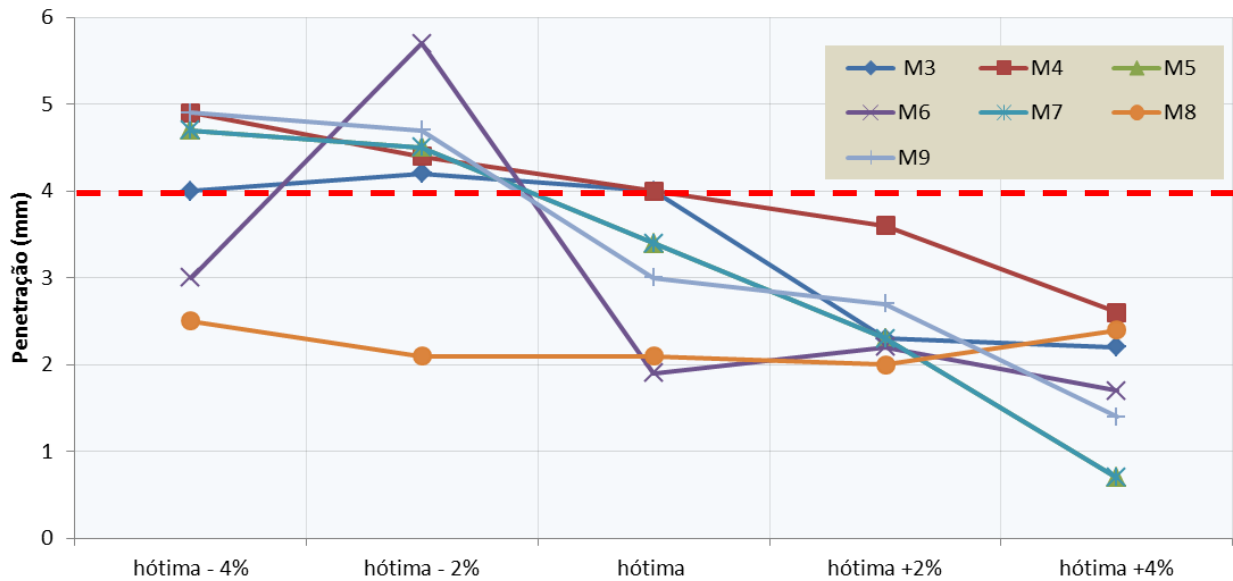
4.2.5 Ensaios de imprimação

A imprimação foi testada para as misturas estabilizadas (M3, M4, M5, M6, M7, M8 e M9) em cinco teores diferentes de umidade: $h_{ót}$, $h_{ót} \pm 2\%$ e $h_{ót} \pm 4\%$. As misturas naturais de solo (M1) e de cinza (M2) não foram avaliadas, por não apresentarem propriedades mecânicas aptas para aplicação em bases de pavimentos. Para cada mistura, foram moldados três corpos-de-prova em cada teor. A penetração média do CM-30 em cada uma das misturas estudadas e para cada teor de umidade está apresentada na Tabela 12 e ilustrada na Figura 47.

Tabela 12 - Penetração betuminosa das misturas estabilizadas

	PENETRAÇÃO (mm)				
	$h_{ótima} - 4\%$	$h_{ótima} - 2\%$	$h_{ótima}$	$h_{ótima} + 2\%$	$h_{ótima} + 4\%$
M3	4,0	4,2	4,0	2,3	2,2
M4	4,9	4,4	4,0	3,6	2,6
M5	4,7	4,5	3,4	2,3	0,7
M6	3,0	5,7	1,9	2,2	1,7
M7	4,7	4,5	3,4	2,3	0,7
M8	2,5	2,1	2,1	2,0	2,4
M9	4,9	4,7	3,0	2,7	1,4

Fonte: Autora

Figura 47 - Penetração betuminosa das misturas idealizadas

Fonte: Autora

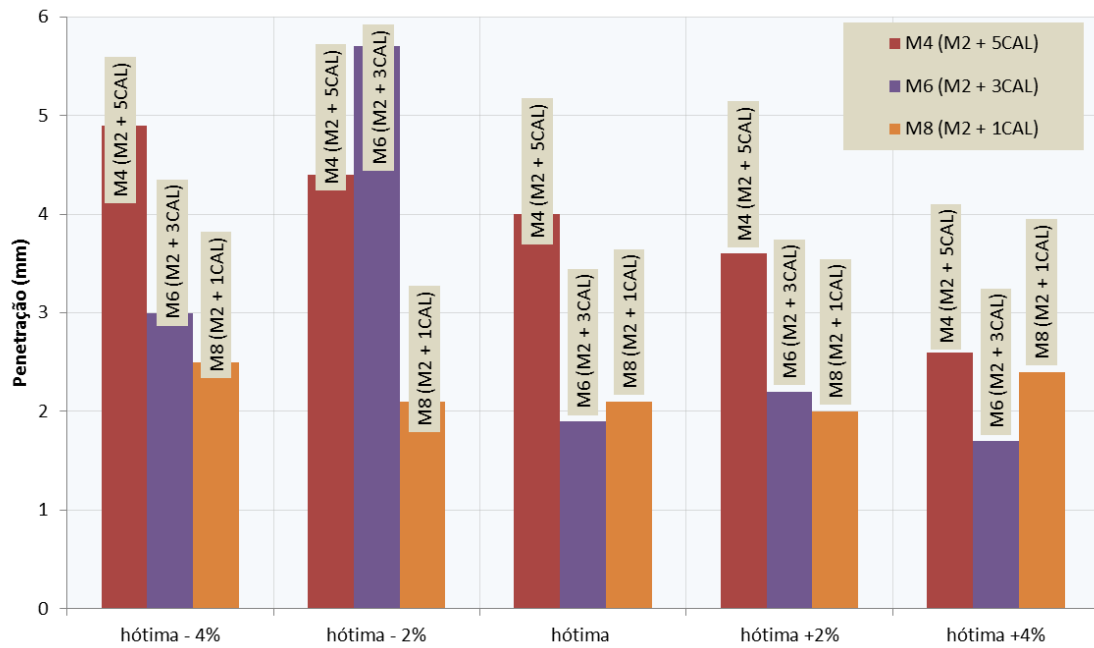
O ligante tem de penetrar na base para que esta desempenhe bem as suas funções, sendo recomendada para um bom serviço uma penetração mínima de 4 a 5 mm na base (HITCH e RUSSEAL, 1977). As pesquisas mais recentes, como as de Rabêlo (2006) e Almeida (2017), tomam como parâmetro para aceitação da imprimação um valor mínimo de penetração de 4 mm e máximo de 10 mm.

Observou-se que houve uma tendência ao decréscimo de penetração das misturas com o aumento da umidade de compactação, de forma que em todas as misturas testadas na umidade ótima e acima da ótima a penetração foi mínima (4 mm) ou menor que o limite mínimo estabelecido como aceitável. No entanto, na umidade ótima $h_{ót} - 2\%$, umidade usualmente utilizada no estado do Ceará para compactação em campo em função das altas taxas de evaporação típicas de um clima tropical quente, as misturas M3, M4, M5 e M7 apresentaram penetração dentro do limite aceitável, indício de que tais misturas, ao serem empregadas como bases teria uma boa adesão com a mistura asfáltica. Sabe-se também que as penetrações obtidas em laboratório tendem a ser menores do que aquelas obtidas em campo, em função da forma de distribuição do ligante em laboratório (RABÊLO, 2006; ALMEIDA, 2017).

Devido às reações pozolânicas, é esperado que com a adição de cal seja gerada uma massa mais solidificada da mistura, com uma maior integridade estrutural. Essa

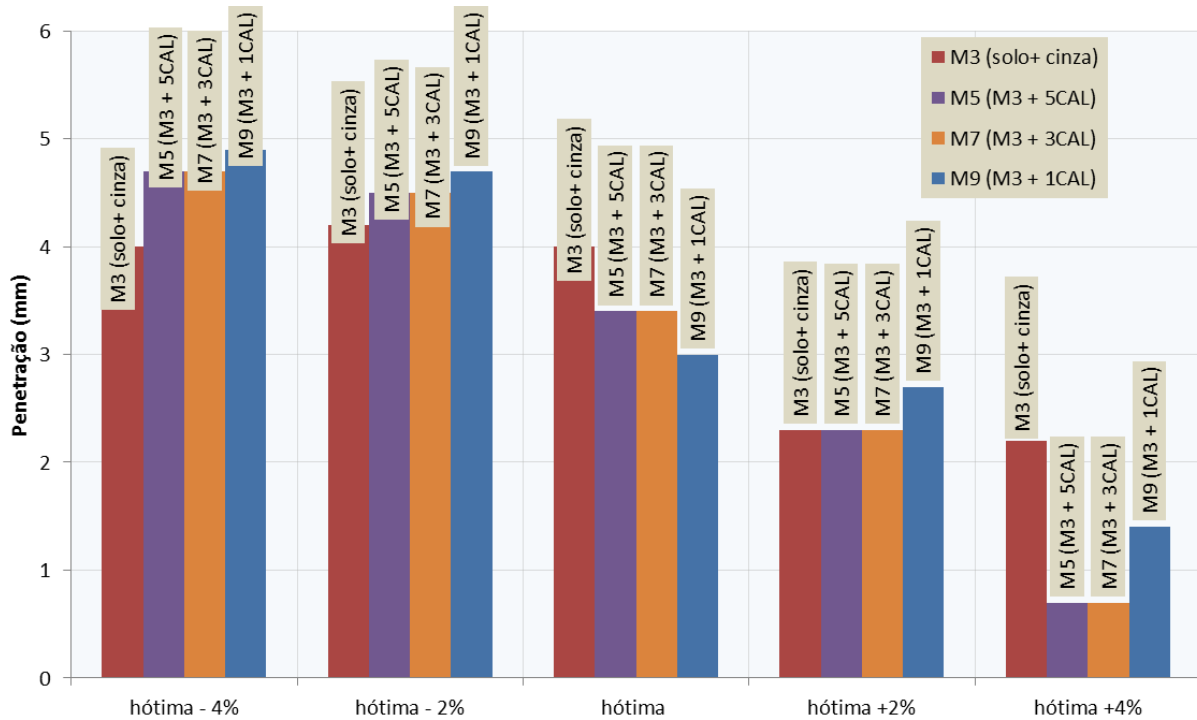
solidificação acarretaria uma diminuição da capacidade de penetração do ligante. A Figura 48 ilustra o comportamento da penetração da ligante com o acréscimo do teor de cal na mistura M2 (cinzas) e a Figura 49 ilustra a influência do acréscimo do teor de cal na mistura M3 (solo+cinza).

Figura 48 - Influência do acréscimo do teor de cal na mistura M2



Fonte: Autora

Figura 49 - Influência do Acréscimo do Teor de cal na mistura M3



Fonte: Autora

Observou-se, no entanto, que as penetrações não seguiram padrão com o aumento do teor de cal. As penetrações dos CPs com 5% de cal foram maiores do que para teores menores em alguns corpos-de-prova. Ao romper os CPs, eles apresentavam penetrações bastante heterogêneas quando medidas em diferentes pontos do corpo-de-prova. Isso dificultou o processo de leitura das medidas e pode explicar a ausência de um padrão de comportamento da penetração betuminosa com o aumento do teor de cal.

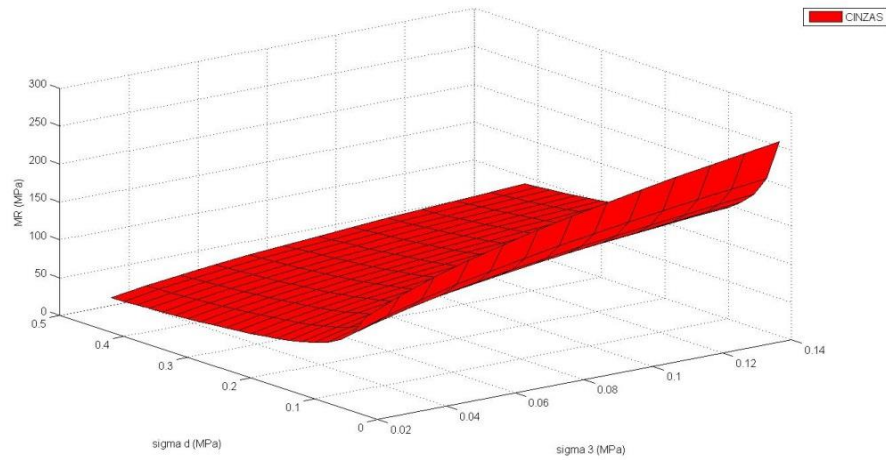
4.2.6 Ensaios de módulo de resiliência

Os resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR) estão dispostos na Tabela 13. Os dados obtidos dos ensaios foram importados para o programa LabFit para obtenção dos coeficientes do modelo composto ($MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$). Apesar do baixo valor de correlação observado para algumas amostras, o modelo composto ainda foi o que melhor representou as misturas.

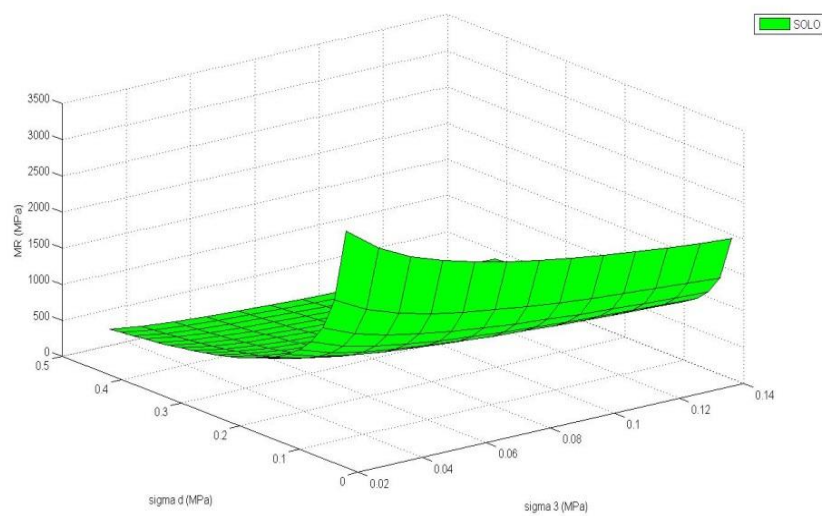
Tabela 13 - Resultados dos Ensaios de MR

Misturas	Tempos de Cura (dias)	Parâmetros do MR ($MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma_d^{-K_3}$)				MR Médio (MPa)
		K_1	K_2	K_3	R^2	
M1 (solo)	0	139,3	-0,269	-0,538	0,78	161
M2 (cinza)	0	133,5	0,351	-0,343	0,53	111
M3 (solo+ cinza)	0	16,79	0,16	-0,3892	0,70	149
M4 (M2 + 5CAL)	0	167,6	-0,444	-0,087	0,57	501
	7	91,42	-0,101	-0,731	0,59	902
	14	260,7	0,106	0,089	0,52	1305
	28	1430	0,455	-0,405	0,47	1149
M5 (M3 + 5CAL)	0	149,2	-0,065	-0,513	0,75	496
	7	1943	0,397	-0,2	0,66	698
	14	647,1	0,281	0,23	0,58	849
	28	318,3	0,114	0,092	0,52	1007
M6 (M2 + 3CAL)	0	338,4	-0,444	-0,2728	0,75	205
	7	608,9	0,21	-0,731	0,90	398
	14	1144	0,259	-0,209	0,90	450
	28	1258	0,134	-0,1115	0,55	895
M7 (M3 + 3CAL)	0	433,9	0,1274	-0,174	0,55	250
	7	578,4	-0,087	-0,1405	0,77	490
	14	1040	0,06937	-0,17	0,55	593
	28	2649	0,2823	-0,199	0,50	735
M8 (M2 + 1CAL)	0	204,4	0,228	0,7208	0,65	54
	7	430,6	0,3903	-0,02323	0,72	98
	14	1238	0,3622	0,216	0,91	303
	28	318,3	0,3402	-0,056	0,75	228
M9 (M3 + 1CAL)	0	281,9	0,087	-0,1668	0,65	225
	7	541,3	0,159	-0,164	0,72	510
	14	790,3	0,171	-0,175	0,63	503
	28	525,9	0,182	-0,302	0,78	478

A Figura 50 e Figura 51 mostram que o comportamento da cinza (M2) e do solo (M3) para o modelo composto testado, apresentou maiores dependências com a tensão desviatória do que com a tensão de confinamento.

Figura 50 - Representação do MR (M2)

Fonte: Autora

Figura 51 - Representação do MR (M3)

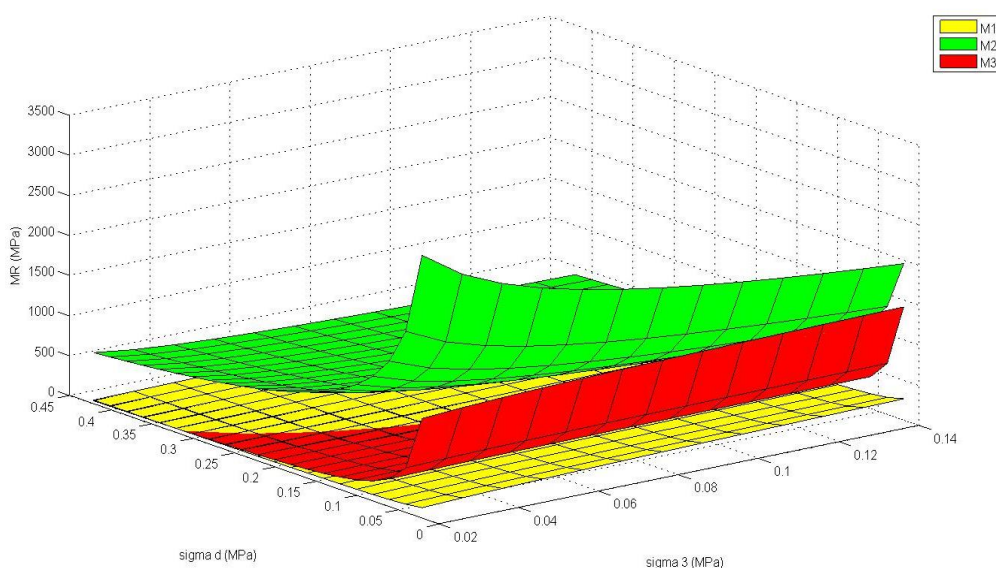
Fonte: Autora

O efeito da estabilização granulométrica no comportamento das misturas com relação ao Módulo de Resiliência pode ser constatado na Figura 52. Observa-se que os valores de MR para a mistura granulométrica M3 foram intermediários entre os das misturas M1 e M2, demonstrando o potencial do solo de atuar com um estabilizante granulométrico das cinzas.

Barros (2015) estudou cinzas volantes advindas da mesma termelétrica em estudo e um solo regional com características granulométricas similares ao estudado nesta pesquisa. Apesar da autora não dispor dos MRs médios de suas misturas, pelas ilustrações do

comportamento do MR com as tensões aplicadas foi observado que os valores para o solo regional obtidos nesta pesquisa se assemelham aos de Barros (2015). Com relação às cinzas, os valores de MR observados neste estudo é cerca da metade do constatado em Barros (2015). Isso ocorreu porque as cinzas estudadas pela referida autora foram cinzas puramente volantes, com propriedades mecânicas superiores as das cinzas abordadas nesta pesquisa.

Figura 52 - Efeito da Estabilização Granulométrica sobre o MR



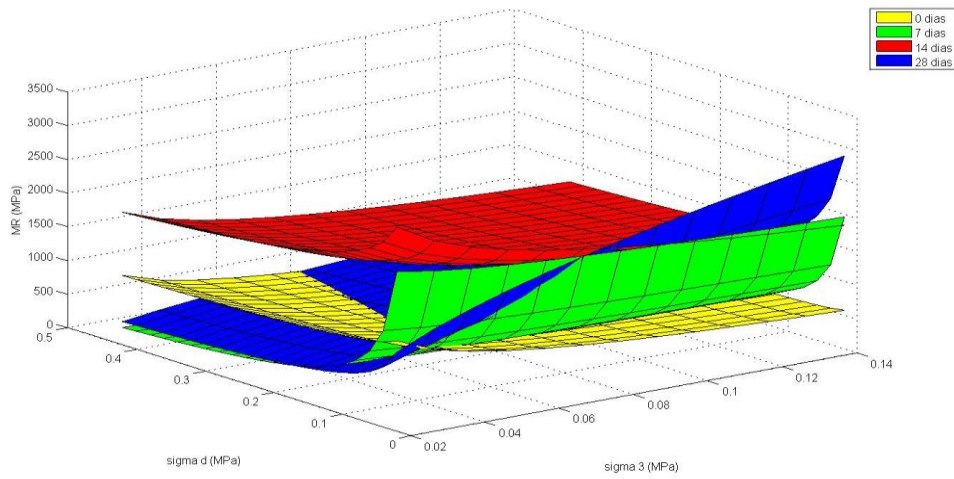
Fonte: Autora

Verificaram-se também os efeitos do tempo de cura nos valores de MR. As Figuras (Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57 e Figura 58) ilustram o comportamento resiliente das misturas de M4 a M9 para os tempos de cura imediato, 7, 14 e 28 dias.

Barros (2015) estudou o comportamento resiliente de misturas de cinzas estabilizadas de mesmos teores aos estudados nas misturas M4 e M5. Na mistura M4 os valores de MR foram próximos aos observados pela referida autora, no entanto o comportamento resiliente da M5 deste estudo foi melhor que o de Barros (2015), apresentando MRs mais elevados (praticamente o dobro).

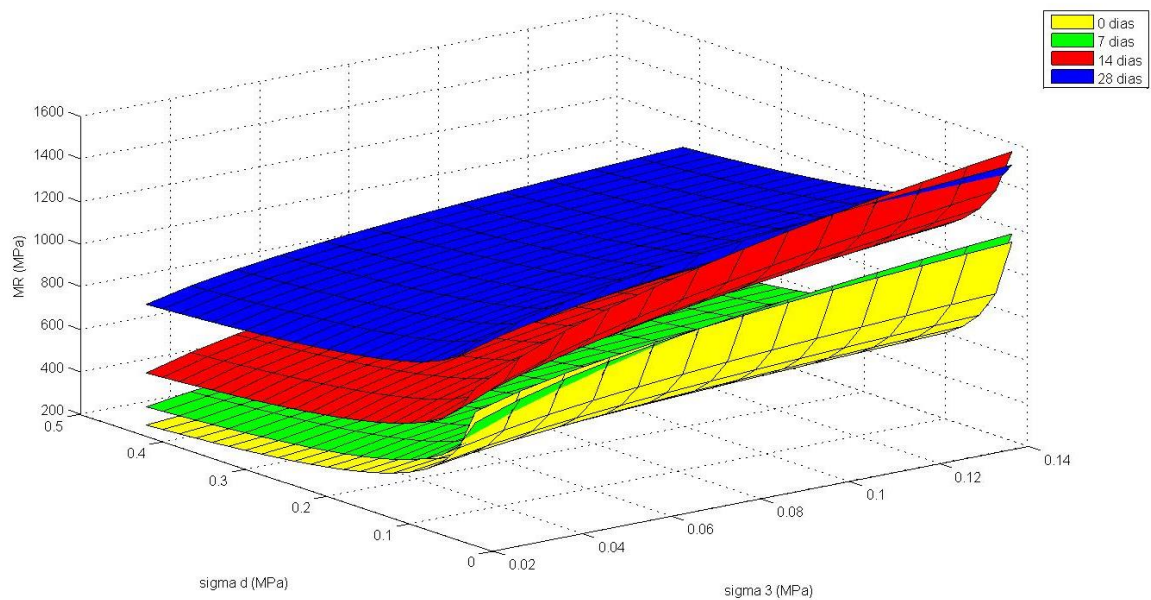
Como já era esperado, as misturas apresentaram, em geral, melhores comportamentos resilientes para maiores tempos de cura. As reações pozolânicas entre a cal e os minerais presentes no solo e nas cinzas podem durar dias, às vezes até anos, justificando a melhoria das propriedades mecânicas das misturas com o avanço no período de cura.

Figura 53 - Comportamento do MR da mistura M4 para diferentes tempos de cura

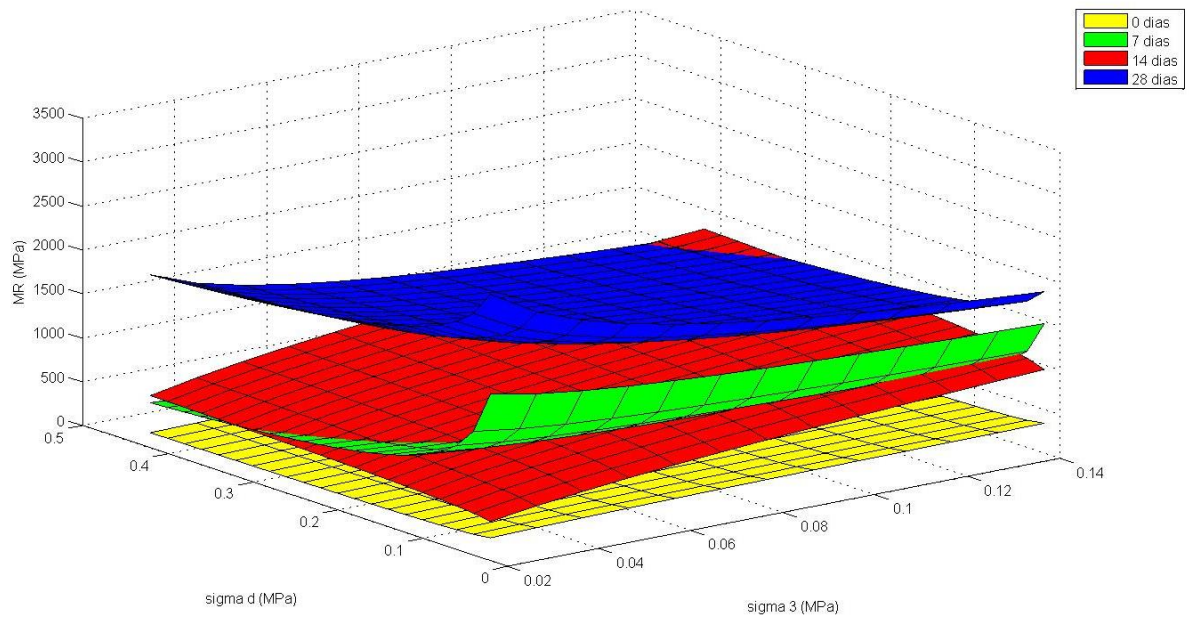


Fonte: Autora

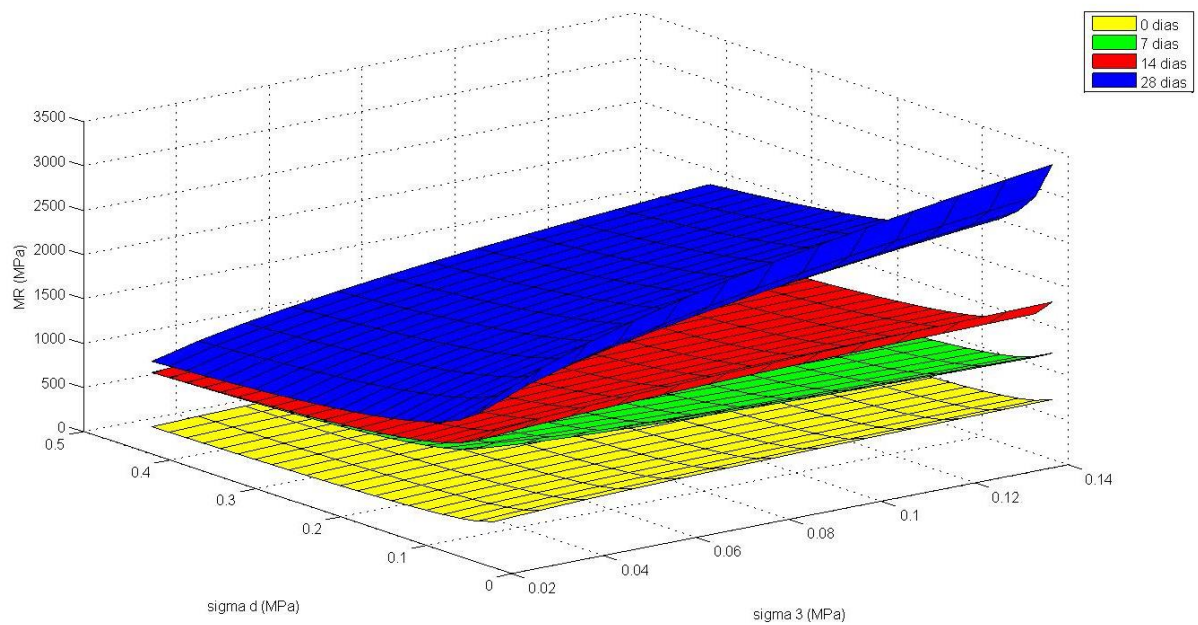
Figura 54 - Comportamento do MR da mistura M5 para diferentes tempos de cura



Fonte: Autora

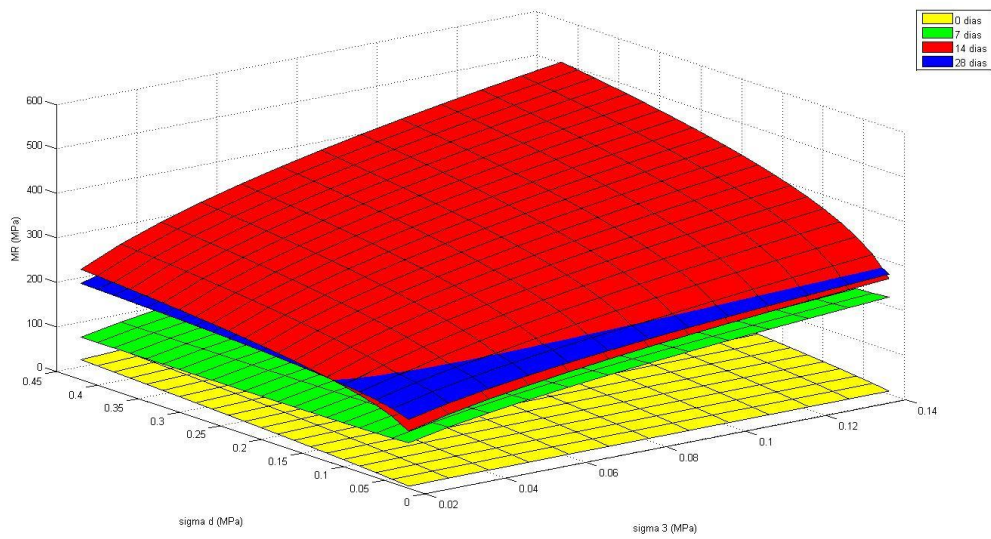
Figura 55 - Comportamento do MR da mistura M6 para diferentes tempos de cura

Fonte: Autora

Figura 56 - Comportamento do MR da mistura M7 para diferentes tempos de cura

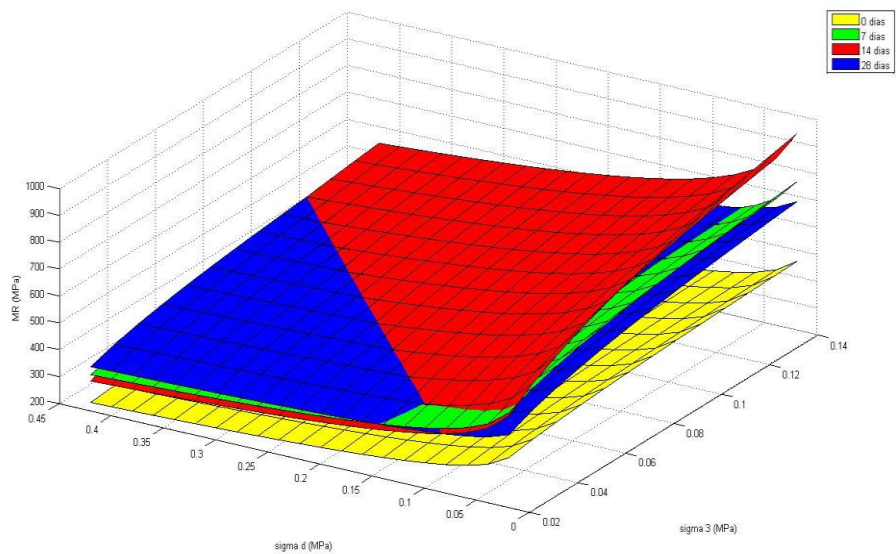
Fonte: Autora

Figura 57 - Comportamento do MR da mistura M8 para diferentes tempos de cura



Fonte: Autora

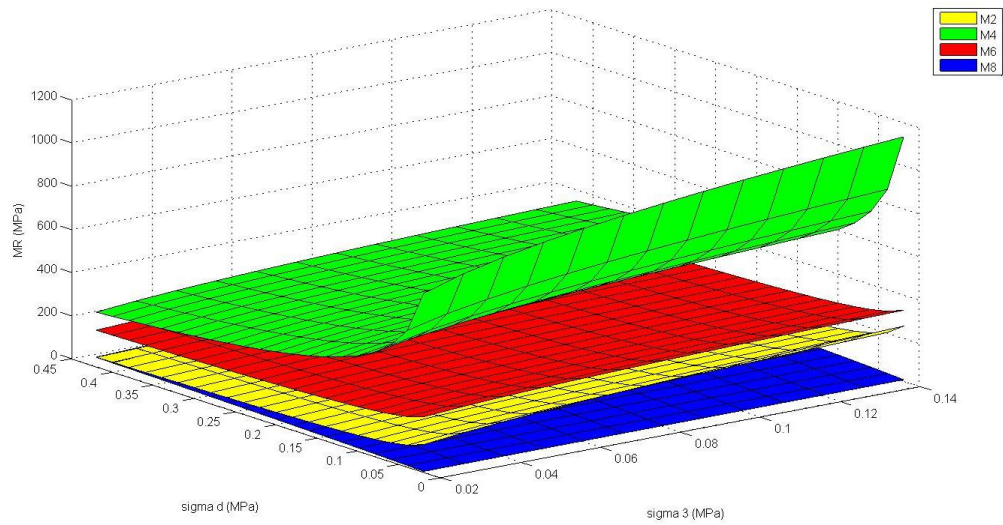
Figura 58 - Comportamento do MR da mistura M9 para diferentes tempos de cura



Fonte: Autora

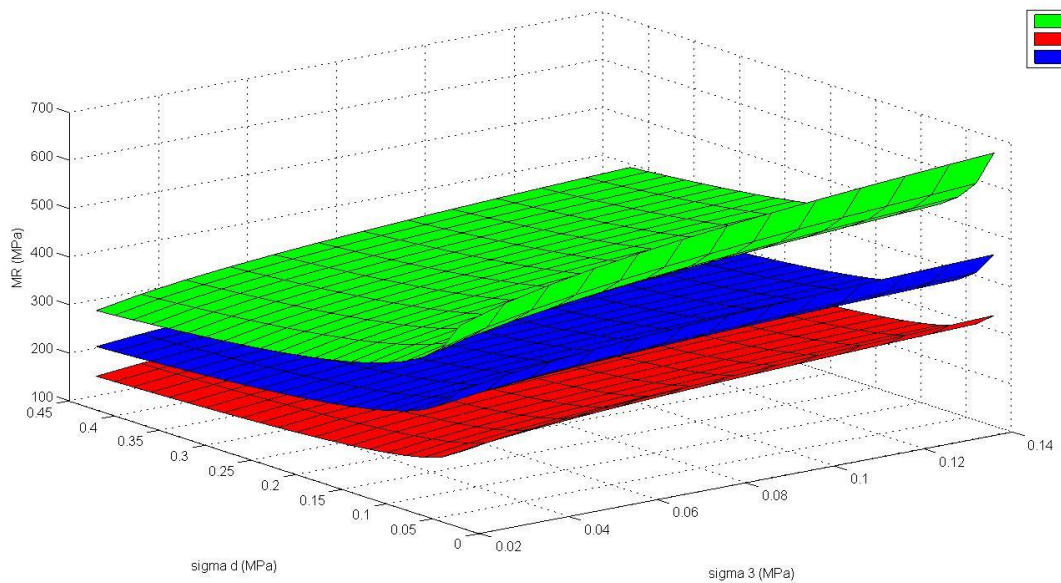
Analisou-se o efeito do teor de cal, comparando-se os resultados de MR nas misturas naturais de cinza e de solo com as misturas estabilizadas com adição de 1%, 3% e 5% de cal. A Figura 59 e a Figura 60 ilustram o comportamento observado. Em geral, teores de cal mais elevados resultaram em estabilizações mais efetivas, melhorando assim o comportamento resiliente das misturas.

Figura 59 - Efeito dos diferentes teores de cal na mistura M2



Fonte: Autora

Figura 60 - Efeito dos diferentes teores de cal na mistura M3



Fonte: Autora

4.2.7 Seleção das melhores misturas para camadas de pavimentos

Tendo em vista os resultados observados na 2ª Etapa do Programa Experimental, foi selecionada a amostra M3 (50%S+50%C) como “melhor mistura” para uso em camadas

de sub-bases e escolhidas as amostras M4 (Cinza+5% Cal) e M5 (Solo + Cinza+5% Cal) como as mais adequadas para uso em bases de pavimentos.

A escolha da mistura M3 como sub-base ocorreu por ela atender aos parâmetros mecânicos mínimos de resistência, além do ponto de vista econômico ser vantajosa em relação às misturas com a cal. Para camadas de base, torna-se necessário a escolha de misturas mais resistentes, tendo as amostras M4 e M5 apresentado resistências bem superiores às exigidas para uso em camadas de pavimentos. Essas duas misturas apresentaram altos valores de CBR, RCS, RTCD, MR adequados, além de terem apresentado penetração de ligante satisfatória na umidade ótima $h_{ót} - 2\%$, umidade usualmente obtida após compactação no estado do Ceará.

Assim, foram selecionadas para a 3ª e 4ª Etapas Metodológicas as amostras M3, M4 e M5. Pelo fato de as cinzas serem o objeto de estudo desta pesquisa e visando-se proceder análises comparativas dos resultados obtidos com a cinza natural e com as misturas estabilizadas, optou-se por realizar os ensaios de deformação permanente e as análises ambientais também na mistura M2.

4.3 Terceira etapa do programa experimental

Nesta etapa objetivou-se verificar a deformação permanente nas misturas selecionadas. Os resultados estão dispostos na Tabela 14 onde constam os valores da deformação permanente total após a primeira carga (ϵ^1) e a deformação acumulada com 6.000 ciclos (ϵ^{6000}) e 10.000 ciclos (ϵ^{10000}). Consta também o acúmulo de deformação permanente em 60% das cargas aplicada ($\epsilon^1/\epsilon^{6000}$) e com 100% da carga aplicada ($\epsilon^{6000}/\epsilon^{10000}$).

O acúmulo total de deformação permanente se concentrou em todos os ensaios realizados nas primeiras 6.000 aplicações de carga, mostrando que após este período as misturas tendem a se estabilizar. Observa-se que em praticamente todos os ensaios realizados o acúmulo de deformação permanente com 100% da carga aplicada ($\epsilon^{6000}/\epsilon^{10000}$) foi acima de 90%, demonstrando que a deformação permanente se concentrou nos primeiros 6000 ciclos.

Tabela 14 - Resultados dos Ensaios de Deformação Permanente

MISTURAS	Tensão (kPa)		ϵ^1 (mm)	ϵ^{6000} (mm)	ϵ^{10000} (mm)	$\epsilon^1/\epsilon^{6000}$ (%)	$\epsilon^{6000}/\epsilon^{10000}$ (%)
	σ_d	σ_3					
M2	40	40	0,416	0,97	0,993	42,89	97,68
	80		1,125	1,875	1,948	60,00	96,25
	120		3,073	3,823	3,896	80,38	98,13
	160		3,896	11,536	13,543	33,77	85,18
M3	40	40	0,756	1,781	1,804	42,45	98,73
	80		1,816	4,135	4,223	43,92	97,92
	120		4,233	6,268	6,547	67,53	95,74
	160		6,543	9,461	10,175	69,16	92,98
M4 (0 DIA)	40	40	0,16	0,569	0,548	28,12	103,83
	80		0,553	0,62	0,596	89,19	104,03
	120		0,595	0,596	0,586	99,83	101,71
	160		0,596	0,613	0,636	97,23	96,38
M4 (7 DIAS)	40	40	0,032	0,237	0,237	13,50	100,00
	80		0,241	0,295	0,298	81,69	98,99
	120		0,303	0,352	0,356	86,08	98,88
	160		0,353	0,402	0,406	87,81	99,01
M5 (0 DIA)	40	40	0,259	0,599	0,566	43,24	105,83
	80		0,845	1,175	1,102	71,91	106,62
	120		1,122	1,267	1,207	88,56	104,97
	160		1,217	1,302	1,203	93,47	108,23
M5 (7 DIAS)	40	40	0,025	0,052	0,058	48,08	89,66
	80		0,062	0,134	0,138	46,27	97,10
	120		0,145	0,149	0,153	97,32	97,39
	160		0,159	0,161	0,165	98,76	97,58

Fonte: Autora

Constata-se que nas amostras M2 e M3, quando aplicadas tensões desviatórias acima de 80 kPa, o afundamento total ao final do ensaio foi acima de 0,5%, valor limite para a interrupção do ensaio de acordo com a norma europeia BS EN 13286-7:2004. Isso comprova que a aplicação de 10.000 ciclos é suficiente para uma avaliação aceitável da deformação permanente.

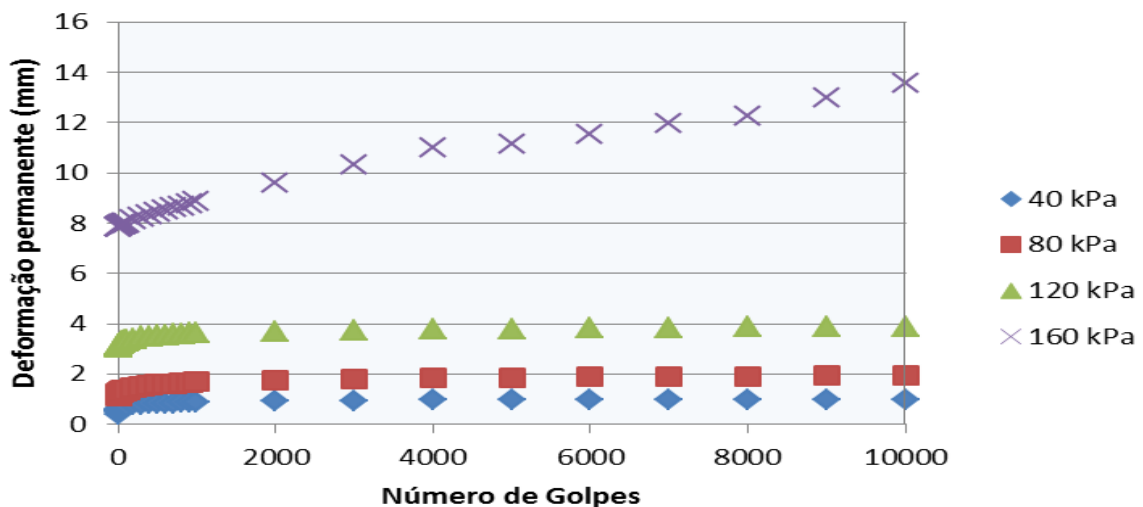
Guimarães (2009) afirma que o valor admissível para deformação permanente em um pavimento é de, no máximo, 12,5 mm. Observa-se que as misturas M2 e M3 apresentaram altos valores de deformação permanente, com a mistura M2 apresentando ao fim do ensaio 13,54 mm e a mistura M3 com uma DP acumulada de 10,17 mm. Lopes *et al.* (2012)

estudaram a deformação permanente de um solo estabilizado com cinzas volantes e pesadas, com e sem adição de cal. O solo estudado pelos autores também era um solo arenoso e foi constatado que a adição de cinzas volantes com cal melhorou significativamente as propriedades mecânicas dos solos, a depender do teor de cinzas, umidade e número de ciclos de carga.

Zaga (2016) ao estudar a deformação permanente em uma areia argilosa (A-6) observou que, para o par de tensões confinante de 40 kPa e desvio de 120 kPa, a deformação permanente obtida ao final de 150.000 ciclos foi de 2,415 mm. Para esse mesmo par de tensão, o solo nesse estudo apresentou uma deformação de quase duas vezes maior, com 4,233 mm (ao final dos 10.000 ciclos).

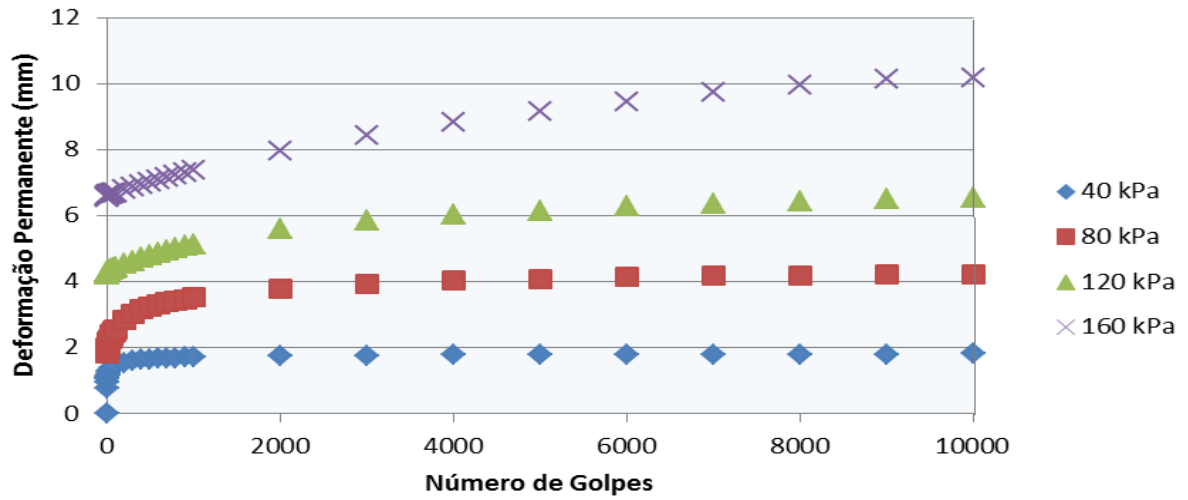
A deformação permanente observada nas amostras com cal (M4 e M5) com tempo de cura imediato apresentaram valores acima de 100% na relação $\varepsilon^{6000}/\varepsilon^{10000}$. Ou seja, ocorreu um decréscimo da deformação permanente durante o ensaio. Com tempo de cura de 7 dias, as amostras M4 e M5 apresentaram um pequeno acréscimo da deformação permanente entre os ciclos 6000 e 10000, porém deformações negativas também foram observadas em alguns ciclos. Para facilitar a visualização desse fenômeno, os resultados gráficos dos ensaios de deformação permanente estão apresentados nas figuras que se seguem (Figura 61, Figura 62, Figura 63, Figura 64, Figura 65 e Figura 66). Reforça-se que alguns ensaios de DP tiveram problemas durante sua execução ou apresentaram resultados inesperados, gerando a necessidade de repetição desses ensaios.

Figura 61 - Deformação permanente da amostra M2



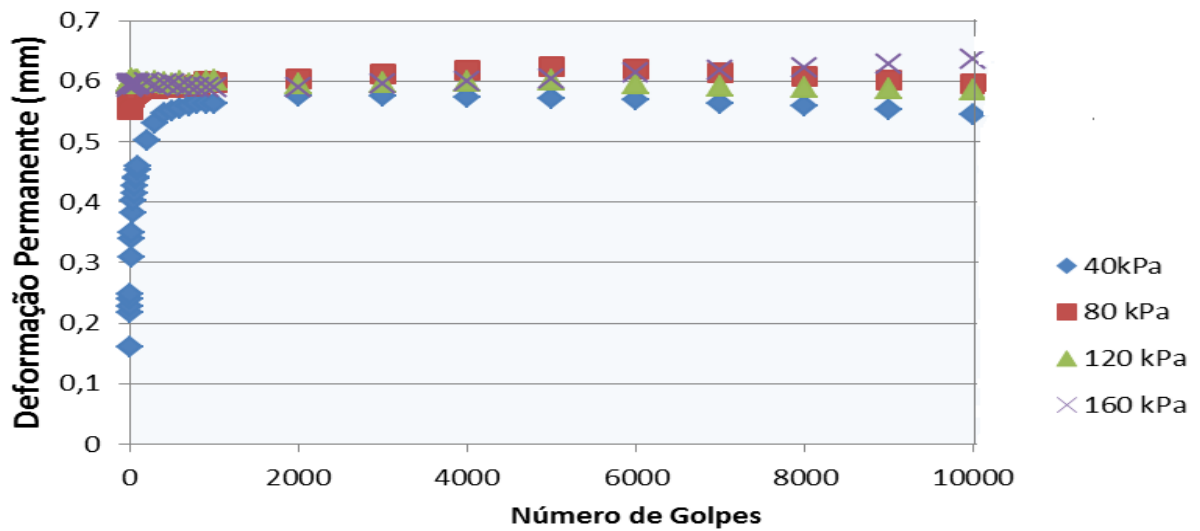
Fonte: Autora

Figura 62 - Deformação permanente da amostra M3



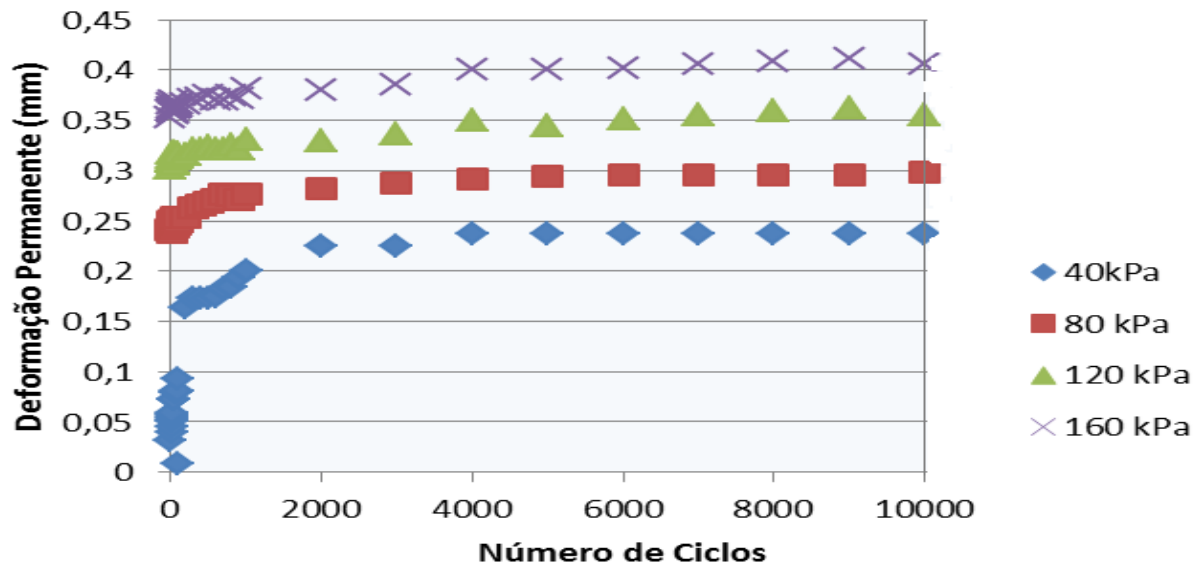
Fonte: Autora

Figura 63 - Deformação permanente da mistura M4 com tempo de cura de 0 dia



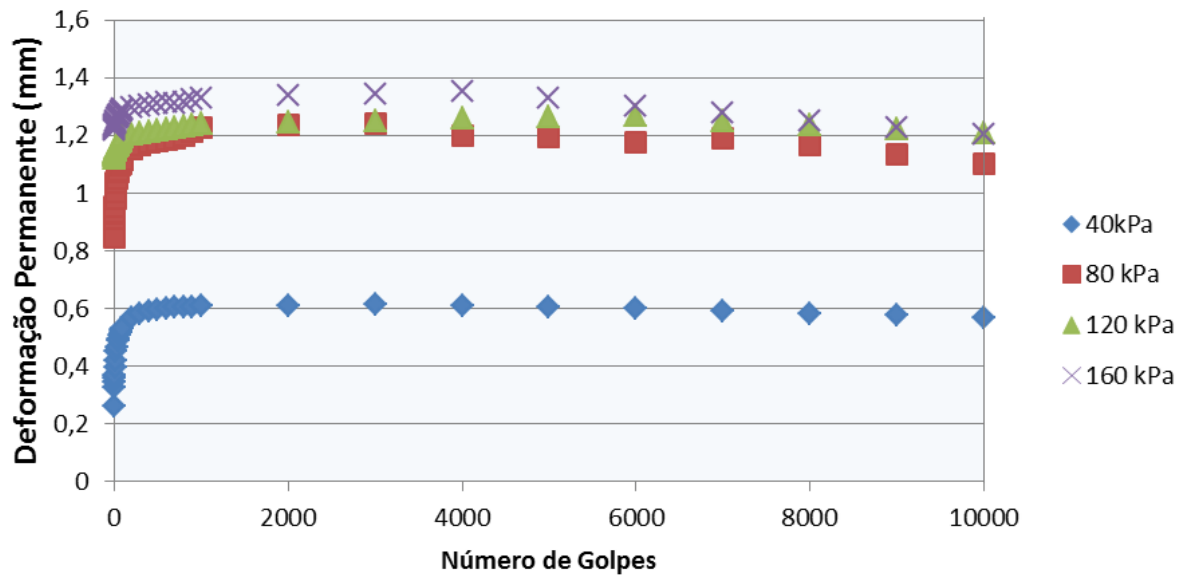
Fonte: Autora

Figura 64 - Deformação permanente da mistura M4 com 7 dias de cura



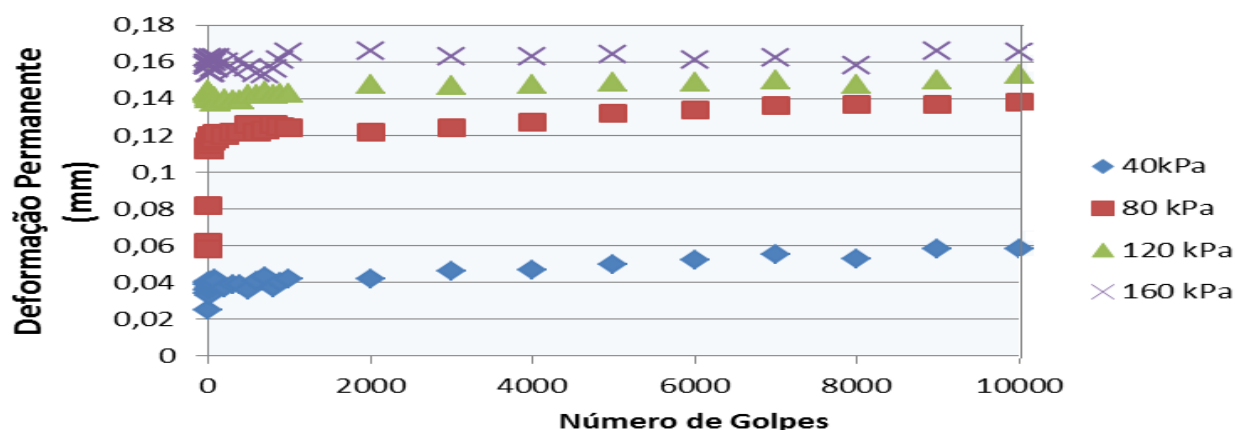
Fonte: Autora

Figura 65 - Deformação permanente da mistura M5 com 0 dia de cura



Fonte: Autora

Figura 66 - Deformação permanente da mistura M5 com 7 dias de cura

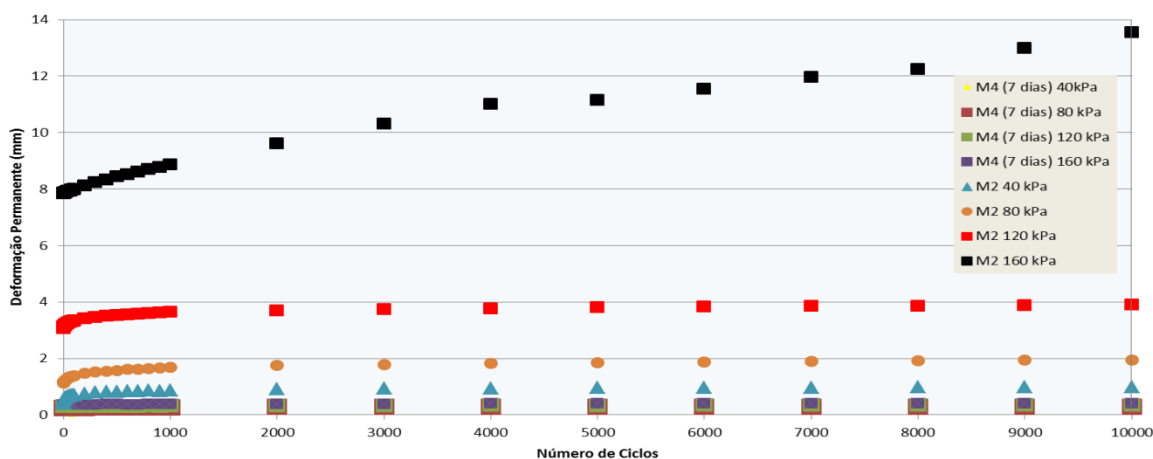


Fonte: Autora

A adição de 5% cal na mistura M2 diminuiu consideravelmente a deformação permanente observada, apresentando ao fim dos ensaios uma deformação irreversível acumulada de apenas 0,636 mm (cura imediata) e 0,406 mm (cura de 7 dias). Isso comprova a existência de reações pozolânicas que geram compostos cimentícios e promovem uma grande melhoria das propriedades mecânicas das misturas. A diminuição da deformação permanente também foi observada com a adição de 5% de cal na mistura M3, resultando em deformações irreversíveis de 1,203 mm (cura imediata) e 0,165 mm (cura de 7 dias). Lopes *et al.* (2015) também comprovaram a forte influência do tempo de cura nos resultados de DP realizados em cinzas estabilizadas.

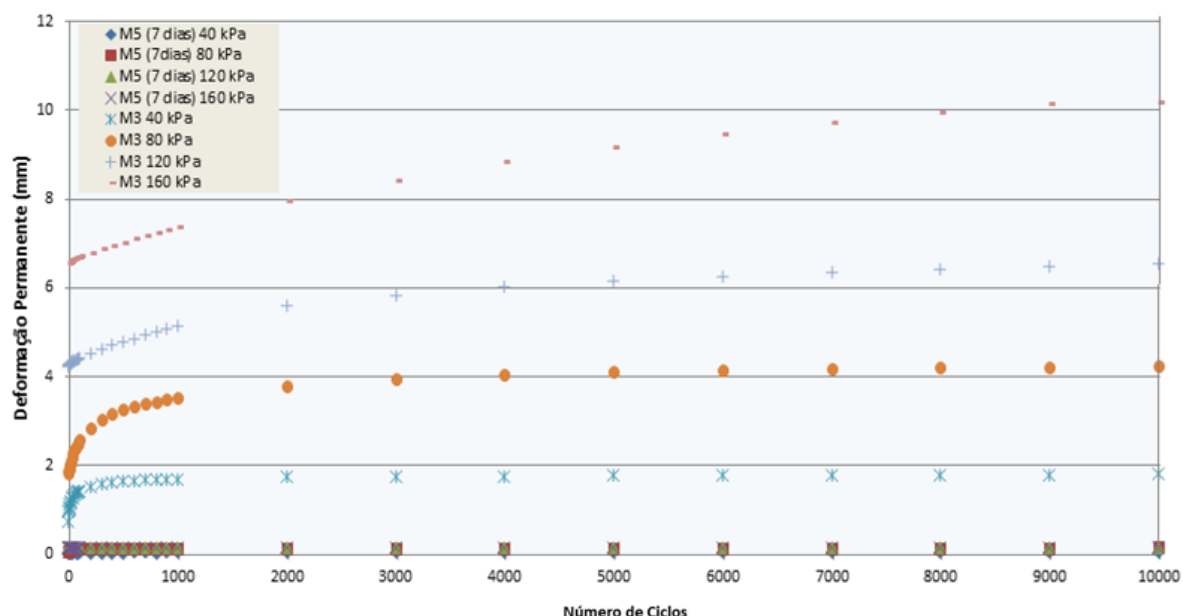
O efeito da adição de 5% da cal nas misturas M2 e M3 está observado nas figuras que se seguem (Figura 67 e Figura 68).

Figura 67 - Influência da cal na deformação permanente da amostra M2



Fonte: Autora

Figura 68 - Influência da cal na deformação permanente da amostra M3



Fonte: Autora

Observa-se que as misturas com adição de cal (com cura de 7 dias) apresentaram DP mais de 10 vezes menores do que as idealizadas sem o estabilizante químico. Por meio de observações visuais no decorrer dos ensaios, observou-se que as misturas estabilizadas (M4 e M5) são bem rígidas, de forma que com a pressão aplicada, se a base do corpo de prova não tiver devidamente plana, a amostra pode não ficar estável no equipamento, apresentando pequenos movimentos laterais no decorrer dos ensaios. Esse movimento pode fazer com que um dos LVDT'S apresente leituras negativas, podendo ocasionar os decréscimos observados na deformação permanente.

Nos ensaios de DP com 7 dias de cura (Figura 64 e Figura 66) foi realizada uma serragem da base do corpo de prova, de forma a tentar garantir uma superfície mais plana. Observa-se que, com esse procedimento, problemas de decréscimos de DP foram atenuados. Não foi possível fazer a serragem dos CPs de cura imediata, haja vista que não apresentaram consistência adequada para esse procedimento.

4.4 Quarta etapa do programa experimental

Na quarta etapa metodológica foram realizadas análises ambientais nas misturas selecionadas. Os resultados dos ensaios de lixiviação estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de Lixiviação para as amostras estudadas

Concentração (ppm)	M2	M3	M4	M5	VMP (ppm)
F ⁻	0,847	0,482	0,559	0,436	150
Cl ⁻	29,406	18,584	15,190	27,879	-
Br ⁻	<LD	<LD	5,2954	40,497	-
NO ₂ ⁻	<LD	<LD	10,520	<LD	-
NO ₃ ⁻	1,655	<LD	4,518	7,687	-
PO ₄ ³⁻	2,887	2,671	5,828	7,724	-
SO ₄ ²⁻	1841,362	1132,978	569,968	162,220	-
Pb ⁺²	0,410	<LD	<LD	<LD	1
Zn ⁺²	<LD	<LD	<LD	<LD	-
Cr ⁺²	0,161	0,146	0,176	0,141	5
Fe	0,017	0,045	<LD	<LD	-
Cu ⁺²	0,011	0,020	0,01	0,031	-
Ni	0,127	0,063	0,117	0,104	-
Cd ⁺²	<LD	<LD	0,014	<LD	0,5
Co	<LD	<LD	<LD	<LD	-
Mn	0,077	0,069	0,069	0,070	-

Fonte: Autora

No ensaio de lixiviação quando um ou mais parâmetros do lixiviado estiverem acima dos valores máximos permitidos (VMP), conforme a NBR 10005/2004, a amostra é classificada como Resíduo Classe I (Perigoso). Observa-se que nenhuma amostra ultrapassou o valor máximo permitido dos parâmetros analisados. Então, todas são classificadas como amostras não perigosas, aptas para uso na pavimentação do ponto de vista ambiental.

Observa-se que, ao se comparar os resultados das concentrações após a adição do estabilizante químico, teve-se uma diminuição considerável de íons sulfatos (SO₄²⁻) após adição de cal nas misturas M2 (cinza) e M3 (50% cinza+ 50% solo). As concentrações de fluoreto, que são íons críticos que determinam o grau de periculosidade do contaminante, também decresceram. No entanto foram observados pequenos aumentos nas concentrações dos outros parâmetros nas amostras analisadas.

Os resultados dos ensaios de solubilização estão apresentados na Tabela 16, constando as concentrações dos parâmetros inorgânicos no extrato solubilizado.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de Solubilização para as amostras estudadas

Concentração (ppm)	M2	M3	M4	M5	VMP
F ⁻	<LD	2,2445	0,2887	2,9136	1,5
Cl ⁻	9,435	57,2968	9,5697	24,648	250
Br ⁻	<LD	18,2779	<LD	47,1814	-
NO ₃ ⁻	<LD	22,6957	1,235	3,8224	10
PO ₄ ³⁻	<LD	10,5895	2,4333	<LD	-
SO ₄ ²⁻	76,2565	2231,0915	242,5779	212,1009	250
Pb ⁺²	0,29	0,32	<LD	0,17	0,01
Zn ⁺²	<LD	<LD	<LD	<LD	-
Cr ⁺²	0,065	0,126	0,096	0,091	0,05
Fe	<LD	0,103	<LD	<LD	0,3
Cu ⁺²	0,123	0,133	<LD	<LD	2,0
Ni	0,156	0,214	0,036	0,149	-
Cd ⁺²	<LD	<LD	<LD	<LD	0,005
Co	<LD	<LD	<LD	<LD	-
Mn	0,081	0,069	0,064	0,07	0,1

Fonte: Autora

No ensaio de solubilização quando um ou mais parâmetros do extrato solubilizado estiverem acima dos valores máximos permitidos (VMP), conforme a NBR 10006/2004, a amostra é classificada como Resíduo Classe II-A (não inertes). Foi observado que as amostras de cinzas (M2) e de cinzas estabilizadas com 5% de cal (M4) foram classificadas como materiais não inertes (Classe II-A), por apresentarem concentrações acima do valor máximo permitido de cromo. Lopes et al. (2015) e Barros (2015) também classificaram as cinzas volantes estudadas como materiais Classe II-A. Segundo Lopes et al. (2015) a classificação das cinzas em resíduo não inerte não reprova sua utilização na pavimentação, desde que no ensaio de lixiviação, que representa o potencial de percolação e de infiltração das águas das chuvas no solo, todos os parâmetros analisados encontrem-se dentro dos limites permitidos.

A amostra M3 apresentou altas concentrações de fluoreto, nitrato, sulfato e cromo, sendo classificadas com materiais de Classe II-A. A adição de 5% de cal na mistura M3 reduziu as concentrações de nitrato e sulfato para abaixo do VMP, no entanto as concentrações de fluoreto e cromo continuaram elevadas, sendo a amostra M5 classificada também como Classe II-A.

Observa-se que a influência da estabilização química na concentração dos estabilizantes não apresentou um padrão. Em alguns casos a adição de cal promoveu uma diminuição nas concentrações de íons e em outros ocorreu o efeito contrário. Knop (2013) observou que alguns fatores interferem nas concentrações dos contaminantes, como o tempo de cura e o teor de estabilizante químico. A adição de 5% de cal pode ter efeitos consideráveis nas propriedades mecânicas das misturas, mas pode ser um teor baixo para promover o encapsulamento de contaminantes. Ressalte-se aqui que os ensaios foram realizados com cura imediata e acredita-se que talvez seja necessário realizar o ensaio considerando uma cura mínima de 7 dias para que haja tempo para a ocorrência das reações químicas.

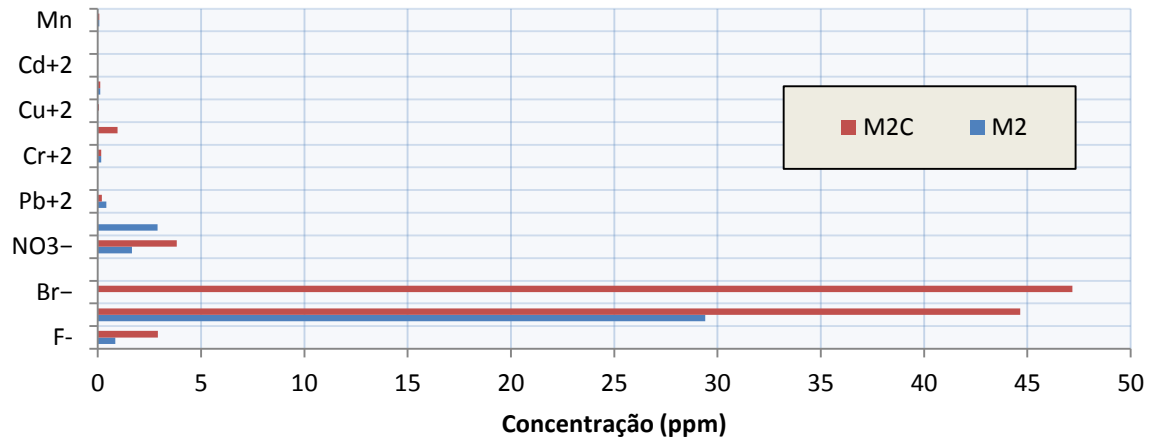
Os resultados dos extratos lixiviados em amostras compactadas (simbolizadas pela letra “C”) estão representados na Tabela 17. Nesta tabela também constam, de forma a facilitar a comparação, as concentrações dos mesmos parâmetros obtidos nos ensaios de lixiviação em amostra solta, conforme NBR 10005/2004.

Tabela 17 - Comparação do lixiviado das amostras no estado solto e no estado compactado

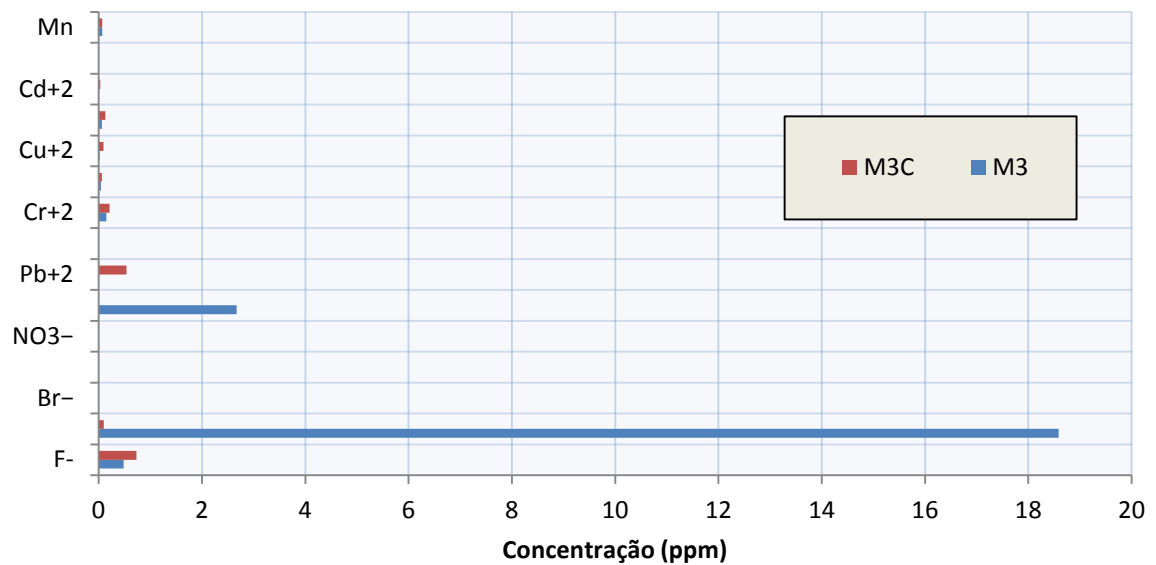
Concentração (ppm)	M2	M2C	M3	M3C	M4	M4C	M5	M5C
F ⁻	0,847	2,914	0,482	0,729	0,559	1,870	1,136	<LD
Cl ⁻	29,406	44,648	18,584	0,097	15,189	292,46	327,878	32,640
Br ⁻	<LD	47,181	<LD	<LD	5,295	19,940	40,496	17,770
NO ₂ ⁻	<LD	<LD	<LD	<LD	10,520	<LD	<LD	<LD
NO ₃ ⁻	1,655	3,822	<LD	<LD	4,518	17,933	7,687	<LD
PO ₄ ⁻³	2,887	<LD	2,671	<LD	5,828	<LD	7,724	<LD
SO ₄ ⁻²	1841,363	212,100	1132,978	167,233	569,968	1199,92	162,219	869,802
Pb ⁺²	0,410	0,2	<LD	0,54	<LD	0,49	<LD	0,54
Zn ⁺²	<LD	<LD	<LD	<LQ	<LD	<LD	<LD	<LD
Cr ⁺²	0,161	0,175	0,146	0,208	0,176	0,192	0,141	0,208
Fe	0,017	0,965	0,045	0,061	<LD	0,026	<LD	0,061
Cu ⁺²	0,011	0,058	0,020	0,092	0,010	0,148	0,031	0,092
Ni	0,127	0,119	0,063	0,126	0,117	0,109	0,104	0,126
Cd ⁺²	<LD	0,003	<LD	0,031	0,014	0,034	<LD	0,031
Co	<LD	<LQ	<LD	<LQ	<LD	<LD	<LD	<LD
Mn	0,077	0,082	0,069	0,069	0,069	0,066	0,070	0,069

Fonte: Autora

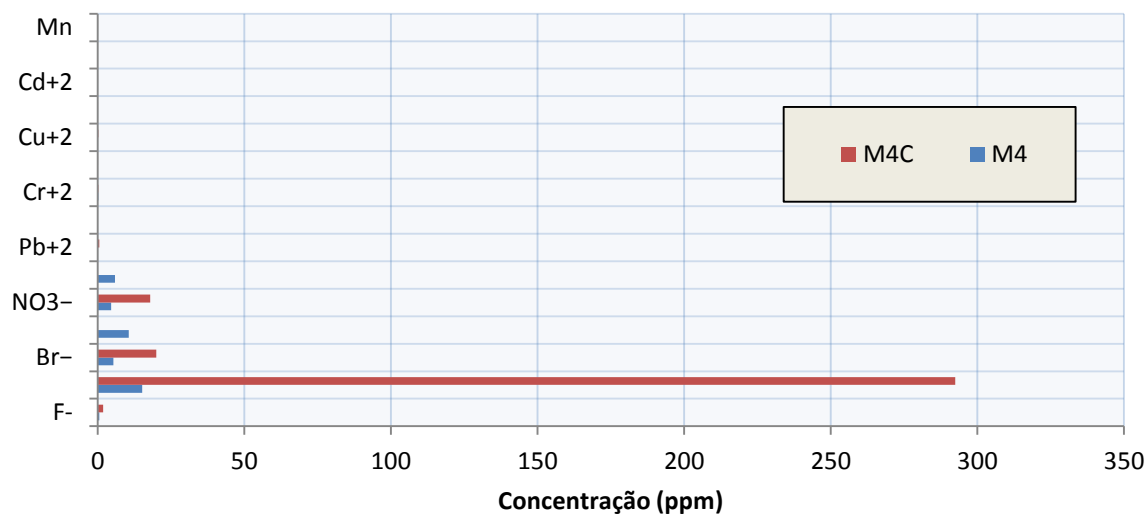
A Figura 69, Figura 70, Figura 71 e Figura 72 ilustram a diferença entre a concentração de alguns parâmetros obtidos no extrato lixiviado conforme norma brasileira e o extrato obtido em amostras compactadas.

Figura 69 - Comparação das concentrações dos parâmetros no extrato lixiviado (M2 e M2C)

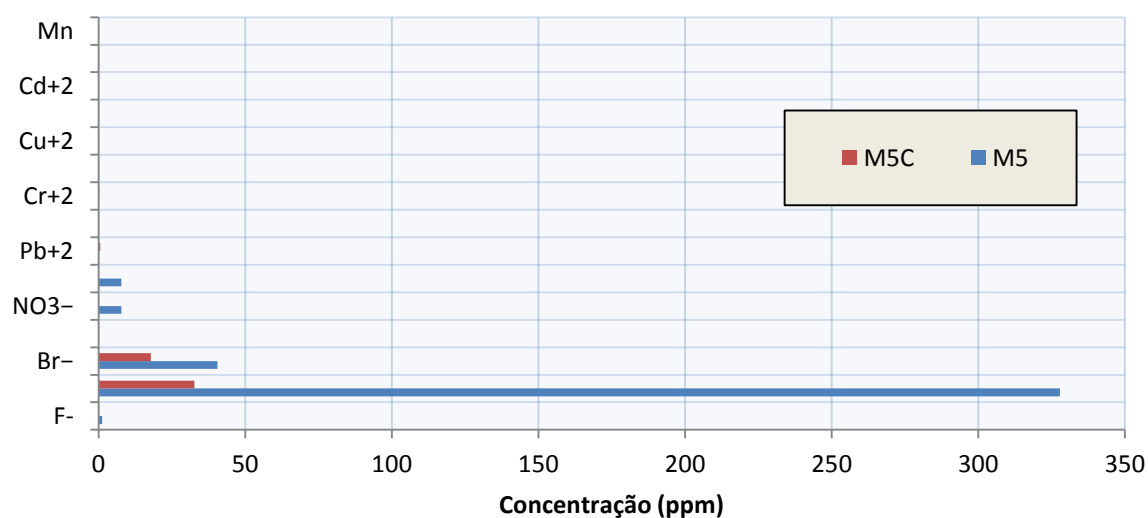
Fonte: Autora

Figura 70 - Comparação das concentrações dos parâmetros no extrato lixiviado (M3 e M3C)

Fonte: Autora

Figura 71 - Comparação das concentrações dos parâmetros no extrato lixiviado (M4 e M4C)

Fonte: Autora

Figura 72 - Comparação das concentrações dos parâmetros no extrato lixiviado (M5 e M5C)

Fonte: Autora

Observa-se que a influência do processo de lixiviação em amostras compactadas na concentração dos parâmetros não apresentou um padrão. Em alguns casos, a compactação resultou em uma diminuição nas concentrações de íons e em outros ocorreu o efeito contrário. Na mistura M3 a realização do procedimento em amostras compactadas teve um efeito considerável reduzindo as concentrações de praticamente todos os ânions analisados (à exceção da concentração de fluoreto). As concentrações de sulfato foram reduzidas em cerca

de 9 vezes e as concentrações de fosfato e cloreto foram reduzidas para abaixo do limite de detecção do aparelho. Na mistura M2 (cinza) observou-se também uma redução em cerca de 9 vezes nos íons sulfatos. No entanto, nas misturas M4 e M5, os lixiviados obtidos nas amostras compactadas apresentaram um acréscimo na concentração de praticamente todos os parâmetros analisados.

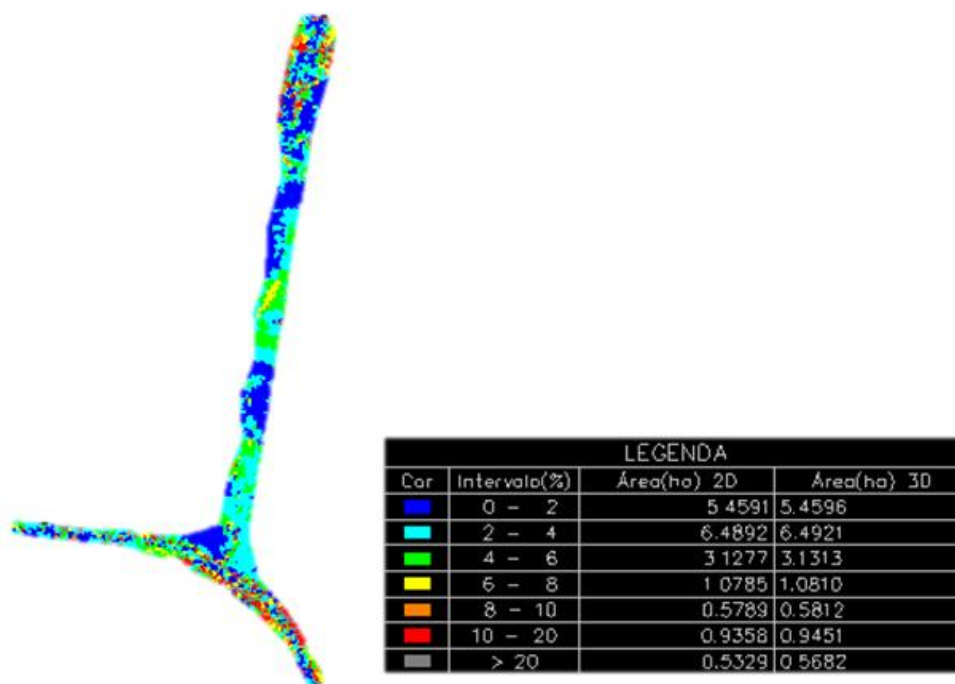
Vários fatores podem interferir na concentração dos parâmetros inorgânicos dos extratos lixiviados. Na metodologia do ensaio de lixiviação normatizada, os procedimentos de ensaio são bem diferentes da metodologia proposta em amostras compactadas, uma vez que se exige o controle do pH, da temperatura e do tempo de obtenção do extrato lixiviado. O ensaio de lixiviação em amostras compactadas busca simular as condições reais de compactação e confinamento em campo, desta forma o pH, a temperatura e o tempo não são controlados. Além da compactação, todos esses fatores podem ter interferido nas concentrações obtidas dos parâmetros inorgânicos.

4.5 Quinta etapa do programa experimental

A ideia desta etapa foi dimensionar e propor um trecho a ser construído dentro da termelétrica para melhorar as condições de transporte do carvão mineral. Para isso, foram realizados estudos topográficos e geotécnicos no terreno proposto pela empresa para construção do trecho, seguidos do dimensionamento de estruturas de pavimentos e análise financeira.

4.5.1 Estudos topográficos

A partir do levantamento planialtimétrico realizado na região abrangendo todo entorno do futuro trecho pavimentado a ser construído, foi possível obter, com auxílio do software DataGeosis, o mapa de declividades do terreno, conforme Figura 73.

Figura 73 - Mapa de Declividades do entorno do futuro trecho experimental

Fonte: Data Geosis

Conforme critério estabelecido em DNER (1999), quase 90% da área levantada no estudo apresenta baixas declividades (declividades de até 8%), classificando-se como região plana. Cerca de 3% da área levantada apresenta declividades maiores do que 20%, classificando-se como região montanhosa. A Tabela 18 apresenta a classificação da região quanto à sua declividade.

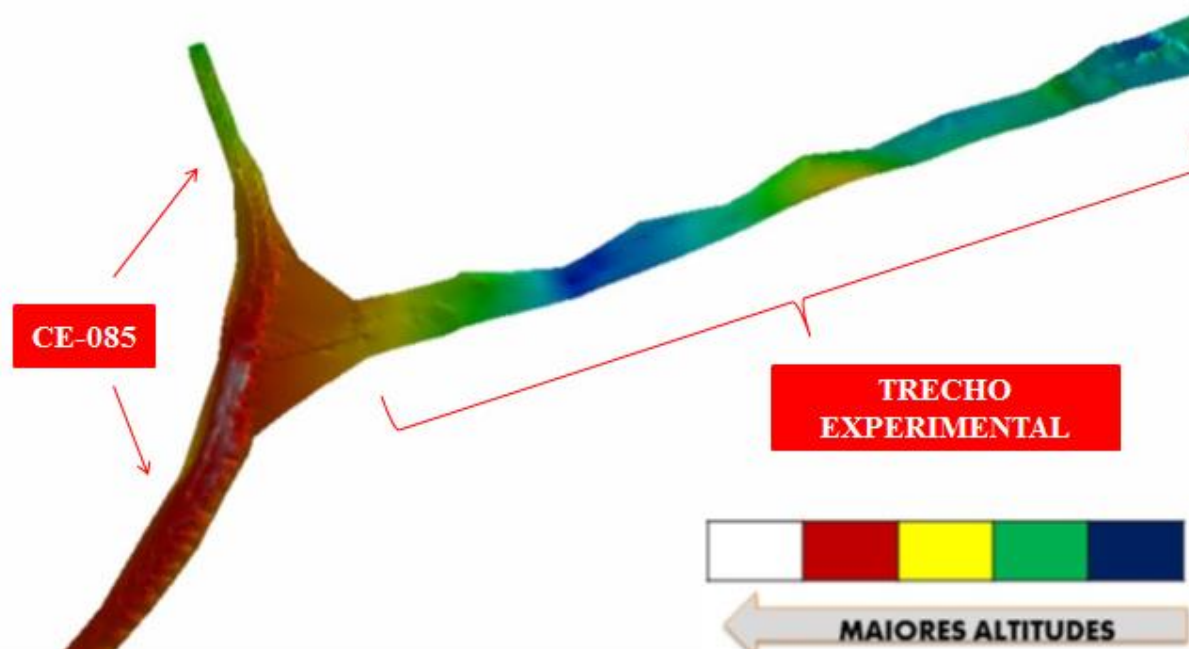
Tabela 18 - Classificação da região levantada quanto à declividade

Região	Critério Adotado	% da Área Levantada
Plana	declividades de até 8%	88,75
Ondulada	declividades entre 8% e 20%	8,32
Montanhosa	declividades maiores do que 20%	2,93

Fonte: Autora

De posse da nuvem de pontos obtidas com o levantamento altimétrico e com auxílio do software DataGeosis foi obtido o modelo 3D do terreno levantado, representado na Figura 74. Observa-se que maiores altitudes são observadas ao longo da CE-085, região na qual se concentram também as maiores declividades (Figura 73).

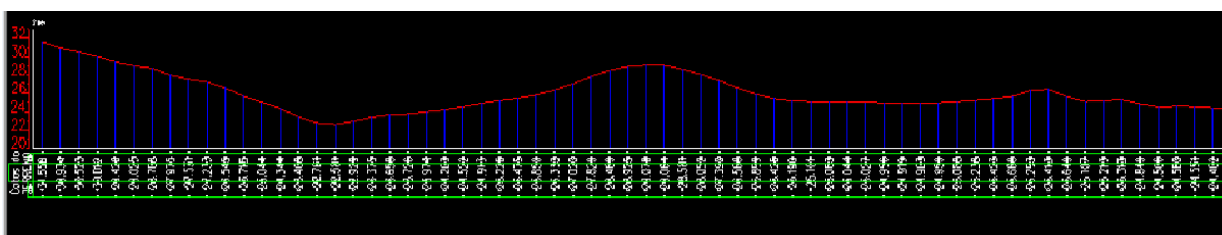
Figura 74 - Modelo 3D do terreno levantado



Fonte: Adaptado de DataGeosis

Foi traçado também o perfil longitudinal do terreno, considerando-se a extensão do trecho pavimentado. O perfil está representado na Figura 75. As linhas verticais correspondem às estacas, espaçadas de 20,0 m. No eixo vertical estão as cotas do terreno (m).

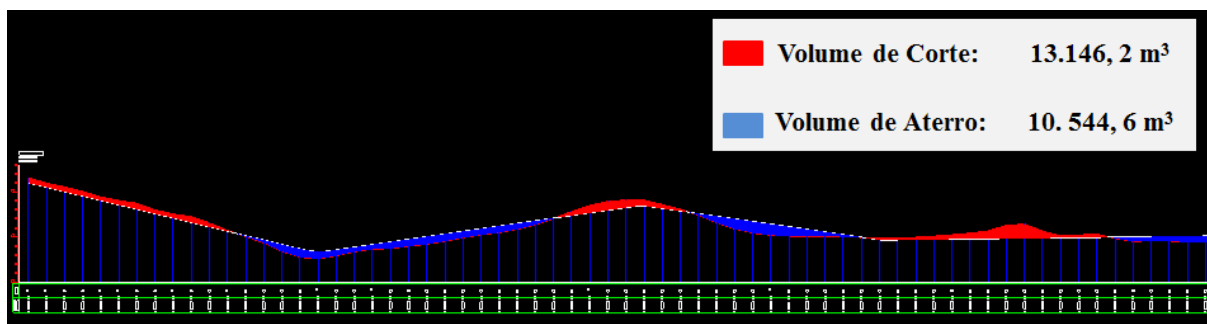
Figura 75 - Perfil longitudinal do trecho experimental a ser construído.



Fonte: DataGeosis

Com base no perfil longitudinal, idealizou-se um possível greide para o trecho pavimentado, de forma a otimizar os volumes de corte e aterro, uma vez que o terreno de fundação apresenta boa qualidade conforme o levantamento geotécnico realizado e que será mais adiante melhor detalhado. O greide idealizado e os volumes de corte e de aterro estão dispostos na Figura 76.

Figura 76 - Greide selecionado para o trecho experimental



Fonte: DataGeosis

4.5.2 Estudos geotécnicos

Na etapa de reconhecimento do subleito de região foram coletadas 10 amostras. Na Tabela 19 estão apresentados os resultados dos ensaios de granulometria e limites de consistência de cada uma das amostras.

Tabela 19 - Caracterização física das amostras representativas do subleito

Amostras	Percentual passante (%)							LL	LP
	Peneiras								
	2"	3/8"	nº4	nº 10	nº 40	nº 100	nº 200		
AM-1	100	100	100	100	92,95	19,6	11,64	NL	NP
AM-2	100	100	100	100	91,55	10,12	3,35	NL	NP
AM-3	100	100	100	100	93,08	10,37	3,75	NL	NP
AM-4	100	100	100	100	93,01	10,81	4,49	NL	NP
AM-5	100	100	100	100	92,75	5,99	1,97	NL	NP
AM-6	100	100	100	100	92,08	10,15	4,70	NL	NP
AM-7	100	100	100	100	94,20	8,60	5,10	NL	NP
AM-8	100	100	100	100	94,30	7,53	3,43	NL	NP
AM-9	100	100	100	100	96,87	13,56	6,61	NL	NP
AM-10	100	100	100	100	92,73	41,35	34,72	NL	NP

Fonte: Autora

Todas as amostras foram classificadas pela AASHTO como materiais do tipo A-2-4. A amostra AM-10 apresentou elevadas porcentagens de silte, sendo classificada como areia siltosa. As demais amostras apresentaram menores teores de silte (variando de 1,97% a 11,64%), sendo classificadas como material arenoso.

Os resultados dos ensaios de Proctor, de CBR e de Expansão estão dispostos na Tabela 20.

Tabela 20 - Caracterização mecânica das amostras representativas do subleito

Amostras	Compactação		CBR (%)	E (%)
	γ_s (g/cm ³)	$h_{ót}$ (%)		
AM-1	1,621	6,97	15,5	0
AM-2	1,607	8,13	15,5	0
AM-3	1,656	6,80	15,5	0
AM-4	1,64	7,72	14,4	0
AM-5	1,624	5,90	15,3	0
AM-6	1,624	6,00	14,5	0
AM-7	1,633	5,75	14,8	0
AM-8	1,601	8,40	15,5	0
AM-9	1,591	7,98	13,3	0
AM-10	1,903	11,51	15,3	0

Fonte: Autora

De forma a verificar a heterogeneidade e obter valores representativos das propriedades mecânicas das amostras, a análise estatística foi realizada (Tabela 21), conforme DNIT (2006).

Tabela 21 – Análise estatística das amostras representativas do subleito

	Análise Estatística	Nº de Amostras	Média	Desvio Padrão	Valor Mínimo Provável	Valor Máximo Provável
Granulometria (% Passante)	2"	10	100	0	100	100
	3/8"	10	100	0	100	100
	nº 10	10	100	0	100	100
	nº 40	10	93,34	1,49	91,73	94,97
	nº 100	10	13,81	10,37	2,53	25,09
	nº 200	10	7,98	9,76	-2,64	18,60
Ensaio Mecânicos	$h_{ót}$ (%)	10	7,51	1,71	5,66	9,37
	γ_s (g/cm ³)	10	1,65	0,09	1,55	1,75
	EXPANSÃO (%)	10	0,00	0,00	0,00	0,00
	CBR (%)	10	15,0	0,7	14,2	15,7

Fonte: Autora

Observa-se que a média da umidade ótima foi de 7,51%, com desvio padrão de 1,71%. O CBR apresentou pequeno desvio padrão (0,7%), com uma média de 15%. O CBR de projeto (valor mínimo provável) obtido foi de 14%, valor utilizado para se proceder ao dimensionamento do trecho experimental.

4.5.3 Dimensionamento das estruturas de pavimento

Com base nos ensaios realizados, pode-se propor algumas estruturas teóricas de pavimentos. No pré-dimensionamento dos trechos adotou-se a seguinte estrutura: subleito local (CBR de 14% obtido dos estudos geotécnicos), reforço de subleito (mistura M3 com CBR de 21%) e uma sub-base (também mistura granulométrica M3 com CBR de 21%). A escolha da mistura M3 como sub-base ocorreu por ela atender aos parâmetros mecânicos mínimos de resistência e expansão, apresentar indícios de boa penetração betuminosa nos serviços de imprimação, além de do ponto de vista econômico ser vantajosa em relação às misturas com a cal (devido ao alto custo aquisitivo da cal). A mistura M3 não pode ser usada, pelo método do DNIT, como base de pavimento (CBR mínimo de 40%). No entanto, pelo método mecanístico-empírico, que se baseia na resposta estrutural e modelos de desempenho, são necessários para análise os parâmetros de MR. Sendo assim, a mistura M3 pode ser investigada para ser empregada como base à luz de tais métodos.

Utilizou-se o método do DNIT apenas para pré-dimensionar o pavimento. Foram adotados três revestimentos típicos do estado do Ceará em função do tráfego: um Tratamento Superficial Duplo (TSD) e dois Concretos Asfálticos Usinados a Quente (CAUQ), com espessuras de 7,5 cm e 12,5 cm.

Os valores das espessuras para cada camada em função de seis níveis de solicitação N estão dispostos na **Tabela 22**. Essas espessuras foram então utilizadas como dados de entrada no programa SisPav, onde verificou-se os modos de falha do pavimento, o tipo de dano crítico e seu valor em percentual para cada número N (vida de projeto de 10 anos).

Tabela 22 - Dimensionamento de Pavimentos

		DIMENSIONAMENTO (Número N)					
		10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹
Método Empírico	Revestimento (cm)	2,5	2,5	2,5	7,5	12,5	12,5
	Base (M3) (cm)	15	17	20	15	15	15
	Ref. de subleito (M3) (cm)	15	15	15	15	15	15
Obtidos com SisPav	Falhas no pavimento	-	-	-	DP e Fadiga	DP e Fadiga	DP e Fadiga
	Tipo de Dano Crítico	Tensão no topo do subleito	Tensão no topo do subleito	Tensão no topo do subleito	Fadiga na base do revestimento	Fadiga na base do revestimento	Fadiga na base do revestimento
	D _{crit} %	0,00%	0,00%	0,02%	979 %	9791 %	97913 %

Fonte: Autora

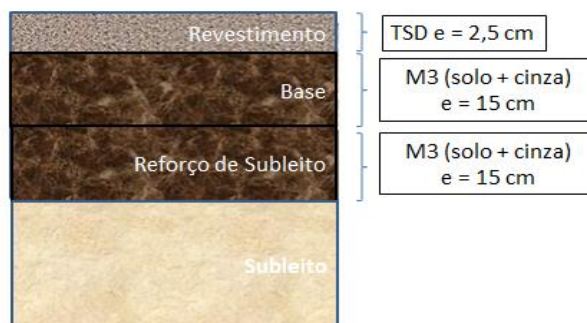
Observou-se, conforme a **Tabela 22**, que a partir do número $N = 10^7$ a estrutura do pavimento dimensionada pelo método do DNIT apresentou deformações permanentes acima das admissíveis e fadiga na base do revestimento asfáltico. Dessa forma, dados os bons resultados mecânicos obtidos para mistura M4 (M3 + CAL), testou-se seu uso como base para rodovias de maior volume de tráfego. Essa mistura tem como vantagem também a alta porcentagem de cinzas em sua composição (95%).

Em conformidade com valores utilizados por Bastos (2013), como dados de entrada no programa SisPavBR se considerou que, para tratamentos superficiais duplos, o coeficiente de Poisson é de 0,40 e módulo de resiliência constante de 500 MPa. Para revestimentos de concreto asfáltico, adotou-se um coeficiente de Poisson de 0,25 e módulo de resiliência constante de 3000 MPa. Para as camadas granulares, o valor de coeficiente de Poisson foi de 0,35 e para o módulo de resiliência, utilizou-se o modelo composto (foi o que melhor representou as misturas em estudo).

Por fim, procedeu-se o dimensionamento utilizando o programa SisPavBR para duas Estruturas (EST), conforme as seguintes situações de tráfego: para utilização em um trecho baixo volume de tráfego (N adotado de 10^6) e para utilização em rodovias de maiores volume de tráfego (N adotado de 10^7), conforme mostrado nas Figura 77 e Figura 78. Para N igual a 10^7 , utilizou-se uma camada de base mais resistente (M4), de forma que não se faz

necessário o reforço de subleito, sendo o pavimento composto apenas de uma sub-base (M3), base (M4) e revestimento (CBUQ).

Figura 77 - Estrutura 1 para o pavimento com $N = 10^6$



Fonte: Autora

Figura 78 - Estrutura 2 para o pavimento com $N = 10^7$



Fonte: Autora

As estruturas dos pavimentos propostos neste estudo tiveram bons desempenhos quando analisadas no programa SisPavBR, para uma vida de projeto de 10 anos, apresentando reduzidos danos críticos e baixas deflexões na superfície. A estrutura para o tráfego de 10^6 apresentou vida de projeto estimada em 49 anos e teve como dano crítico a tensão admissível no topo do subleito, equivalente a 20 % da admissível. A estrutura para o tráfego de 10^7 apresentou como dano crítico a fadiga no topo do revestimento, equivalente a 39 % da admissível. Para essa estrutura a vida de projeto foi estimada em 26 anos. Assim, as duas estruturas apresentaram vida de projeto elevada, de forma que se espera que suportem o tráfego para o qual elas foram dimensionadas, dispondo de desempenhos satisfatórios em campo.

4.5.4 Análise financeira

Para análise financeira, a tabela de custos da Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA-CE) do ano de 2017 foi consultada. Considerou-se a cinza com custo zero de aquisição e de transporte. O custo de aquisição do solo regional foi obtido a partir da tabela de insumos da SEINFRA-CE. As composições de custo utilizadas também foram obtidas pela SEINFRA.

O trecho idealizado foi de 1,4 km de comprimento e com largura de 8 m para a camada de base. Para a Estrutura 1 ($N=10^6$) e a Estrutura 2 ($N=10^7$) foram calculados os custos para construção das camadas de base das duas estruturas. Foi considerada uma distância média de transporte (DMT) para o solo de 30 km. Na Tabela 23 e na Tabela 24 estão os custos obtidos para a construção da camada de base das duas estruturas:

Tabela 23 - Custo para construção da camada de base (EST 1 – $N = 10^6$)

BASE (Solo+Cinza)	Unidade	Custo Unitário (R\$)	Quantidade	Total
Execução da Camada (Composição C3216 - Estabilização Granulométrica de Solos C/ Mistura de Materiais)	m ³	20,28	1680,0	R\$ 34070,4
Aquisição do Solo	m3	37,5	855,7	R\$ 32062,5
Transporte do Solo (DMT até 30 km)	T.km	0,57	1890,0	R\$ 32319,0
			Custo Total	R\$ 98451,9

Fonte: Autora

Tabela 24 - Custo para construção da camada de base (EST 2 – $N = 10^7$)

BASE (CINZA+5% CAL)	Unidade	Custo Unitário (R\$)	Quantidade	Total
Execução da Camada (composição C3968 - Sub Base/Base de Solo com 5% Cal)	m ³	108,54	1680	R\$ 182.347,2
			Custo Total	R\$ 182.347,2

Fonte: Autora

Comparou-se economicamente a base de solo+cinza do pavimento idealizado (Estrutura 1) com uma base usual no estado do Ceará, base de solo-brita (SB). A espessura considerada para a base de solo-brita foi a mínima admitida (15 cm). Os valores foram obtidos com base nos dados da SEINFRA/CE para o ano de 2017. A base de cinza + 5% cal

(Estrutura 2), dado o maior volume de tráfego a suportar, foi comparada com um pavimento composto de base de Brita Graduada (BG).

Ambas as camadas de base propostas dos pavimentos apresentaram custos abaixo das de camadas usualmente construídas no Estado do Ceará, conforme Tabela 25.

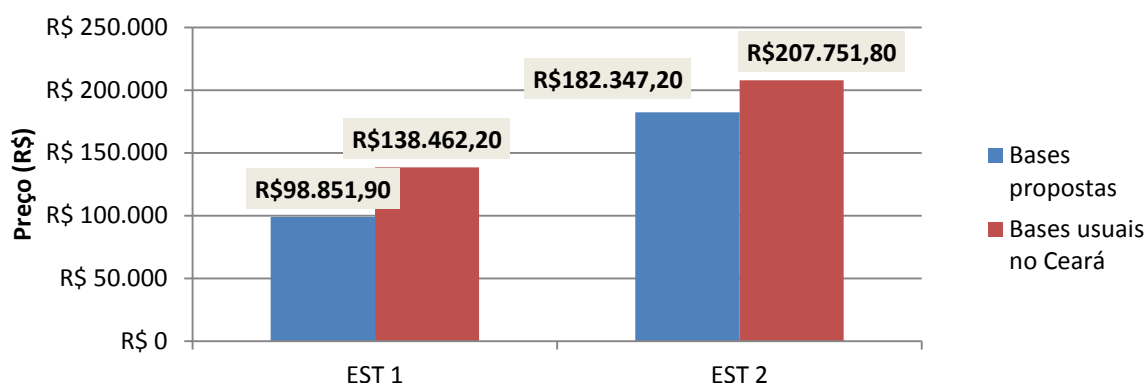
Tabela 25 - Comparativo dos preços das camadas de base

Preço em R\$		Preço em R\$	
EST 1	BASE SB	EST 2	BASE BG
R\$ 98.848,8	R\$ 138.462,2	R\$ 182.347,2	R\$ 207.751,8

Fonte: Autora

A Figura 79 mostra de forma gráfica um comparativo dos preços das misturas

Figura 79 - Comparativo dos preços das camadas de base das estruturas propostas



Fonte: Autora

4.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados obtidos nas cinco etapas da sequência metodológica definida. Foram apresentados os resultados dos ensaios realizados em todos os pontos amostrais definidos na primeira etapa metodológica. Depois se discutiram os resultados obtidos dos ensaios realizados nas nove misturas propostas para o estudo. Ensaios de deformação permanente e análises ambientais em misturas selecionadas também foram realizados. Por fim, foram apresentados os resultados do dimensionamento de pavimentos teóricos, composto das misturas idealizadas neste estudo para serem utilizadas em camadas granulares (base e/ou sub-base).

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões desta pesquisa, abordando as principais contribuições e constatações e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Principais contribuições

A principal contribuição desta pesquisa foi propor uma solução de engenharia técnica, econômica e ambientalmente adequada para as cinzas de carvão que estão depositadas no Módulo I da Usina Termelétrica Energia Pecém. As limitadas propriedades mecânicas e a heterogeneidade das cinzas dispostas nesse módulo foram constatadas por meio da coleta e da realização dos ensaios laboratoriais em 32 pontos amostrais. A partir do estudo das técnicas de estabilização granulométrica e química, análises ambientais e avaliação financeira se conseguiu propor uma solução de reaproveitamento dessas cinzas em camadas de bases e sub-bases de pavimentos. Assim, é possível diminuir os custos de tratamento e disposição final do resíduo, atenuar impactos ambientais e oferecer matéria-prima secundária ao mercado rodoviário.

5.2 Principais constatações

As principais constatações desta pesquisa serão apresentadas a seguir, em conformidade com as etapas do programa experimental.

5.2.1 Primeira etapa do programa experimental

Na primeira etapa do programa experimental, foi realizado um estudo detalhado em 32 amostras superficiais e em profundidade coletadas no Módulo I. Observou-se periculosidade em 6 amostras, sendo as demais classificadas como Resíduo Classe II-A (Não Inerte).

Obtiveram-se valores de umidade ótima entre 25% e 57% (média de 38%), com um desvio padrão de cerca de 15%, o que demonstra grande heterogeneidade nas cinzas analisadas. No que se refere aos valores de CBR, eles foram também variados, oscilando entre 1% e 46%, com mais de 80% das amostras apresentando valores abaixo de 20%, mínimo

exigido para camadas de sub-base. Os valores de expansão variaram entre 0,2% a 8,6%, sendo que 48% das amostras coletadas não atenderam ao valor mínimo estipulado para camada de sub-base (menor que 1%).

A heterogeneidade das cinzas dispostas no Módulo I da termelétrica tornou difícil a definição de valores de ensaios representativos para os rejeitos. Além disso, as cinzas analisadas apresentaram, em geral, propriedades mecânicas insatisfatórias. O CBR de projeto (valor mínimo provável) para as cinzas neste estudo foi de 1%, bem abaixo do exigido pelo DNIT para camadas granulares. A expansão média foi de 2%, acima da tolerância admitida. Assim, as cinzas *in natura* do Módulo I não possuem requisitos mecânicos mínimos para emprego em camadas granulares de pavimentos, tornando necessário o emprego de técnicas de estabilização granulométrica e química para deixá-las dentro dos requisitos admissíveis para utilização na pavimentação.

5.2.2 Segunda etapa do programa experimental

Na segunda etapa do programa experimental, idealizou-se 9 misturas de cinzas homogeneizadas com solo regional e com adição de cal em três proporções (1%, 3% e 5%). Observou-se que o solo (M1) foi classificado, pela AASTHO, como material arenoso do tipo A-2-4 e a cinza misturada (M2) como material silte-argiloso do tipo A-4.

Verificou-se que houve acréscimo da umidade ótima ($h_{ót}$) e diminuição da massa específica seca máxima ($\gamma_{smáx}$) das misturas em função do aumento do teor de cinza. Com a adição da cal, foram observados, em geral, acréscimos nos valores de umidade ótima e decréscimos nos valores de massa específica aparente máxima.

Observou-se também que a cinza (M2) homogeneizada apresentou CBR de 4%, bem abaixo do que o mínimo exigido pelo DNIT para uso em camadas de sub-base (20%). Na mistura M3 (solo+cinza) foi verificado um acréscimo de resistência em relação à cinza misturada (M2), de forma que o CBR atingiu um valor de 21%.

Quanto à expansão, o solo natural não apresentou expansão e quando utilizado como estabilizante das cinzas reduziu o valor para 0,95% (abaixo do limite mínimo para sub-base de 1%). Dessa forma, a mistura M3 apresentou resultados compatíveis para emprego em camada de sub-base.

Pelos resultados de CBR, RCS e RTCD pode-se constatar que a resistência aumenta à medida que se eleva o teor de cal e os tempos de cura, devido à ocorrência de reações pozolânicas. A adição de 5% de cal nas cinzas (M4) acarretou um aumento do CBR

de 4% para 153%. A adição desse mesmo teor de cal na mistura M3 aumentou em mais de 10 vezes o valor de CBR, passando de 21% para 258%.

Nos ensaios de avaliação da penetração betuminosa, foi observado que houve uma tendência ao decréscimo da penetração das misturas com o aumento da umidade de compactação. Em todas as misturas testadas, na umidade ótima e acima da ótima, a penetração foi mínima (4 mm) ou menor que o limite mínimo estabelecido como aceitável.

Com relação aos ensaios de MR, observou-se que o modelo composto foi o que melhor representou todas as misturas analisadas. Os valores de MR para a mistura granulométrica M3 foram intermediários entre os das misturas M1 e M2, demonstrando o potencial do solo de atuar com um estabilizante granulométrico das cinzas. O efeito da adição de cal também foi benéfica, melhorando o comportamento resiliente dos materiais à medida que se aumentam o teor de cal e os tempos de cura.

Tendo em vista os resultados observados na 2ª etapa do programa experimental, foi selecionada a amostra M3 (50%S+50%C) como “melhor mistura” para uso em camadas de sub-bases e escolhidas as amostras M4 (Cinza+5% Cal) e M5 (Solo + Cinza+5% Cal) como as mais adequadas para uso em bases de pavimentos. Essas misturas foram submetidas aos ensaios ambientais e de deformação permanente.

5.2.3 Terceira etapa do programa experimental

Nesta etapa foram realizados ensaios de Deformação Permanente (DP) nas misturas selecionadas, com aplicação de 10.000 ciclos em cada par de tensões (conforme norma europeia BS EN 13286-7:2004). Verificou-se que o acúmulo total de deformação permanente se concentrou em todos os ensaios realizados nas primeiras 6.000 aplicações de carga, comprovando que após este período as misturas tenderam a se estabilizar.

Foi observado que as misturas M2 e M3 apresentaram altos valores de deformação permanente, com a mistura M2 apresentando ao fim do ensaio 13,54 mm e a mistura M3 com uma DP acumulada de 10,17 mm.

Constatou-se uma diminuição considerável da DP com adição de 5% cal. Na mistura M2, a DP diminuiu consideravelmente, apresentando ao fim dos ensaios uma deformação irreversível acumulada de apenas 0,636 mm (cura imediata) e 0,406 mm (cura de 7 dias). A diminuição da deformação permanente também foi observada com a adição de 5%

de cal na mistura M3, resultando em deformações irreversíveis de 1,203 mm (cura imediata) e 0,165 mm (cura de 7 dias).

5.2.4 Quarta etapa do programa experimental

A quarta etapa do programa experimental consistiu na realização de análises ambientais nas misturas M2, M3, M4 e M5. Observou-se que todas as amostras foram classificadas como resíduo Classe II-A (Não Inerte), sendo aptas para uso na pavimentação do ponto de vista ambiental.

Conclui-se que a influência da estabilização química na concentração dos parâmetros não apresentou um padrão. Em alguns casos, a adição de cal promoveu uma diminuição nas concentrações de íons e em outros ocorreu o efeito contrário, o que indica que 5% de cal pode ser um teor baixo para promover o encapsulamento de contaminantes.

A influência da compactação na concentração dos parâmetros também não apresentou um padrão. Em alguns casos, a compactação resultou em uma diminuição nas concentrações de íons e em outros ocorreu o efeito contrário. Na mistura M3 o extrato lixiviado em amostras compactadas apresentou concentrações de parâmetros inferiores aos obtidos no ensaio normatizado. No entanto, nas misturas M4 e M5 os lixiviados obtidos nas amostras compactadas apresentaram um acréscimo na concentração de praticamente todos os parâmetros analisados.

5.2.5 Quinta etapa do programa experimental

Na quinta etapa, os procedimentos foram voltados à concepção de um trecho experimental de pavimentos com utilização de cinzas em camadas granulares. A partir do estudo topográfico, no entorno do futuro trecho pavimentado a ser construído, foi constatado que aproximadamente 90% da região é plana, 8% ondulada e cerca de 3% montanhosa. Observou-se que maiores altitudes são verificadas ao longo da CE-085, região na qual se concentram também as maiores declividades.

Pelos estudos geotécnicos, todas as amostras representativas do subleito local foram classificadas pela AASHTO como materiais do tipo A-2-4. A média da umidade ótima foi de 7,51%, com desvio padrão de 1,71%. O CBR apresentou pequeno desvio padrão

(0,7%), com uma média de 15%. Determinou-se que o CBR representativo do subleito foi de 14%.

De posse do CBR do subleito e das propriedades mecânicas das misturas estudadas, foram idealizadas duas estruturas de pavimentos com cinzas. A Estrutura 1, dimensionada para o tráfego $N = 10^6$, apresentou a mistura M3 como base e o solo regional como reforço de subleito. Já a Estrutura 2 apresentou a mistura M5 como base e a mistura M3 como sub-base. As estruturas dos pavimentos propostos neste estudo tiveram bons desempenhos quando analisadas no programa SisPavBR, apresentando vidas de projeto elevadas.

Por meio da análise financeira foi constatado que as camadas de base contendo cinzas apresentaram custos abaixo das camadas usualmente construídas no Estado do Ceará para o número de tráfego previsto.

Conclui-se, assim, que o reaproveitamento de cinzas da termelétrica em camadas granulares é viável do ponto de vista técnico-financeiro e ambiental, representando uma excelente alternativa para a proposição de um projeto estrutural de pavimento mais econômico e sustentável.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

De forma a complementar o estudo já desenvolvido nesta pesquisa, seguem algumas sugestões e recomendações para execução de trabalhos futuros referentes ao reaproveitamento das cinzas de carvão mineral na pavimentação.

- a) construir e acompanhar um trecho experimental, com utilização de bases de misturas solo + cinza e/ou solo + cinza + cal;
- b) avaliar o efeito da adição de diferentes teores de cal na vida de fadiga das misturas investigadas;
- c) avaliar nas misturas o efeito do teor de cal no encapsulamento de contaminantes;
- d) avaliar nas misturas investigadas o efeito tempo de cura no encapsulamento de contaminantes;
- e) avaliar o emprego, à luz das propriedades mecânicas e ambientais, de materiais geopoliméricos à base de cinzas como estabilizante químico de solos;

- f) implementar, validar e testar modelos destinados à geração de estimativas de deformação permanente para misturas de cinzas estabilizadas;
- g) propor novas metodologias de ensaios ambientais com cinzas, de forma a incorporar o efeito do estado compactado e confinado dos materiais na estrutura de pavimento.

REFERÊNCIAS

ABDULJAUWAD, S.N. Improvement of plasticity and swell potential of calcareous expansive clays. **Geotechnical Engineering Journal**, v. 26, n. 1, p. 3-16, 1995.

AHLBERG, H, L.; BARENBERG, E. J. Pozzolanic pavements. **Engineering Experiment Station**, Illinois, v. 473, p. 1-130, 1965.

ALMEIDA, F. D. **Avaliação da penetração, coesão, aderência e desgaste superficial de ligantes alternativos e comerciais para aplicação na imprimação betuminosa de rodovias**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION. **Coal combustion Products Production & Use Statistics**, 2017. Disponível em: <<https://www.acaa-usa.org/publications/productionuserereports.aspx>> Acesso: em: 2 agosto.2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Specifications for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement**. ASTM-C-618, 1989.

ARORA, S.; AYDILEK, A. H. Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 17, n. 6, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CARVÃO MINERAL – ABCM. Disponível em: <<http://www.carvaomineral.com.br/>> Acesso em: agosto.2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10005: Lixiviação de Resíduos – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10006: Solubilização de Resíduos – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

AZEVEDO, A. L. C. **Estabilização de Solos com Adição de Cal: Um Estudo sobre a Reversibilidade das Reações que Ocorrem nos Solos após a Adição de Cal**. 2010. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

BAIRD, C. **Química Ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BARENBERG, E.; THOMPSON, M. R. Lime - fly ash - stabilized bases and sub – bases. **Transportation Research Board**, Washington, n. 37, p. 66, 1976.

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

BERGESON, K. L.; BARNES, A. G. **Iowa thickness design for low volume roads using reclaimed hydrated Class C fly ash bases.** Transportation Conference Proceedings, Iowa, 1998.

BORBAS, R. F. **Carvão mineral: Balanço mineral brasileiro,** Agência Nacional de Mineração, 2001.

BRITO, A. L. F.; SOARES, S. R. **Necessidade de normas e critérios para avaliar e dispor resíduos estabilizados por solidificação.** I Congresso Interamericano de Resíduos Sólidos Industriais, Porto Alegre, 2004.

BUTALIA, T. S.; WOLFE, W. E. **Market opportunities for utilization of Ohio flue gas desulfurization (FGD) and other coal combustion products (CCPs).** Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science The Ohio State University, v. 1, 2000.

CAVALCANTE, S. C. I. T. **O Uso da Técnica de Encapsulamento como Alternativa para o Emprego de Solo Contaminado por Derivados de Petróleo em Camadas de Bases e Sub-Bases de Pavimentos.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

CERATTI, J. A. P. **Efeitos da adição de cal e cinza volante nas propriedades de um solo residual compactado.** 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CHIES, F.; SILVA, N. I. W.; ZWONOK, O. Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão. **In: Rocha, J.C.; John, U.M.** Coleção Habitare, Porto Alegre, v. 4, p. 218-239, 2003.

CLARKE, L. B. Applications for options for coal use residues: An international overview. **Studies in Environmental Science**, v. 60, p. 673-696, 1993.

COKCA, E. Frost susceptibility properties of Soma-B fly ash. **Journal of Energy Engineering**, ASCE, v. 123, 1997.

CONSOLI, N. C.; LOPES JUNIOR, L. S.; HEINECK, K. S. Key Parameters for the Strength Control of Lime Stabilized Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, p. 210-216, 2009.

COCKE, D. L. The Binding chemistry and leaching mechanisms of hazardous substances in cementitious solidification/stabilization systems. **Journal of Hazardous Materials**, v. 24, p. 231-253, 2002.

CRISTELO, N. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil: Estruturas, Geotecnia e Fundações. Universidad do Minho, Braga, Portugal.

DAWSON, A. R.; BULLEN, F. Furnace Botton Ash. Its Engineering Properties and its Use as Sub-base Material. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 90, p. 993 – 1009, 1991.

DAWSON, A. R.; NUNES, M. C. M. **Some British Experience of the Behavior of Furnace Bottom Ash and Slate Waste for Pavement Foundations**. Symposium Proceedings - Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and Byproducts for Construction of Highway Facilities, United Kingdom, 1993.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ME-162**: Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994a.

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

_____. **DNER-ME 180**: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro, 1994c.

_____. **DNER-ME 181**: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994d.

_____. **DNER-ME 041**: Solos – preparação de amostras para caracterização. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 051**: Solos – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994.

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

_____. **DNER-ME 093**: Solo – Densidade Real. Rio de Janeiro, 1994.

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

_____. **Manual de Pavimentação**, Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 134-ME**: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 2010.

EDIL, T. B.; BENSON, C. H.; BIN, S.; TANYU, B. F., KIM, W. H.; SENOL, A. **Field evaluation of construction alternatives for roadway over soft subgrade**. Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad of Wisconsin Madison, 2002.

ENERGIA PECÉM. **Projeto de pesquisa sobre a utilização da cinza de carvão mineral na construção civil, pavimentação, e aplicações geotécnicas e ambientais**. Primeiro Relatório Semestral, Fortaleza, 2016.

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

FELEKOGLU, S.; TÜRKEL, K. H. Optimization of fineness to maximize the strength activity of high-calcium ground fly ash—Portland cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 2053-2061, 2009.

FERGUSON, G. Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent. Fly ash for soil improvement. **Geotechnical Special Publication**, n. 36, ASCE, New York, 1993.

GEORGIA POWER. **A Coal-Fired Thermoelectric Power Plant**, 2017.

GHAFOORI, N., BUCHOLC, J. Investigation of Lignite-Based Bottom Ash for Structural Concrete. **Journals of Materials in Civil Engineering**, v.8, p. 128-137, 1996.

GHAFOORI, N., BUCHOL, C. J. Properties of High-Calcium Dry Bottom Ash Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 2, p. 90-101, 1997.

GOETHE, C.A. **Sistemas de controle e disposição final das cinzas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda – SC e da usina termelétrica de Jacuí – RS**. Seminário de estudos da aplicação dos resíduos da combustão do carvão mineral, Florianópolis, Santa Catarina, 1990.

GOOGLE EARTH. Disponível em: < <https://www.google.com/earth/>> Acesso em: outubro/2017.

GOOGLE MAPS. **Localização da UTE Energia Pecém**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/>> Acesso em: outubro/2017.

GREENPEACE CHINA. **The true cost of coal: an investigation into coal ash in China [R]**, 2010.

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

GUIMARÃES, A. C. R. **Estudo de Deformação Permanente em Solos e a Teoria do Shakedown Aplicada a Pavimentos Flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

HALEEM, A.; LUTHRA, S.; KHURANA, S.; AHMAD, S. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective. **Resources Policy**, v. 49, p. 334–348, 2016.

HARDJITO, B.; RANGAN, B. V. **Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymers concrete**, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Austrália, 2005.

HEINECK, K.S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras de contenção de resíduos**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HESTER J. A. Fly ash in roadway construction, fly ash utilization. **In: Proceedings of Edison electric institute.** National coal association and bureau of mines symposium, p. 87–90, 1967

HEYNS, M.; ADEDEJI, J. A.; MOSTAFA, M. Utilization of Fly Ash in Road Construction in South Africa: Environmental Assessment. **Proceedings of The Joint International Conference: 21st Century Human Habitat: Issues, sustainability and Development**, Nigeria, p. 426-432, 2016.

HOLMES, N.; O'MALLEY, H.; CRIBBIN, P.; MULLEN, H.; KEANE, G. Performance of masonry blocks containing different proportions of incinerator bottom ash. **Sustainable Mater Technol**, v. 8, p. 14-19, 2006.

HOOVER J. M.; HUFFMAN R. T.; DAVIDSON D. T. Soil stabilization field trials, Primary Highway 117. **In: 41st Annual meeting of the highway research board**, Washington DC, USA, 1962

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: 21 outubro. 2017.

ISMAIL, K.N., HUSSIN, K.; IDRIS, M. S. Physical, chemical e mineralogical properties of fly ash. **Journal of Nuclear and Related Technology**, v. 4, p.47-51, 2007.

JOW, J.; DONG, Y.; ZHAO, Y.; DING, S.; LI, Q.; WANG, X.; LAI, S. **Fly ash-based technologies and value-added products based on materials science**, Nashville, Tennessee, 2015.

JUN, S. **Discussion on environmental problems of coal-fired power plants fly ash and its disposal sites**, 2004;

KIATTIKOMOL, K.; JATURAPITAKKUL, C.; SONGPIRIYAKIJ, S.; CHUTUBTIM, S. A. Study of ground coarse fly ashes with different finesses from various sources as pozzolanic materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 4-5, p. 335-343, 2001.

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

KNISS, C. T. **Desenvolvimento e caracterização de materiais cerâmicos com adição de cinzas pesadas de carvão mineral**. 2005. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

KOLIAS, S. Stabilization of clayey soils with high calcium fly ash and cement. **Cement & Concrete Composites**, n. 27, p. 301-313, 2005.

- KNOP, A. **Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- LAV, A. H., LAV, M. A. Microstructural development of stabilized fly ash pavement base material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 2, n. 2, 2000.
- LAV, A. H.; LAV, M. A.; GOKTEPE, A. B. Analysis and design of a stabilized fly ash as pavement base material. **Fuel**, v. 85, p. 2359-2370, 2006.
- LEANDRO, R. P. **Estudo laboratorial acerca da possibilidade de aproveitamento da cinza pesada de termelétrica em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, SP, 2005.
- LIMA, M. T. S. L.; SOUZA, M. C. Discorrendo Sobre o Uso das Termelétricas no Brasil. **In: Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, 2014.
- LITTLE, D.N. **Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates**. Summary of Findings. Prepared for the National Lime Association, v. 1, 1999.
- LIVI, C. N; REPETTE, W. L. Ligante geopolimérico produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 7-18, 2015.
- LOIOLA, P. R. R; NOBRE JÚNIOR, E. F. **Trecho experimental utilizando mistura de solo- cal no município de Limoeiro do Norte-Ceará**. VI Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Brasília, Distrito Federal, 2001.
- LOPES, L.S.E. **Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de bases de pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- LOPES, L. S. E. ; SZELIGA, L.; CASAGRANDE, M. D. T.; MOTTA, L. M. G. Applicability of Coal Ashes to be used for Stabilized Pavements Base. **Geotechnical Special Publication**, v. 225, p. 1542-1551, 2012.
- LOPES, L. S. E.; MALKO, J. A. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; MOTTA, L. M. G. Análise do Comportamento de um Solo Estabilizado com Cinzas de Carvão Mineral para Aplicação em Camadas de Base de Pavimentos. **Revista Pavimentação**, v. 36, p. 63-82, 2015.
- LOPES JUNIOR, L.S. **Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.
- LOVELL, C. W.; KE, T. C.; HUANG, W. H.; LOVELL, J. E. Bottom ash as highway material. **Transportation Research Record**, n. 1310, p. 106-116, 1991.
- MALLMANN, J. E. C. **Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante**. 1996. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de

Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MALLMANN, J. E. C.; ZWONOK, O. **Panorama dos resíduos da combustão do carvão mineral e características químicas e físicas das cinzas de fundo das usinas do Rio Grande do Sul**, Rio Grande do Sul, 2013.

MARCON, A. F. **Durabilidade e módulo de elasticidade de misturas areia-cal e cinza volante**. 1977. Tese (Mestrado em Ciências), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MARRECO, J. M.; PEREIRA JUNIOR, A. O.; TAVARES, M. E. E. **Perspectivas para a Geração Termelétrica a Carvão**. In: V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Brasília, 2006.

MASSAZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. **LEA's Chemistry of Cement and Concrete**, 4. ed, 1998.

MATEOS, M. **Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash**. Iowa University, 1961.

MEDINA, J.; PREUSSLER, E.S. Características resilientes de solos em estudos de pavimentos. **Solos e Rochas**, v. 3, n. 1, 1980.

MEDINA, J., MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

MEHTA, P. H.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

MELIANDE, A. M. C. **Análise do Comportamento de Misturas de Solos com Cinza Volante de Carvão Mineral e Cal**. 2014. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC/RJ) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MUDGAL, A.; NEGI, P.; SARKAR, R. Utilization of Fly Ash Mixed With Lime in Pavement Sub-Base. **International Journal of Civil Engineering and Applications**, v. 3, n. 2, p. 22-25, 2013.

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

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

NICHOLSON, P.; KASHYAP, V. **Fly ash stabilization of tropical Hawaiian soils**. **Geotechnical Special Publication**, New York, n. 36, 1993.

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.

OLIVEIRA, P. V. **Aplicabilidade de resíduos e rejeitos ambientais para aproveitamento em pavimentação**. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2011.

PASSOS, J. A. L.; NEDER, L. T. C. **Encapsulamento: Uma Técnica Moderna de Processamento de Resíduos Sólidos Perigosos**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

PINTO, S. **Estabilização de areia com aditivo de cal e cinza volante**. 1971. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PRIETTO, P. D. M. **Estudos do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

RANGANATH R. V., BHATTACHARJEE, B., KRISHNAMOORTHY, S. Influence of Size Fraction of Pondered Ash on Its Pozzolanic Activity. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 5, p. 746-761, 1998.

ROBNETT, Q. L.; THOMPSON, M. R. Soil stabilization literature reviews. **Civil Engineering Studies**, Illinois, v. 34, 1969.

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

ROCHA, J. C.; MALIK, C.; POZZOBON, C.; MAIA, M. S.; MAGRI, L.; XAVIER, S. M. T. Reaproveitamento das cinzas pesadas do Complexo Jorge Lacerda na elaboração de materiais de construção: aspectos tecnológicos e ambientais. In: **XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Foz do Iguaçu, Paraná, 1999.

ROJAS, J. W. J.; CONSOLI, N. C.; HEINECK, K. S. **Tratamento de solo contaminado: análise do encapsulamento de metais pesados**. Estudos Tecnológicos (Online), 2009.

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), **Anais do XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia**. Itajaí: Univali, 2011.

SABEDOT, S.; SUNDSTRON, M. G.; BÖER, S. C.; SAMPAIO, C. H.; DIAS, R. G. O. Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas. In: **Anais do III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral**, Gramado, 2011.

SALVADOR, F. S.; ROCHA, J. C.; ANDRADE, L. B.; CHERIAF, M. **Análise da Influência de Cinzas Pesada como Agregado Miúdo em Concreto na Absorção Capilar e Retração Plástica**. XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Florianópolis, 2006.

SAMPAIO, E. A. N. **Análise da viabilidade técnica do uso de borracha de pneus inservíveis como modificadores de asfaltos produzidos por refinarias do Nordeste.** Unifacs, Salvador, 2005.

SANTOS, J. **Estabilização de uma argila laterítica do Distrito Federal para uso em rodovias de baixo volume de tráfego.** 2004. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

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

SCHROEDER, R. L. **The Use of Recycled Materials in Highway Construction, U.S.** Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1994.

SECRETARIA DA INFRAESTRUTURA DO CEARÁ – SEINFRA. Disponível em: <<http://www.seinfra.ce.gov.br>>. Acesso em: 2 maio. 2017.

SANTA, R. A. A. B. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da industrial de papel.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, A. J. **Estudo da viabilidade de utilização da cinza pesada em adição ao concreto compactado com rolo (CCR) destinado a camada de base de pavimentos híbridos.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SIMON, H.S.; JEFFERY, J. M. An X-Ray Study of Pulverised Fuel Ash. **Journal of Applied Chemistry**, London, v. 10, p. 328-336, 1960.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO.; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa: Relatório de Referência**, Brasília, Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010.

SINGH, M.; SIDDIQUE, R. Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 72, p. 20-32, 2013.

SOUSA JÚNIOR, J. D. **Efeito da Energia de Compactação em Propriedades dos Solos Utilizados na Pavimentação do Estado do Ceará.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SUN, Y. Q.; DUAN, L.; QIAN, H.; ZHANG, Y.J. **Fly ash leaching and the influence of the leach to water environment.** Geotech Invest Surve, 2009.

SUNDSTRON, M.G. **Caracterização e avaliação das cinzas da combustão de carvão mineral geradas na região do baixo Jacuí – RS.** 2012. Dissertação (Mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais em Mineração), Centro Universitário La Salle, Canoas.

SURABHI. Fly ash in India: Generation vis-à-vis Utilization and Perspectiva global. **International Journal of Applied Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 29-52, 2017.

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

TRICHÊS, G.; FARIAS, E. R.; MACCARINI, M. Análise dos aspectos mecânicos da utilização de misturas solo-cinzas-pesadas na pavimentação rodoviária. **In: Congresso da Associação Brasileira de Ensino e Pesquisa em Transporte. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes**, v. 2, p. 1291-1302, 2006.

TURIEL, J. L.F.; GEORGAKOPOULOS, A.; GIMENO, D.; PAPASTERGIOS, G.; KOLOVOS, N. Ash deposition in a pulverized coal-fired power plant after high-calcium lignite combustion. **Energy e Fuels**, v.18, p. 1512-1518, 2004.

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. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

VASCONCELOS, S. D.; ALMEIDA, H. B. F.; BARROSO, S. H. A. Avaliação da Heterogeneidade de Cinzas de Carvão Mineral Advindas da Usina Termelétrica Energia Pecém e sua Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos. **In: Anais do X Congresso Brasileiro de Carvão Mineral**, 2017, Criciúma.

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

WIKIHAND. **Fly Ash**, 2017. Disponível em: <http://www.wikiwand.com/en/Fly_ash> Acesso em: 2 out. 2017.

YADAV, A.; YADAV, N. K. Study of Fly Ash Cement Concrete Pavement. **International Journal of Civil Engineering**, v. 4, p. 1-6, 2017.

YAO, Z. T.; Ji, X. S.; SARKER, P. K.; TANG, J. H.; GE L, Q.; XI, A. M. S.; XI, Y. Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. **Earth-Science Reviews**, v. 141, p. 105-121, 2015.

ZAGA, J. P. **Estudo da deformação permanente de três solos típicos de subleitos rodoviários de Santa Maria – RS**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N. I. W. **Identificação dos usos possíveis (estado da arte) para as cinzas de carvão mineral de termelétricas brasileiras**. Relatório Técnico. Porto Alegre, CIENTEC, 1996.