



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

MARIOLEIDE DE FARIAS XAVIER

**AVALIAÇÃO DO USO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL COMO
MELHORADOR DE ADESIVIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

FORTALEZA

2016

MARIOLEIDE DE FARIAS XAVIER

**AVALIAÇÃO DO USO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL COMO
MELHORADOR DE ADESIVIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

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 Ciências (M.Sc.). Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.
Orientadora: Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

FORTALEZA

2016

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)

X21a Xavier, Marioleide de Farias.

Avaliação do Uso de Cinzas de Carvão Mineral como Melhorador de Adesividade em Misturas Asfálticas / Marioleide de Farias Xavier. – 2016.

118f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.

1. Misturas asfálticas. 2. Cinza de carvão mineral. 3. Dano por umidade induzida. I. Título.

CDD 388

MARIOLEIDE DE FARIAS XAVIER

**AVALIAÇÃO DO USO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL COMO
MELHORADOR DE ADESIVIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

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 Ciências (M.Sc.). Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 16/12/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D. (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Sandra de Aguiar Soares, Dra. (Examinadora Externo)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Manuela de Mesquita Lopes Gennesseaux, Dra. (Examinador Externo).
Escola Politécnica da USP

A Deus.

Aos meus pais, Calbi e Maria (Eunice), pelo apoio e incentivo que me deram para atingir meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

À Prof.^a Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, pela excelente orientação e pela ajuda nos momentos difíceis.

Ao Prof. Jorge Barbosa Soares, pelo apoio e pela parceria com o Grupo ENEVA, incluindo as Usinas Termoelétricas Pecém I e II.

Ao Grupo ENEVA, incluindo as Usinas Termoelétricas Pecém I e II, pelo apoio financeiro e pelo fornecimento das amostras de cinzas de carvão mineral.

À Pedreira POLIMIX por ter fornecido todos os agregados usados nesta pesquisa.

Ao técnico de laboratório Rômulo pelo auxílio e apoio necessário ao desenvolvimento deste trabalho.

A todos que compõem o LMP.

Ao professor Eduardo Cabral e a todos que formam o Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Estruturas da UFC, pelo apoio acadêmico e pelo fornecimento de resultados.

À Professora Juliana Fátima, que me deu todo apoio na correção da versão final deste trabalho no que tange à língua portuguesa.

“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento.” (Provérbios 3:13)

“La pelota que arrojé cuando jugaba en el parque aún no ha tocado el suelo.” (Dylan Thomas)

RESUMO

O dano por umidade causa impactos negativos sobre o pavimento asfáltico, podendo agravar os defeitos comumente encontrados nessas estruturas. O contato com a umidade pode resultar na degradação da adesão entre o ligante asfáltico e os agregados. Este trabalho trata da avaliação do uso de cinzas de carvão mineral como melhoradoras de adesividade em misturas asfálticas, utilizando-as como filer mineral, e ainda realizando a comparação entre o comportamento mecânico de misturas asfálticas contendo cinza de carvão mineral, cal hidratada do tipo CH-I e pó de pedra como fileres. Para o desenvolvimento do presente trabalho foram coletadas cinzas volantes "frescas" diretamente dos silos de processo e cinzas do módulo de armazenamento das usinas termoelétricas, totalizando 34 amostras. As cinzas de carvão mineral coletadas no módulo de armazenamento apresentaram granulometria mais graúda em relação às cinzas volantes "frescas". A caracterização química do material coletado, por meio das técnicas de difração e de fluorescência de Raios-x, mostrou que o material coletado é bastante heterogêneo, e que 67,7% das cinzas coletadas são pertencentes à Classe C, segundo norma ASTM C618/2015, sendo o restante das cinzas enquadradas na Classe F. Com relação à avaliação aos ensaios de resistência à tração, o uso das cinzas de carvão mineral num percentual de 4% em peso de agregado não representou incremento na resistência a tração das misturas estudadas, porém quando se utilizou as cinzas associadas à cal percebeu-se aumento na rigidez nas misturas asfálticas estudadas. Na avaliação da resistência ao dano causado pela umidade, por meio do ensaio de *Lottman* modificado, ficou evidente que o uso de cinzas num teor de 4% em peso de agregado apresentou resultados similares aos do filer natural, obtendo valores de RRT (Relação de Resistência à Tração) médio abaixo de 50%. Já o uso das cinzas associadas à cal representou aumento da resistência ao dano por umidade, obtendo-se RRT médio maior que 80%. Ressalta-se que fato de algumas cinzas pertencerem a Classe C ou F, ou mesmo o fato de algumas cinzas serem mais alcalinas que outras, não refletiram em ganhos significativos de resistência ao dano por umidade.

Palavras-chave: Misturas asfálticas, cinza de carvão mineral, dano por umidade induzida.

ABSTRACT

The moisture damage cause negative impacts on the asphalt pavement, which may aggravate the defects commonly found in these structures. Contact with moisture may result in degradation of adhesion between the asphalt binder and the aggregates. This work deals with the evaluation of the use of coal ash as adhesivity improvers in asphalt mixtures, using them as mineral filler, and also comparing the mechanical behavior of asphalt mixtures containing mineral coal ash, hydrated lime CH -I type and stone powder as fillers. For the development of the present work, were collected fly ashes directly from the process silos and ashes from the storage module of the thermoelectric power plants, totalizing 34 samples. Coal ash collected in the storage module showed a larger grain size than the fly ash. The chemical characterization of the collected material, through diffraction and X-ray fluorescence techniques, showed that the collected material is quite heterogeneous, with 67.7% of the collected ashes belonging to Class C, and the rest of the ashes framed In Class F, according to ASTM C618 / 2015. Regarding the evaluation of tensile strength tests, the use of coal ash in a percentage of 4% by weight of aggregate did not represent an increase in the tensile strength of the mixtures studied, however, when the ash was associated with lime, occurred a increase in stiffness in the studied asphalt mixtures. In the evaluation of moisture damage, through the use of modified *Lottman* test, it was evident that the use of ashes at a 4% by weight of aggregate presented results similar to those of the natural filler, obtaining values of average ITS below than 50%. On the other hand, the use of ash associated with lime represented an increase in resistance to moisture damage, obtaining an average of indirect tensile strength greater than 80%. The fact of some ashes belong to Class C or F, or even that some ashes be more alkaline than others, did not reflect significant gains in resistance to moisture damage.

Keywords: Asphalt mixtures, coal ash, moisture damage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Materiais obtidos a partir da queima do carvão em termoelétricas.....	7
Figura 2	– Partículas de cinzas volantes vistas ao microscópio eletrônico.....	8
Figura 3	– Módulo de Resiliência (MR) para amostras de misturas asfálticas contendo cinza pesada com fíler em diferentes percentuais.....	16
Figura 4	– Efeito esquemático da água sobre uma gota de ligante asfáltico em contato com a superfície de um agregado.....	19
Figura 5	– Fontes de água para o pavimento.....	21
Figura 6	– Dois mecanismos possíveis de dano por umidade. (a) poro pressão: gera microtrincas e desagregação, (b) difusão: causa descolamento do ligante asfáltico.....	24
Figura 7	– Esquema de tipos de dano causados pela umidade induzida em misturas asfálticas.....	25
Figura 8	– Química envolvida na ligação entre o agregado e o ligante asfáltico (Estágio 1).....	27
Figura 9	– Química envolvida na ligação agregado-ligante asfáltico (Estágio 2).....	28
Figura 10	– Classificação dos vazios na mistura asfáltica.....	34
Figura 11	– Dano causado pela umidade expresso através da razão N_f (razão tração indireta, para amostras condicionadas e não condicionadas) versus o diâmetro médio de V_v para uma mistura asfáltica densa contendo agregados graníticos.....	35
Figura 12	– Efeito da cal na superfície do agregado.....	36
Figura 13	– Líquido anti-stripping HP Plus.....	38
Figura 14	– Cinza volante (<i>fly ash</i>).....	39
Figura 15	– Curvas granulométricas dos agregados coletados na POLIMIX.....	44
Figura 16	– Agregados graníticos usados no programa experimental.....	45
Figura 17	– Plano de amostragem de coleta.....	46
Figura 18	– Ilustração esquemática e exemplo de Compactador Giratório Superpave (CGS).....	47
Figura 19	– Volumes considerados no cálculo de G_{mm}	48
Figura 20	– Realização do Ensaio de Resistência à Tração.....	51
Figura 21	– Classificação dos vazios na mistura asfáltica.....	59
Figura 22	– Variação na composição dos principais constituintes químicos para as cinzas	

	coletadas na superfície do módulo de armazenamento (pontos PA-1 a PA-21).....	59
Figura 23	– Variação na composição dos principais constituintes químicos para as cinzas coletadas em profundidade do módulo de armazenamento (pontos PP1 e PP2).....	60
Figura 24	– Variação na composição dos principais constituintes químicos para as cinzas coletadas volantes “frescas” coletas nas Usinas Pecém I e II.....	60
Figura 25	– Difratoograma obtido para a cinza coletada em PA-01.....	63
Figura 26	– Difratoograma obtido para a cinza coletada em PA-13.....	63
Figura 27	– Difratoograma obtido para as cinzas volantes “frescas” de Pecém I.....	64
Figura 28	– Difratoograma obtido para as cinzas volantes “frescas” de Pecém II.....	64
Figura 29	– Granulometria para as cinzas PA-01 e PA- 13.....	65
Figura 30	– Granulometria para as cinzas volantes "frescas" de Pecém I e II.....	65
Figura 31	– Variação na composição dos principais constituintes químicos para as cinzas, da cal e das cinzas+cal.....	69
Figura 32	–Curva granulométrica de projeto.....	71
Figura 33	– Resultados de RT obtido para as dosagens usando pó de pedra, Cal CH-I e cinzas.....	74
Figura 34	– Resultados de RT obtidos usando pó de pedra, Cal CH-I e cinzas, mas com o percentual de CAP fixado em 5%.....	75
Figura 35	– Resultados de RT obtido para as dosagens usando cal, cal + pó de pedra, cal + cinzas.....	77
Figura 36	–Resultados de RT obtidos usando cal, cal + pó de pedra e cal + cinzas, mas com o percentual de CAP fixado em 5%.....	77
Figura 37	– Resultados de RRT obtido obtidos para as dosagens usando pó de pedra, cal hidratada CH-I e cinzas.....	81
Figura 38	– Resultados de RRT obtido usando pó de pedra, cal CH-I e cinzas, mas com teor de CAP fixado em 5%.....	84
Figura 39	– Resultados de RRT obtido para as dosagens com cal, pó de pedra+cal, cinzas +cal.....	85
Figura 40	– Resultados de RRT obtido para as misturas contendo cal, pó de pedra+cal, cinzas +cal, com teor de CAP fixado em 5%.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Propriedades físicas das cinzas pesadas.....	9
Tabela 2	– Resultados das análises granulométricas realizadas nas cinzas pesadas.....	9
Tabela 3	– Composição química das cinzas leves encontradas na literatura.....	10
Tabela 4	– Composição química das cinzas pesadas encontradas na literatura.....	11
Tabela 5	– Resultados de RT.....	17
Tabela 6	– Resultados de MR.....	17
Tabela 7	– Fatores que contribuem para o dano por umidade induzida em misturas asfálticas.....	20
Tabela 8	– Falha adesiva ou coesiva associadas aos mecanismos de danos provocados pela umidade.....	23
Tabela 9	– Resultados da caracterização do ligante asfáltico usado nesta pesquisa.....	43
Tabela 10	– Resultados de granulometria.....	44
Tabela 11	– Caracterização das cinzas coletadas na Usina Termelétrica Energia Pecém, para os pontos em superfície PA–01 a PA–10.....	54
Tabela 12	– Caracterização das cinzas coletadas na Usina Termelétrica Energia Pecém, para os pontos em superfície PA11 a PA21.....	55
Tabela 13	– Caracterização das cinzas coletadas na Usina Termelétrica Energia Pecém, para os pontos em profundidade (PP1 e PP2).....	57
Tabela 14	– Caracterização das cinzas volantes “frescas” das Usinas Pecém I e II.....	58
Tabela 15	– Caracterização das amostras de cal, pó de pedra, pó de pedra+cal e cinza+cal.....	68
Tabela 16	– Parâmetros de dosagem das misturas asfálticas avaliadas até o momento.....	71
Tabela 17	– Valores de RRT (MPa) para as misturas asfálticas dosadas com pó de pedra, cal e cinzas.....	80
Tabela 18	– Valores de RRT (MPa) para as misturas asfálticas com teor de CAP fixo em 5%.....	83
Tabela 19	– Valores de RRT (MPa) para as misturas asfálticas dosadas com cal, pó de pedra+cal, cinzas +cal.....	85
Tabela 20	– Resultados de RRT obtido para as misturas contendo cal, pó de pedra+cal, cinzas +cal, com teor de CAP fixado em 5%.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ACAA	<i>American Coal Ash Association</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	Corpo de Prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
FBC	<i>Fluidized Bed Combustion</i>
FGD	<i>Flue Gas Desulphurization</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
IPRF	<i>Innovative Pavement Research Foundation</i>
MIST	<i>Moisture Induced Stress Tester</i>
RRT	Relação de Resistência à Tração
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
MR	Módulo de Resiliência
RT	Resistência a Tração
Superpave	<i>Superior Performing Asphalt Pavement System</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
CGS	Compactador Giratório Superpave
SATS	<i>Saturation Ageing Tensile Stiffness</i>
UTE	Unidade Termoelétrica
Vv	Volume de vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Problema de Pesquisa	2
1.3	Questões de Pesquisa	3
1.4	Objetivos	4
1.4.1	<i>Objetivo Geral</i>	4
1.4.2	<i>Objetivos Específicos</i>	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Cinzas de Carvão Mineral	5
2.1.1	<i>Origem e Classificação das Cinzas</i>	5
2.1.2	<i>Características Físicas das Cinzas</i>	7
2.1.3	<i>Características Química das Cinzas</i>	9
2.2	Papel do Fíler em Misturas Asfálticas	11
2.3	Utilização de cinzas volantes (<i>fly ashes</i>) na pavimentação	13
2.4	Utilização das cinzas pesadas (<i>bottom ashes</i>) na pavimentação	15
2.5	Dano por umidade induzida	17
2.5.1	<i>Definição</i>	17
2.5.2	<i>Defeitos em Pavimentos Relacionados à Umidade</i>	19
2.5.3	<i>Mecanismos Relacionados ao Dano por Umidade</i>	21
2.5.4	<i>Características da Ligação Agregado-Ligante Asfáltico</i>	25
2.5.5	<i>Fatores que Influenciam a Ligação Adesiva entre o Ligante Asfáltico e o Agregado</i>	29
2.5.6	<i>Estrutura de Vazios na Mistura Asfáltica e Sua Relação com o Dano Relacionado a Umidade</i>	33
2.6	Aditivos Usados em Misturas Asfálticas para Prevenção do Dano por Umidade Induzida	35
2.6.1	<i>Utilização da Cal como Aditivo em Misturas Asfálticas</i>	35
2.6.2	<i>Aditivos líquidos anti-stripping</i>	37
2.6.3	<i>Cinzas Volantes (Fly Ash) e o Desempenho nas Misturas</i>	39
2.6.4	<i>Poeira de Forno de Cimento (Cement Kiln Dust)</i>	40
2.6.5	<i>Outros aditivos</i>	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	INTRODUÇÃO	42
3.2	MATERIAIS	42
3.2.1	<i>Ligante asfáltico</i>	42
3.2.2	<i>Agregados Naturais</i>	43
3.2.3	<i>Cinzas</i>	45
3.3	Dosagem das Misturas Asfálticas	46
3.3.1	<i>Concreto Asfáltico (CA) Contendo Fíler Natural</i>	48
3.3.2	<i>Concreto Asfáltico (CA) Contendo Cinzas e Cal Hidratada como Fíler</i>	49
3.3.3	<i>Moldagem das amostras de mistura asfáltica</i>	49

3.4	Métodos de Ensaio para Caracterização das Misturas Asfálticas.....	50
3.4.1	<i>Resistência a Tração (RT)</i>	<i>50</i>
3.4.2	<i>Ensaio de Lottman modificado</i>	<i>51</i>
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
4.1	Caracterização das Amostras de Cinzas	53
4.2	Caracterização das Amostras de Cal, Filer Natural, Filer Natural+Cal, Cinza+Cal	67
4.3	Dosagens das Misturas Asfálticas.....	70
4.4	Resultados de RT.....	73
4.5	Resultados de RRT.....	79
5	CONCLUSÕES	89
5.1	Considerações Iniciais	89
5.2	Principais Conclusões	89
5.2.1	<i>Caracterização das Cinzas</i>	<i>89</i>
5.2.2	<i>Caracterização da cal, Filer Natural, Cinzas+Cal, Filer Natural+Cal</i>	<i>90</i>
5.2.3	<i>Dosagens das Misturas Asfálticas</i>	<i>90</i>
5.2.4	<i>Resistência à Tração</i>	<i>91</i>
5.2.5	<i>Resistência ao Dano por Umidade Induzido.....</i>	<i>92</i>
5.2.6	<i>Sugestões e Recomendações para Estudos Futuros</i>	<i>93</i>
	REFERÊNCIAS	95

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

O aumento da utilização de resíduos na pavimentação cresceu devido à limitação, a diminuição e, em alguns casos, ao esgotamento das fontes naturais. Aliado a isso, houve um forte crescimento industrial nas últimas décadas e, conseqüentemente, uma maior preocupação com a preservação ambiental. O governo e a sociedade vêm impondo medidas no sentido de compatibilizar o crescimento industrial com a preservação do ambiente. Neste contexto, além da criação de leis mais rigorosas, da realização de maior fiscalização e do surgimento de organizações em prol do meio ambiente pode ser citado também, como uma alternativa economicamente viável e sustentável, o aproveitamento de rejeitos industriais como insumo para serviços diversos, tal como é o caso proposto nesse trabalho com relação ao reaproveitamento de cinza de carvão mineral em serviços de pavimentação.

A geração de subprodutos é uma das conseqüências de qualquer processo industrial. Devido ao crescimento deste setor, torna-se cada vez maior a quantidade dos diversos tipos de rejeitos gerados, o que faz surgir a preocupação com o descarte adequado desses materiais e a, conseqüente, busca por soluções eficazes para a diminuição dos impactos ambientais e dos custos associados com seu acondicionamento e com a sua disposição final. Dessa forma, a utilização de cinza de carvão em projetos de pavimentação pode reduzir a necessidade de exploração de materiais naturais em jazidas, o que poderá reduzir, também, os custos associados a esses processos.

Durante o processo de produção de energia elétrica nas usinas termelétricas, o carvão mineral é pulverizado e colocado para queima nas fornalhas das caldeiras. O calor liberado da queima é transferido para a água que circula nos tubos que envolvem a fornalha, transformando-a em vapor. A energia térmica contida no vapor é transformada em energia mecânica e assim movimenta a turbina do gerador. Esse movimento dá origem à eletricidade.

A queima de carvão mineral para produção de eletricidade nas usinas termoelétricas gera resíduos diversos, dentre os quais podem ser destacadas as cinzas pesadas ou de fundo (*bottom ash*) e as cinzas leves ou volantes (*fly ash*) (ROHDE *et al.*, 2006). De acordo com Basu *et al.* (2009), o aumento do uso dessa matéria-prima (carvão mineral) para

produção de energia aumenta o problema da gestão dos resíduos sólidos gerados constituindo, assim, um problema ambiental. No Brasil, esse cenário não é diferente, segundo a EPE - Empresa de Pesquisas Energéticas (2016), o consumo de carvão mineral somente na geração de energia por usinas termelétrica passou de 2,1Mtep em 2006 para 4,5Mtep em 2015, representando um aumento de 53,3% no consumo deste combustível no período avaliado. No estado do Ceará a capacidade instalada de geração elétrica por termoeletricas passou de 1.046MW em 2005 para 1,949MW em 2015.

De acordo com a EPA - *United States Environmental Protection Agency* (2005), os diferentes tipos de cinza podem ter várias aplicações no campo da engenharia e vêm sendo utilizados há muitos anos pela humanidade. Nos tempos antigos, os romanos acrescentaram cinzas vulcânicas ao concreto para fortalecer estruturas como a do Panteão Romano e a do Coliseu, ambas existentes ainda hoje. O primeiro grande uso de cinzas de carvão em concreto nos Estados Unidos ocorreu em 1942 para reparar o vertedouro de um túnel na barragem *Hoover Dam*.

As cinzas volantes têm propriedades químicas e mecânicas que fazem dela um insumo largamente utilizado em produtos de concreto, em camadas de revestimento de pavimentos, pontes, edifícios, blocos de concreto, dentre outros (ACAA, 2013). Segundo EPA (2005), as cinzas volantes podem ainda ser utilizadas como filler mineral em revestimentos de pavimentos asfálticos, pois estas possuem a capacidade de aumentar a rigidez da mistura asfáltica, melhorar a resistência a deformação permanente, diminuir os custos em relação ao uso de outros filleres e reduzir o potencial relacionado ao dano por umidade induzida.

1.2. Problema de Pesquisa

Os grandes volumes de cinzas de carvão gerados estão ligados ao crescimento das usinas termelétricas e ao aumento do consumo anual de carvão mineral como combustível no mundo. No Brasil, a utilização do carvão para a produção de eletricidade cresceu devido ao baixo nível dos reservatórios das hidrelétricas e, conseqüentemente, a baixa produção de eletricidade por geração hidráulica. Segundo dados levantados pela EPE (2016), o uso do carvão para produção de eletricidade aumentou em 9,4% em 2015, se comparado ao ano anterior.

Sabe-se que o dano causado pela presença da umidade na mistura asfáltica trás consequências que se refletem na vida de serviço do revestimento, causando, assim, maior necessidade de ações relativas a intervenção e a manutenção dessas estruturas. O processo de dano por umidade é iniciado com o transporte da umidade, por meio de permeabilidade e/ou de difusão de vapor, para dentro da mistura asfáltica o que leva a diminuição da adesão e da coesão na estrutura (KENNEDY *et al.*, 1983; MASAD *et al.*, 2007). Com o intuito de minimizar os efeitos que a água pode causar ao pavimento, muitos métodos foram adotados para mitigar o dano causado pela umidade induzida em pavimentos asfálticos. Uma maneira comum, normalmente utilizada, é a adição de aditivos *antistripping* a composição da mistura asfáltica, os quais incluem normalmente o uso da cal hidratada, do cimento, das cinzas volantes, de aditivos comerciais, etc (HUANG *et al.*, 2010). As cinzas de carvão mineral podem proporcionar as misturas asfálticas efeitos benéficos, tais como: o aumento da resistência ao dano por umidade induzida, o aumento da resistência à deformação permanente e o aumento da vida de fadiga (XIE *et al.*, 2012).

No estado do Ceará, as usinas termoelétricas movidas a carvão acumulam elevadas quantidades de cinza de carvão mineral em seus módulos de armazenamento, sendo estas heterogêneas, pois são derivadas de carvões de origens diversas, além de serem produzidas por diferentes tecnologias de queima deste carvão. Aliado a isso, grande parte do material ora estocado não possui mercado consumidor definido, devido à falta de informações que apontem, de forma segura e satisfatória, sua aplicação como insumo na construção/fabricação/produção de produto ou serviço.

1.3. Questões de Pesquisa

Existem diversas questões interessantes a serem pesquisadas, envolvendo o assunto deste trabalho, dentre elas é possível destacar:

- De que forma a heterogeneidade das cinzas terá efeitos positivos, ou negativos, com relação aos teores de ligante asfálticos obtidos a partir das dosagens das misturas asfálticas?
- Como a heterogeneidade das cinzas de carvão mineral irá interferir nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica composta também pela mesma?

- É possível aumentar a resistência ao dano por umidade induzida de misturas asfálticas a partir da utilização de cinzas de carvão mineral como fíler, em relação aos materiais naturais normalmente utilizados em misturas asfálticas (pó de pedra e cal, por exemplo)?
- O uso de mistura de cinzas de carvão mineral e cal hidratada (do tipo CH-I), como fíler, pode melhorar a resistência ao dano por umidade induzida em misturas asfálticas?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desse estudo é avaliar o uso de cinzas de carvão mineral como melhorador de adesividade em misturas asfálticas que contém esse material como fíler.

1.4.2. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos para a pesquisa em questão propõem-se:

- Comparar propriedades físico-químicas das cinzas com aquelas obtidas para materiais naturais ou artificiais (a cal e o pó de pedra, por exemplo) normalmente utilizados como fíler em misturas asfálticas;
- Comparar parâmetros volumétricos a partir da realização de dosagens de misturas asfálticas compostas por cinzas provenientes de diferentes processos e fontes e por material de referência;
- Comparar o efeito do dano por umidade induzida em misturas asfálticas compostas por diferentes cinzas, por material de referência (pó de pedra) e por cal hidratada, utilizados como fíleres;
- Verificar o quanto a dopagem das cinzas de carvão mineral com a cal hidratada (do tipo CH-I) irá melhorar a resistência ao dano por umidade nas misturas asfálticas estudadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cinzas de Carvão Mineral

2.1.1. Origem e Classificação das Cinzas

O carvão mineral, de origem fóssil, foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas em larga escala pelo homem. Sua aplicação na geração de vapor para movimentar máquinas foi um dos pilares da primeira revolução industrial, iniciada na Inglaterra no século XVIII. Já no fim do século XIX, o vapor foi aproveitado na produção de energia elétrica. Ao longo do tempo, contudo, o carvão perdeu espaço na matriz energética mundial para o petróleo e para o gás natural, com o desenvolvimento dos motores a explosão. O interesse em utilizar carvão mineral reacendeu na década de 70, em consequência do aumento dos preços do petróleo (ANEEL, 2008).

De acordo com Rohde *et al.* (2006), a formação das cinzas acontece devido a combustão direta do carvão mineral. Esta é uma matéria-prima sólida constituída por duas frações, sendo uma orgânica (material volátil adicionado de carbono fixo) e outra mineral (argilas, quartzo, piritas, carbonatos, etc.). Pela ação do calor, a fração orgânica gera voláteis e coque, enquanto a fração mineral transforma-se em cinza com mineralogia modificada, tendo em vista a perda de água das argilas, a decomposição dos carbonatos, a oxidação dos sulfetos, etc. Segundo Silva *et al.* (1999), a combustão do carvão pulverizado, em altas temperaturas, entre 1.200°C e 1.600°C, num ambiente gasoso oxidante, com tempo de permanência das partículas em chama oxidante de 2 segundos, em média, é condição suficiente para a fusão total ou parcial da matéria mineral. Nesse processo, dois tipos de cinzas são formados, a saber: a cinza pesada e a cinza volante.

Segundo a ACAA (2013), quando o carvão mineral é queimado em uma termoelétrica para gerar energia elétrica, este produz resíduos que podem ser utilizados como matérias-primas ou produtos, principalmente, na construção civil. Esses materiais podem ser classificados como: cinza pesada ou de fundo (*bottom ash*), cinza leve ou volante (*fly ash*), gesso sintético (*synthetic gypsum*), escória ou cinza grossa (*boiler slag*), cenoesferas (*cenospheres*) e cinza de leito fluidizado de plantas de geração de energia a combustão (FBC

Ash). Para melhor compreensão e entendimento da caracterização de cada material obtido a partir da queima do carvão, segue a definição e também o modo de obtenção de cada um deles. A Figura 1 mostra a aparência destes materiais.

- Cinza leve ou volante (*fly ash*): é o material particulado finamente dividido arrastado pelos gases de combustão das fornalhas da caldeira e capturado pelos equipamentos de controle de emissões antes que este possa chegar à chaminé. Este material é constituído, principalmente, por compostos de sílica, de alumina e de cálcio (SILVA *et al.*, 1999, ACAA, 2013);
- Cinza pesada ou de fundo (*bottom ash*): é o material granular mais pesado, com textura mais rugosa, que é coletado no "fundo" de caldeiras das fornalhas. Este material representa cerca de 15 a 20% das cinzas produzidas numa usina termelétrica (SILVA *et al.*, 1999, ACAA, 2013);
- Gesso sintético (*synthetic gypsum*): é obtido em usinas de energia equipadas com sistema de dessulfurização de gases de combustão (do inglês FGD - *Flue Gas Desulphurization*) que controla as emissões, também conhecido como lavadores (ou *scrubbers*) que geram subprodutos que incluem o gesso sintético. Embora esse material não seja tecnicamente considerado como cinza, porque não está presente no carvão, o mesmo é gerido e regulamentado como produto da combustão do carvão mineral;
- Escória ou cinza grossa (*Boiler slag*): é a cinza fundida e coletada na base de caldeiras de gerações mais antigas que é esfriada com água e se estilhaça em partículas angulares negras com aparência vítrea;
- Cenosferas (*Cenospheres*): é o material colhido a partir de cinzas volantes e que é constituído por esferas microscópicas ocas;
- Cinza de leito fluidizado de plantas de geração de energia a combustão (*FBC Ash*): é a cinza obtida em plantas que recuperam resíduos de carvão como combustível através da utilização de leito fluidizado gerando cinza como subproduto.

Segundo Lopes (2011), as propriedades físico-químicas das cinzas oriundas da combustão do carvão mineral em usinas termelétricas são influenciadas por diversos fatores, dentre eles: composição do carvão; grau de beneficiamento e moagem do carvão; tipo, projeto e operação da caldeira; sistema de extração e manuseio das cinzas. Gothe (1990) afirma que, devido a estes fatores, as cinzas possuem variação na sua composição e nas suas propriedades

físico-químicas, não só de uma usina para outra, mas também de uma caldeira para outra dentro de uma mesma usina e até mesmo em uma determinada caldeira em tempos diferentes.

Figura 1– Materiais obtidos a partir da queima do carvão em termoelétricas



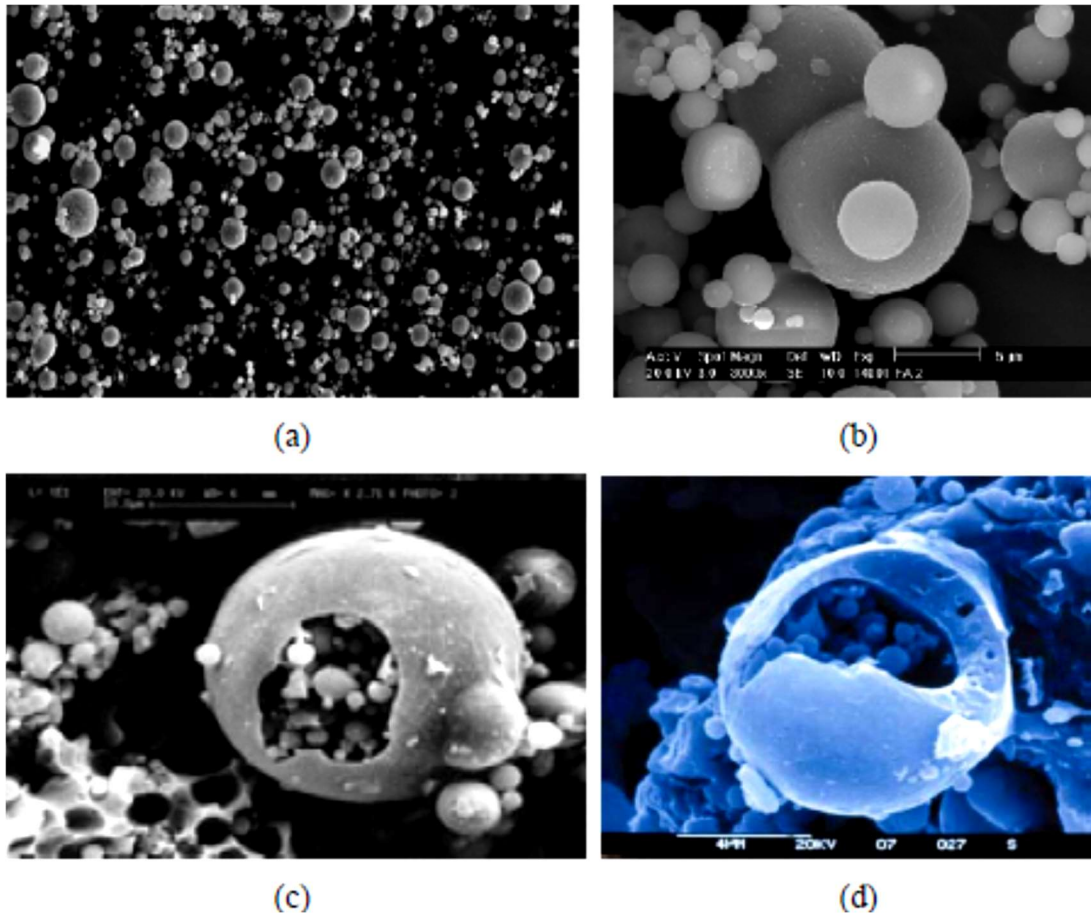
Fonte: Adaptado de ACAA (2013)

2.1.2. Características Físicas das Cinzas

Cinzas Volantes

As cinzas volantes são constituídas essencialmente por partículas esféricas, algumas ocas, chamadas de “cenoesferas”, e outras denominadas de “pleroesferas”, as quais contêm pequenas esferas dentro delas, como é apresentado na Figura 2 (FERNÁNDEZ, 2009). Chama-se atenção para o fato de que algumas cinzas apresentam partículas irregulares ou angulares. A maioria das partículas têm um diâmetro variável, entre $1\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$, porém o diâmetro médio das partículas de cinzas volantes varia de $7\mu\text{m}$ a $12\mu\text{m}$, valor semelhante as partículas do cimento (AZEVEDO, 2002). Segundo Faber e DiGioia (1976), as cinzas volantes possuem densidade variando entre 2,3 e 2,6, com um valor médio de 2,4.

Figura 2 – Partículas de cinzas volantes vistas ao microscópio eletrônico.



(a) Partículas esféricas que compõem as cinzas volantes;

(b) Detalhe da partícula esférica do tipo “cenoferas”;

(c) e (d) Detalhes de partículas esféricas do tipo “pleroesferas”.

Fonte: Adaptado de Fernández (2009)

As partículas com dimensões superiores a $125\mu\text{m}$ são bastante porosas. A ocorrência deste tipo de partículas de cinza está associada a grandes quantidades de carbono. Este material não queimado é responsável pelo elevado valor da superfície específica verificado na maioria das cinzas volantes (AZEVEDO, 2002).

Cinzas Pesadas

As cinzas pesadas possuem superfície angulares, irregulares, porosas, ásperas e com aparência e distribuição de tamanho de partícula semelhante às de areia de rio. A densidade das cinzas pesadas varia de 1,20 a 2,47, a depender da origem e do tipo de carvão utilizado no processo. Esse material apresenta densidade reduzida e textura porosa que prontamente se degrada sob a ação de carga ou da compactação. Os fatores que afetam as

propriedades das cinzas pesadas são: grau de pulverização do carvão; temperatura de queima no forno e tipo de forno. A Tabela 1 mostra algumas propriedades físicas das cinzas pesadas (SINGH, 2015).

Tabela 1 – Propriedades físicas das cinzas pesadas.

Propriedades Físicas	Ghafoori e Bucholc (1996)	Bai <i>et al.</i> (2005)	Yukse e Genc (2007)	Naik <i>et al.</i> (2007)	Kou e Poon (2009)	Kim e Lee (2011)	Singh (2015)
Densidade	2,5	1,5	1,4	2,1	2,2	1,9	1,4
Absorção de água (%)	7,0	30,4	6,1	13,6	28,9	5,5	31,6
Módulo de finura	2,8	-	-	-	1,8	2,4	1,4

Fonte: Adaptado de Singh (2015).

Zwonok, Chies e Silva (2006) mostram que os resultados das análises granulométricas realizadas nas cinzas pesadas podem ser consideravelmente diferentes, dependendo da origem do carvão. A partir dos dados apresentados na Tabela 2, os grãos predominantes são do tamanho dos grãos de areia e de silte em praticamente todos os tipos de cinzas e possuem baixos teores da fração argila, sendo classificados, segundo a granulometria, como materiais granulares.

Tabela 2 – Resultados das análises granulométricas realizadas nas cinzas pesadas.

Procedência das cinzas	Diâmetro dos grãos em (%)				
	Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa
Usina Termelétrica de Charqueadas – RS	1	44	41	13	1
Aracruz Celulose S.A, Guaíba – RS	1	29	34	26	10
Presidente Médici, Candiota – RS	1	30	42	20	7

Fonte: Zwonok, Chies e Silva (2006)

2.1.3. Características Química das Cinzas

Cinzas Volantes

As cinzas volantes (*fly ashes*) apresentam como constituintes principais os compostos químicos e cristais de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) óxido férrico (Fe_2O_3) e cal (CaO). Em quantidades substancialmente inferiores, aqueles apresentados anteriormente, existem outros componentes como os seguintes óxidos: MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 , MnO e TiO_2 . As cinzas leves também contêm partículas de carbono não consumidas na combustão (SILVA

et al., 1999; AZEVEDO, 2002; ACAA, 2003; FERNÁNDEZ, 2009). A norma ASTM C618 (2015) classifica as cinzas leves baseada na sua composição química, principalmente na soma de três óxidos, a saber: SiO₂, Al₂O₃eFe₂O₃. Os dois tipos e os requisitos primários exigidos pela norma são os seguintes: Classe F (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ ≥ 70%); e Classe C (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ ≥ 50%). As cinzas leves da Classe C apresentam geralmente teor de CaO maior que 20% (IPRF, 2011). Segundo a norma americana C618 (ASTM, 2015), as cinzas volantes pertencentes a classe F apresentam propriedades pozolânicas, mas não têm propriedades aglomerantes e hidráulicas, já as cinzas volantes pertencentes a classe C têm propriedades pozolânicas e aglomerantes. A Tabela 3 apresenta a composição química, em percentual de massa, das cinzas leves relatadas na literatura. Pode-se perceber que a composição destas cinzas é bastante variável, mostrando que este trata-se de um material heterogêneo.

Tabela 3 – Composição química das cinzas leves encontradas na literatura.

Composição química (%)	Neves <i>et al.</i> (1998)	Silva <i>et al.</i> (1999)	Siqueira <i>et al.</i> (2012)	Silveira, Silva e Guimarães (2014)
SiO ₂	54,76	67,00 - 71,00	33,80	1,82 - 9,38
Al ₂ O ₃	28,30	19,00 - 24,00	13,69	1,89 - 3,92
Fe ₂ O ₃	4,23	5,00 - 8,00	5,03	-
CaO	1,04	0,20 - 1,10	14,05	56,65 - 79,63
MgO	1,30	0,20 - 1,80	1,45	0,60 - 3,11
Na ₂ O	0,33	0,10 - 0,70	0,75	-
K ₂ O	2,84	0,40 - 1,50	1,20	0,24 - 0,47
SO ₃	-	0,10 - 0,70	7,33	12,77 - 17,60
NiO	-	-	-	1,80
FeO	-	-	-	0,31 - 2,12
TiO ₂	2,42	-	-	-
Li ₂ O	0,02	-	-	-
MnO	-	-	0,04	-
Cu	-	36 - 55 (ppm)	-	0,21
S	0,08	-	-	-
V	-	-	-	0,48 - 6,84

Cinzas Pesadas

Cinzas pesadas são compostas, principalmente, de sílica, de alumina e de ferro com pequenas quantidades de cálcio, magnésio, sulfatos, etc. A sua composição química é controlada pela fonte do carvão utilizado no processo (SINGH, 2015). As propriedades físico-químicas das cinzas pesadas podem variar de acordo com a composição do carvão mineral,

com o grau de moagem adotado no beneficiamento, com a pré-queima e com o sistema de extração e de transporte da cinza após a queima (GOTHE, 1990). A Tabela 4 apresenta a composição química das cinzas pesadas encontradas na literatura

Tabela 4 – Composição química das cinzas pesadas encontradas na literatura.

Composição química (%)	Yuksel, Genc (2007)	Bai <i>et al.</i> (2005)	Aramraks (2006)	Kasemchaisiri, Tangtermsirikul (2007)	Muhardi <i>et al.</i> (2010)	Gafoori, Bucholc (1996)	Singh (2015)	Moulton (1973)*
SiO ₂	57,90	54,80	46,20	38,64	42,70	41,70	56,44	53,60
Al ₂ O ₃	22,60	28,50	23,11	21,15	23,00	17,10	29,24	28,30
Fe ₂ O ₃	6,50	8,49	8,62	11,96	17,00	6,63	8,44	5,80
CaO	2,00	4,20	12,12	13,80	9,80	22,50	0,75	0,40
MgO	3,20	0,35	2,90	2,75	1,54	4,91	0,40	4,20
Na ₂ O	0,09	0,08	0,55	0,90	0,29	1,38	0,09	1,00
K ₂ O	0,60	0,45	2,13	2,06	0,96	0,40	1,29	0,30
TiO ₂	-	2,71	-	-	1,64	3,83**	3,36	-
P ₂ O ₅	-	0,28	-	-	1,04		-	-
SO ₃	-	-	0,42	0,61	1,22	0,42	0,24	-

* Composição para o carvão betuminoso (contem de 80% a 90% de carbono em sua composição) oriundo de West Virginia.

**Composição química representando P₂O₅ eTiO₂.

Fonte: Adaptado de Moulton (1973); Singh (2015)

2.2. Papel do Fíler em Misturas Asfálticas

O material de enchimento ou fíler constitui-se de um material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura asfáltica, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira n°200, a qual possui 0,075mm de abertura de malha quadrada (DNER-EM 367/97). Segundo Bardini *et al.* (2009), o fíler é utilizado como material de enchimento dos vazios entre agregados graúdos e miúdos, contribuindo para a redução dos vazios da mistura asfáltica, modificando a trabalhabilidade, a resistência a umidade induzida e ao envelhecimento da mesma. Em decorrência do pequeno tamanho das partículas e de suas características de superfície, o fíler age como material ativo, se manifestando nas propriedades da interface fíler/ligante asfáltico, não sendo, portanto, apenas um material inerte, como é apresentado na definição geral do antigo DNER, hoje DNIT.

A rigidez e a densidade de uma mistura asfáltica são afetadas pela porcentagem de material passante na peneira n°200 (0,075mm), mas também são influenciadas pela forma, pela natureza e pela granulometria destas partículas (MOTTA e LEITE, 2000). Se a maior parte do material de enchimento, que passa na peneira n°200, é relativamente graúda (acima de 40µm), este deve cumprir a função de preencher os vazios formados pelo esqueleto

mineral, diminuindo o Volume de vazios (V_v) e alterando o teor de projeto de ligante asfáltico. No entanto, um filer miúdo, com porcentagem significativa de material menor do que $20\mu\text{m}$, e até com alguma porção menor do que $5\mu\text{m}$, tende a ser incorporado ao ligante asfáltico modificando o mesmo e compondo um material (mástique) que envolve as partículas de agregados miúdos e graúdos (AASHTO, 1991).

Os vazios no filer compactado a seco podem ser medidos pelo método de Rigden (EN 1097-4), o qual consiste em compactar o filer a seco, resultando em uma mistura de grãos e em alguns espaços vazios, obtendo-se, assim, o volume de vazios presentes no filer. Estes vazios num mástique serão ocupados pelo ligante asfáltico, gerando dois tipos de ligantes em uma mistura asfáltica: o ligante asfáltico fixo, que preenche os vazios entre os grãos de filer e o ligante asfáltico livre, que é o excesso de ligante depois que os vazios são preenchidos (BLAZEJOWSKI, 2010).

Motta e Leite (2000) comentam que, teoricamente, quando a quantidade de ligante asfáltico aumenta além do índice de vazios Rigden, as partículas perdem o contato entre elas e a quantidade adicional de ligante asfáltico promove a lubrificação entre as mesmas. Quando a quantidade livre de ligante asfáltico diminui, a rigidez da mistura asfáltica tende a aumentar. Quanto mais fino for o filer, menor deve ser a relação filer-ligante asfáltico, pois o volume livre de ligante asfáltico é o responsável pelo aumento da espessura da película que recobre as partículas dos agregados. Em outras palavras, a razão do volume de ligante asfáltico livre pelo volume total de ligante asfáltico tem efeito significativo na rigidez do mástique.

O material passante na peneira nº200 ($0,075\text{mm}$) é designado como pó (*dust* em inglês) para distinguir da definição do filer tradicionalmente utilizada pelo DNIT. Esta distinção está relacionada à possível incorporação da parcela de finos no ligante em uma mistura asfáltica. Quando a porcentagem de pó aumenta, reduzem-se os vazios do esqueleto mineral e aumenta-se a trabalhabilidade da mistura asfáltica. Acima de um determinado teor, o pó começa a prejudicar a trabalhabilidade da mistura asfáltica bem como a estabilidade do esqueleto mineral, diminuindo os pontos de contato entre as partículas mais graúdas, alterando, também, a capacidade de compactação da mistura asfáltica.

Segundo Tunnicliff (1962), as partículas de filer reagem quimicamente e interagem fisicamente com o ligante asfáltico, enquanto que as partículas de agregado

preenchem parcialmente os vazios e apenas secundariamente formam a ligação ligante-filer. Craus et al. (1978) consideram, dentre os vários aspectos físico-químicos da interação filer-ligante asfáltico, a intensidade de adsorção como o fator mais importante de caracterização do filer. Kavussi e Hicks (1997), complementarmente, destacam os seguintes fatores:

- tipo de filer: graduação, textura superficial, superfície específica, forma dos grãos etc.; natureza do filer: a composição mineralógica e a atividade físico-química, que afetam a
- afinidade com o ligante asfáltico;
- concentração do filer na mistura.

A adição de filer provoca modificações no comportamento reológico do ligante asfáltico, uma vez que este aumenta o módulo complexo e reduz o ângulo de fase, associado à natureza rígida do filer mineral. O ligante asfáltico se comporta de forma distinta quando adicionado de filer, se comparado a outros modificadores, como os polímeros e a borracha de pneu moída, que apresentam módulo complexo menor que o dos ligantes asfálticos em temperaturas baixas ou intermediárias. Esses efeitos associados a incorporação do filer ao ligante asfáltico são mais significativos e favoráveis em altas temperaturas, devido ao aumento da rigidez do ligante asfáltico. Porém, em baixas temperaturas, o filer aumenta ainda mais a rigidez do ligante asfáltico, acarretando na redução da capacidade deste de relaxar tensões (BAHIA, 1995). De acordo com Bechara *et al.* (2008), as propriedades reológicas do mástique é resultado da combinação das características elástica, viscoelástica ou viscosa do ligante asfáltico e da natureza elástica do filer mineral, o que afeta as propriedades mecânicas da mistura asfáltica.

2.3. Utilização de cinzas volantes (*fly ashes*) na pavimentação

Segundo a FHWA (2003), as cinzas volantes de carvão formam um produto da combustão do carvão, que têm numerosas aplicações em serviços de pavimentação. As cinzas volantes foram usadas em serviços de pavimentação desde o início dos anos 50, nos Estados Unidos. Em 1974, a FHWA incentivou o uso de cinzas em pavimentos rígidos o que fez surgir a adição de cinzas no cimento, sempre que possível. Além disso, a Agência Federal de Proteção Ambiental Americana (*Environmental Protection Agency*, EPA) publicou em 1983 orientações para o uso de cimento e de concreto contendo cinzas volantes para incentivar a utilização desse material.

Quando utilizadas como filer, em misturas asfálticas, as cinzas volantes devem estar na forma seca. Tipicamente, as cinzas volantes são tratadas de um modo semelhante a cal hidratada sendo transportadas para a unidade de mistura asfáltica a quente; armazenadas em silos estanques na planta e dosadas na mistura asfáltica (FHWA, 2003).

As cinzas volantes podem ser utilizadas como filer em misturas asfálticas a quente usadas em serviços de pavimentação. Quando disponíveis localmente, as cinzas volantes podem ser economicamente viáveis se comparadas a outros materiais minerais. Ressalta-se, ainda, o fato dos fileres aumentarem a rigidez do mástique o que pode contribuir para a resistência global do pavimento. Além disso, as cinzas volantes reúnem as especificações técnicas de um filer mineral quanto a granulometria, ao teor de impurezas orgânicas e a plasticidade desses materiais. De acordo com Huang *et al.* (2010), a adição de 1% de cinza volante classe F como filer em uma mistura asfáltica gerou um resultados similares quando comparado a mistura asfáltica de controle, mas ligeiramente inferior se comparado aos resultados obtidos para a mistura asfáltica com utilização da cal como filer.

Androjić, Kaluđer e Komljen (2008) adicionaram cinzas volantes, ácidas com baixo teor de cálcio ($\text{CaO} \approx 17,63\%$), a mistura asfáltica em duas proporções: 3,0% e 6,2% em massa de agregado. Neste citado estudo foram avaliadas misturas asfálticas contendo pó-de-pedra natural e misturas asfálticas contendo cinzas leves. O percentual de ligante asfáltico utilizado nas misturas asfálticas contendo cinzas leves foi 0,5% superior se comparado aquele obtido para as misturas asfálticas contendo somente agregados naturais. Segundo os citados autores, as cinzas leves atenderam os critérios para serem utilizadas como agregados em misturas asfálticas de acordo com a legislação croata.

Asmael (2010) adicionou fileres em três percentuais 5,8%, 7,8% e 9,8% em peso de agregado à mistura asfáltica, e produziu misturas asfálticas contendo três tipos de fileres: cinza volante, cimento Portland e sílica. Segundo a autora, as misturas asfálticas contendo cinzas volantes como filer possuem menor resistência a tração se comparadas as outras misturas asfálticas estudadas. A incorporação de cinzas volantes como filer provocou uma redução nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas, pois houve redução nos valores de RT da ordem de 50% quando se utilizou 9,8% de cinzas em peso de agregado como filer, em relação às misturas asfálticas contendo cimento Portland ou sílica como filer. Quando se utilizou as cinzas numa proporção de 5,8% em peso de agregado como filer na mistura

asfáltica, também houve redução nos valores de RT, sendo da ordem de 25% em relação a mistura contendo cimento Portland como filer, e da ordem de 40% para a mistura contendo sílica como filer. De acordo com a autora, quantidades em excesso de cinzas volantes na mistura asfáltica produziram pavimentos que apresentavam trincas durante sua execução.

Vale ressaltar que segundo Beretka e Brown (1977), a cinza volante é um material heterogêneo e alterações na operação de queima e nos combustíveis utilizados, afetam a composição e o tamanho de suas partículas. Snyder (1967) admite, ainda, que, devido a cinza ser um material extremamente variável, é importante que a mesma seja caracterizada antes da sua utilização. O autor afirmou que não existem duas cinzas com características iguais.

Além da aplicação das cinzas volantes com fileres em misturas asfálticas, as mesmas também podem ser utilizadas na composição de camadas granulares. A cinza volante e a cal podem ser combinadas com agregados para produção de bases estabilizadas (FHWA, 2003).

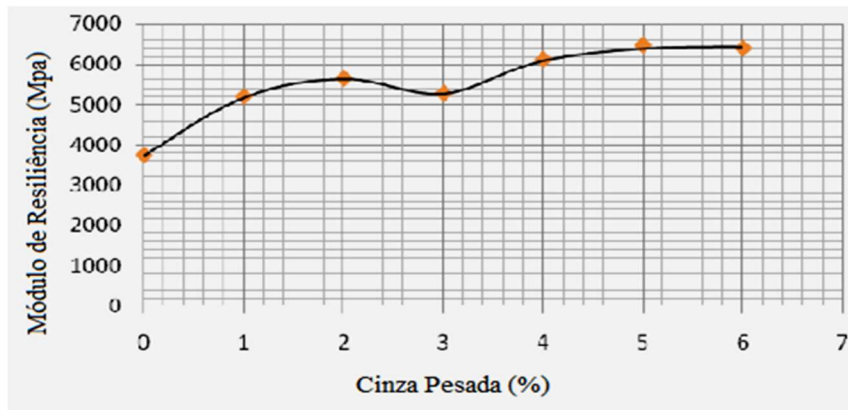
2.4. Utilização das cinzas pesadas (*bottom ashes*) na pavimentação

Schroeder (1994) apresenta a cinza pesada como material adequado para ser utilizado em camadas de sub-base de pavimentos e como material fino (fíler) para ser usado em misturas asfálticas. Segundo Weber (2010), o uso de cinza pesada em misturas asfálticas a quente se mostrou eficiente, atingindo resultados satisfatórios com relação a resistência a tração, sendo superiores aos 0,65MPa recomendado pela Norma DNIT-ES 31. Porém percebeu-se que, apesar da cinza possuir granulometria semelhante a da areia, a mesma é muito porosa, o que pode refletir numa alta absorção do ligante asfáltico utilizado na mistura asfáltica.

Vasudevan (2013) adicionou cinza pesada (*bottom ash*) a mistura asfáltica a quente e verificou que quando o percentual de cinza pesada adicionada a mistura asfáltica como filer é aumentado, os valores de Módulo de Resiliência (MR) das misturas asfálticas contendo esses materiais também aumentam. Na Figura 3 é possível observar os valores de MR obtidos por esses citados autores para as misturas asfálticas contendo apenas agregados naturais e aquelas contendo as cinzas pesadas com filer em seis percentuais distintos, a saber: 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%. Percebe-se que as misturas asfálticas, com 5,1% de ligante

asfáltico, contendo agregados naturais como filer obtiveram MR em torno de 3.732MPa. Já a mistura asfáltica contendo cinza pesada como filer, com percentual de 6%, resultou em valores de MR em torno de 6.500MPa, ou seja 1,7 vezes superior.

Figura 3– Módulo de Resiliência (MR) para amostras de misturas asfálticas contendo cinza pesada com filer em diferentes percentuais.



Fonte: Adaptado de Vasudevan (2013).

Weber *et al.* (2012) acrescentaram cinzas pesadas de carvão mineral a misturas asfálticas a quente. Para o estudo foram confeccionados corpos de prova com percentuais de cinza pesada de 6% e 10%. A substituição do agregado natural pela cinza ocorreu na faixa granulométrica correspondente à faixa C do DNIT entre as peneiras de nº #4 e #200 com pequeno ajuste nas outras faixas. Os valores de Resistência à Tração (RT) obtidos para estas misturas foram superiores a 0,65 MPa, sendo este o valor recomendado pela DNIT-ES031 (2006), tal como mostra a Tabela 5. O aumento no teor de ligante asfáltico para a mistura que continha cinza gerou um consequente aumento no valor de RT. Com relação ao MR, o resultado deste ensaio diminuiu a partir do aumento do percentual de cinza pesada utilizada na mistura asfáltica. Para um mesmo teor de cinza, os comportamentos foram distintos: com 6% de cinza, o MR diminuiu com o aumento do teor de ligante asfáltico, e com 10% de cinza o MR aumentou com o aumento do teor de ligante asfáltico, tal como apresentado na Tabela 6. Os autores avaliaram ainda o dano por umidade para a mistura contendo 6% de cinza pesada, o resultado de RRT obtido foi de 35%, o que pode indicar um problema de adesividade agregado/ligante asfáltico e comprometer o bom comportamento dessa mistura à ação deletéria da água. Uma provável causa desse baixo valor, segundo os autores, pode estar associada à elevada porosidade da cinza pesada, que durante a execução da mistura poderia estar absorvendo o ligante, antes que este consiga cobrir adequadamente os agregados graúdos. Outra hipótese pode estar relacionada com a constituição química dos materiais, tanto dos

agregados como da própria cinza. Segundo Weber (2010), o uso de cinzas pesadas em misturas asfálticas a quente é viável, pois as cinzas apresentam características mecânicas adequadas para o uso em rodovias, no entanto, devido a alta porosidade deste material, nas misturas asfálticas dosadas foi utilizada maior quantidade de ligante se comparadas as misturas asfálticas contendo fileres naturais, já que a mistura asfáltica convencional gerou um teor de ligante.

Tabela 5– Resultados de RT.

Mistura Asfáltica	Convencional 5,0% Ligante	6% cinza + 5,5% Ligante	6% cinza + 6,0% Ligante	10% cinza + 6,0% Ligante	10% cinza + 6,5% Ligante
Resistência a Tração (MPa)	1,20	1,26	1,50	1,28	1,48

Fonte: Adaptado de Weber *et al.* (2012).

Tabela 6– Resultados de MR.

Mistura Asfáltica	Convencional 5,0% Ligante	6% cinza + 5,5% Ligante	6% cinza + 6,0% Ligante	10% cinza + 6,0% Ligante	10% cinza + 6,5% Ligante
Módulo de Resiliência (MPa)	4.861	4.283	4.130	3.742	4.382

Fonte: Adaptado de Weber *et al.* (2012).

2.5. Dano por umidade induzida

2.5.1. Definição

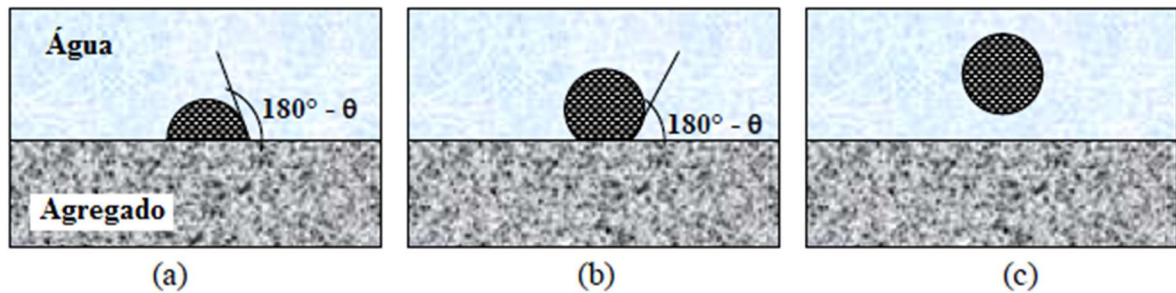
Dano pode ser definido como o grau de perda de funcionalidade de um dado sistema. Dentro deste contexto, danos provocados pela umidade em misturas asfálticas são amplamente definidos como a degradação de propriedades mecânicas do material, devido à presença de umidade no estado líquido ou vapor. Provavelmente a definição mais abrangente de danos causados pela umidade na literatura é fornecida por Kiggundu e Roberts (1988) como a deterioração funcional progressiva de um pavimento dada pela perda da ligação adesiva entre o CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) e a superfície dos agregados e/ou pela perda da resistência coesiva dentro do CAP, principalmente, a partir da ação da água. Segundo Hicks, Santucci e Aschenbrener (2003), problemas relacionados ao dano por umidade são acelerados devido a: (i) falha adesiva: acontece quando a água infiltra na interface agregado-ligante asfáltico, destruindo a força de ligação entre os dois componentes,

arrastando o ligante asfáltico e deixando os agregados sem a cobertura asfáltica; (ii) falha coesiva: pode ser descrita como o efeito do amolecimento e do enfraquecimento que a água exerce sobre o ligante asfáltico, causando assim a perda de rigidez no ligante. Porém, de acordo com Spinel (2009), falhas na adesão e na coesão compreendem as etapas finais do processo que se inicia com diferentes modos de transporte da umidade para dentro do pavimento, resultando na geração de diversos tipos de danos.. Para Amelian *et al.* (2014), o dano por umidade é fundamentalmente a perda da ligação entre o ligante asfáltico e os agregados.

A água é muito danosa aos pavimentos asfálticos, sua presença (ou da umidade) muitas vezes resulta em falha prematura da estrutura (LU e HARVEY, 2007). A sensibilidade à umidade é reconhecida como um fator importante para a mistura asfáltica. Na década de 40, Francis Hveem percebeu a importância da resistência à água e a identificou como uma propriedade crítica de engenharia que deve ser determinada na seleção de materiais para a construção de pavimentos (SANTUCCI, 2002). O dano por umidade induzida em misturas asfálticas é um problema complexo, que resulta de vários mecanismos diferentes. Grande parte desse conhecimento é teórico e só foi demonstrado em testes de laboratório (BOYES, 2011).

Segundo Mercado (2007), a razão pela qual a água provoca danos deriva da sua baixa viscosidade e baixa tensão superficial, que se traduz numa maior afinidade pela superfície do agregado, em comparação com a atração da mesma ao ligante asfáltico. Este efeito pode ser observado no esquema apresentado na Figura 4, que representa uma queda de uma gota de ligante asfáltico em contato com o agregado que é imerso em água (Figura 4a). Com o avanço do tempo, o ângulo de contato, θ , entre os dois materiais, na presença da água aumenta (Figura 4b) até que este se torna grande o suficiente (enquanto $[180-\theta]$ diminui) até que o ligante asfáltico perde o contato com a superfície do agregado (Figura 4c).

Figura 4– Efeito esquemático da água sobre uma gota de ligante asfáltico em contato com a superfície de um agregado



Fonte: adaptado de Mercado (2007).

2.5.2. Defeitos em Pavimentos Relacionados à Umidade

De acordo com Hicks, Santucci e Aschenbrener (2003), defeitos relacionados à umidade em misturas asfálticas são semelhantes em muitos aspectos aqueles causados por outros fatores (materiais, projeto, construção). As consequências a mistura asfáltica que podem estar relacionados à umidade, ou a outros fatores, são descritas a seguir:

- Exsudação, trincamento e afundamento por deformação permanente: são causados pela perda parcial ou completa da ligação adesiva entre a superfície dos agregados e o ligante asfáltico. Isso pode ser causado pela presença de água na mistura asfáltica devido à má compactação, ao processo inadequado de secagem do agregado, a drenagem insuficiente e a reduzida afinidade química entre o agregado e o ligante asfáltico. Estes defeitos são agravados pela presença de ciclos de tráfego e, nos lugares mais frios, pelos ciclos de congelamento-descongelamento.
- Desagregação: perda progressiva de material da superfície devido às intempéries ou à abrasão ocasionada pelo tráfego, ou ambos. Este problema pode ser causado pela baixa energia de compactação, pelo uso de agregados com reduzida qualidade, pelo baixo teor de ligante asfáltico, pela quantidade elevada de finos, ou pelos mecanismos de dano relacionados a umidade induzida, que são agravados pelo tráfego.
- Falhas localizadas: este defeito pode ser o resultado final de qualquer um dos tipos discutidos acima. Estas falhas são progressivas e podem resultar da perda de adesão entre o ligante asfáltico e os agregados, ou resultar da diminuição da força de coesão no próprio ligante.

- Painéis ou buracos: desagregações médias e/ou profundas que aparecem no pavimento.

Segundo Hicks, Santucci e Aschenbrener (2003), o dano relacionado a umidade pode ser acelerado por vários fatores, tais como: projeto da mistura asfáltica, produção, construção, clima, dentre outros. A Tabela 7 traz um resumo explicitando o que contribui para aumento da suscetibilidade a umidade para cada um dos fatores citados.

Tabela 7 – Fatores que contribuem para o dano por umidade induzida em misturas asfálticas

Projeto da mistura	<ul style="list-style-type: none"> - Afinidade química entre ligante asfáltico e agregados - Percentual de ligante asfáltico - Volume de vazios (Vv) - Aditivos
Produção	<ul style="list-style-type: none"> - Percentual de agregados no revestimento e qualidade do material passante na peneira nº200 - Temperatura da usina - Excesso de umidade contida no agregado - Presença de argila
Construção	<ul style="list-style-type: none"> - Compactação - altos valores de Vv - Permeabilidade elevada - Segregação da mistura asfáltica - Mudanças em campo do projeto de mistura asfáltica original
Clima	<ul style="list-style-type: none"> - Áreas com alta pluviosidade - Locais com ciclos de congelamento/descongelamento - Regiões desérticas (dano por umidade causado por vapor)
Outros fatores	<ul style="list-style-type: none"> - Drenagem superficial - Drenagem subsuperficial - Estratégias inadequadas de reabilitação do pavimento

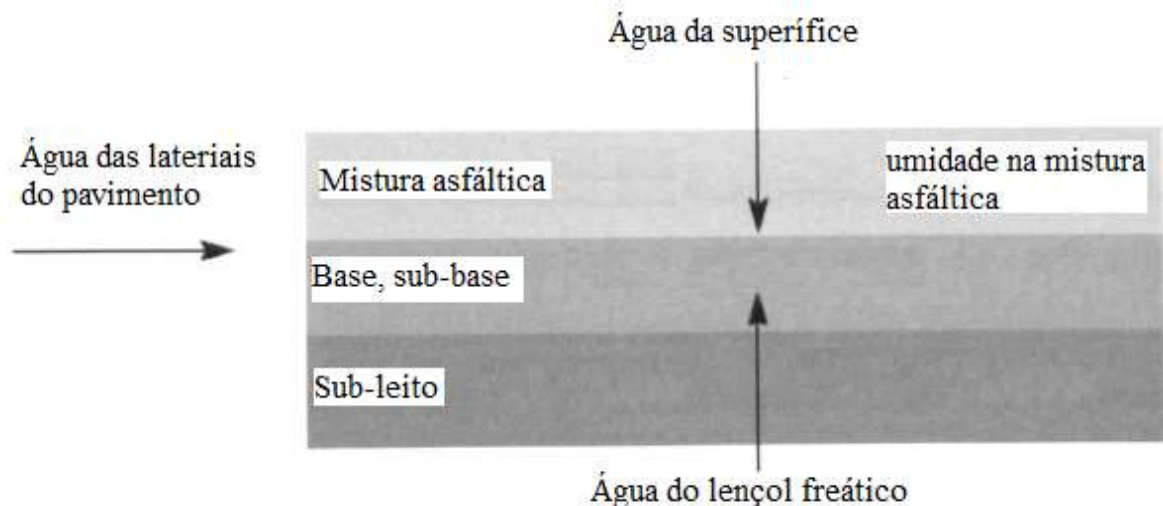
Fonte: Hicks, Santucci e Aschenbrener (2003)

Santucci (2010) discute a importância das propriedades químicas da superfície do ligante asfáltico. Este autor relatou que os agregados podem possuir pH alcalino (calcário) ou ácido (quartzito). O ligante asfáltico, a depender da sua origem, tende a ter pH que varia de neutro a ácido. O ligante asfáltico, desta forma, provavelmente deve formar um vínculo mais forte com os agregados de origem calcária. Além disso, a argila presente na superfície dos agregados pode expandir-se na presença da água e formar uma barreira à adesão, enfraquecendo, assim, a mistura asfáltica.

2.5.3. Mecanismos Relacionados ao Dano por Umidade

Um pavimento asfáltico está exposto a vários ciclos de precipitação durante sua vida de serviço, e as fontes de umidade em um pavimento podem ser internas ou externas. A fonte interna é a umidade que pode ser deixada no interior do pavimento antes da construção do mesmo devido à secagem inadequada dos agregados. Quando a água entrar em contato com o ligante asfáltico a quente, esta é convertida em vapor e o seu volume aumenta, o que pode resultar na formação de espuma e transbordamento do ligante asfáltico. Ressalta-se que misturas asfálticas a quente podem ser mais propensas a este tipo de fenômeno (SANTUCCI, 2002; READ e WHITEOAK, 2003). As fontes de umidade externas ao pavimento podem ser: a umidade que entra no pavimento devido a falhas na drenagem, a existência de compactação ineficiente ou misturas asfálticas com elevados valores de V_v ; falhas na drenagem que podem conduzir ao transporte da umidade pela lateral da estrutura; e/ou a elevação de lençóis freáticos que pode conduzir ao transporte da umidade através do subleito e da drenagem insuficiente das camadas de base e sub-base (NAVEED, 2011). A Figura 5 ilustra as diferentes fontes de umidade que podem acessar a estrutura do pavimento asfáltico.

Figura 5 – Fontes de água para o pavimento



Fonte: Adaptado de Santucci (2002).

De acordo com Santucci (2010), as razões para a ocorrência do dano por umidade induzida não são integralmente compreendidas, mas alguns mecanismos de falha são comumente aceitos:

- Separação (*Detachment*): separação do filme de ligante asfáltico da superfície dos agregados ocasionada por uma fina película de água, sem ruptura óbvia do filme de ligante asfáltico;
- Deslocamento (*Displacement*): difere da separação, pois envolve o deslocamento do ligante asfáltico da superfície do agregado através de uma ruptura do filme de ligante asfáltico;
- Ruptura do filme de ligante asfáltico (*Film rupture*): subconjunto do mecanismo de deslocamento;
- Emulsificação espontânea (*Spontaneous emulsification*): resulta numa emulsão invertida de água no ligante asfáltico. A formação de tais emulsões é agravada pela presença de emulsificantes, tais como argilas ou aditivos para ligantes asfálticos. A taxa de emulsificação depende da natureza do ligante asfáltico e da presença de aditivos;
- Poro-pressão (*Pore pressure*): essa pressão é desenvolvida quando as tensões aplicadas pelas cargas repetidas do tráfego são transmitidas para a água aprisionada na mistura asfáltica. A continuação destas cargas repetidas acelera o dano, com o acúmulo de pressão nos poros, o filme de ligante asfáltico na superfície do agregado é rompido, ou gera-se microfissuras no mástique.
- Instabilidade do pH (*pH instability*): o contato com a água pode afetar as ligações químicas e, portanto, influenciar na adesão agregado-ligante asfáltico. O pH da água de contato também pode afetar o valor do ângulo de contato e as características de molhabilidade da interface agregado-ligante asfáltico;
- Fatores ambientais (*Environmental factors*): fatores tais como temperatura, ar e água podem influenciar a durabilidade do pavimento. Em climas amenos o tráfego pode ser a principal causa de defeitos nos pavimentos. No entanto, falhas prematuras podem ocorrer quando materiais de baixa qualidade são usados em combinação com condições climáticas severas, tais como excesso de chuvas, grandes alterações de temperatura, condições de congelamento-descongelamento e envelhecimento severo do ligante asfáltico.

De acordo com Huang *et al.* (2010), cada um dos mecanismos previamente citados leva a dois grandes tipos de falha: a perda de adesão e/ou a perda de coesão. Além disso, vários fatores são conhecidos por contribuir para a ocorrência e para o agravamento do dano causado pela umidade, esses fatores incluem as propriedades do ligante asfáltico, as propriedades dos agregados, as propriedades da mistura asfáltica, as práticas de construção, o controle de qualidade utilizado durante a compactação, a natureza da água presente na interface ligante asfáltico/agregados, o efeito dinâmico do tráfego no carregamento, bem como o tipo e as propriedades dos aditivos melhoradores de adesividade utilizados. A Tabela 8 apresenta as falhas adesivas ou coesivas associadas aos mecanismos de danos provocados pela umidade.

Tabela 8 – Falha adesiva ou coesiva associadas aos mecanismos de danos provocados pela umidade

Mecanismo	Adesão	Coesão
Separação (<i>Detachment</i>)	X	
Deslocamento (<i>Displacement</i>)	X	
Emulsificação espontânea (<i>Spontaneous emulsification</i>)		X
Porosidade (<i>Pore pressure</i>)	X	X
Corrente hidráulica (<i>Hydraulic scour</i>)	X	
Instabilidade do pH (<i>pH instability</i>)	X	
Fatores ambientais (<i>Environmental factors</i>)	X	X

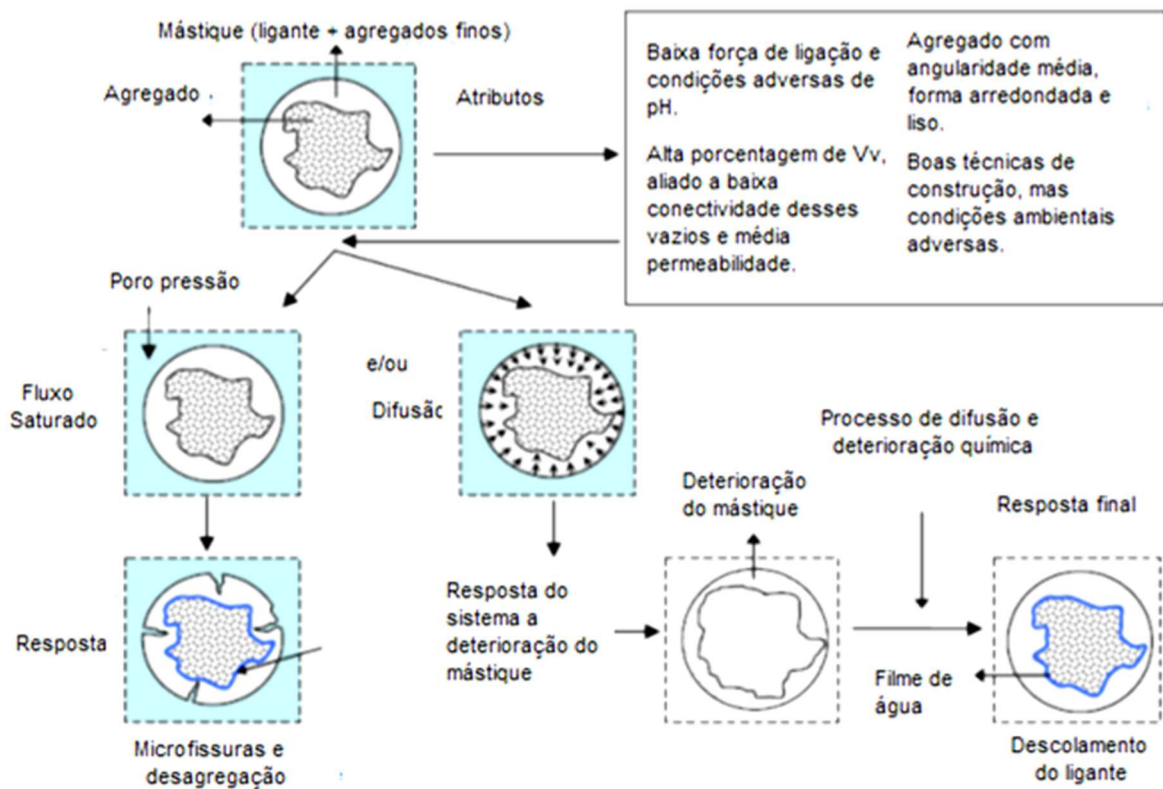
Fonte: Little e Jones (2003).

Segundo Spinel (2009), um mecanismo é um processo que leva a modificações nas condições internas ou externas de um sistema produzindo um novo "estado" ou "condição". Quando o estado final do sistema representa uma redução na sua integridade original, o processo é considerado um mecanismo de dano. O mecanismo de dano por umidade induzida consiste de dois passos: (i) o processo de transporte da umidade, e (ii) a resposta do sistema. O primeiro refere-se a processos através do qual a umidade em estado líquido ou vapor infiltra-se na mistura asfáltica, bem como no ligante asfáltico ou no mástique (composto formado pelo ligante asfáltico e pela parte miúda dos agregados) e atinge a interface ligante asfáltico-agregado. O segundo refere-se às alterações geradas no interior da mistura asfáltica que conduzem a uma perda na capacidade de carga do material

A Figura 6 ilustra um agregado revestido com mástique que é submetido a dois possíveis mecanismos de dano causados pela umidade. Neste exemplo, a elevada percentagem de V_v , aliada a baixa conectividade destes vazios, permite o desenvolvimento de altas

pressões nos poros na condição de fluxo saturado, e pode causar dano mecânico devido à ruptura do filme de ligante asfáltico ou a formação de microfissuras. Simultaneamente, a umidade também pode ser difundida através do mástique e deslocar o ligante asfáltico da superfície do agregado devido à sua fraca ligação adesiva interfacial.

Figura 6– Dois mecanismos possíveis de dano por umidade. (a) poro pressão: gera microfissuras e desagregação, (b) difusão: causa descolamento do ligante asfáltico.



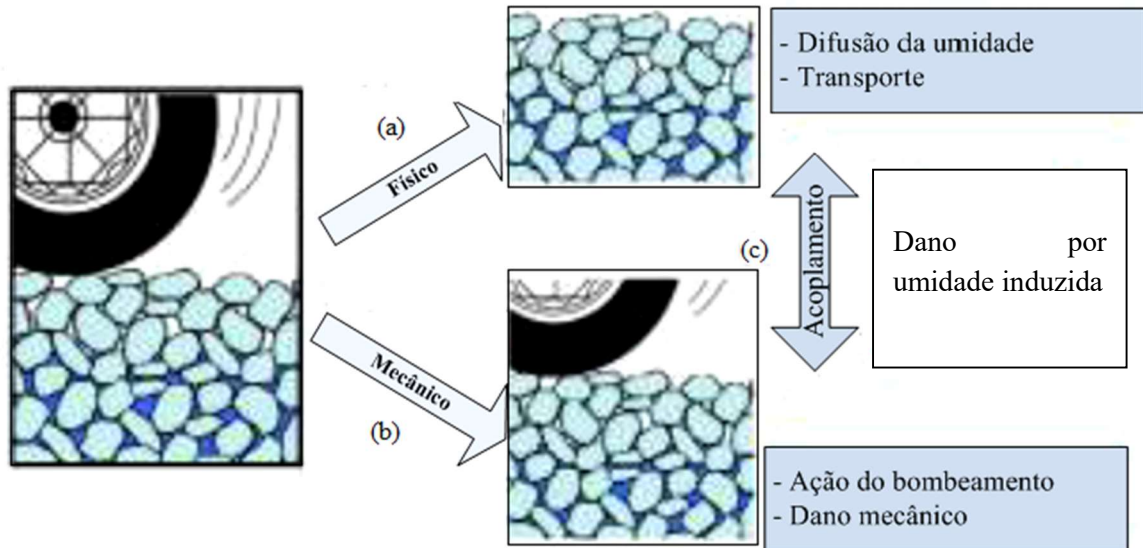
Fonte: Adaptado de Spinel (2009).

Kringos (2007) resumiu e dividiu o dano por umidade induzida em processos físicos e mecânicos, tal como mostrado na Figura 6. O dano físico é um fator importante, a difusão da molécula de umidade e o processo de “lavagem” do ligante asfáltico ocorrem devido à ação do fluxo rápido de água. O processo de dano mecânico, que contribui para o dano causado pela umidade, é a ocorrência de pressão de água no interior da mistura asfáltica devido ao tráfego, sendo conhecido como “ação de bombeamento” (“*pumping action*”).

O micromecanismo de interação entre os agregados e o ligante asfáltico, juntamente com os processos de danos físicos e mecânicos, devem ser investigados. Assim, o componente químico desuperfície que previne o dano na mistura asfáltica devido à umidade

induzida, juntamente com a carga do tráfego, podem ser explorados adequadamente (HAMZAH, KAKAR e HAININ, 2015).

Figura 7– Esquema de tipos de dano causados pela umidade induzida em misturas asfálticas.



Fonte: Adaptado de Kringos (2007).

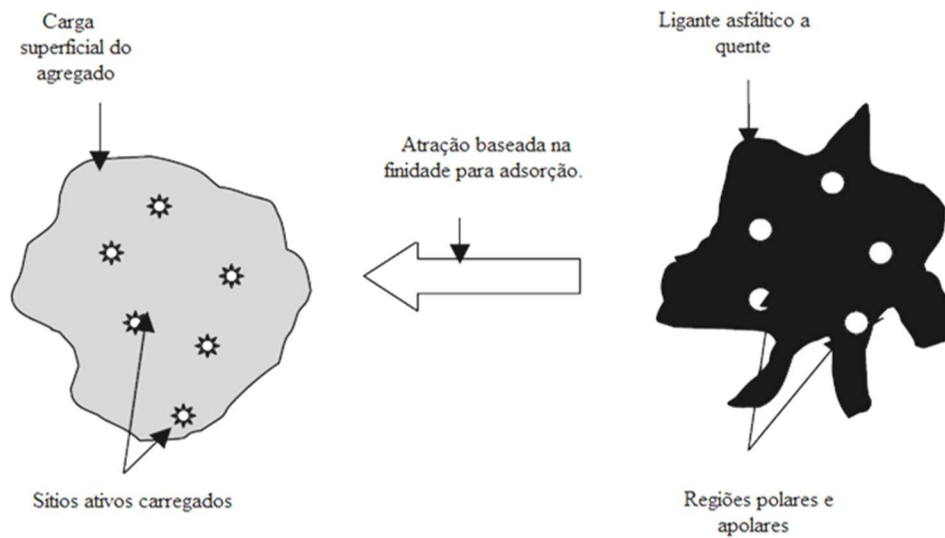
2.5.4. Características da Ligação Agregado-Ligante Asfáltico

Ligante asfáltico e agregados são os dois principais componentes de uma mistura asfáltica, a interação destes na mistura exerce um papel importante no desempenho do pavimento. Ambos os componentes têm as suas propriedades químicas e físicas distintas. Estas propriedades do ligante asfáltico e dos agregados também interagem entre si, quando ambos estão em contato. A proporção em peso de ligante asfáltico na mistura asfáltica varia tipicamente de 5 a 6% para o ligante asfáltico e 94 a 95% para os agregados. Os agregados variam muito em termos de composição, propriedades químicas de superfície e de morfologia, incluindo a área de superfície, o tamanho e a distribuição de seus poros. Pós compostos por argilas ou outros minerais frequentemente revestem a superfície dos agregados e estes não são completamente removidos durante a preparação da mistura asfáltica, o que normalmente resulta em diferentes partes da superfície do mesmo agregado com diferentes propriedades químicas. Os agregados possuem vários locais ativos e inativos sobre a sua superfície. Estes desempenham papel importante na interação das moléculas destes materiais com o ligante asfáltico. Os agregados também variam em termos de textura da sua superfície. Existem agregados com maior área de superfície específica, bem como com um tamanho de poro favorável a penetração do ligante asfáltico. Por vezes constata-se que o ar é retido nos poros

sobre a superfície dos agregados, dificultando a penetração do ligante asfáltico em toda a superfície dos agregados. Com base no que foi previamente exposto, existem diferentes sítios (ativos e inativos) na superfície dos agregados (SHAH, 2003).

Segundo Shah (2003), o ligante asfáltico é composto por uma mistura de hidrocarbonetos que contêm alguns grupos funcionais polares, bem como componentes organometálicos que contêm metais como níquel, vanádio e ferro. Um estudo realizado por Scott (1978) mostrou que, quando o ligante asfáltico entra em contato com os agregados, os asfaltenos que contêm oxigênio são preferencialmente adsorvidos sobre a superfície dos agregados. Um tipo de comportamento semelhante foi observado por Fritschy e Papirer (1978) a partir da investigação de asfaltenos polares. De acordo com Shah (2003), foi possível confirmar que a química na interface entre o ligante asfáltico e o agregado conduz a interações de ligação que influencia a força adesiva definitiva gerada no par. O agregado proporciona uma superfície que é heterogênea e tem uma variedade de sítios com diferentes composições e níveis de atividade (Figura 8). Estes sítios ativos são muitas vezes carregados ou contêm cargas parciais que atraem e orientam os constituintes polares do ligante asfáltico. Os componentes químicos com maior afinidade para uma determinada região competem de forma mais eficaz e ganham a posição. Experimentos radiográficos conduzidos por Ross (1991) confirmaram a presença de sítios ativos sobre a superfície dos agregados. Os grupos funcionais polares presentes no ponto de contato entre o filme de ligante asfáltico e o agregado aderem às superfícies devido à força eletrostática, às pontes de hidrogênio ou às forças de *Van der Waals*.

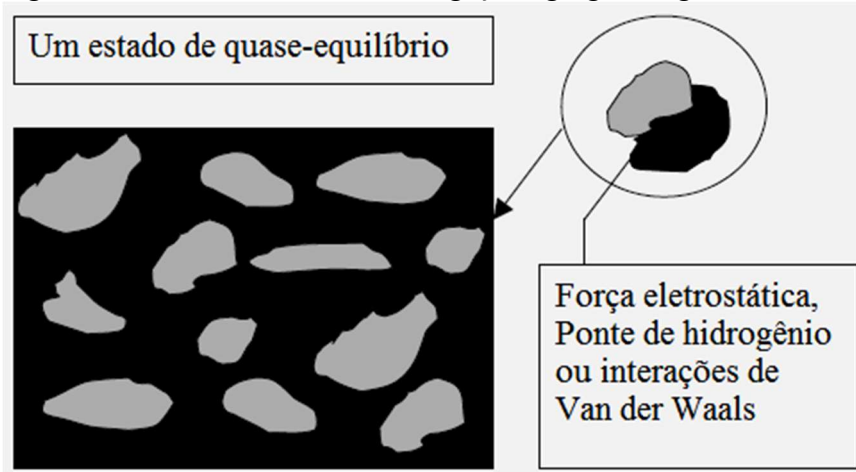
Figura 8 – Química envolvida na ligação entre o agregado e o ligante asfáltico (Estágio 1)



Fonte: Adaptado de Shah(2003)

As reações químicas que ocorrem entre o ligante asfáltico e os agregados acontecem no momento da mistura entre agregados e ligante asfáltico. A gama de efeitos químicos causados por essas reações afeta a durabilidade de longo prazo da mistura. Quando o ligante asfáltico aquecido recobre o agregado, este tende a entrar em qualquer fenda ou poro disponível. A energia superficial do agregado atrai um grupo funcional de carga oposta ou parcialmente carregada presente no ligante asfáltico. A parte da molécula atraída, que está disponível para a interação com outras moléculas de ligante asfáltico, pode então ter a carga do agregado e, conseqüentemente, ter interação eletrostática com outra carga oposta ou parcialmente carregada de moléculas de ligante asfáltico. Um estado de quase-equilíbrio na ligação agregado-ligante asfáltico pode permanecer durante algum tempo (Figura 9). A perturbação causada pelas forças de atrito muda o estado de equilíbrio, quer em um novo quase-equilíbrio ou quer em um estado constante, embora talvez lento, este deteriora o vínculo ligante asfáltico-agregado, e a falha deste vínculo pode causar falhas na interface, tanto no próprio ligante asfáltico, como falha coesiva, ou dentro do agregado como uma falha estrutural (SHAH, 2003).

Figura 9 – Química envolvida na ligação agregado-ligante asfáltico (Estágio 2)



Fonte: Adaptado de Shah (2003)

Segundo Liu (1991), se a região da superfície do agregado com características polares está completamente coberta com o ligante asfáltico com superfície não polar, então as características de adsorção do agregado mudarão radicalmente. Os grupos funcionais polares acharão mais favorável permanecer na fase de ligante asfáltico uma vez que nenhuma força motriz ou potencial eletrostática existe para adsorção ou adesão na superfície agregada. Os grupos funcionais mais polares, como sulfóxidos, ácidos carboxílicos, e bases nitrogenadas, são adsorvidos mais fortemente, enquanto que os grupos asfálticos menos polares, incluindo os hidrocarbonetos aromáticos, têm menos afinidade com a superfície e não aderirão fortemente ao agregado (CURTIS, ENSLEY e EPPS, 2001).

Uma das razões para a deterioração da mistura asfáltica ao longo do tempo é o envelhecimento. Com o aumento de rigidez da mistura asfáltica a ligação agregado-ligante asfáltico deve ser alterada. As mudanças causadas pelo envelhecimento oxidativo podem mudar a natureza das ligações químicas na interface agregado-ligante asfáltico. Os compostos produzidos normalmente durante o envelhecimento são sulfóxidos, ácidos carboxílicos, e cetonas (CURTIS, ENSLEY e EPPS, 2001). A aderência do ligante asfáltico à superfície do agregado é dependente dos tipos de grupos funcionais na interface (ligante-agregado) e da sua capacidade para se ligar fortemente à superfície do agregado. A resistência dessa ligação a fatores ambientais, principalmente a o contato com a água, é essencial para manter a durabilidade de misturas asfálticas (SHAH, 2003).

2.5.5. Fatores que Influenciam a Ligação Adesiva entre o Ligante Asfáltico e o Agregado

- **Falha Adesiva *versus* Falha Coesiva**

Segundo Little e Jones (2003), misturas asfálticas com filmes de ligante asfáltico finos falham na tensão por ruptura na ligação adesiva, enquanto que aquelas com filmes de ligante asfáltico mais espesso (ou filmes de mástique) falham por causa de dano no próprio mástique (falha coesiva). A espessura do filme que diferencia estes dois tipos de falha depende da reologia do ligante asfáltico (ou mástique), da quantidade de dano sofrido pelo ligante asfáltico (ou mástique) para suportar a falha, da taxa de carregamento e da temperatura no momento do ensaio em laboratório.

- **Efeito das Características do Ligante Asfáltico na Adesão**

As características do ligante asfáltico podem influenciar tanto na adesão do sistema ligante asfáltico-agregado como na coesão do mástique. As propriedades do ligante asfáltico que podem influenciar na ligação ligante asfáltico-agregado são: química do ligante asfáltico (*e.g.*, polaridade e constituição), viscosidade, espessura do filme de ligante asfáltico que recobre o agregado e energia de superfície (BAHIA, HANZ, KANITPONG e WEN, 2007; XIAO, AMIRKHANIAN e JUANG, 2007). A força de coesão na matriz asfáltica na presença de umidade é também influenciada pela natureza química do ligante asfáltico e pelas técnicas de processamento da mistura (MORAES, VELASQUEZ e BAHIA, 2010).

Segundo Moraes, Velasquez e Bahia (2010), a compreensão da interação química entre o ligante asfáltico e o agregado é crucial para o entendimento do dano por umidade induzida em misturas asfálticas. A composição química e mineral do agregado também determina a qualidade e a durabilidade da ligação adesiva com o ligante asfáltico. Bagampadde *et al.* (2005) investigaram a susceptibilidade das misturas asfálticas que foram preparadas utilizando 11 agregados de fontes diferentes e apenas um ligante asfáltico. Os agregados e o ligante asfáltico foram caracterizados com base tanto na sua mineralogia quanto na sua composição química. A sensibilidade dos corpos de prova compactados à umidade foi quantificada pela razão entre a resistência à tração e o módulo dinâmico, utilizando corpos de prova condicionados e não-condicionados, seguindo a metodologia apresentada na norma AASHTO T 283/14. As relações de resistência à tração menores que 70% foram associadas

aumentam a resistência ao dano causado pela umidade. Com base na análise estatística conduzida neste estudo, foi observado que as misturas que contêm agregados com elementos de metais alcalinos (e.g., sódio e potássio) ou agregados com alto conteúdo de quartzo e feldspato alcalino foram mais propensos aos danos provocados pela umidade. Ao contrário, as misturas com os agregados que contêm cálcio, magnésio e ferro foram consideradas resistentes a umidade. Nenhuma correlação com danos causados pela umidade foi estabelecido com agregados contendo alumina. No entanto, uma vez que estes resultados foram baseados em misturas com um único ligante asfáltico, os resultados não podem ser generalizados.

Mais recentemente, Bagampadde *et al.* (2006) exploraram o papel da química do ligante asfáltico no dano causado pela umidade. Esses autores seguiram uma metodologia semelhante à descrita anteriormente, mas utilizaram diferentes tipos de agregados e quatro tipos de ligantes asfálticos. Observou-se que as características dos ligantes asfálticos, tais como índice de acidez (definido como o número de miligramas de hidróxido de potássio necessárias para neutralizar um grama da amostra), penetração e tamanho molecular, não são fatores significativos na determinação da resistência das misturas asfálticas avaliadas com relação ao dano por umidade induzida. Os autores relataram também que a variabilidade da susceptibilidade a umidade induzida é atribuída, principalmente, aos agregados aos invés dos ligantes asfálticos. Pois, misturas com agregados contendo metais alcalinos (sódio e potássio) apresentaram relativamente alta sensibilidade à umidade, independentemente do ligante asfáltico. Em contraste, indicações de sensibilidade à umidade não foram evidentes em misturas elaboradas com agregados contendo cálcio, magnésio e ferro. Resultados semelhantes também foram encontrados por Airey *et al.* (2007) que analisaram o efeito de certas propriedades dos ligantes e agregados em 14 misturas asfálticas diferentes com relação a resistência ao dano por umidade induzida das mesmas usando o teste SATS (*saturation ageing tensile stiffness*).

A adesão devido à ligação química é também útil para explicar a ação dos aditivos tais como a cal hidratada e os agentes *anti-strip*, usados para melhorar a resistência das misturas asfálticas à umidade (Bagampadde *et al.*, 2005). Little e Petersen (2005) estudaram as alterações nas propriedades reológicas, assim como as interações físicas e químicas, que explicam as diferenças na resposta mecânica dos ligantes asfálticos quando a cal hidratada é adicionada como filler a mistura asfáltica. Os autores relataram que a cal hidratada reage

quimicamente com os ácidos carboxílicos e os grupos funcionais 2-quinolona presentes no ligante asfáltico, fazendo surgir grupos funcionais que são mais fortes a ação da água, e formando ligações mais fortes com a superfície dos agregados.

A viscosidade do ligante asfáltico pode influenciar a resistência de misturas asfálticas ao dano por umidade. Ligantes asfálticos com viscosidade elevada resistem melhor a umidade se comparados aqueles com baixa viscosidade. Ligantes asfálticos com alta viscosidade, normalmente, possuem em sua composição alta concentração de grupos funcionais polares que proporcionam maior resistência a esse tipo de dano (BHASIN *et al.*, 2006).

A resistência à força de ligação está diretamente relacionada à espessura do filme de ligante. As misturas asfálticas com filme de ligante mais espesso tendem a sofrer falhas coesiva após a realização do condicionamento através do contato com a umidade. Por outro lado, amostras com filmes de ligante asfáltico mais esbeltos geralmente sofrem falha adesiva (KANITPONG e BAHIA, 2003)

Segundo Moraes, Velasquez e Bahia (2010), no que diz respeito à energia de superfície, de acordo com a teoria termodinâmica de adesão agregado-ligante asfáltico, os baixos valores desta propriedade para o ligante asfáltico são desejáveis a fim de proporcionar um melhor recobrimento do ligante asfáltico sobre o agregado. Energia livre de superfície (γ em ergs/cm²) pode ser definida como a quantidade de trabalho externo feito num material para criar uma nova unidade de área de superfície no vácuo.

- **Efeito das Características dos Agregados na Adesão Ligante Asfáltico/Agregados**

As propriedades dos agregados têm maior impacto na adesão se comparadas as propriedades do ligante asfáltico. O tamanho e a forma do agregado, o volume e o tamanho de seus poros, sua área superficial, suas propriedades de superfície, sua natureza ácida ou alcalina, adsorção superficial e sua carga de superfície ou polaridade, são algumas das características dos agregados amplamente citadas que podem influenciar a resistência da mistura asfáltica ao dano umidade (TARRER e WAGH, 1992).

Segundo Moraes, Velasquez e Bahia (2010), a química do agregado afeta substancialmente a adesão agregado-ligante asfáltico. Vários componentes minerais dos agregados possuem diferentes afinidades com o ligante asfáltico. Quando um agregado é recoberto com o ligante asfáltico, o agregado adsorve seletivamente alguns componentes do ligante asfáltico. A tendência geral é que os sulfóxidos e os ácidos carboxílicos, presentes no ligante asfáltico, tenham maior afinidade pelos agregados. É também evidente que os hidrocarbonetos aromáticos têm menos afinidade pela superfície dos agregados se comparados aos grupos polares. Portanto, os tipos e as quantidades dos componentes adsorvidos afetam a adesão e agregados diferentes desenvolvem ligações com forças também diferentes (ROBERTSON, 2000).

Agregados são comumente classificados como hidrofílicos, isto é, quando há maior afinidade natural pela água se comparada a afinidade destes pelo ligante asfáltico, ou hidrofóbicos, os quais possuem maior afinidade natural pelo ligante asfáltico se comparada a afinidade dos mesmos pela água (TARRER e WAGH, 1992; KANITPONG e BAHIA, 2003; BHASIN, 2006). A composição mineralógica do agregado em termos da sua natureza hidrofílica e hidrofóbica e a sua afinidade pelo ligante asfáltico são também importantes. Agregados com alto teor de carbonato (hidrofóbico ou básico), como calcário, são mais fáceis de serem recobertos pelo ligante asfáltico e formar uma ligação mais forte com o ligante asfáltico que os agregados com alto teor de sílica (hidrofílicos ou ácidos), como arenito, por exemplo (EMERY e SEDDIK, 1997).

Agregados com superfícies ásperas e com maiores áreas de contato favorecem a ligação adesiva. A porosidade é outra característica importante do agregado que pode afetar a adsorção do ligante asfáltico. Por exemplo, quando o ligante asfáltico recobre uma superfície áspera de um agregado com poros finos, o ar é aprisionado e o ligante asfáltico tem dificuldade de penetrar nos poros (MENG, 2010). No entanto, segundo Moraes, Velasquez e Bahia (2010), a penetração do ligante asfáltico nos poros do agregado também depende da viscosidade e da temperatura de mistura do ligante asfáltico com os agregados.

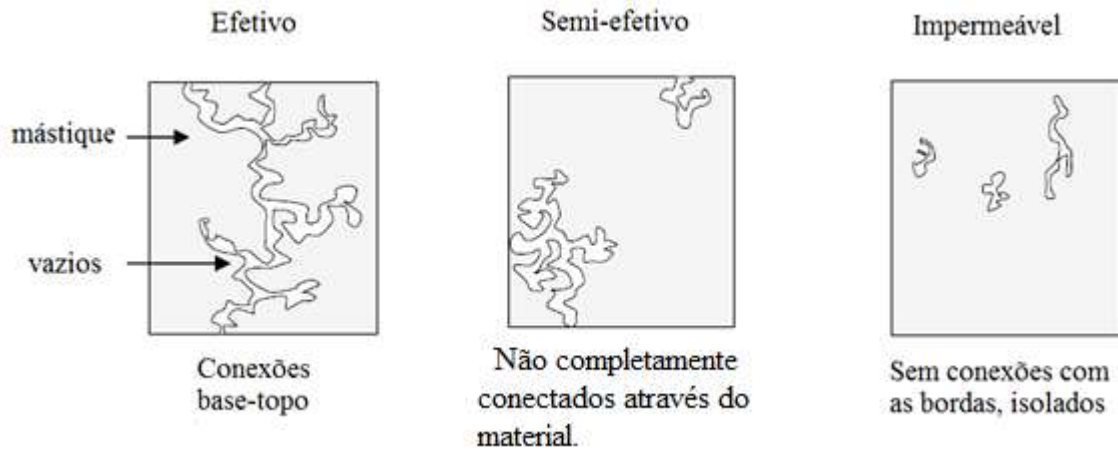
A umidade e a quantidade de finos também podem reduzir significativamente a força de ligação do sistema agregado-ligante asfáltico. A presença de finos que reveste o agregado inibe a completa molhabilidade do agregado pelo ligante asfáltico, uma vez que o ligante asfáltico adere aos finos e não ao agregado (DONG-WOO, 2008).

2.5.6. Estrutura de Vazios na Mistura Asfáltica e Sua Relação com o Dano Relacionado a Umidade

O transporte da umidade em um meio poroso, tal como em misturas asfálticas, é influenciado pela estrutura de vazios que compõe o material. Por conseguinte, a fim de identificar os modos de transporte da umidade e as suas relações com o dano provocado pela umidade, é importante caracterizar a estrutura de vazios nestes materiais. Algumas agências de transporte tentam controlar o dano causado pela umidade, limitando o percentual de V_v (Volume de vazio), o que por sua vez irá limitar o acesso da água a mistura asfáltica. Por exemplo, o Ministério dos Transportes de Ontário especifica que o V_v na superfície da mistura asfáltica deve ser tão baixo quanto possível, a fim de controlar o dano causado pela umidade. No entanto, mesmo com um percentual baixo de V_v , há evidências de dano produzido pela infiltração de água (MOHAMED *et al.*, 1993), o que prova que o volume de vazios totais não fornece uma medida global da taxa de transporte da umidade em misturas asfálticas (ARAMBULA *et al.*, 2007; MASAD *et al.*, 2007). De acordo com Spinel (2009), os recentes avanços tecnológicos tornaram possível caracterizar completamente a estrutura de vazios em misturas asfálticas em termos de tamanho, distribuição, conectividade e tortuosidade do trajeto de escoamento.

O tamanho e a distribuição do V_v em misturas asfálticas dependem, principalmente, das propriedades dos agregados, do projeto da mistura asfáltica e dos processos de compactação (BROWN *et al.*, 2004; MASAD *et al.*, 2009). Chen *et al.* (2004) classificaram o V_v de misturas asfálticas em três categorias: efetivos, semi-efetivos e impermeáveis (Figura 10). No entanto, de acordo com Spinel (2009), a identificação destes diferentes tipos de V_v em amostras de laboratório ou de campo é difícil por causa da complexidade da estrutura interna do material e da capacidade limitada para explorar a sua composição interior. Existem várias alternativas para determinar a estrutura do V_v em materiais porosos. Algumas técnicas comuns são baseadas em análises de seções transversais do material a partir de imagens bidimensionais adquiridas através do uso da microscopia de varredura eletrônica, de técnicas de imagem utilizando espectroscopias (para determinar o produto químico da composição), ou com o uso de microscopia de força atômica (KOSEK *et al.*, 2005). As técnicas usadas para a caracterização tridimensional dos meios porosos incluem imagens geradas por ressonância magnética nuclear (BARRIE, 2000), microscopia eletrônica de transmissão e tomografia computadorizada de Raios-x (SPINEL, 2009).

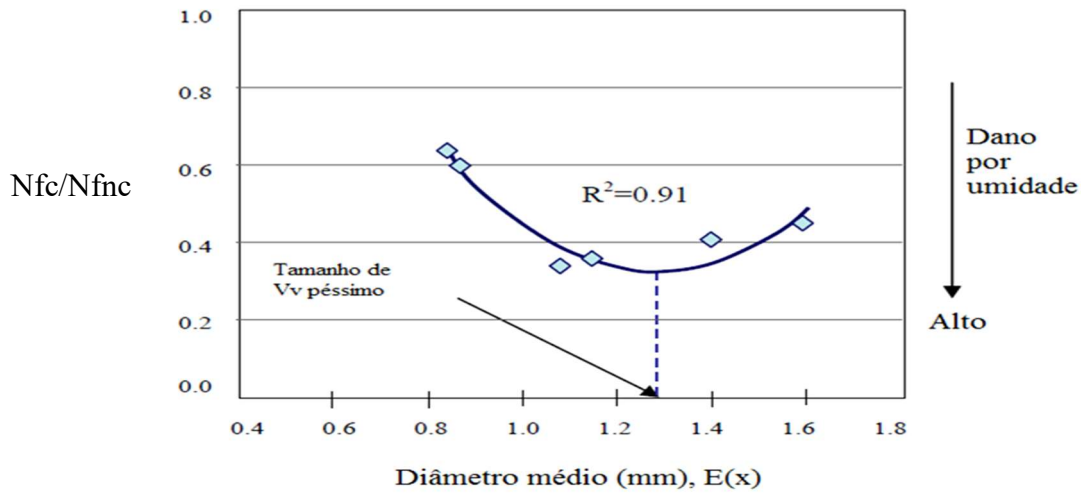
Figura 10 – Classificação dos vazios na mistura asfáltica.



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2004)

Segundo Spinel (2009), a Figura 11 apresenta a relação entre a distribuição do V_v e o dano por umidade induzida em corpos de prova contendo agregados graníticos. Estes resultados sugerem que existe um tamanho médio de V_v referido como medida péssima, para o qual a sensibilidade a umidade da mistura asfáltica é máxima. A existência do valor péssimo foi explicado pelo fato de que para V_v de tamanho reduzido a infiltração de água na mistura asfáltica é baixa, para V_v de tamanhos grandes a água atinge o material, mas é facilmente drenada para fora do mesmo, e para o tamanho de vazios considerado como péssimo (entre 1,2mm e 1,4mm para misturas asfálticas contendo agregados graníticos e entre 0,8mm e 1,0mm para misturas contendo agregados calcários, segundo Masad *et al.*, 2006), a água é aprisionada no material gerando condições propícias para a ocorrência do dano por umidade induzida.

Figura 11 – Dano causado pela umidade expresso através da razão N_f (razão tração indireta, para amostras condicionadas e não condicionadas) versus o diâmetro médio de V_v para uma mistura asfáltica densa contendo agregados graníticos.



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

2.6. Aditivos Usados em Misturas Asfálticas para Prevenção do Dano por Umidade Induzida

Desde que o dano causado pela umidade tornou-se um assunto investigado na pavimentação, os engenheiros têm desenvolvido e testado, nas últimas décadas, vários aditivos com a intenção de melhorar a resistência do material asfáltico ao dano por umidade induzida. Dentre os aditivos *anti-stripping* (agentes redutores de dano por umidade) mais comumente utilizados pode-se citar a cal hidratada e os produtos químicos à base de aminas líquidas. Recentemente, contudo, a utilização de materiais reciclados (cinzas leves, poeiras de forno de cimento, vidro, borracha de pneus usados moídos) foram testados como função de melhorar a adesividade de misturas asfálticas (BOYES, 2011).

2.6.1. Utilização da Cal como Aditivo em Misturas Asfálticas

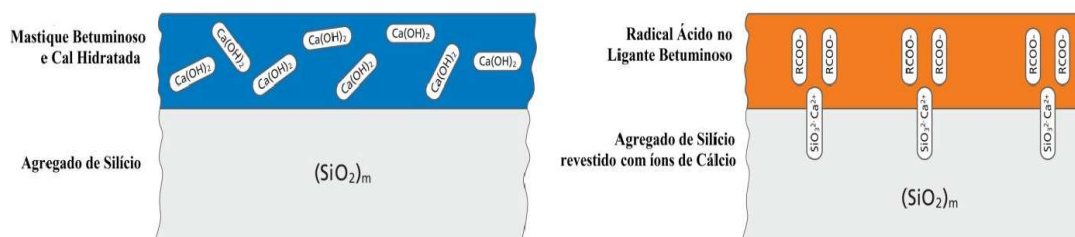
Um dos fileres mais populares empregado em misturas asfálticas é a cal hidratada, tendo em vista que esta atua como material ativo e altera as propriedades destes materiais, melhorando a trabalhabilidade e a estabilidade e aumentando a rigidez e a resistência ao envelhecimento e ao dano por umidade induzida. No estudo sobre o efeito da cal no envelhecimento da mistura asfáltica, Lesueur, Little e Epps (1998) apontam que a cal melhorou a resistência ao dano por umidade induzida e à deformação permanente, e reduziu

os efeitos de envelhecimento e de trincamento em baixas temperaturas para as misturas asfálticas investigadas pelos mesmos.

A cal reduz a tensão superficial entre o ligante asfáltico e os agregados. Os íons de cálcio (Ca^{2+}) presentes neste material reagem com os ácidos carboxílicos presentes no ligante asfáltico substituindo alguns cátions na superfície dos agregados ácidos, promovendo uma forte ligação entre as moléculas de sílica dos agregados e as moléculas de nitrogênio do ligante asfáltico. Outros efeitos positivos da adição de cal são o aumento da viscosidade do ligante asfáltico e a redução na formação de produtos de oxidação no ligante asfáltico devido a maior resistência ao envelhecimento do mesmo (MERCADO, 2007).

A cal hidratada modifica as propriedades superficiais do agregado (Figura 12), permitindo o desenvolvimento de uma composição de superfície e rugosidade mais favorável à adesão do ligante. Além disso, a cal hidratada pode tratar partículas argilosas aderidas à superfície do agregado, inibindo seu efeito prejudicial (ISHAI e CRAUS, 1977; BOCK, 2012).

Figura 12 – Efeito da cal na superfície do agregado



Fonte: Ishai e Craus (1977), Bock (2012).

Ao ser adicionada, a cal reage com os agregados, fortalecendo o vínculo entre estes e o ligante asfáltico. Ao mesmo tempo em que trata os agregados, a cal também reage com as moléculas fortemente polares do ligante, inibindo a formação de sabões solúveis em água, que causariam problemas de adesividade. As interações químicas entre a cal hidratada e os grupos de ácidos do ligante contribuem tanto para o aumento da resistência ao envelhecimento quanto para melhorar a adesividade das misturas modificadas. Além disso, a dispersão de minúsculas partículas de cal hidratada na mistura torna-a mais rígida e mais

resistente, reduzindo a probabilidade do vínculo entre o ligante asfáltico e os agregados ser quebrado mecanicamente, mesmo sem a presença de água (EULA, 2010; BOCK, 2012).

Dos aditivos utilizados em misturas asfálticas, a cal é a mais aceita, sendo uma grande aliada no combate ao dano por umidade induzida na mistura asfáltica. Tunnicliff e Root (1984), Hicks (1991), Little e Epps (2001) constataram que a cal enrijece o ligante asfáltico e melhora a estabilidade da mistura asfáltica. A cal ainda aumenta a resistência ao dano causado pela umidade na mistura asfáltica, deixa a mistura asfáltica mais rígida e reduz a taxa de oxidação, porém o aumento da rigidez pode tornar a mistura asfáltica mais vulnerável ao trincamento por fadiga.

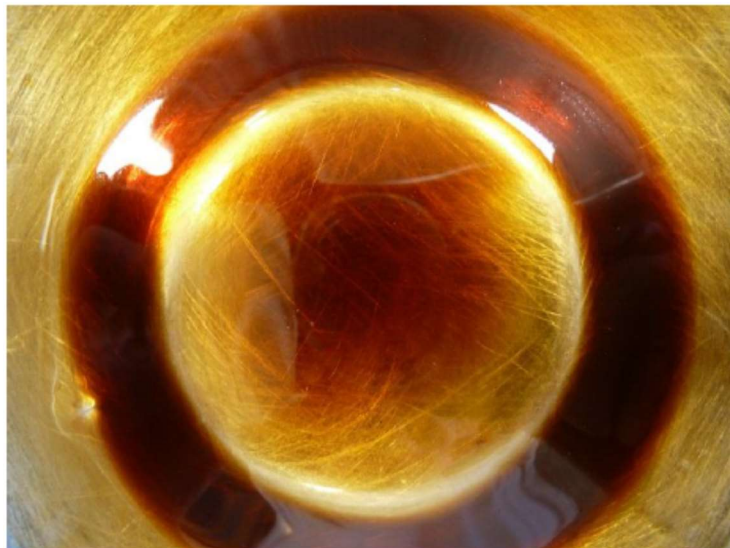
2.6.2. Aditivos líquidos *anti-stripping*

Outro tipo comum de aditivo utilizado para minimizar o dano causado pela umidade em misturas asfálticas são os líquidos *anti-stripping* (aditivos redutores do dano por umidade induzida). De acordo com Lu (2005), a maioria dos aditivos líquidos *anti-stripping* são produtos químicos que contêm, na sua formulação química, as aminas, e estes são produtos químicos fortemente alcalinos à base amônia. Estes produtos são geralmente catiônicos com o intuito de promover a adesão entre os agregados ácidos e o ligante asfáltico também ácido, porém alguns destes produtos contêm tanto compostos aniônicos quanto compostos catiônicos visando atender as necessidades de todos os tipos de agregados e ligantes asfálticos. Quando adicionados às misturas asfálticas, os aditivos líquidos *anti-stripping* tendem a diminuir a consistência do ligante asfáltico, afetando, assim, a resistência ao envelhecimento do material e as temperaturas de usinagem e de compactação. Santucci (2010) explica que os aditivos líquidos *anti-stripping* são adicionados ao ligante asfáltico na refinaria ou misturados *in-line* na mistura asfáltica a quente nas plantas de produção. Os aditivos são comumente utilizados nas concentrações entre 0,25% a 1% em peso de ligante asfáltico.

Alguns estudos avaliaram a eficácia dos aditivos líquidos *anti-stripping* com relação ao desempenho das misturas asfálticas onde os mesmos são utilizados. Um exemplo de aditivo químico é apresentado na Figura 13a título de ilustração. Aksoy *et al.* (2005) avaliaram dois produtos a base de aminas (Wetfix I e Lilamin VP 75P), um catalisador (Cemcrete) e um polímero. Os produtos químicos foram adicionados à mistura asfáltica, em

concentrações de 0,2%, 0,4%, e 0,6%, respectivamente, do ligante asfáltico. As misturas asfálticas foram dosadas seguindo a metodologia Marshall. As amostras foram avaliadas com relação a estabilidade e a fluência Marshall e a RT das mesmas. As amostras que utilizaram os produtos químicos em suas composições apresentaram estabilidade e fluência Marshall ligeiramente superiores em relação aos valores obtidos para as amostras de controle (que não utilizaram os compostos químicos em suas composições). As misturas asfálticas que utilizaram os produtos Wetfix I e Lilamin VP 75P, em concentrações de 0,2 e 0,4% respectivamente, em suas composições apresentaram resistência ao dano por umidade induzida satisfatória, atendendo os requisitos mínimos no que diz respeito a Relação de Resistência à Tração (RRT), que foi estabelecida em 70% para o estudo.

Figura 13– Líquido anti-stripping HP Plus.



Fonte: Retirado de Boyes (2011).

Chen e Huang (2008) condicionaram corpos de prova contendo em suas composições produtos químicos à base de aminas, com relação a umidade induzida, utilizando o equipamento MIST (do inglês, *Moisture Induced Stress Tester*). O aditivo líquido *antistripping* foi adicionado em uma concentração de 0,5% em peso de ligante asfáltico. As amostras foram submetidas a 0, 1, e 2 ciclos de congelamento/descongelamento, bem como a 0, 500 e 1.000 ciclos de carregamento. Os resultados de RRT obtidos indicaram que os aditivos à base de aminas contribuíram para a diminuição do dano causado pela umidade para as amostras avaliadas em laboratório.

2.6.3. Cinzas Volantes (*Fly Ash*) e o Desempenho nas Misturas

A cinza volante contém pozzolanas, as quais são compostos de materiais silicatos e aluminatos que, em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio para produzir componentes cimentantes. Tipicamente mais fina que o cimento Portland e a cal, a cinza volante consiste de partículas tipicamente esféricas com diâmetro variando de 10 a 100 microns. A cor deste material pode variar de marrom escuro a cinza escuro, e pode até mesmo apresentar a cor negra quando houver quantidade significativa de carvão não queimado em sua composição (ACAA, 2003).

Figura 14– Cinza volante (*fly ash*)



Fonte: Retirado de Boyes (2011).

A literatura apresenta comparações entre o desempenho de misturas asfálticas com o uso de cinzas volantes e de outros fileres minerais. Huang *et al.* (2010) adicionaram 1,0% de cinza leve classe F, como filer, em uma mistura asfáltica. Os resultados foram semelhantes quando o valor de MR (Módulo de Resiliência) dos materiais (misturas asfálticas com o uso de materiais naturais e com o uso de cinza leve em sua composição) foram comparados. Os resultados foram, porém, inferiores quando a mistura asfáltica com o uso da cal foi comparada as demais. Os resultados de RRT foram 15% superiores quando a mistura asfáltica com o uso da cinza foi comparada com aquela com o uso apenas de materiais naturais.

Xie *et al.* (2012) avaliaram misturas asfálticas contendo 4% dos seguintes fileres minerais: cinza volante modificada com composto de silano (CFAM) e cal. As misturas

asfáltica contendo CFAM apresentaram RRT de 85%, que é 10,7% maior que o apresentado pelas misturas asfálticas contendo cal como filer, o que indica maior resistência ao dano por umidade induzida para estes materiais. A RT da mistura asfáltica contendo CFAM foi superior em 23,3%, mesmo após o condicionamento de 4 ciclos de congelamento, se comparada ao valor obtido para a mistura asfáltica contendo a cal. O uso do CFAM contribuiu ainda para o aumento da vida de fadiga das misturas asfálticas, uma vez que o número de ciclos que levaram as amostras a ruptura foi superior quando comparado aquele obtido para a mistura asfáltica contendo a cal. Dessa forma, com base nos resultados experimentais obtidos, pode-se concluir que o CFAM melhorou significativamente a resistência a umidade induzida da mistura asfáltica, sugerindo a viabilidade de utilização das cinzas volantes tratadas com composto de silano para melhoramento da sensibilidade a umidade de misturas asfálticas.

Modarres e Rahmanzadeh (2015) utilizaram o pó residual de carvão mineral e a cal como filer em misturas asfálticas. Neste citado estudo foi adicionado 7% de filer em massa de agregado a mistura asfáltica. Seis misturas asfálticas distintas contendo a seguinte proporção entre os fileres: 100% de cal; 75% de pó residual de carvão mineral + 25% de cal; 50% de pó residual de carvão mineral + 50% de cal; 25% de pó residual de carvão mineral + 75% de cal; 100% de pó residual de carvão mineral foram avaliadas. Os autores concluíram que a mistura asfáltica com a utilização deste resíduo (pó residual de carvão mineral), em comparação com a mistura asfáltica de controle contendo a cal, apresentou estabilidade Marshall 14,2% maior, RT e MR. O RRT mínimo selecionado para aceitação do critério de dano por umidade induzida foi de 80%. Baseado nos resultados obtidos, todas as misturas asfálticas produzidas satisfizeram o critério estabelecido. A misturas asfálticas com proporção igual de cal e de pó residual de carvão apresentaram os melhores resultados para a maioria das características examinadas.

2.6.4. Poeira de Forno de Cimento (Cement Kiln Dust)

Quimicamente, a poeira de forno de cimento tem uma composição semelhante a do cimento Portland e contém principalmente cal, ferro, sílica e alumina. Este material também contém traços de cádmio, chumbo, selênio e menos de 0,05% de radionuclídeos. Esta poeira possui pH aproximadamente igual a 12 e contém uma significativa quantidade de álcalis (SIDDIQUE, 2008).

As quantidades requeridas de ligante asfáltico são significativamente reduzidas quando a poeira de forno de cimento é utilizada. Esse filler também tem o potencial de substituir a cal hidratada e de reduzir o dano causado pela umidade em pavimentos devido ao alto teor de cal presente no mesmo (SIDDIQUE, 2008). Huang *et al.* (2010) avaliaram vários filleres minerais adicionados de 1,0% de poeira de forno de cimento. Os resultados reportados por esses autores apontam que a mistura asfáltica contendo este resíduo apresentou valores de RRT semelhantes aos resultados encontrados para a mistura asfáltica com a utilização de cal.

2.6.5 Outros aditivos

Além da cal, produtos químicos a base de amina, cinzas e poeiras de forno de cimento, já foram testados em misturas asfálticas como aditivos melhoradores do dano por umidade induzida. Aksoy *et al.* (2005) avaliaram um catalisador chamado *Chemcrete* que modifica a estrutura molecular do ligante asfáltico através da temperatura e de reações dependentes do oxigênio. Durante a mistura e a compactação da mistura asfáltica, o *Chemcrete* substituiu forças eletrostáticas fracas por ligações químicas fortes e irreversíveis. Os resultados apresentados demonstraram a diminuição da susceptibilidade térmica, o aumento da resistência à deformação permanente, e o aumento da adesão com a adição de *Chemcrete* ao ligante asfáltico em 2% em peso de ligante asfáltico. Aksoy *et al.* (2005) relataram que a RRT aumentou de 45% para 80% quando o produto foi adicionado a mistura asfáltica.

O uso da borracha de pneu moído como aditivo melhorador do dano por umidade induzida também foi avaliado por Aksoy *et al.* (2005). O objetivo principal deste citado estudo foi verificar o potencial da borracha como melhorador da susceptibilidade térmica, avaliando também as propriedades mecânicas (MR) da mistura asfáltica com utilização deste material em sua composição. Os resultados apresentados por Aksoy *et al.* (2005) demonstraram o aumento da estabilidade e da RT dos materiais com o uso de borracha, e a diminuição da RRT, indicando redução da resistência ao dano por umidade induzida.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa, bem como suas caracterizações, os métodos e os ensaios laboratoriais que foram necessários para a avaliação das misturas asfálticas com relação ao dano por umidade induzida. O presente estudo surgiu devido ao estabelecimento do Termo de Cooperação (TC) 01/2015, no qual a ENEVA se compromete a apoiar pesquisas realizadas na UFC, visando o reaproveitamento das cinzas de carvão mineral, tendo em vista o grande acúmulo de cinzas provenientes do processo de produção de eletricidade utilizando carvão mineral como combustível nas Usinas Termoelétricas Itaqui e Pecém I e II. O trabalho faz parte da Linha de Pesquisa 2, a qual visa avaliar a utilização da cinza de carvão mineral em camadas de pavimentos.

A pesquisa realizada no presente trabalho se propõe a verificar, por meio de ensaios de laboratório, a possibilidade de reaproveitamento das cinzas para uso em camadas de pavimentos, buscando, assim, minimizar os impactos ambientais causados pelo descarte desses materiais, focando especificamente na incorporação das cinzas como fileres em misturas asfálticas em substituição aos fileres convencionalmente utilizados em serviços de pavimentação.

3.2. Materiais

3.2.1. Ligante asfáltico

Para a confecção dos corpos de prova usados nesta pesquisa foi utilizado o ligante asfáltico CAP 50/70, produzido pela Petrobras na Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste (Lubnor). A Tabela 9 apresenta os resultados da caracterização do ligante asfáltico usado nesta pesquisa.

Tabela 9 – Resultados da caracterização do ligante asfáltico usado nesta pesquisa.

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	50 a 70	64	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D 36	46 min	47,3	°C
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	E 102	141 min	177,5	s
Viscosidade Brookfield 135°C-SP21 20rpm	D 4402	274 min	349	cp
Viscosidade Brookfield 150°C-SP21	D 4402	112 min	175	cp
Viscosidade Brookfield a 177°C-SP21	D 4402	57 a 285	64	cp
RTFOT penetração retida	D 5	55 min	67	%
RTFOT - aumento do ponto de amolecimento	D 36	8 max	2,7	°C
RTFOT - ductibilidade a 25°C	D 113	20 min	>150	cm
RTFOT variação em % massa	D 2872	-0,50 a 0,50	-0,049	%
Ductibilidade a 25°C	D 113	60 min	>150	cm
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,5 min	100,0	% massa
Ponto de fulgor	D 92	235 min	>300	°C
Índice de suscetibilidade térmica	X 018	-1,5 a 0,7	-1,3	N/A
Aquecimento a 177°C	X 215	NESP	NESP	N/A

Fonte: adaptado de Petrobras (2012).

3.2.2. Agregados Naturais

Os agregados graúdos e miúdos utilizados nesta pesquisa são de três tipos, a saber: as britas e o pó-de-pedra que são de natureza granítica, as cinzas de carvão mineral e a Cal Hidratada do tipo CH-I. Todos os agregados de natureza granítica foram fornecidos pela pedreira POLIMIX, localizada na cidade de Itaitinga/CE. As cinzas de carvão mineral foram fornecidas pela ENEVA e a cal hidratada foi comprada no comércio local.

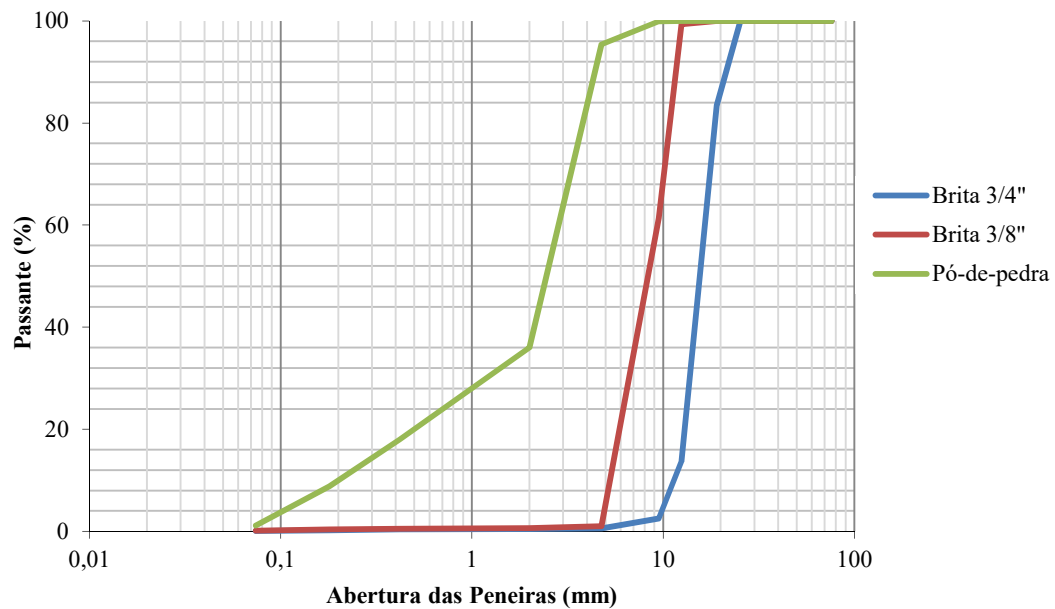
Na Pedreira POLIMIX foram coletados três tipos de agregados para utilização no programa experimental, a saber: brita 3/4", brita 3/8" e pó-de-pedra. Foi realizada a determinação da granulometria dos agregados graúdos e miúdos de acordo com DNER-ME 083/98. Na Figura 15 são apresentadas as curvas granulométricas obtidas para os agregados graníticos e na Tabela 10 são apresentados os resultados de granulometria obtidos para cada agregado. Na Figura 16 é apresentada uma foto dos agregados coletados com Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,0mm.

Tabela 10 – Resultados de granulometria.

Abertura das peneiras (pol)	(mm)	Brita 3/4” % Passante	Brita 3/8” % Passante	Pó-de-pedra % Passante
3"	76,2	100,0	100,0	100,0
2.1/2"	63,5	100,0	100,0	100,0
2"	50,8	100,0	100,0	100,0
1.1/2"	38,1	100,0	100,0	100,0
1"	25,4	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	83,4	100,0	100,0
1/2"	12,5	13,7	99,4	100,0
3/8"	9,5	2,5	61,3	99,9
N.º 4	4,76	0,6	1,0	95,4
N.º 10	2	0,5	0,7	36,0
N.º 40	0,42	0,4	0,5	18,0
N.º 80	0,18	0,2	0,4	8,8
N.º 200	0,074	0,1	0,1	1,2
FUNDO		0,0	0,0	0,0
TOTAL:		100	100	100

Fonte: Próprio autor.

Figura 15– Curvas granulométricas dos agregados coletados na POLIMIX.



Fonte: Próprio autor.

Figura 16– Agregados graníticos usados no programa experimental.



Fonte: Próprio autor.

3.2.3. Cinzas

As cinzas de carvão mineral utilizadas neste estudo foram coletadas na UTE Energia Pecém, sendo utilizados três procedimentos de coleta, a saber: amostragem de superfície, amostragem de profundidade e amostragem das cinzas volantes. A amostragem de superfície consistiu de coleta de material numa malha amostral de 75m por 75m lançada sobre a superfície do Módulo 1 de armazenamento de cinzas da Termoelétrica, o qual consiste de uma “piscina” de armazenamento de cinzas com aproximadamente 300m de comprimento, 150m de largura e 7m de profundidade totalizando 315.000m³ de cinza. Como é possível verificar na Figura 17, no centro do Módulo I, há um local onde são despejadas as águas das instalações da UTE Energia Pecém, o que levou a necessidade de realocação de dois pontos da malha amostral, que inicialmente estavam localizados sobre a região alagada. Ao final foram coletados 21 pontos de amostragem de superfície denominadas de PA-1 a PA-21.

A amostragem de profundidade consistiu da perfuração em dois pontos da malha (PP1 e PP2) retirando amostras a cada metro de profundidade. Já para a amostragem de cinzas volantes foram coletadas cinzas volantes “frescas”, proveniente diretamente do processo produtivo das Usinas Pecém 1 e Pecém 2 (PECÉM-1 e PECÉM-2).

Figura 17 – Plano de amostragem de coleta.



Fonte: Plano de amostragem

3.3. Dosagem das Misturas Asfálticas

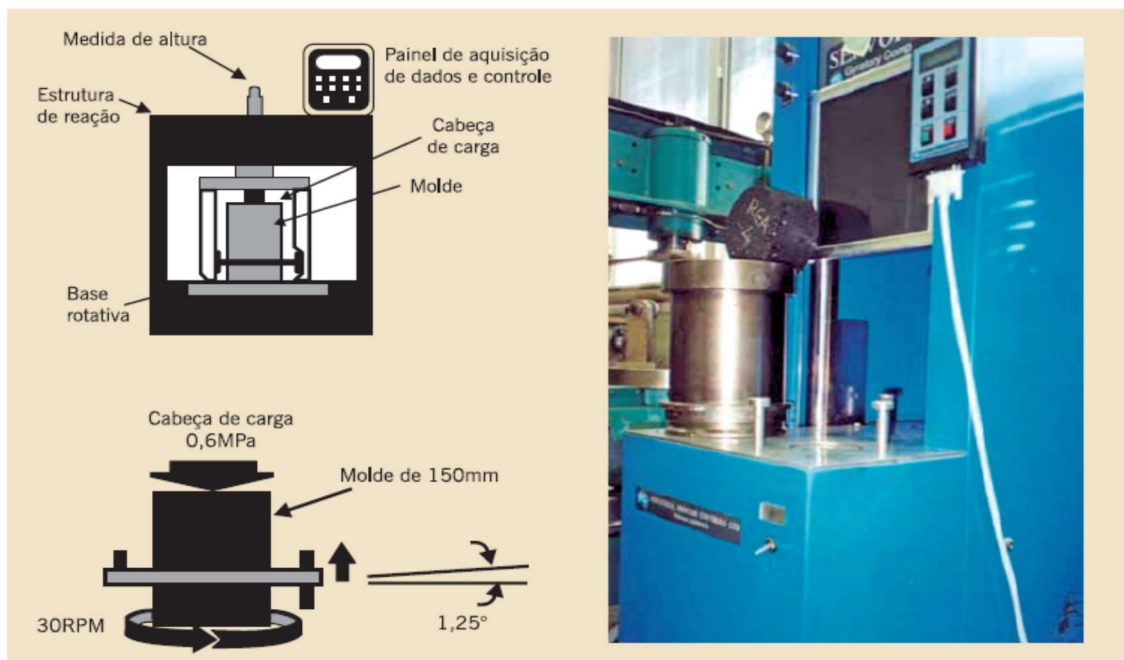
As misturas asfálticas analisadas neste estudo foram dosadas seguindo a metodologia Superpavedesenvolvidas pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP), o qual foi criado para substituir os métodos Hveem e Marshall. A análise volumétrica comum destes dois métodos serviu de base para o método Superpave. Em 1993 este foi concluído e nomeado de Superpave.

O Superpave é um método que abrange a dosagem de misturas asfálticas adaptadas aos requisitos de desempenho requeridos pelo tráfego e pelo ambiente (clima). Este método facilita a escolha e a combinação do ligante asfáltico, dos agregados, e de algum modificador necessário para alcançar o nível de desempenho requerido para o pavimento.

O Superpave tem como a diferença mais importante, em relação aos métodos Marshall e ao Hveem, o tipo de compactação, pois este utiliza um compactador giratório, conforme demonstrado na Figura 18, que aplica energia por amassamento. É a metodologia usada atualmente nas universidades e Departamentos de Estradas dos Estados Unidos. No

Brasil, este tipo de dosagem tem sido adotado em centros de pesquisas e universidades, mas obras federais já foram realizadas com a utilização deste procedimento (CAVALCANTI, 2010).

Figura 18 – Ilustração esquemática e exemplo de Compactador Giratório Superpave (CGS)



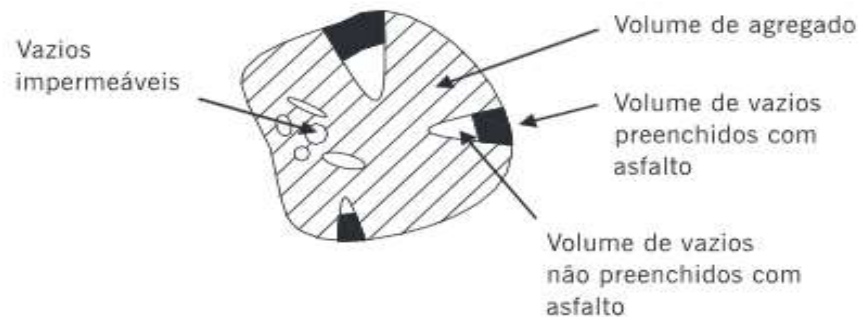
Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2010)

O funcionamento do CGS pode ser comparado ao de um rolo compressor que, em vez de aplicar golpes de impacto, faz a compactação exercendo uma tensão de amassamento na mistura asfáltica. Os parâmetros utilizados na operação do CGS são: ângulo de rotação de $1,25^{\circ}(\pm 0,02^{\circ})$, taxa de 30RPM, tensão de compressão aplicada ao CP durante a rotação de 600KPa e capacidade de reproduzir CP com diâmetro de 100mm e 150mm (CAVALCANTI, 2010).

Segundo Bernucci *et al.* (2010), a massa específica máxima teórica, tradicionalmente denominada densidade máxima medida (G_{mm}) é dada pela ponderação entre as massas dos constituintes da mistura asfáltica (Figura 19), também é chamada de densidade específica Rice (devido ao fato de que esse procedimento foi desenvolvido pelo pesquisador James Rice). Esse parâmetro pode ser determinado em laboratório seguindo a ASTM 2041/2000 ou a AASHTO T 209/1999. A G_{mm} é usada no cálculo de: percentual de vazios de misturas asfálticas compactadas, absorção de ligante pelos agregados, massa específica efetiva dos agregados, teor de ligante asfáltico efetivo da mistura asfáltica e ainda para

fornecer valores alvo para a compactação de misturas asfálticas através do compactador giratório.

Figura 19–Volumes considerados no cálculo de G_{mm}



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2010)

A G_{mm} foi calculada como sendo a razão da massa do agregado mais CAP e a soma dos volumes dos agregados e CAP e dos vazios não preenchidos. Para a determinação da densidade aparente das amostras (G_{mb}), utilizou-se a metodologia descrita na norma ASTM D 2726/2000. Com os valores de G_{mm} da mistura asfáltica e de G_{mb} de cada amostra compactada, o V_v de cada Corpo de Prova (CP) pode ser obtido a partir da Equação 1.

$$V_v = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

V_v = Volume vazios (%);

G_{mm} = densidade máxima medida;

G_{mb} = densidade máxima aparente.

3.3.1 Concreto Asfáltico (CA) Contendo Fíler Natural

Para o CA contendo fíler natural avaliado no estudo, utilizou-se o traço corrido para a dosagem e a moldagem dos CPs. A mistura asfáltica é composta pelos seguintes agregados: brita 3/4", brita 3/8" e pó-de-pedra. Foram moldados CPs com V_v de 4% ($\pm 0,4$) seguindo a metodologia SUPERPAVE para as dosagens das misturas asfálticas e para os ensaios de Resistência a Tração (RT), e com V_v de 7% ($\pm 0,5$) para realização dos ensaios de *Lottman* modificado. Para a obtenção do V_v , foram utilizados 100 giros no CGS para a

compactação da mistura asfáltica com 4% de Vv e 30 giros para a mistura asfáltica com 7% de Vv.

3.3.2 Concreto Asfáltico (CA) Contendo Cinzas e Cal Hidratada como Fíler

Para a adição de cinza e cal hidratada às misturas asfálticas, procedeu-se do seguinte modo:

- Adição de cinzas de carvão mineral em 4% de massa de agregado, seguindo o que utilizou Freitas (2015) em seu trabalho. Substituiu-se do pó de pedra (agregado natural) pelas cinzas. Foram utilizadas nesta etapa as cinzas volantes “frescas”, proveniente do processo produtivo das Usinas Pecém 1 e Pecém 2, e as cinzas coletadas no modelo de armazenamento, nos pontos de amostragem PA01 e PA13;
- Adição de cal hidratada do tipo CH-I à mistura asfáltica em substituição ao agregado natural, num percentual igual a 4% em massa de agregado;
- Adição de cinza dopada com cal hidratada do tipo CH-I, sendo que nesta etapa foi utilizado 2% de cinza de carvão mineral e 2% de cal hidratada do tipo CH-I, totalizando 4% de fíler, também em substituição ao agregado natural (pó de pedra). Foram utilizadas nesta etapa as misturas de cinza com cal, sendo que as amostras de cinzas utilizadas foram: cinzas volantes “frescas”, proveniente do processo produtivo das Usinas Pecém 1 e Pecém 2, e as cinzas obtidas dos pontos de amostragem PA01 e PA13.

Para proceder com as substituições de agregado natural, fracionaram-se os agregados graúdo e miúdo e removeu-se a fração passante na peneira n°200 dos três materiais (brita 3/4”, brita 3/8” e pó de pedra) substituindo a fração passante na peneira n°200 (0,075mm) pela cinza, cal ou mistura de cinza com a cal, também passante na peneira n°200, com o intuito de manter a mesma curva granulométrica de projeto e assim não envolver outras variáveis no processo de análise dos resultados. Após a substituição do fíler natural foi realizado o procedimento de dosagem também utilizando a metodologia Superpave.

3.3.3. Moldagem das amostras de mistura asfáltica

Para a preparação da mistura asfáltica, o CAP 50/70 foi aquecido a 150°C e os

agregados a 175°C, sendo estes misturados em seguida. A mistura asfáltica permaneceu na estufa durante duas horas na temperatura de 150°C, a fim de simular o envelhecimento que ocorre no processo de usinagem. Por fim, a mistura asfáltica seguiu para o CGS para compactação a temperatura de 150°C.

3.4. Métodos de Ensaio para Caracterização das Misturas Asfálticas

Nessa seção serão apresentados os ensaios utilizados no presente estudo. Primeiramente será descrito o ensaio de resistência a tração. Em seguida o ensaio de *Lottman* modificado, usado na avaliação do dano por umidade induzida.

3.4.1. Resistência a Tração (RT)

A realização dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral nos CPs, seguiu as recomendações do Método de Ensaio DNER-ME 138/94. As amostras foram submetidas ao carregamento por compressão em planos paralelos diametralmente opostos com velocidade aproximada de 0,8mm/s, gerando assim planos de tensões de tração, perpendiculares ao da carga aplicada. O CP foi fixado na posição com uma leve compressão da prensa para dar início a aplicação da carga, que foi feita de forma progressiva até a ruptura da amostra. Registrada a carga de ruptura no ensaio, obtém-se o valor da RT a partir da Equação 2. A Figura 20 mostra um dos CPs sendo ensaiado. Para execução deste ensaio os CP foram colocados em capela com temperatura mantida a 25°C, por um período de 2 (duas) horas, de modo a obter a temperatura específica para o ensaio.

$$RT = \frac{2P}{100\pi t d} \quad (2)$$

Onde:

RT = Resistência à Tração (MPa);

P = força de compressão (N);

t = espessura da amostra (cm);

d = diâmetro da amostra (cm).

Figura 20– Realização do Ensaio de Resistência à Tração



Fonte: Próprio autor

3.4.2. Ensaio de Lottman modificado

Para caracterização do dano por umidade induzida em misturas asfálticas, foi utilizado o ensaio de *Lottman* modificado, de acordo com a norma AASHTO T283/14. Esse método consiste na avaliação de dois subgrupos: condicionados e não condicionados, com pelo menos três amostras para cada subgrupo. Para as amostras condicionadas inicia-se o ensaio com a aplicação de saturação avácuo por 10 minutos, em seguida é calculada a saturação, Equação 3. Se o valor encontrado estiver entre 70 e 80%, a amostra pode seguir para o ciclo de congelamento, se este valor estiver abaixo de 70% a etapa de saturação à vácuo é repetida. Se o valor for acima de 80% o CP deve ser descartado. A norma sugere que o CPs moldados tenham V_v de 7% ($\pm 0,5$), condição na qual o dano por umidade seria melhor observado, já que esse V_v permite um maior volume de água absorvida pela amostra, o que ajuda a provocar maior número de fissuras na amostra durante o congelamento aumentando assim o dano por umidade induzida.

Para a realização do ciclo de congelamento, as amostras foram enroladas em filme plástico e colocadas em uma bolsa de plástico impermeável e seladas juntamente com 10ml de água. As amostras foram levadas ao freezer na temperatura de -18°C ($\pm 3^\circ\text{C}$) por 16 horas. Ao fim do congelamento, retirou-se o filme e a bolsa de plástico dos CPs. Em seguida, as amostras foram colocadas no banho maria a temperatura de 60°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) por um período de

24 horas. Para estabilização da temperatura, o subgrupo das amostras condicionadas foi submerso em água por 2 horas a 25°C, enquanto o subgrupo das amostras não condicionadas foi colocado em sacos plásticos impermeáveis e submerso em água por 2 horas a 25°C. Os dois subgrupos foram então, rompidos pelo ensaio de RT de acordo com a norma DNER-ME 138/94. O valor da força de compressão é anotado e por meio da Equação 2 pode-se determinar a tensão de resistência à tração da amostra. Por fim, calcula-se o valor da Relação de Resistência a Tração (RRT), que indica o potencial de dano por umidade, dado pela razão da resistência a tração do grupo condicionado e a resistência a tração do grupo de controle (não-condicionado), conforme mostrado na Equação 4.

$$S^1 = \frac{100 J^1}{V_a} \quad (3)$$

Onde:

S^1 = Grau de saturação (%);

J^1 = Volume absorvido de água (cm³);

V_a = Volume de vazios (cm³).

$$RRT = \frac{RT \text{ condicionado}}{RT \text{ controle}} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

RRT = Relação de Resistência Tração (%);

RTcondicionado = Resistência a tração para os corpos de prova condicionados (MPa);

RTcontrole = Resistência a tração para os corpos de prova não-condicionados (MPa);

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Caracterização das Amostras de Cinzas

Com a finalidade de se conhecer a composição química das cinzas de carvão coletadas na Energia Pecém, bem como analisar a variabilidade na composição química das mesmas, foi realizada a caracterização química do material proveniente de todos os pontos de coleta utilizando-se a técnica de Fluorescência de Raios X. As Tabelas 11 e 12 apresentam os resultados das análises realizadas para os pontos coletados no módulo de armazenamento de cinzas (PA-01 a PA-21) das Usinas Termoelétricas em superfície (profundidade variando entre 50 e 75 cm).

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para os pontos coletados em profundidade (PP1 e PP2) também no módulo de armazenamento de cinzas das Usinas Termoelétricas. Vale ressaltar que para esta etapa da análise foram obtidas amostras de cinzas a cada metro desde a superfície. Em PP1 foram obtidas 6 (seis) amostras, tendo-se cavado até a profundidade de 5,25 m. Já em PP2, foram obtidas 7 amostras, tendo-se cavado até 6,25 m de profundidade.

Na Tabela 14 encontram-se os resultados obtidos para as análises realizadas nas cinzas volantes “frescas” coletadas nas Usinas Termoelétricas Pecém I e II. Nesta etapa foram coletadas cinzas retiradas diretamente dos silos, antes destas serem enviadas para os módulos de armazenamento.

Tendo por base as composições químicas das cinzas que foram obtidas por meio da Fluorescência de Raios-X foi possível classificá-las de acordo com o preconizado pela norma ASTM C618 (2015) como pertencentes a Classe C ou F. Desse modo criou-se um diagrama esquemático tendo por base os pontos de coleta, apresentado na Figura 21, para se analisar a distribuição das cinzas segundo sua classificação dentro do módulo de armazenamento. Já as Figuras 22, 23 e 24 apresentam os resultados obtidos através do ensaio de Fluorescência de Raios-X para as amostras analisadas. Nestes gráficos é mostrada a variação nas composições das cinzas analisadas (cinzas coletadas na superfície e em profundidade no módulo de armazenamento, e as cinzas volantes “frescas”, respectivamente) focando nos constituintes principais deste material apontados pela literatura, a saber: cristais de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3) e cal (CaO).

Tabela 11 – Caracterização das cinzas coletadas na Usina Termelétrica Energia Pecém, para os pontos em superfície PA-01 a PA-10.

Compostos	PA-01 (%massa)	PA-02 (%massa)	PA-03 (%massa)	PA-04 (%massa)	PA-05 (%massa)	PA-06 (%massa)	PA-07 (%massa)	PA-08 (%massa)	PA-09 (%massa)	PA-10 (%massa)
Al ₂ O ₃	7,3600	11,9610	8,6290	9,4531	10,1910	9,2386	6,3167	4,7809	7,1125	6,4910
SiO ₂	23,6340	38,0070	35,9690	32,0780	34,9530	34,2350	23,4440	18,1110	23,4420	26,5470
P ₂ O ₅	0,1067	0,0000	0,0000	0,2902	0,0000	0,4571	0,0000	0,0000	0,1779	0,2298
SO ₃	10,8450	2,0038	2,5744	2,9805	2,0534	2,1468	5,6507	10,3000	4,4558	4,2482
Cl	0,0000	0,1254	0,2720	0,1085	0,0283	0,0722	0,0627	0,0236	0,0000	0,2158
K ₂ O	2,3840	3,8241	4,2013	3,9654	3,5666	3,8537	2,8484	2,2433	2,9526	3,4681
CaO	34,7570	13,3230	19,4450	19,7140	17,6600	21,2590	34,8730	43,4070	35,1420	30,0110
MnO	0,0000	0,0000	0,4258	0,2777	0,0000	0,2668	0,2315	0,2082	0,2340	0,0000
TiO ₂	1,5567	2,5995	0,0000	2,5093	3,1214	3,0360	2,6471	2,1196	2,6912	2,7281
Fe ₂ O ₃	18,6780	27,5660	27,5110	28,0610	27,4070	24,7110	22,6990	18,2780	23,0440	25,5290
ZnO	0,1134	0,0000	0,1827	0,1629	0,0000	0,1331	0,1242	0,1093	0,1009	0,1579
SrO	0,5657	0,5908	0,7898	0,3993	0,7449	0,3620	0,3782	0,3127	0,3998	0,2866
NiO	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1592	0,0000	0,1058	0,1060	0,0000	0,0000
Rb ₂ O	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1155	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0876
MgO	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,6187	0,0000	0,0000	0,0000
Ag ₂ O	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2284	0,0000	0,0000	0,2473	0,0000
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Classe*	C	F	F	C	F	C	C	C	C	C
pH	8,9	8,7	9,8	8,9	9,4	9,1	9,8	8,9	9,7	10,0

Fonte: Resultados do ensaio de fluorescência de raios X fornecidos pelo laboratório de Raios-X da UFC.

*Classificação segundo ASTM C618 (2015).

Tabela 12 – Caracterização das cinzas coletadas na Usina Termelétrica Energia Pecém, para os pontos em superfície PA11 a PA21.

Compostos	PA-11 (%massa)	PA-12 (%massa)	PA-13 (%massa)	PA-14 (%massa)	PA-15 (%massa)	PA-16 (%massa)	PA-17 (%massa)	PA-18 (%massa)	PA-19 (%massa)	PA-20 (%massa)	PA-21 (%massa)
Al ₂ O ₃	6,5306	5,6835	9,1662	10,249	9,6497	13,224	8,2341	8,8446	7,5845	10,155	6,2007
SiO ₂	21,7180	21,604	35,526	39,851	36,916	39,872	25,876	29,224	25,747	35,235	24,013
P ₂ O ₅	-	-	0,4475	0,5099	0,4183	-	-	0,4273	0,2254	0,3146	
SO ₃	6,2383	9,0754	1,8717	0,8342	1,5973	1,8758	5,3149	3,5959	5,397	3,7174	6,8829
Cl	0,1105	0,0794	-	0,318	0,0529	-	0,0979	0,0689	0,1294		
K ₂ O	2,6199	2,4515	4,0946	4,4022	4,429	5,0592	3,2565	2,9783	3,1072	3,5671	2,741
CaO	39,4140	37,743	14,215	10,221	18,123	13,255	31,917	26,609	32,754	17,649	33,897
MnO	0,1821	0,3053	0,208	0,2542	0,1957	0,2626	0,21		0,1336	0,1859	
TiO ₂	2,6209	1,9367	3,1414	3,7382	2,7342	3,0691	3,0007	2,7626	2,625	2,8202	2,449
Fe ₂ O ₃	18,3350	20,273	29,245	28,578	25,187	19,749	20,863	24,909	21,338	25,197	23,189
ZnO	0,0870	-	0,1538	0,1691	0,1096	0,1201	-	0,1483	0,0915	0,1202	
SrO	0,2447	0,6034	0,6205	0,5634	0,4708	0,2424	0,2005	0,4317	0,3378	0,3377	0,6279
NiO	-	0,1393	-	-	0,1173	0,0889	-				
Rb ₂ O	0,0800	-	-	-	-	0,0578	0,0628				
MgO	-	-	-	-	-	0,7807	-		0,5295	0,7006	
Ag ₂ O	0,4400	-	-	-	-	0,197	0,1921				
Y ₂ O ₃	0,0435	-	-	-	-	-	-				
Co ₂ O ₃	-	-	-	0,1206	-	-	-				
Nb ₂ O ₅	0,4017	-	-	-	-	0,0536	0,0507				
MoO ₃	0,0791	-	-	-	-	1,5162	0,0644				
CuO	-	-	-	0,1035	-	-	-				
As ₂ O ₃	-	0,1028	-	0,0874	-	-	-				
BaO	-	-	1,311	-	-	-	-				

Tabela 12 – Caracterização das cinzas coletadas na Usina Termelétrica Energia Pecém, para os pontos em superfície PA11 a PA21 (continuação).

Rh ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	0,2978				
ZrO ₂	-	-	-	-	-	0,0924	0,076				
ThO ₂	-	-	-	-	-	-	0,0843				
PuO ₂	-	-	-	-	-	0,1117	0,0916				
Tc	0,0718	-	-	-	-	-	-				
U ₃ O ₈	-	-	-	-	-	-	0,1106				
CdO	0,3731	-	-	-	-	0,3727	-				
In ₂ O ₃	0,4090	-	-	-	-	-	-				
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Classe*	C	C	F	F	F	F	C	C	C	F	C
pH	9,5	10,3	8,9	8,4	8,4	9,0	10,2	8,7	9,5	9,9	9,5

Fonte: Resultados do ensaio de fluorescência de raios X fornecidos pelo laboratório de Raios-X da UFC.

*Classificação segundo ASTM C618 (2015).

Tabela 13 – Caracterização das cinzas coletadas na Usina Termelétrica Energia Pecém, para os pontos em profundidade (PP1 e PP2).

Compostos	PP1 (= PA20) (%massa)	PP1 (1-1,25m) (%massa)	PP1 (2-2,25m) (%massa)	PP1 (3-3,25m) (%massa)	PP1 (4-4,25m) (%massa)	PP1 (5-5,25m) (%massa)	PP2 (=PA21) (%massa)	PP2 (1-1,25m) (%massa)	PP2 (2-2,25m) (%massa)	PP2 (3-3,25m) (%massa)	PP2 (4-4,25m) (%massa)	PP2 (5-5,25m) (%massa)	PP2 (6-6,25m) (%massa)
Al ₂ O ₃	10,155	10,1770	8,0916	6,7617	9,303	9,4163	6,2007	5,2027	9,9028	11,385	9,4864	9,5333	8,6044
SiO ₂	35,235	34,0760	30,2300	23,4610	30,47	37,0070	24,013	20,376	29,4730	33,326	32,8630	30,5300	29,9350
P ₂ O ₅	0,3146	0,2994	0,1893	-	0,3829	0,3798	-	-	-	-	0,8425	0,4612	0,2634
SO ₃	3,7174	2,7449	4,0658	6,0041	2,1017	1,1592	6,8829	7,3639	3,7067	3,3714	3,3411	4,1900	2,6044
Cl	-	0,2059	0,1826	0,1571	0,3618	0,1858		0,0804	0,0807	0,078	0,0814	0,2063	0,2218
K ₂ O	3,5671	4,0993	3,3317	2,9862	3,3499	4,2823	2,741	2,557	3,0816	3,2404	2,8482	3,1663	3,1914
CaO	17,649	15,0540	23,4770	28,7140	21,882	9,8134	33,897	37,914	27,8250	20,604	27,4950	27,2330	24,083
MnO	0,1859	0,2183	0,2937	0,2798	0,2251	0,2434		0,2141	0,1426	0,2465		0,2340	0,2132
TiO ₂	2,8202	3,3120	3,2053	2,9848	2,8547	2,6412	2,449	2,4461	3,2275	2,337	2,7036	2,8205	2,8324
Fe ₂ O ₃	25,197	29,1200	25,9600	27,6930	26,954	32,9730	23,189	22,702	21,3420	24,327	18,4640	20,4440	27,195
ZnO	0,1202	0,1333	0,1406	-	0,131	0,1661			0,1098	0,1067		0,1246	0,1558
SrO	0,3377	0,5601	0,4568	0,9578	0,7129	0,7716	0,6279	0,5889	0,6350	0,8674	0,5091	1,0569	0,6214
CdO	-	-	0,3761	-	0,3675	0,4193	-	-	-	-	-	-	-
Rb ₂ O	-	-	-	-	-	0,1019	-	-	-	-	-	-	0,0788
MgO	0,7006	-	-	-	0,5614	-	-	0,5546	0,4731	-	0,8062	-	-
Ag ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1991	-	-
V ₂ O ₅	-	-	-	-	0,3424	0,3261	-	-	-	-	0,3604	-	-
CuO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1099		-	-
As ₂ O ₃	-	-	-	-	-	0,1137	-	-	-	-		-	-
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Classe*	F	F	C	C	C	F	C	C	C	C	C	C	C
pH	9,9	8,4	9,6	10,1	8,9	8,8	9,5	11,4	9,6	9,1	8,9	8,9	9,4

Fonte: Resultados do ensaio de fluorescência de raios X fornecidos pelo laboratório de Raios-X da UFC.

*Classificação segundo ASTM C618 (2015).

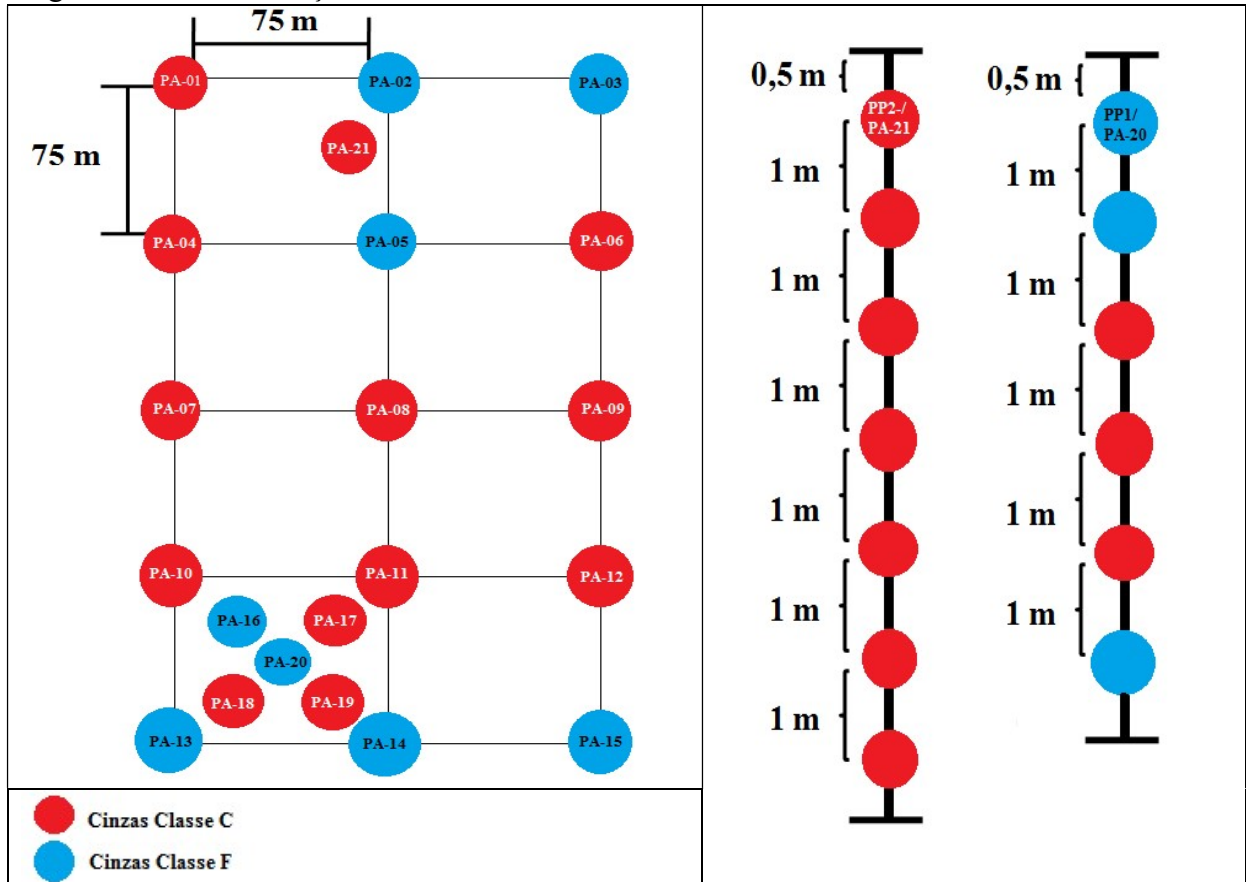
Tabela 14 – Caracterização das cinzas volantes “frescas” das Usinas Pecém I e II.

Compostos	Pecém 1 (%massa)	Pecém 2 (%massa)
Al ₂ O ₃	4,1527	10,3690
SiO ₂	15,7040	39,5840
SO ₃	14,3560	0,6113
Cl	0,0738	-
K ₂ O	1,9084	3,7032
CaO	43,4910	7,2629
MnO	0,1797	0,1915
TiO ₂	1,9718	2,9414
Fe ₂ O ₃	17,5970	31,0930
ZnO	0,0936	0,1283
CuO	-	0,1548
Rb ₂ O	0,0593	0,0829
Y ₂ O ₃	-	0,0730
MoO ₃	-	0,1497
Tc	-	0,0253
Ag ₂ O	-	0,5142
Sb ₂ O ₃	-	0,5803
Nb ₂ O ₅	-	0,1006
TeO ₂	-	0,8592
I	-	0,8838
PuO ₂	-	0,1365
SrO	0,4122	0,5545
TOTAL	100,0	100,0
Classe*	C	F
pH	12,2	9,7

Fonte: Resultados do ensaio de fluorescência de raios X fornecidos pelo laboratório de Raios-X da UFC.

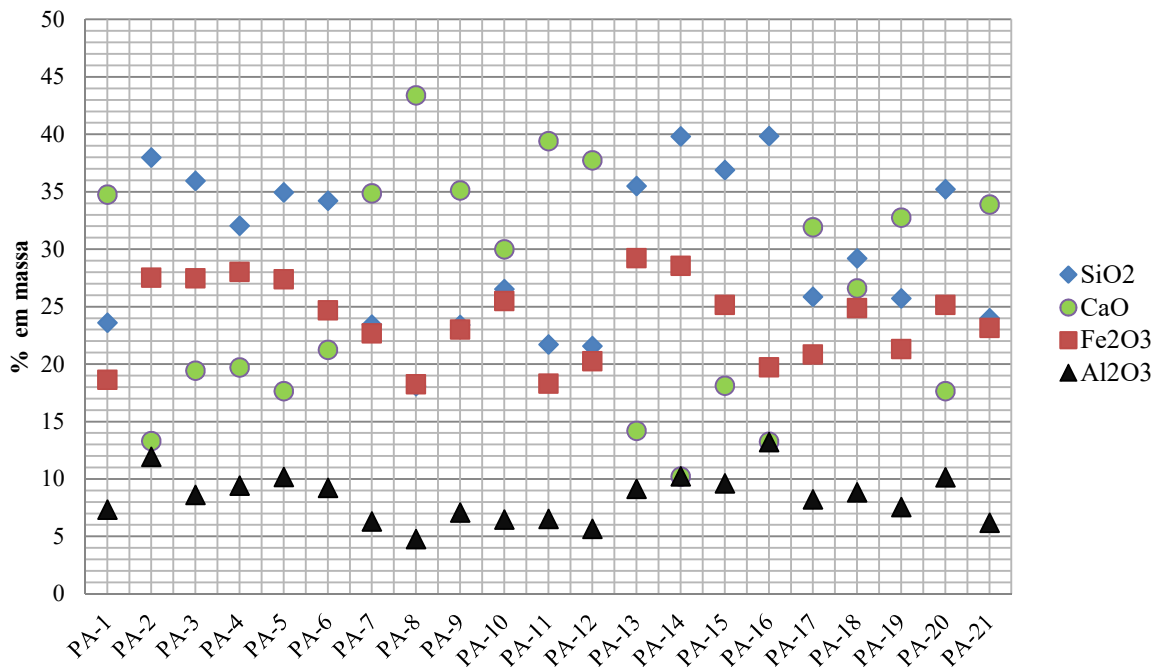
*Classificação segundo ASTM C618 (2015).

Figura 21 - Classificação dos vazios na mistura asfáltica.



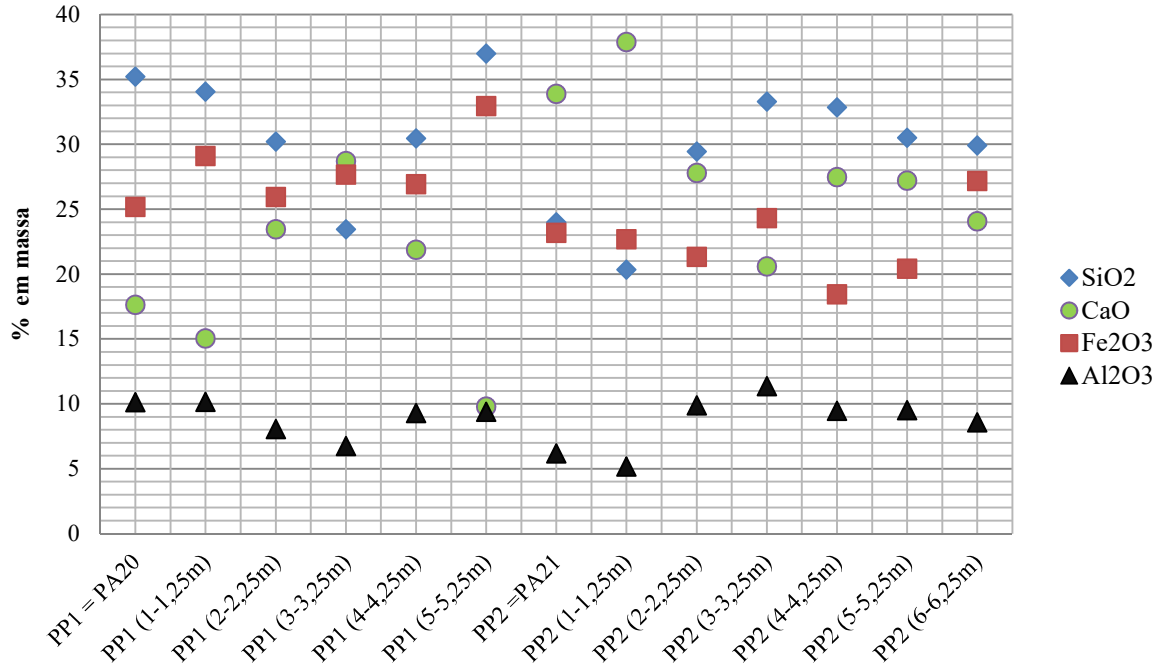
Fonte: Próprio autor.

Figura 22 - Variação na composição dos principais constituintes químicos para as cinzas coletadas na superfície do módulo de armazenamento (pontos PA-1 a PA-21).



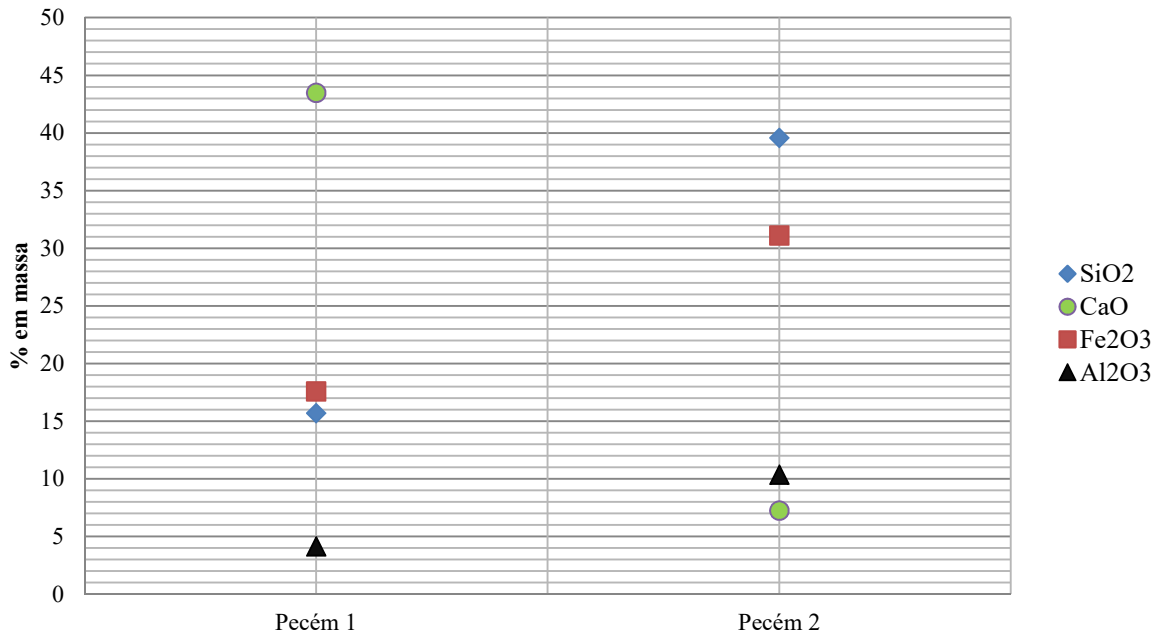
Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – Variação na composição dos principais constituintes químicos para as cinzas coletadas em profundidade do módulo de armazenamento (pontos PP1 e PP2).



Fonte: Próprio autor.

Figura 24 – Variação na composição dos principais constituintes químicos para as cinzas coletadas volantes “frescas” coletas nas Usinas Pecém I e II.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 11 a 12, e na Figura 22, pôde-se perceber que o material coletado na superfície do módulo de armazenamento é

bastante heterogêneo. A título de avaliação da variabilidade deste material, a amostra de cinza que possui o maior percentual de CaO (43,4% em massa) apresenta aproximadamente 4 vezes mais CaO em sua composição se comparada a amostra que apresenta a menor quantidade deste composto em sua composição (10,2% em massa), além disso, foi percebido que houve grande dispersão dos resultados obtidos, pois para a composição de CaO obteve-se um desvio padrão de 10,1 e um coeficiente de variação de 38,9%. Com relação ao SiO₂, também houve grande dispersão dos resultados, uma vez que obteve-se um desvio padrão de 6,8 e um coeficiente de variação de 23,0%, e razão entre a amostra com maior percentual SiO₂ com aquela que apresenta menor percentual foi igual a 2. Com relação ao Fe₂O₃ e o Al₂O₃, também houve dispersão nos resultados. Para o Fe₂O₃ obteve-se um desvio padrão de 3,6, com coeficiente de variação de 15,0%, e para o Al₂O₃ o desvio padrão calculado foi de 2,1, com coeficiente de variação de 25,2%. Ademais, há cinzas que podem ser classificadas como Classe C e outras que podem ser classificadas como Classe F de acordo com ASTM C618 (2015). Vale ressaltar ainda que mesmo as cinzas enquadradas numa mesma classe apresentam composições químicas bem distintas, não sendo possível identificar pelo menos duas amostras de cinzas com composições idênticas dentre os 21 pontos coletados.

Com relação os pontos coletados em profundidade, tal como apresentado na Tabela 13 e na Figura 23, houve também grande dispersão dos resultados, principalmente no que se refere ao percentual de CaO contido nas amostras. O percentual em massa de CaO varia de 9,8% a 37,9%, e apresentou um desvio padrão de 7,6. Para o Al₂O₃, o Fe₂O₃ e o Al₂O₃, também obteve-se grande dispersão dos resultados, sendo obtidos os seguintes desvios padrões 1,7, 4,9 e 3,9, respectivamente. Foi percebido que as amostras coletadas em PP1 apresentaram variação na sua classificação, sendo algumas delas enquadradas na Classe C e outras enquadradas na Classe F, tal como mostra a Figura 19. Já as cinzas coletadas em PP2, foram todas enquadradas na Classe C. Porém, tal como foi notado para os pontos em superfície, para os pontos coletados em profundidade também obteve-se grande variação na composição químicas das cinzas, não sendo possível detectar cinzas com características idênticas dentre aquelas coletadas.

Desse modo, pode-se afirmar que o material contido no módulo de armazenamento de cinzas das Usinas Termelétricas em estudo é bastante heterogêneo. Esta heterogeneidade apresenta-se tanto na superfície e como em profundidade, mostrando que antes da utilização deste material em obras civis, a cinza que for coletada deverá ser

homogeneizada e as misturas resultantes dessas homogeneizações deverão ser caracterizadas e testadas em laboratório para que assim se minimizem as distorções que possam vir a ocorrer em campo.

Acredita-se que a variação dos resultados obtidos provém de fatores tais como: carvões de origens diferentes; cinzas de períodos diversos (*startup*, comissionamento e operação normal); diferenças nas tecnologias usadas entre as usinas; dentre outros. Lopes (2011) afirmou que as propriedades físico-químicas das cinzas oriundas da combustão do carvão mineral em usinas termelétricas são influenciadas por fatores como a composição do carvão, grau de beneficiamento e moagem do carvão, tipo, projeto e operação da caldeira, sistema de extração e manuseio das cinzas. Gothe (1990) assegurou que as cinzas possuem variação na sua composição e nas suas propriedades físico-químicas, não só de uma usina para outra, mas também de uma caldeira para outra dentro de uma mesma usina e até mesmo em uma determinada caldeira em tempos diferentes.

No que tange as amostras de cinzas volantes “frescas” obtidas diretamente do processo, pode-se observar grande variação no percentual de CaO, isto decorre da diferença de tecnologia aplicada no tratamento dos gases de exaustão, uma vez que na Usina Pecém I há sistema de lavagem com a cal para retirada dos compostos de enxofre que são lançados na atmosfera. Este processo de lavagem faz com que as cinzas obtidas na Usina Pecém I tenham elevado teor de CaO em sua composição ($\approx 43,5\%$ em massa), enquanto que as cinzas obtidas da Usina Pecém II apresentem baixo percentual de CaO ($\approx 7,3\%$ em massa), pois nesta Usina não há sistema para tratamento dos gases de exaustão utilizando-se a cal. Essa diferença faz com que as cinzas que são obtidas em Pecém I sejam classificadas como classe C, ao passo que as cinzas coletadas em Pecém II sejam classificadas como classe F, segundo a norma ASTM C618 (2015).

Os valores de pH para todas as amostras cinzas coletadas apresentaram valores acima de 7, indicando que estes são materiais alcalinos. Porém há algumas cinzas com alcalinidade mais acentuada que outras, não havendo homogeneidade nos resultados obtidos. Os valores de pH variam de 8,4 a 12,2.

Através da técnica de difração por raios-x, as amostras de cinzas utilizadas nos processos de dosagem foram caracterizadas. Dentre as amostras de cinzas coletadas foram selecionadas para a utilização como filer em misturas asfálticas as mostras de cinzas volantes

“frescas” de Pecém I e II, e as cinzas de PA-01e PA-13 coletadas no módulo de armazenamento. Nas figuras 25, 26, 27 e 28 seguem os resultados obtidos.

Figura 25– Difratoograma obtido para a cinza coletada em PA-01

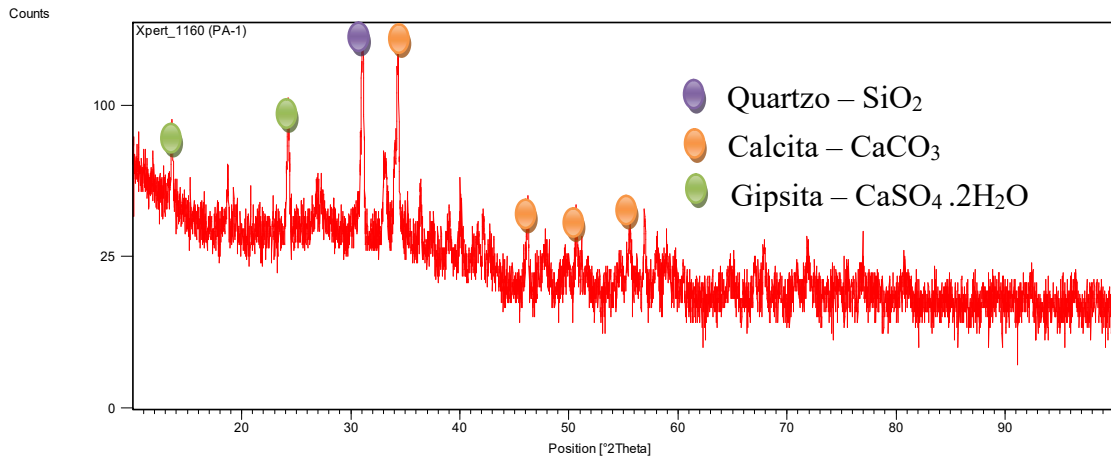


Figura 26 – Difratoograma obtido para a cinza coletada em PA-13

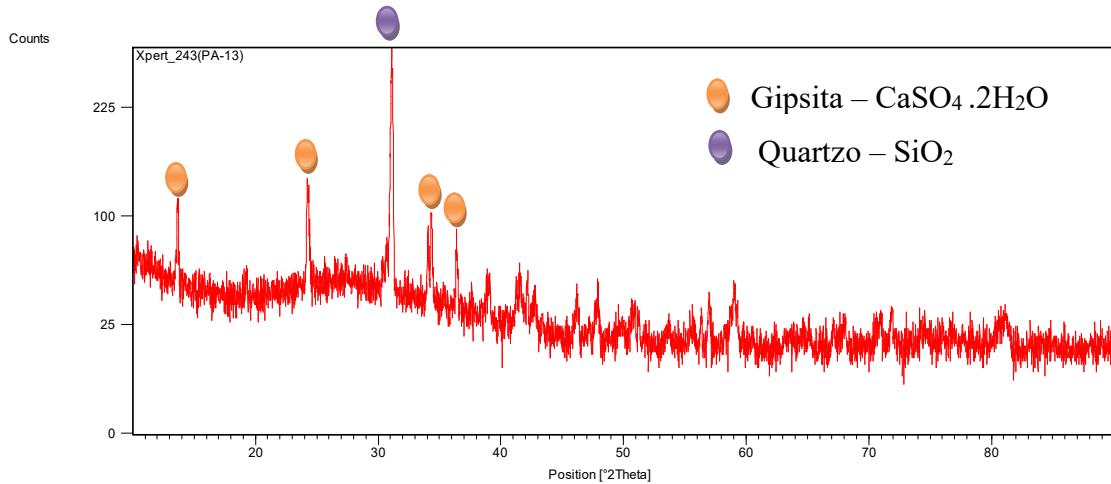


Figura 27– Difratoograma obtido para as cinzas volantes “frescas” de Pecém I

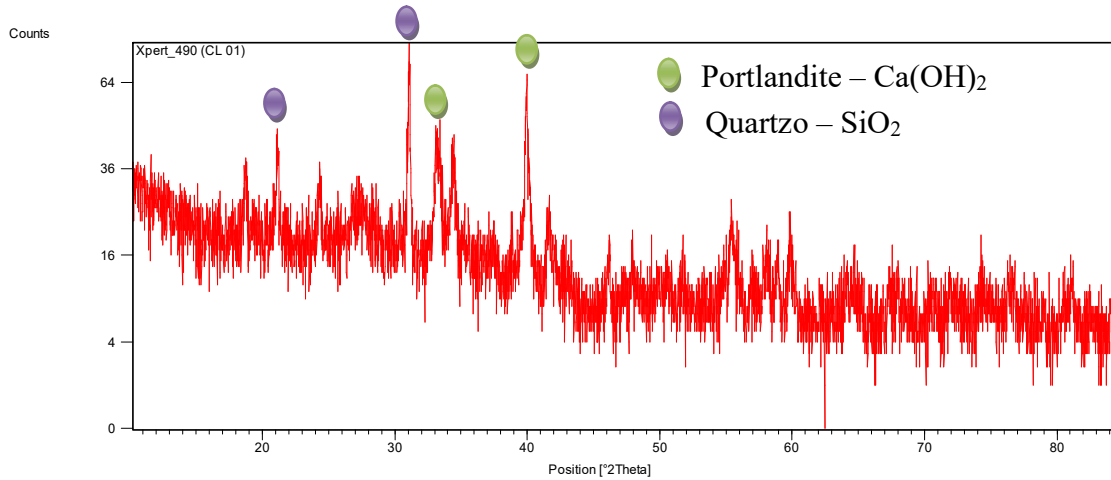
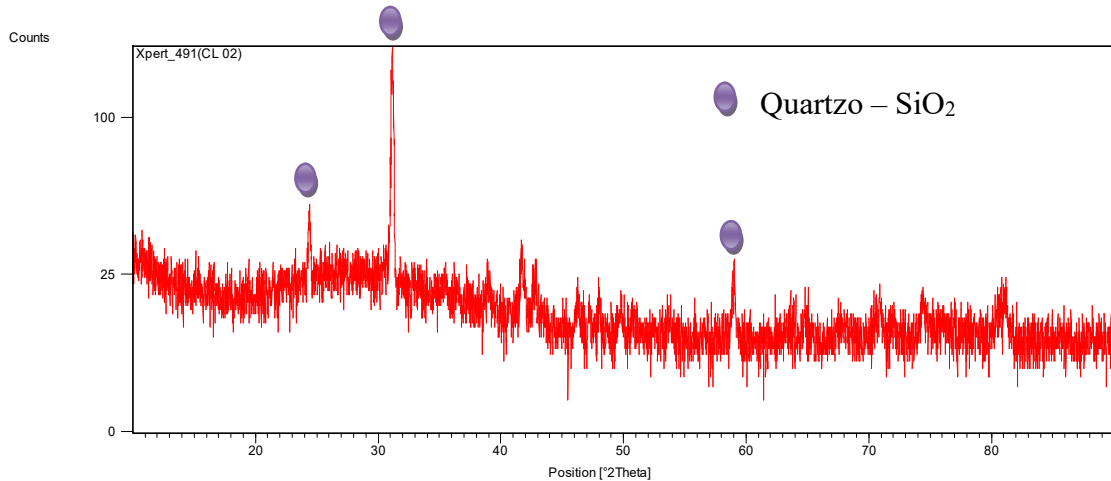


Figura 28 – Difratoograma obtido para as cinzas volantes “frescas” de Pecém II

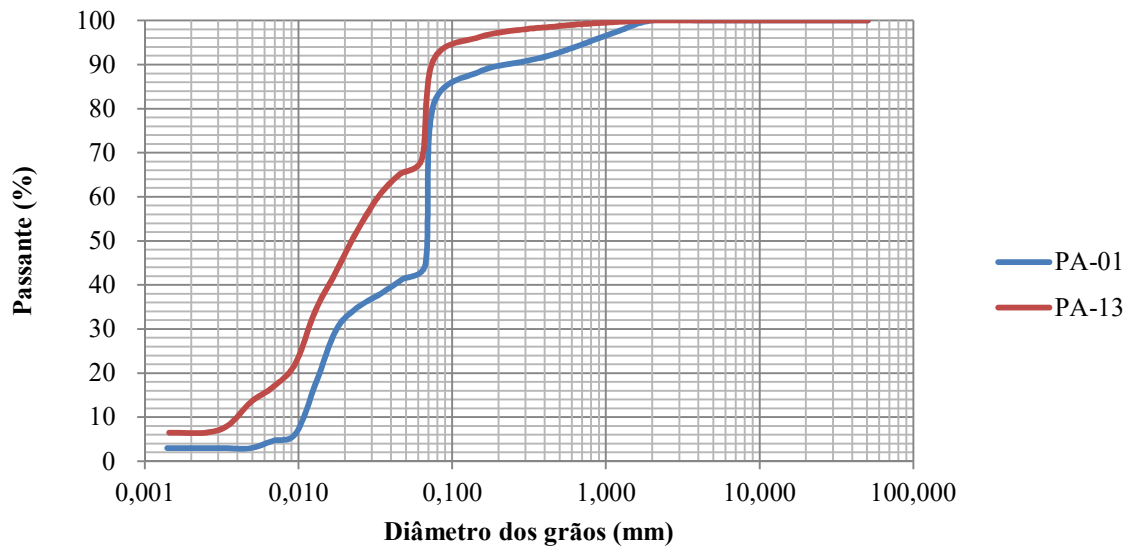


Os difratogramas apresentados mostraram algumas diferenças entre as cinzas escolhidas para serem usadas nas misturas asfálticas como filler. No caso das cinzas coletadas no módulo de armazenamento (PA-01 e PA-13), bem como as cinzas volantes “frescas” coletadas em Pecém I fica evidente que parte do cálcio contido nestas amostras apresenta-se nas fases cristalinas de gipsita, portlandite e calcita, porém pode ainda existir compostos formados por cálcio que estejam dispersos numa matriz amorfa. No caso das cinzas volantes “frescas” coletadas em Pecém II não foram detectadas estruturas cristalinas formadas por cálcio, isto pode indicar que o cálcio presente nestas amostras pode estar numa forma amorfa.

Nas Figuras 29 e 30 são apresentados os resultados para as granulometrias das cinzas utilizadas como filleres nas misturas asfálticas. As granulometrias referentes as cinzas coletadas no módulo (PA-01 e PA-13) são apresentadas na Figura 29, ressalta-se que neste

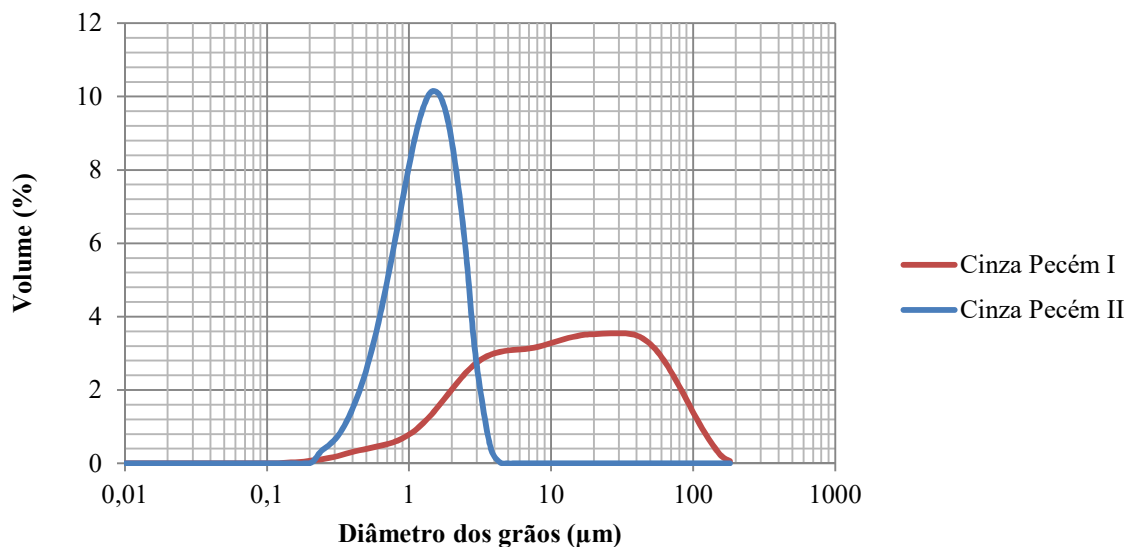
caso foi usada a técnica de sedimentação. As granulometrias para as cinzas volantes "frescas" de Pecém I e II são apresentadas na Figura 30, neste caso utilizou a granulometria a laser. Ressalta-se que os dados de granulometria foram retirados do relatório de acompanhamento do Termo de Cooperação N° 01/2015 - ENEVA - UFC - FUNDAÇÃO ASTEF.

Figura 29– Granulometria para as cinzas PA-01 e PA- 13



Fonte: Relatório semestral, Termo de Cooperação N° 01/2015 - ENEVA - UFC - FUNDAÇÃO ASTEF (2016).

Figura 30– Granulometria para as cinzas volantes "frescas" de Pecém I e II



Fonte: Relatório semestral, Termo de Cooperação N° 01/2015 - ENEVA - UFC - FUNDAÇÃO ASTEF (2016).

Analisando-se os resultados de granulometria das cinzas volantes utilizadas no processo de dosagem das misturas asfálticas, foi possível perceber que há diferenças entre os materiais utilizados, no que diz respeito ao tamanho dos grãos que formam estes materiais. Percebe-se que as cinzas volantes "frescas" oriundas de Pecém I e II são materiais muito finos. As cinzas volantes "frescas" coletadas em Pecém I apresentam partículas distribuídas na faixa de 0,138 μ m a 181 μ m, e as cinzas volantes coletadas em Pecém II apresentaram o diâmetro das partículas variando de 0,209 μ m a 4,365 μ m.

No caso das cinzas de carvão mineral coletadas no módulo de armazenamento e incorporadas às misturas asfálticas, a granulometria para estes materiais também mostrou que estes são bastante finos, porém com características um pouco distintas em relação as cinzas volantes "frescas". A granulometria para as cinzas coletadas em PA-01 mostrou que 81% das partículas estão abaixo de 75 μ m (0,075 mm) e que os grãos que formam este material são predominantemente do tamanho dos grãos de areia fina (0,42mm - 0,074mm) e de silte(0,074mm - 0,005mm), sendo 78% das partículas do tamanho dos grãos de silte e 11% das partículas do tamanho de grãos de areia fina. Porém há uma pequena parcela (3%) dos grãos que possuem partículas do tamanho de grãos de argila (entre 0,001mm- 0,005mm), e ainda 8% dos grãos possuem granulometria mais graúda, do tamanho de grãos de areia média (2,00mm - 0,42mm). No tocante as cinzas coletadas em PA-13, foi possível constatar que 91% das partículas estão abaixo de 75 μ m (0,075 mm), tendo sido constatado que os grãos que formam este material são predominantemente do tamanho dos grãos de silte (0,074mm - 0,005mm) e de argila (entre 0,001mm- 0,005mm), obtendo-se através da realização do ensaio 77% das partículas do tamanho de grãos de silte e 13% das partículas do tamanho de grãos de argila. Porém neste material há uma parcela de 8% dos grãos que são do tamanho de areia fina e 2% dos grãos que são do tamanho de areia média. Esses grãos com diâmetros maiores encontrados nas cinzas que compõem o material depositado no módulo de armazenamento de cinzas pode estar associado ao fato de que ali, ao longo do tempo, foram depositadas cinzas volantes e cinzas pesadas fazendo com que se obtive-se um material com granulometria mais graúda que as cinzas volantes "frescas" atualmente produzidas.

Na literatura há diferentes definições sobre o diâmetro dos grãos que compõem as cinzas volantes. Azevedo (2002) define que a maioria das partículas de cinzas volantes têm um diâmetro variável, podendo ser menores que 1 μ m e chegando até 150 μ m. Ao passo que a FHWA (2003) define que as cinzas volantes típicas apresentam diâmetro dos grãos variando

de 20µm a 30µm, e que as cinzas volantes ultrafinas podem ser produzidas com um diâmetro médio de partícula de 1µm a 5µm. Já Barros (2015) diz que, na definição geral, as partículas de cinzas volantes devem estar compreendidas entre os diâmetros de 5µm e 100µm (0,005mm e 0,1mm). Porém, apesar das diferenças encontradas na literatura, pode-se dizer que os grãos que formam as cinzas volantes frescas oriundas de Pecém I e II são predominantemente similares aos das cinzas volantes. Contudo para cinzas coletadas em PA-01 e PA-13 parte de sua granulometria pode ser enquadrada como cinza volantes, mas uma parcela dos seus grãos é formada por partículas com diâmetros equivalentes ao da areia média, que varia de 2.000µm a 420µm (2,00mm - 0,42mm), fazendo com que estes materiais não possam ser classificados como cinzas volantes.

4.2. Caracterização das Amostras de Cal, Filer Natural, Filer Natural+Cal, Cinza+Cal

Com intuito de comparação entre os resultados obtidos para as misturas asfálticas contendo cinzas como filer em comparação ao emprego de outros fileres, foram dosadas e testadas misturas asfálticas contendo somente fileres natural (mistura de referência) de composição granítica, os quais são encontrados e largamente utilizados como agregados em misturas asfálticas no estado do Ceará. Também foram moldadas misturas asfálticas contendo a cal como filer, tendo em vista que este material é um agente *antistriping* largamente utilizado em misturas asfálticas em vários países, uma vez que as misturas asfálticas contendo a cal podem apresentar maior resistência ao dano por umidade induzida. E por fim, foram moldados corpos de prova contendo um filer resultante da mistura da cal hidratada CH-I com o filer natural, num teor de 50% de cal + 50% de filer natural, e a mistura das cinzas com a cal hidratada, num teor de 50% de cal + 50% de cinza.

Dessa forma, com a finalidade de se conhecer a composição química dos fileres citados no parágrafo anterior, foi realizada a caracterização destes materiais por meio da técnica de Fluorescência de Raios X. A Tabela 15 apresenta os resultados das análises.

Tabela 15 – Caracterização das amostras de cal, pó de pedra, pó de pedra+cal e cinza+cal.

Compostos	Pó de pedra (100% pó de pedra) (%massa)	Cal CH-I (100% cal) (%massa)	Pó de pedra + Cal (50% pó de pedra + 50% cal) (%massa)*	PA01 + Cal (50%PA01 + 50%cal) (%massa)	PA13 + Cal (50%PA13 + 50%cal) (%massa)	Cinza Pecém I + Cal (50%Cinza Pecém I + 50%cal) (%massa)	Cinza Pecém II + Cal (50% Cinza Pecém II + 50%cal) (%massa)
Al ₂ O ₃	10,082	0,1030	5,0925	1,3153	3,9841	1,8355	4,0414
SiO ₂	60,589	-	30,2945	4,1433	12,0080	6,9408	12,5390
P ₂ O ₅	0,5685	0,1265	0,3475	-	0,2076	-	-
SO ₃	-	-	-	1,8933	0,6101	5,5715	0,2673
Cl	-	-	-	0,0312	0,0715	0,0393	-
K ₂ O	15,854	0,0427	7,9484	0,5263	1,1837	0,7744	1,4116
CaO	5,6746	98,8410	52,2578	85,4490	69,0640	74,469	64,4960
MnO	-	-	-	-	0,1166	-	-
TiO ₂	-	-	-	0,7005	1,2867	1,0217	1,5370
Fe ₂ O ₃	5,6637	0,4529	3,0583	5,6416	10,9630	9,09	15,3640
ZnO	-	-	-	0,0547	0,0790	-	-
SrO	0,1698	0,0702	0,1200	0,2446	0,2013	0,2582	0,3433
CdO		0,2032	0,1016	-	-	-	-
Rb ₂ O	0,2815	-	0,1408	-	-	-	-
Ag ₂ O	0,4609	0,1538	0,3074	-	0,2243	-	-
ZrO	0,4095	-	0,20475	-	-	-	-
CuO	0,0853	-	0,04265	-	-	-	-
ZnO	0,0849	-	0,04245	-	-	-	-
Tc	0,0761	-	0,03805	-	-	-	-
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Classe	-	-	C	C	C	C	C

*Composição estimada por meio de cálculo estequiométrico.

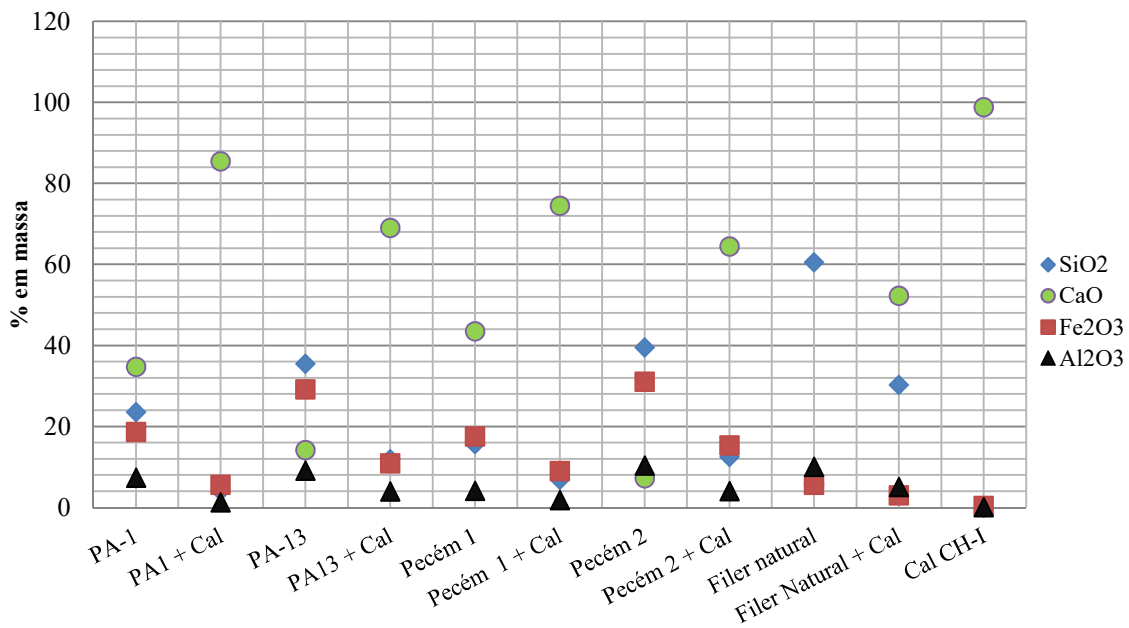
**Classificação segundo ASTM C618 (2015).

Fonte: Resultados do ensaio de fluorescência de raios X fornecidos pelo laboratório de Raios-X da UFC.

Pelos resultados apresentados na Tabela 15, pode-se notar que a Cal Hidratada CH-I utilizada neste estudo é formada primordialmente por CaO, sendo este óxido responsável por 98,8% em massa da composição química da cal. Já para o caso do pó de pedra usado neste estudo pode-se observar que é um material muito pobre em óxido de cálcio ($\approx 5,7\%$ em massa), mas rico em óxido de silício, com cerca de 60,6% em massa.

Quando se adicionou a cal hidratada às cinzas de carvão mineral (PA-01, PA-13 e cinzas volantes "frescas" de Pecem I e II), devido ao alto teor de CaO apresentado pela cal utilizada, foi possível observar que as amostras resultantes dessas misturas também apresentaram alto teor de óxido de cálcio em sua composição. No caso das cinzas, os aumentos mais significativos ocorreram naquelas pertencente a Classe F, pois no caso das cinzas coletadas em Pecém II, após a misturas com a cal, houve aumento no teor de CaO de 88,7%, já para as cinzas proveniente de PA-13 houve aumento de 79,4% no teor de CaO. Ao final do processo de mistura da cal com as cinzas, todas as amostras de "cinzas+cal" utilizadas neste estudo apresentaram teores de óxido de cálcio superiores a 64%, percentual este que não havia sido alcançado por nenhuma das cinzas coletadas e caracterizadas anteriormente. Todas as cinzas resultantes da mistura com cal passaram a ser classificadas como Classe C, de acordo com a ASTM C618/2015. A composição química da cal, das cinzas e das misturas de cinza com cal são apresentadas na Figura 31.

Figura 31 - Variação na composição dos principais constituintes químicos para as cinzas, da cal e das cinzas+cal.



Fonte: Próprio autor.

Pela Figura 31, pode-se constatar que, após a mistura das cinzas com a cal, a composição química das cinzas+cal ficou semelhante a da cal, apresentando baixos teores de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 e altos teores de CaO . Foi ainda notado que mesmo a cinza que apresenta maior percentual de CaO em sua composição (cinza volante "fresca" de Pecém I) esta apresentou somente 43,5% deste óxido, enquanto que todas as misturas de cinzas+cal apresentaram percentual de CaO acima de 60%. A maior adesividade apresentada pelas misturas que continham fileres compostos de cinza+cal deve estar ligado ao alto teor de cálcio presente nestas amostras, pois Emery e Seddik (1997) afirmam em seu trabalho que os agregados com alto teor de carbonato (hidrofóbico ou básico), como calcário, são mais fáceis de serem recobertos pelo ligante asfáltico e formar uma ligação mais forte com o ligante asfáltico que os agregados com alto teor de sílica (hidrofílicos ou ácidos).

4.3. Dosagens das Misturas Asfálticas

As dosagens das misturas asfálticas utilizadas na pesquisa podem ser divididas em dois grupos, a saber: (i) misturas asfálticas devidamente dosadas por meio da metodologia Superpave utilizando-se pó de pedra, cal hidratada CH-I e cinzas (cinzas volantes "frescas" de Pecém I e II, PA-01 e PA-13) como fileres, num teor de 4% em peso de agregado; (ii) misturas asfálticas devidamente dosadas por meio da metodologia Superpave utilizando-se como fileres as seguintes misturas: cal hidratada CH-I + pó de pedra (2% de cal + 2% de pó de pedra em peso de agregado), cal hidratada CH-I + cinzas (2% de cal + 2% de cinzas em peso de agregado) como fileres.

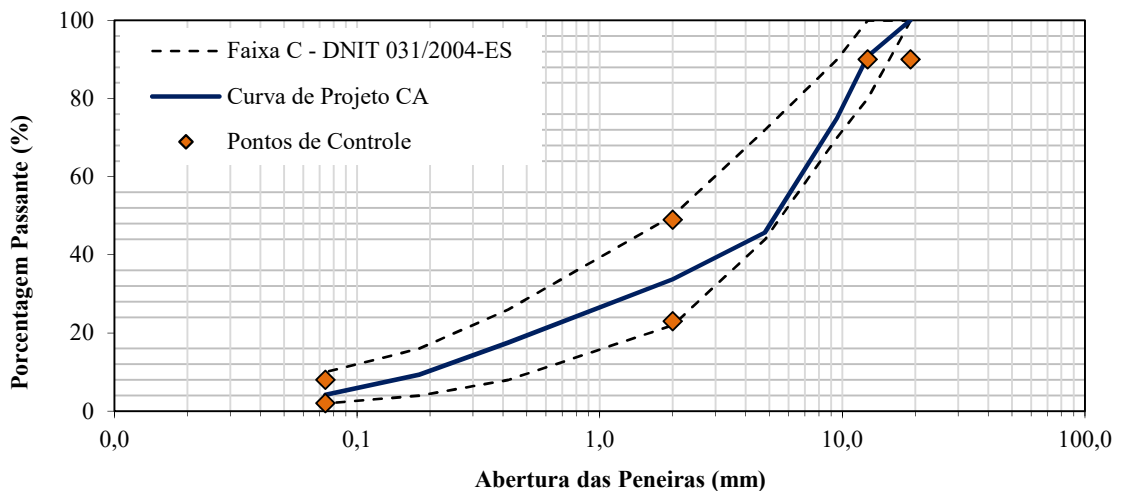
O que motivou a escolha do percentual de 4% de cinza à mistura asfáltica foi primeiramente a substituição de todo o agregado natural passante na peneira nº200, que para a curva granulométrica de projeto é de 4% em massa de agregado, e o embasamento nos trabalhos científicos publicados na área sobre o tema, mais especificamente o trabalho desenvolvido por Freitas(2015). O agregado natural (pó de pedra) foi substituído pela cal e pelas cinzas também passantes na peneira nº200 com o intuito de minimizar as alterações que pudessem vir a ocorrer na curva granulométrica de projeto.

No tocante aos trabalhos científicos com utilização de cinzas em substituição aos fileres naturais, há vários trabalhos que tratam do assunto. Likitlersuang e Chompoorat (2016) que utilizaram cinzas leves em percentuais variando de 1% a 5% em peso de agregado. Freitas (2015) adicionou 4% de cinzas Classe F em massa de agregado à mistura asfáltica. Xie

(2012) utilizou 4% em peso de agregado de cinza leve como filer na mistura asfáltica. Modarres e Rahmzadeh (2015) utilizaram pó residual de carvão adicionando 7% em peso de agregado deste material a mistura asfáltica. Huang *et al.* (2010) utilizaram 1% de cinza leve classe F a mistura asfáltica avaliada. Vasudevan (2013) adicionou cinza pesada a mistura asfáltica nos percentuais de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%. Vasudevan (2013a) adicionou cinza pesada em 6 e 10% a misturas asfálticas. Asmael (2010) adicionou cinza leve em três percentuais 5,8%, 7,8% e 9,8%. Androjić, Kaluđer e Komljen (2008) adicionaram cinza leve em dois percentuais 3,0% e 6,2%. Nakahara e Ceratti (2012) acrescentaram cinza pesada a mistura asfáltica nos percentuais de 6% e 10%.

Na Figura 32 apresenta-se a curva granulométrica de projeto usada nas dosagens. Esta curva foi usada para as dosagens contendo todos os fileres utilizados, a saber: pó de pedra, cinza, cal hidratada CH-I e a mistura de cal e cinza. A Tabela 16 mostra os resultados obtidos nas dosagens realizadas neste estudo.

Figura 32 – Curva granulométrica de projeto.



Fonte: Próprio autor

Tabela 16 – Parâmetros de dosagem das misturas asfálticas avaliadas até o momento.

Mistura Asfáltica	Tipo de filer	Filer (%)	Teor de CAP (%)	Gmm	Vv (%)
1	Filer Natural (pó de pedra)	4	5,0	2,447	4 (±0,4)
2	Cal CH-I	4	4,4	2,464	4 (±0,4)
3	Cinza Pecém I (Classe C)	4	4,1	2,437	4 (±0,4)
4	Cinza Pecém II (Classe F)	4	4,4	2,460	4 (±0,4)

5	PA-01 (Classe C)	4	5,2	2,426	4 ($\pm 0,4$)
6	PA-13 (Classe F)	4	4,8	2,445	4 ($\pm 0,4$)
7	Cal	2	5,0	2,442	4 ($\pm 0,4$)
	Filer Natural	2			
8	Cal	2	4,7	2,443	4 ($\pm 0,4$)
	Cinza Pecém I	2			
9	Cal	2	4,4	2,455	4 ($\pm 0,4$)
	Cinza Pecém II	2			
10	Cal	2	5,2	2,420	4 ($\pm 0,4$)
	PA-01	2			
11	Cal	2	4,8	2,441	4 ($\pm 0,4$)
	PA-13	2			

Fonte: próprio autor.

Os resultados de dosagem obtidos mostram que as cinzas volantes “frescas” e as cinzas retiradas do módulo de armazenamento tiveram resultados bastante distintos com relação aos teores de CAP obtidos nas dosagens das misturas asfálticas. Quando se dosou a misturas asfálticas utilizando-se as cinzas volantes “frescas” provenientes de Pecém I e II notou-se que houve uma redução no teor de CAP de projeto em relação à mistura asfáltica formada apenas por agregados naturais (pó de pedra). Obteve-se uma redução de 18% no teor de CAP de projeto para as misturas contendo as cinzas volantes “frescas” oriundas de Pecém I em relação à mistura composta somente por agregados naturais. Para as cinzas coletadas em Pecém II a redução do teor de CAP de projeto foi de 12%, também em relação a misturas composta somente de agregados naturais. Isso mostra que o uso destes materiais pode trazer economia na execução de obra de pavimentação, tendo em vista que o custo relacionado ao CAP é expressivo.

Já para as cinzas coletadas no módulo de armazenamento (PA-01 e PA-13) não foi observada a redução do teor de CAP de projeto, uma vez que os resultados foram próximos daquele obtido na dosagem da mistura formada por agregados naturais. Isso demonstra que este material tem a capacidade de absorver maior quantidade de ligante asfáltico em relação às cinzas volantes “frescas”, levando a crer que esse material pode apresentar maior porosidade devido a uma parcela mais graúdas dos grãos que forma estas cinzas. Vale ressaltar ainda que, o módulo de armazenamento de onde as cinzas foram coletadas é formado por uma mistura de cinzas volantes e pesadas, oriundas de vários períodos distintos de operação das Usinas Termoelétricas. Essas cinzas pesadas misturadas às cinzas volantes pode ter influenciado a maior absorção de ligante asfáltico durante o processo de dosagem das

misturas. Porém, apenas ensaios mais detalhados poderão fornecer informações seguras sobre as características dos grãos que formam as cinzas utilizadas neste estudo.

Na literatura também são relatados resultados divergentes com relação aos teores de CAP obtidos nas dosagens das misturas asfálticas. Freitas (2015), utilizando cinzas volantes, observou uma redução de 12% no teor de CAP de projeto em relação à mistura de referência. Mistry e Roy (2016) também notaram redução de 7,5% no teor de projeto de CAP utilizando cinzas volantes. Já Androjić, Kaluđer e Komljen (2008), também utilizando cinzas volantes, verificaram aumento no teor de CAP de projeto de 0,5% em relação à mistura de controle. Com relação ao uso de cinzas pesadas em pavimentação Ksaibati e Sayiri (2006) observaram que o uso de cinza pesada (15% em peso de agregado) aumentou o teor de CAP de projeto em torno de 18% para agregados de calcários, e por volta de 10% para agregados graníticos, em relação às misturas de controle. Weber *et al*(2012) verificaram um aumento de 10% no teor de CAP de projeto quando se utilizou cinza pesada de carvão mineral em relação à mistura de referência, segundo o autor esse maior consumo de ligante asfáltico está associado à alta porosidade das cinzas pesadas.

4.4. Resultados de RT

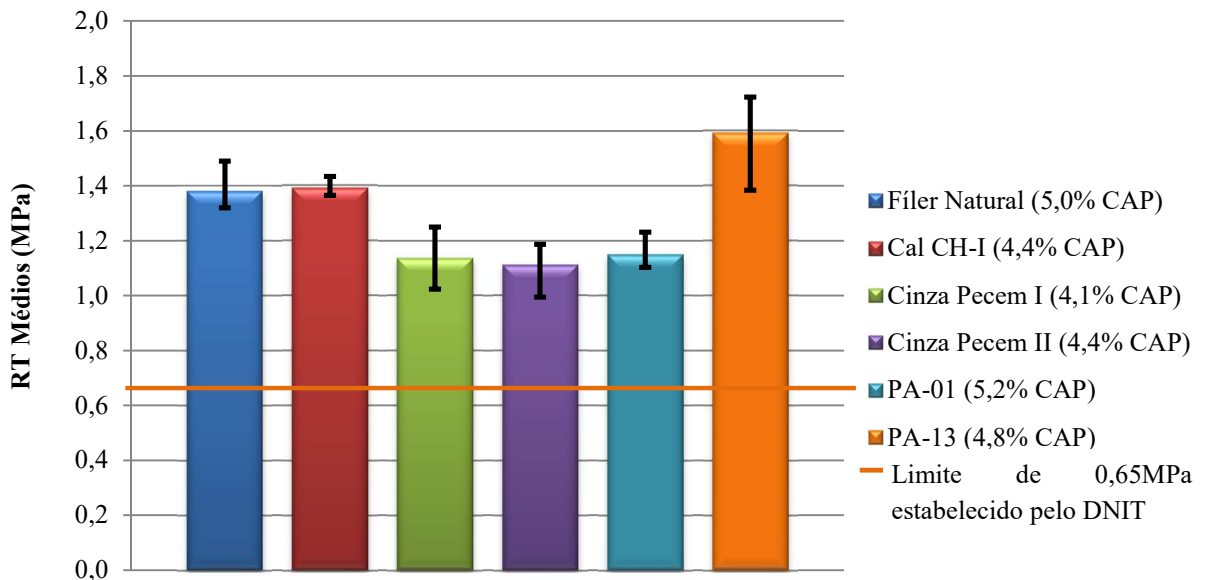
Para esta etapa do trabalho as misturas utilizadas podem ser divididas em quatro grupos, a saber: (i) misturas asfálticas devidamente dosadas por meio da metodologia Superpave utilizando-se pó de pedra, cal hidratada CH-I e cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, PA-01 e PA-13) como fileres, num teor de 4% em peso de agregado; (ii) misturas asfálticas com o teor de CAP fixo em 5% (teor obtido na dosagem da mistura de referência) utilizando-se pó de pedra, cal hidratada CH-I e cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, PA-01 e PA-13) como fileres, num teor de 4% em peso de agregado; (iii) misturas asfálticas devidamente dosadas por meio da metodologia Superpave utilizando-se como fileres as seguintes misturas: cal hidratada CH-I e pó de pedra, cal hidratada CH-I + cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, PA-01 e PA-13) como fileres, num teor de 4% em peso de agregado; (iv) misturas asfálticas com o teor de CAP fixo em 5% (teor obtido na dosagem da mistura de referência) utilizando-se como fileres as seguintes misturas: cal hidratada CH-I e pó de pedra, cal hidratada CH-I + cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, PA-01 e PA-13) como fileres, num teor de 4% em peso de agregado.

Os ensaios de RT foram realizados seguindo o que preconiza a Norma DNER-

ME 138/94. Os resultados obtidos nestes ensaios mostraram que todas as misturas asfálticas avaliadas apresentaram valores médios superiores a 0,65MPa, que é o mínimo recomendado pela DNIT-ES 31/2006 para uso na camada de rolamento.

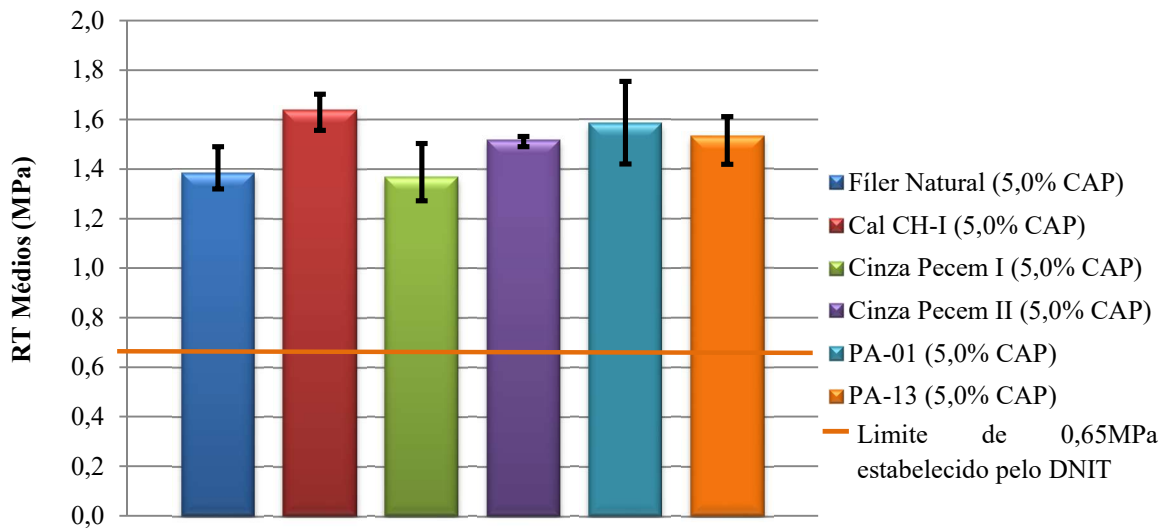
A Figura 33 apresenta os resultados obtidos para as dosagens, utilizando-se pó de pedra, cal hidratada CH-I e cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, PA-01 e PA-13) como fileres. Na Figura 34 é mostrado o resultado encontrado para as misturas asfálticas com o teor de CAP fixo em 5%, que foi o mesmo teor obtido na dosagem da mistura de referência contendo filer natural (pó de pedra), para que assim fosse possível determinar o quanto as variações de percentual de ligante asfáltico obtido nas dosagens estavam, ou não, interferindo nos resultados.

Figura 33 – Resultados de RT obtido para as dosagens usando pó de pedra, Cal CH-I e cinzas.



Fonte: próprio autor.

Figura 34 – Resultados de RT obtidos usando pó de pedra, Cal CH-I e cinzas, mas com o percentual de CAP fixado em 5%.



Fonte: próprio autor.

Para o caso apresentado na Figura 33, as misturas asfálticas contendo cal e pó de pedra apresentaram resultados com valores bastante próximos, obtendo-se um RT médio em torno de 1,4MPa. Já para as misturas asfálticas contendo em sua composição as cinzas volantes “frescas” provenientes de Pecém I e II e as cinzas coletadas no ponto PA-01, os valores de RT obtidos foram inferiores àqueles alcançados para a mistura asfáltica de referência. Os resultados obtidos para as cinzas de PA-01, de Pecém I e II foram, em média, 20% inferiores aqueles obtidos para a cal e o pó de pedra, obtendo-se um valor médio em torno de 1,1MPa. Porém, para as misturas asfálticas dosadas usando as cinzas oriundas do ponto PA-13 o resultado médio de RT obtido foi superior aos atingidos para todas as outras misturas asfálticas, sendo cerca de 13% superior quando comparado aqueles encontrados para a mistura asfáltica de referência, e ainda cerca de 31% superior para aqueles obtidos para as misturas asfálticas dosadas com as outras cinzas. Porém, vale ressaltar que os resultados obtidos para a mistura contendo PA-13 apresentaram uma variação muito expressiva entre o RT máximo ($\approx 1,72$ MPa) e o RT mínimo ($\approx 1,38$ MPa), sendo o valor de RT mínimo foi compatível com os resultados de RT médio para a mistura de referência.

Vale ressaltar que há variação nos teores de CAP obtidos nas dosagens, tendo em vista que o percentual de CAP obtido nas dosagens das cinzas volantes "frescas" foi de 4,1% e 4,4% para as cinzas provenientes de Pecém I e II, respectivamente. Enquanto que as cinzas coletadas no módulo de armazenamento apresentaram nas dosagens das misturas asfálticas os percentuais de CAP iguais a 5,2 e 4,2, para as cinzas provenientes de PA-01 e PA-13,

respectivamente.

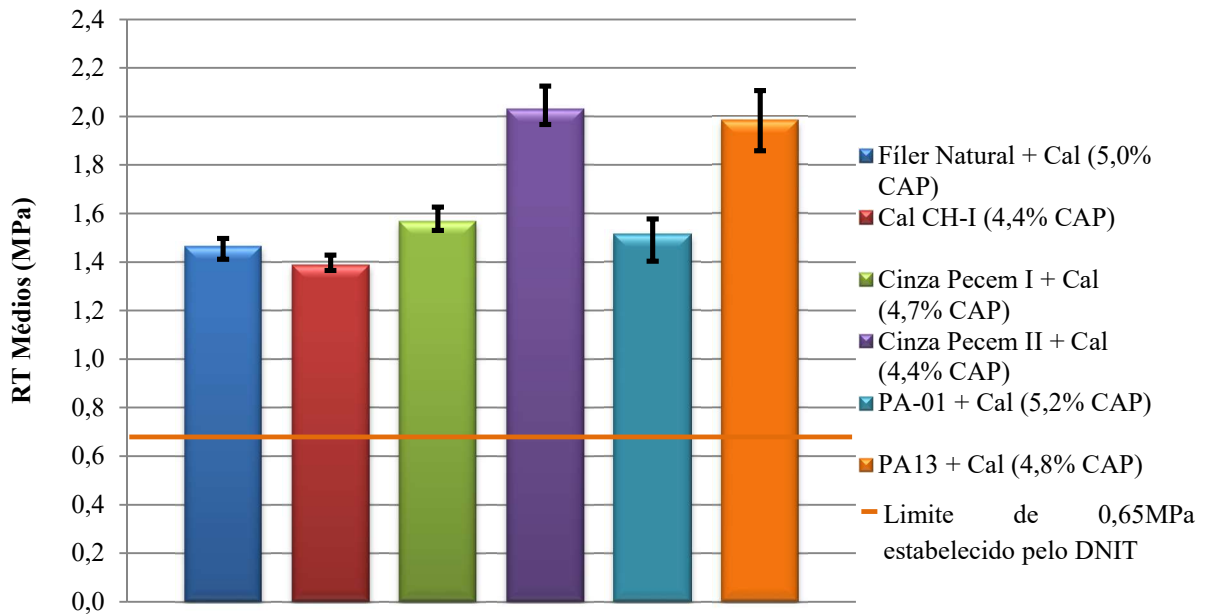
Por conta da grande variação nos teores de CAP encontrados durante as dosagens das misturas asfálticas, os CPs foram remoldados fixando-se o teor de CAP em 5%, para minimizar a influência dessa variável nos resultados de RT obtidos, mantendo-se o Vv. Na Figura 34, vê-se que os resultados de RT obtidos são próximos, não havendo, portanto uma mistura que se sobressaia em relação à outra.

Foi possível perceber que o fato de algumas cinzas pertencerem a Classe C (caso das cinzas de Pecém I e de PA-01) ou à Classe F (caso das cinzas de Pecém II e de PA-13), ou mesmo a composição química de alguma dessas cinzas conterem maior ou menor percentual de CaO, não refletiu em melhores resultados de RT. Pois, quando se fixou o teor de CAP em 5%, foi possível notar que os valores médios obtidos para as misturas asfálticas contendo cinzas de carvão mineral foram similares. Desse modo, pôde-se notar que o uso de cinzas, da forma como se utilizou até o momento neste estudo, não apresentou melhorias significativas nas misturas asfálticas com relação à RT. Na verdade, o que se constatou foi que o uso das cinzas como filer em misturas asfálticas a quente apresentou resultados bastante similares aos atingidos pelo filer natural e pela cal hidratada CH-I, no que se refere ao valor de RT. Mostrando que o uso desse material não melhorou, e nem piorou, significativamente a resistência à tração das misturas asfálticas estudadas.

A Figura 35 mostra os resultados obtidos para as misturas contendo os seguintes fileres: cal (4% em peso de agregado), cal e pó de pedra (2% de cal e 2% de pó de pedra, em peso de agregado), cal e cinza (2% de cal e 2% de cinza, em peso de agregado). Nesta etapa do trabalho foi realizado um novo processo de dosagem das misturas asfálticas contendo os fileres citados. Para tal, todo o filer natural passante na peneira nº200 foi substituído por uma mistura de composta por 2% de cal em peso de agregado e 2% de cinza (ou 2% de filer natural) em peso de agregado.

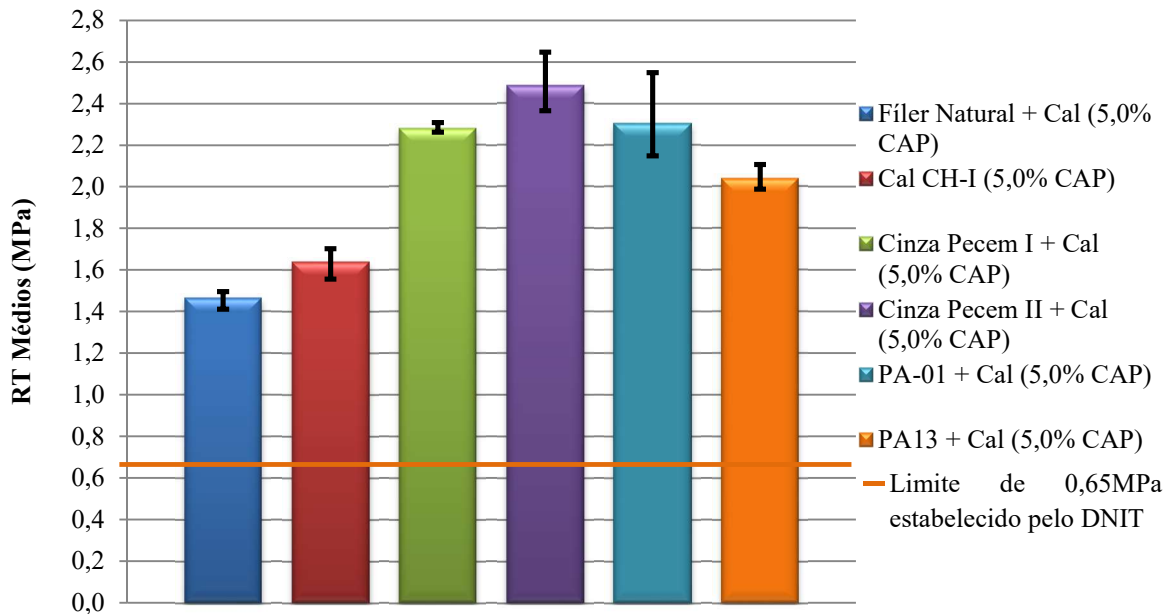
Na Figura 36 são apresentados os resultados para o mesmo grupo de misturas apresentados na figura anterior, porém dessa vez o percentual de CAP foi fixado em 5%, que é o mesmo teor obtido na dosagem da mistura de referência contendo cal e pó de pedra (filer natural) como filer, para que assim fosse possível determinar o quanto as variações de percentual de ligante asfáltico obtido nas dosagens estavam, ou não, interferindo nos resultados.

Figura 35 – Resultados de RT obtido para as dosagens usando cal, cal + pó de pedra, cal + cinzas.



Fonte: próprio autor.

Figura 36 – Resultados de RT obtidos usando cal, cal + pó de pedra e cal + cinzas, mas com o percentual de CAP fixado em 5%.



Fonte: próprio autor.

Para o caso apresentado na Figura 35, os resultados de RT obtidos para as misturas asfálticas mostraram que o uso de um filer resultante da mistura da cal com cinzas foi benéfico em relação a ganho de resistência à tração. Pois houve aumento do valor de RT

em relação aquele obtido para as misturas asfálticas que utilizaram apenas as cinzas como filer. Já a incorporação de cal hidratada CH-I ao filer natural não mostrou um aumento de resistência a tração expressivo, encontrando-se um valor bem próximo daquele atingido pelas misturas compostas somente por filer natural.

Para se quantificar o ganho de resistência a tração obtido com a incorporação de cal às cinzas, a análise com relação ao uso das cinzas volantes “frescas” será detalhada. Quando se adicionou apenas 4% de cinzas volantes “frescas” oriundas de Pecém I à mistura asfáltica obteve-se um RT médio de 1,13MPa, enquanto que quando se incorporou à mistura asfáltica uma mistura de 2% de cinza volantes “fresca” de Pecém I com 2 % de cal hidratada do tipo CH-I, obteve um RT médio de 1,57MPa, representando um aumento de 28% no valor de RT. No caso das cinzas volantes “frescas” coletadas em Pecém II o aumento de RT foi ainda maior quando se utilizou essa cinza misturada à cal hidratada, para o uso das cinzas volantes “frescas” de Pecém II incorporadas a mistura asfáltica num percentual de 4% obteve-se um RT médio de 1,11MPa, enquanto que quando se incorporou à mistura asfáltica uma mescla de 2% de cinza volantes “fresca” de Pecém II com 2 % de cal hidratada do tipo CH-I, obteve um RT médio de 2,03, representando um aumento de 45,3% na resistência a tração. Isso mostra que quando as cinzas volantes “frescas” foram mescladas com a cal houve um aumento da rigidez da mistura asfáltica.

Para o caso das cinzas coletadas no módulo de armazenamento de cinzas, mais especificamente em PA-01 e PA-13, houve também aumento nos resultados de RT obtidos. Para o caso de PA-01 a misturas asfáltica utilizando somente esta cinza num teor de 4% em peso de agregado gerou um valor de RT de 1,15MPa, enquanto o uso de PA-01 (2% em peso de agregado) associado ao uso da cal (2% em peso de agregado) atingiu um RT de 1,51Mpa, representando um aumento de 23,8% no valor de RT. No caso do PA-13 também ocorreram ganhos em relação ao uso destas cinzas associadas à cal, pois quando se utilizou a cinzas de PA-13 em 4% em peso de agregado obteve-se um RT de 1,59MPa, enquanto que quando se utilizou a mistura de PA-13 (2% em peso de agregado) com cal (2% em peso de agregado) obteve-se um RT médio de 1,98MPa, representando um aumento de 19,7% no valor de RT.

Pode-se se observar na Figura 36 que quando se fixou o percentual de CAP em 5%, as misturas asfálticas contendo uma mistura de cal e cinzas como filer apresentaram melhores resultados de RT em relação às misturas contendo uma mistura de pó de pedra e cal como filer, e aquela composta somente pela cal como filer. Ou seja, o uso das cinzas associadas cal

formou misturas asfálticas mais rígidas.

Dessa forma, pode-se concluir que as cinzas interagiram com a cal, resultando em misturas asfálticas mais rígidas. Isso se traduz numa maior resistência a tração. Neste caso pôde-se perceber que o fato das cinzas pertencerem a Classe C ou F, ou mesmo apresentarem maior, ou menor, percentual de CaO, e/ou SiO₂, em sua composição química, não foi determinante para obtenção de misturas asfálticas mais ou menos rígidas. Pois no caso das cinzas volantes “frescas” houve aumento mais acentuado nos valores de RT para as misturas contendo as cinzas da Classe F (cinzas oriundas de Pecém II) combinadas com cal em relação às cinzas da Classe C (cinzas oriundas de Pecém I) combinadas com a cal. Já para o caso da mistura das cinzas coletadas no módulo de armazenamento com a cal constatou-se uma situação distinta, uma vez que as cinzas pertencentes a Classe C (PA-01) combinadas com a cal apresentaram aumento mais acentuado nos valores de resistência à tração, em relação a cinzas pertencentes a Classe F (PA-13) combinada com a cal.

4.5. Resultados de RRT

Para esta etapa do trabalho as misturas utilizadas podem ser divididas em quatro grupos, a saber: (i) misturas asfálticas devidamente dosadas por meio da metodologia Superpave utilizando-se pó de pedra, cal hidratada CH-I e cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, PA-01 e PA-13) como fileres, num teor de 4% em peso de agregado; (ii) misturas asfálticas com o teor de CAP fixo em 5% (teor obtido na dosagem da mistura de referência) utilizando-se pó de pedra, cal hidratada CH-I e cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, PA-01 e PA-13) como fileres, num teor de 4% em peso de agregado; (iii) misturas asfálticas devidamente dosadas por meio da metodologia Superpave utilizando-se como fileres as seguintes misturas: cal hidratada CH-I e pó de pedra, cal hidratada CH-I + cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, PA-01 e PA-13) como fileres, num teor de 4% em peso de agregado; (iv) misturas asfálticas com o teor de CAP fixo em 5% (teor obtido na dosagem da mistura de referência) utilizando-se como fileres as seguintes misturas: cal hidratada CH-I e pó de pedra, cal hidratada CH-I + cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, PA-01 e PA-13) como fileres, num teor de 4% em peso de agregado.

Para avaliação da resistência ao dano por umidade de cada mistura foram moldados os CPs, em seguida, estes foram submetidos ao ensaio *Lottman* modificado, conforme preconizado pela Norma AASHTO T 283/14. Daí, calcularam-se os valores de

Relação de Resistência a Tração (RRT) de cada mistura asfáltica.

Na Tabela 17, e na Figura 37, são apresentados os resultados para as misturas que foram dosadas utilizando-se os seguintes fileres: pó de pedra, cal e cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, PA-01 e PA-13). Para a introdução da cal, ou das cinzas, às misturas asfálticas, substituiu-se o filer natural (pó de pedra) passante na peneira nº200 pela cal, ou pelas cinzas, também passantes na mesma peneira com o propósito de se alterar o mínimo possível a curva granulométrica de projeto.

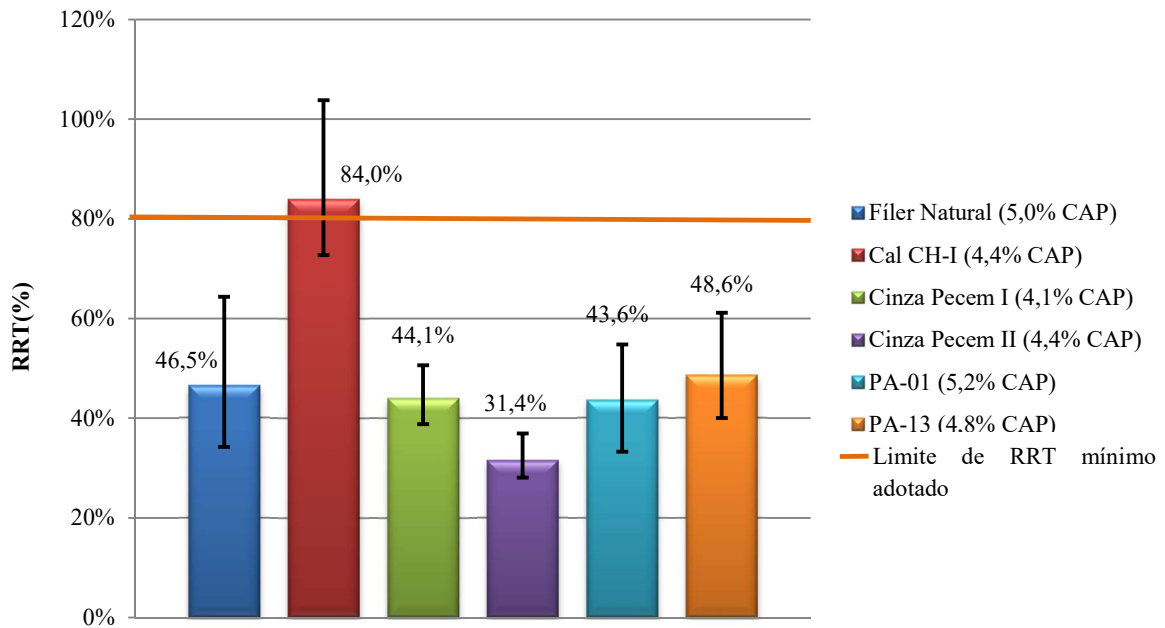
Diante dos resultados de RRT obtidos nesta pesquisa e das variações existentes nos resultados das amostras condicionadas e não condicionadas, determinou-se uma faixa de variação entre as amostras condicionadas e não condicionadas para cada mistura analisada. Dessa forma selecionou-se cada valor de RT do grupo condicionado e dividiu-se por cada valor do RT do grupo não condicionado. Através desse procedimento obteve-se a faixa de variação selecionando-se os valores mínimos e máximos de RRT. A Tabela 17 mostra os resultados das faixas de variação para as misturas analisadas, e na Figura 37 também são apresentadas as barras de erros mostrando a variação obtida para os resultados de cada mistura asfáltica.

Tabela 17 – Valores de RRT (MPa) para as misturas asfálticas dosadas com pó de pedra, cal e cinzas.

Mistura	Teor de CAP (%)	RRT Médio (%)	Faixa de variação de RRT (%)
Fíler Natural	5,0	46,5	34,2 -64,4
Cal CH-I	4,4	84,0	72,7 -103,8
Cinza Pecem I	4,1	44,1	38,8 -50,7
Cinza Pecem II	4,4	31,4	28,1 -36,9
PA-01	5,2	43,6	33,3 -54,8
PA-13	4,8	48,6	40,0 -61,2

Fonte: próprio autor.

Figura 37 – Resultados de RRT obtidos para as dosagens usando pó de pedra, cal hidratada CH-I e cinzas.



Fonte: Próprio autor.

A faixa de variação obtida para todas as amostras demonstra o que neste ensaio há um elevado grau de empirismo. De acordo com Ribeiro (2011) e Arambula (2007), a penetração da água é muito influenciada pela distribuição de vazios na amostra. Durante o processo de compactação, não há como saber como os vazios estão distribuídos, apenas se tem conhecimento da quantidade total destes na mistura. Um maior grau de conexões entre os vazios facilita a entrada da água na mistura e conseqüentemente aumenta a suscetibilidade ao dano por umidade. Resultados de RRT acima de 100%, de acordo com Ribeiro (2011), estão associados à variabilidade do próprio ensaio de RT e a fatores como a faixa de variação do volume de vazio dos CPs e o grau de saturação estabelecido pela AASHTO T 283/14. O efeito deletério da água é completamente dependente da estrutura interna da amostra tais como o grau de conectividade e o tamanho dos vazios. Todos os fatores mencionados podem ter facilitado a entrada da água assim como o deslocamento da película de CAP nas misturas asfálticas analisadas.

Observando os valores de RRT obtidos, verifica-se que as misturas asfálticas avaliadas até o momento apresentaram resultados muito distintos. A mistura composta somente por agregados naturais apresentou RRT médio de 46,5%, já a mistura que contém cal CH-I como filer apresentou um RRT médio de 84,0%, o maior resultado encontrado até o momento, mostrando que quando a cal foi incorporada à mistura asfáltica houve aumento da

resistência ao dano por umidade induzida.

Com relação às misturas asfálticas que possuem as cinzas como filer, estas apresentaram resultados similares aos da mistura contendo apenas o filer natural, com exceção das cinzas volantes “frescas” oriundas de Pecém II que piorou a resistência da mistura asfáltica ao dano por umidade, obtendo-se um valor médio de RRT de 31,4%. Dessa forma, pode-se inferir que nenhuma das misturas asfálticas contendo cinza, e nem mesmo a mistura contendo fileres naturais, conseguiram atingir o valor mínimo de RRT estabelecido, que foi de 80%. Essa má adesividade pode estar ligada ao baixoteor de CaO apresentados por essa cinza, associado ao alto teor de SiO₂. Pois Emery e Seddik (1997) afirmam em seu trabalho que os agregados com alto teor de carbonato (hidrofóbico ou básico), como calcário, são mais fáceis de serem recobertos pelo ligante asfáltico e formar uma ligação mais forte com o ligante asfáltico que os agregados com alto teor de sílica (hidrofílicos ou ácidos).

Nesta etapa do trabalho também foi possível observar que o fato das cinzas pertencerem a Classe C (cinzas volantes “frescas” Pecém I e PA-01) ou a Classe F (cinzas volantes “frescas” Pecém II e PA-13), ou mesmo o fato das cinzas apresentarem maior, ou menor, percentual de CaO contido na composição química, não refletiu em ganhos significativos de resistência ao dano por umidade induzida. Pois entre as cinzas volantes “frescas” o melhor resultado de RRT foi obtido para a cinza Classe C (Cinza Pecém I), a qual apresentava maior percentual de CaO em sua composição, em relação a cinza volante proveniente de Pecém II que pertence a Classe F e tem baixo teor de CaO. Já para cinzas coletadas no módulo de armazenamento essa regra não se aplica, pois os resultados de RRT obtidos, respeitando as margens de erro, foi praticamente o mesmo tanto para as cinzas de PA-01 com para as cinzas de PA-13. Vale ressaltar o fato das cinzas coletadas em PA-01 pertencerem a classe C e possuírem maior percentual de CaO em sua composição em relação as cinzas coletadas em PA-13, pertencentes a Classe F e com baixo percentual de CaO, na apresentou resultados superiores de resistência ao dano por umidade.

Segundo explicam Plancher *et al.* (1977), Little e Epps (2001), Little e Petersen (2005) e Huang (2010), o melhor resultado obtido pelo uso da cal hidratada, em relação aos outros fileres, poder ser atribuído ao fato da cal hidratada ser quimicamente mais ativa. Pois a cal hidratada pode reagir quimicamente com os componentes ácidos do ligante asfáltico, auxiliando, assim, no desenvolvimento de ligação estável entre o ligante e o agregado, mesmo na presença de umidade. A cal hidratada interage com ácidos carboxílicos presentes no ligante

asfáltico formando um produto insolúvel que é facilmente adsorvido sobre a superfície dos agregados. Santucci (2010) relatou o ligante asfáltico, a depender da sua origem, tende a ter pH que varia de neutro a ácido. Desta forma, o ligante asfáltico, provavelmente deve formar um vínculo mais forte com os agregados de origem calcária que tendem a ser alcalinos. Segundo Emery e Seddik (1997), agregados básicos, como calcário, são mais fáceis de serem recobertos pelo ligante e formar uma ligação mais forte com o ligante asfáltico que os agregados ácidos.

Vale ressaltar ainda que mesmo as cinzas utilizadas tendo apresentado pH alcalino, isso não se refletiu em melhores resultados de RRT em relação à mistura composta somente por fileres naturais. Dado que as cinzas volantes “frescas” provenientes de Pecém I e II, poussem pH iguais a 12,2 e 9,7, respectivamente. As cinzas PA-01 e PA-13 demonstraram pH igual a 8,9.

Os resultados obtidos estão alinhados com aqueles achados por Freitas (2015), que observou que o uso de cinza de carvão mineral como filer, num percentual de 4% em massa de agregado, e utilizando-se agregados de origem granítica, não mostrou melhora nas resistências ao dano por umidade induzida das misturas asfálticas estudadas.

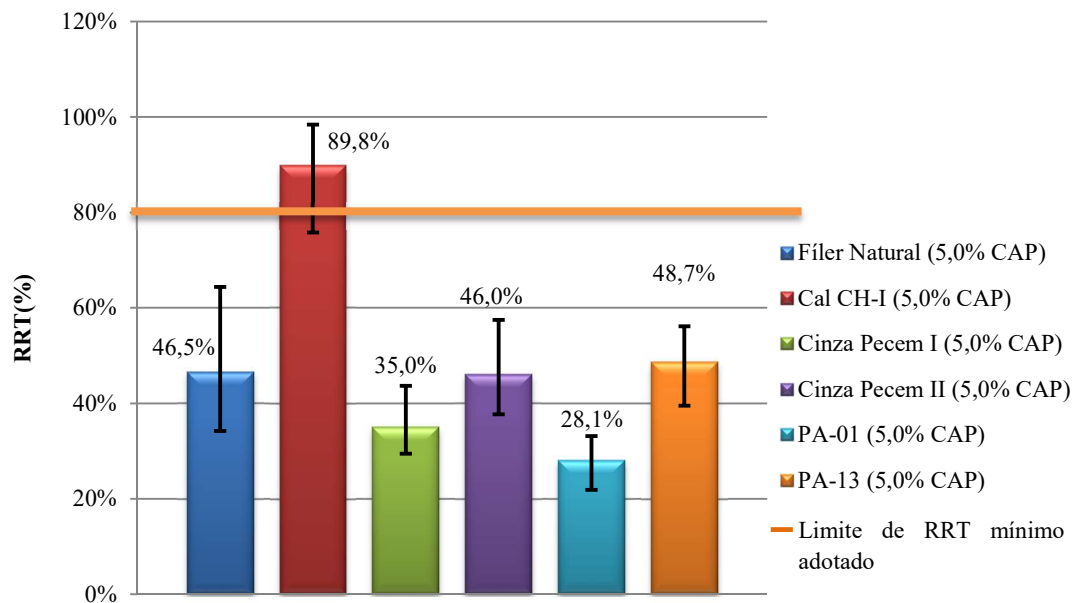
As misturas contendo filer natural, cal hidratada CH-I e cinzas (cinzas volantes “frescas” Pecém I e II, PA-01 e PA13) tiveram o percentual de CAP fixo em 5% (que é o percentual de CAP obtido na dosagem da mistura de referência) para avaliar a influência da variabilidade do percentual de ligante asfáltico obtidos em cada dosagem. Os resultados encontram-se na Tabela 18, e na Figura 38, conforme preconizado pela Norma AASHTO T 283/14.

Tabela 18 – Valores de RRT (MPa) para as misturas asfálticas com teor de CAP fixo em 5%.

Mistura	Teor de CAP (%)	RRT Médio (%)	Faixa de variação de RRT (%)
Fíler Natural	5,0	46,5	34,2 - 64,4
Cal CH-I	5,0	89,8	75,8 - 98,4
Cinza Pecém I	5,0	35,0	29,4 - 43,7
Cinza Pecém II	5,0	46,0	37,7 - 57,5
PA-01	5,0	28,1	21,9 - 33,2
PA-13	5,0	48,7	39,5 - 56,2

Fonte: próprio autor.

Figura 38 – Resultados de RRT obtido usando pó de pedra, cal CH-I e cinzas, mas com teor de CAP fixado em 5%.



Fonte: próprio autor.

Com relação às misturas asfálticas com o teor de CAP fixo em 5%, não foi notado mudanças muito relevantes em relação ao aumento da resistência ao dano por umidade induzido. Tendo em vista que as misturas continuaram apresentando valores de RRT abaixo de 80%, que foi limite mínimo estabelecido. Considerando-se a faixa de variação dos resultados obtidos, os valores de RRT são praticamente equivalentes entre si e muito próximos aqueles encontrado para a mistura contendo apenas fileres naturais.

Dando continuidade à avaliação do uso das cinzas de carvão mineral como melhorador de adesividade, já que o uso das cinzas como fíler sem nenhuma modificação, ou tratamento, não representou ganhos significativos com relação a resistência a umidade induzida das misturas asfálticas. Decidiu-se misturar a cal às cinzas para se avaliar a melhoria na resistência ao dano por umidade induzida. Dessa forma, obteve-se as misturas contendo os seguintes fileres: cal (4% em peso de agregado), cal e fíler natural (2% de cal e 2% de pó de pedra, em peso de agregado), cal e cinza (2% de cal e 2% de cinza, em peso de agregado). Nesta etapa do trabalho foi realizado novo processo de dosagem das misturas contendo os fileres citados. Para tal, todo o fíler natural passante na peneira nº200 foi substituído por uma mistura de composta por 2% de cal em peso de agregado e 2% de cinza (ou 2% de fíler natural) em peso de agregado entre a cal e as cinzas. Os resultados encontram-se na Tabela 19,

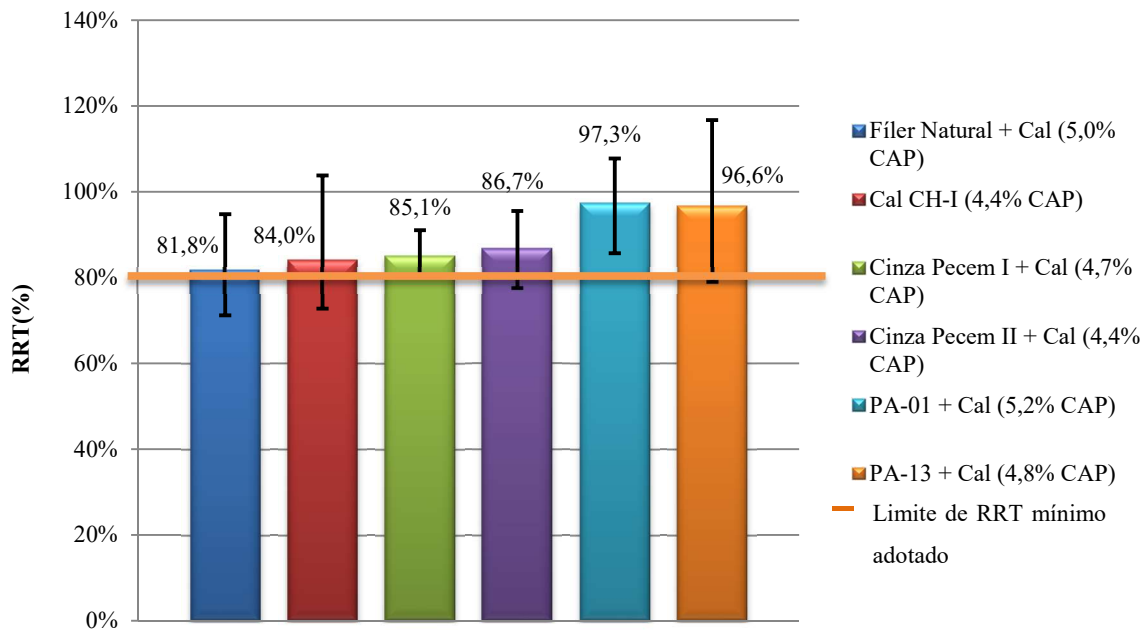
e na Figura 39, conforme preconizado pela Norma AASHTO T 283/14.

Tabela 19 – Valores de RRT (MPa) para as misturas asfálticas dosadas com cal, pó de pedra+cal, cinzas +cal.

Mistura	Teor de CAP (%)	RRT Médio (%)	Faixa de variação de RRT (%)
Fíler Natural + Cal	5,0	81,8	71,2 - 94,8
Cal CH-I	4,4	84,0	72,7 - 103,8
Cinza Pecém I + Cal	4,7	85,1	80,7 - 91,1
Cinza Pecém II + Cal	4,4	86,7	77,6 - 95,5
PA-01 + Cal	5,2	97,3	85,7 - 107,7
PA-13 + Cal	4,8	96,6	79,0 - 116,7

Fonte: próprio autor.

Figura 39 – Resultados de RRT obtido para as dosagens com cal, pó de pedra+cal, cinzas +cal.



Fonte: próprio autor.

Tal como apresentado na Figura 39, todas as misturas asfálticas atingiram um RRT médio maior que 80%, quando se adicionou a cal hidratada CH-I aos fileres que estavam sendo utilizados. Nesta etapa do trabalho foi possível perceber que a adição de 2% de cal hidratada CH-I, em peso de agregado, ao fíler natural gerou resultados equivalentes à mistura asfáltica contendo 4% de cal hidratada CH-I em peso de agregado, o que representa uma economia no uso da cal.

Para o caso da mistura de cinzas+cal hidratada CH-I os resultados obtidos foram similares àqueles alcançados pela mistura contendo cal hidratada CH-I+fíler natural. Isso mostra que, nesses percentuais de cinza e cal utilizados, não foi possível perceber uma interação entre os materiais com relação a melhoria da resistência ao dano por umidade nas misturas asfálticas analisadas. Os resultados de RRT obtidos para todas as misturas estudadas nesta etapa do trabalho são semelhantes, levando a crer que a melhoria na resistência ao dano por umidade percebido nessas misturas asfálticas deve ter sido influenciada pela adição da cal e não pela interação da cal com as cinzas produzindo materiais cimentantes.

Após o processo de mistura das cinzas com a cal, todas as cinzas antes classificadas em Classe C ou F, passaram a ser enquadradas na Classe C, e com alto teor de CaO em sua composição. A elevação do percentual de CaO na composição das "novas cinzas", mostrou que houve aumento na resistência ao dano por umidade induzido nas misturas asfálticas estudadas, gerando valores de RRT médio superiores a 80%. No caso das misturas asfálticas que utilizaram como fíler uma mistura de fíler natural+cal, também foi percebido um aumento na resistência ao dano por umidade com valor médio de RRT maior que 80%, pois nesse caso houve um incremento de 89,1% de CaO na composição química do fíler natural. O fato das cinzas+cal, e do fíler natural+cal, apresentarem melhores resultados de RRT, em relação às misturas sem adição da cal, pode ser devido ao fato de que, após a mistura das cinzas com a cal, a composição química dos materiais ficou semelhante à da cal, apresentando baixos teores de SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃ e altos teores de CaO.

Acredita-se que esse aumento no teor de CaO nos fileres utilizados foi o responsável pela maior resistência a umidade induzida das misturas asfálticas, pois de acordo com Mercado (2007), a cal reduz a tensão superficial entre o ligante asfáltico e os agregados, e os íons de cálcio (Ca²⁺) presentes neste material reagem com os ácidos carboxílicos presentes no ligante asfáltico substituindo alguns cátions na superfície dos agregados ácidos, promovendo uma forte ligação entre as moléculas de sílica dos agregados e as moléculas de nitrogênio do ligante asfáltico. Outros efeitos positivos da adição de cal são o aumento da viscosidade do ligante asfáltico e a redução na formação de produtos de oxidação no ligante asfáltico devido a maior resistência ao envelhecimento do mesmo.

O fato das cinzas pertencerem a Classe C ou F, ou mesmo o fato de apresentarem maior, ou menor, percentual de CaO em sua composição química, não foi determinante para obtenção de melhores resultados. Porém pode-se inferir que as cinzas sendo utilizadas

juntamente com cal em uma proporção de 2% de cal e 2% de cinza em peso de agregado, promovem a redução do uso de agregados naturais, além de permitir a utilização de um subproduto da produção de eletricidade como matéria prima da indústria da pavimentação.

Vale ressaltar ainda que testes mais aprofundados deverão ser realizados para se investigar se há interação entre a cal e as cinzas, formando materiais cimentantes por meio de reações pozolânicas. Dessa forma, deverão ser utilizadas outros percentuais de cal e cinza até que se chegue em um teor ótimo. Ademais, caso a cinza não seja quimicamente ativa, se faz necessário uma modificação da sua estrutura química para que esse material passe a reagir com a cal e assim promover melhor adesividade em misturas asfálticas.

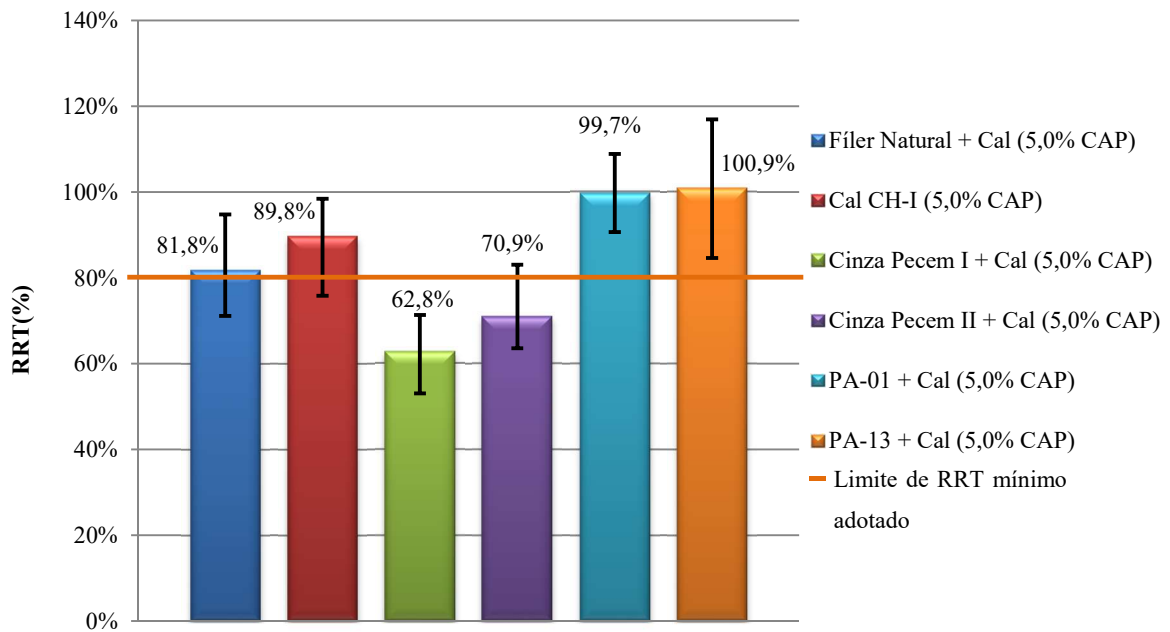
As misturas contendo cal (4% em peso de agregado), cal e filer natural (2% de cal e 2% de pó de pedra, em peso de agregado), cal e cinza (2% de cal e 2% de cinza, em peso de agregado) com fileres, tiveram o percentual de CAP fixo em 5% (que é o percentual de CAP obtido na dosagem da mistura de referência) para se avaliar a influência da variabilidade do percentual de ligante asfáltico obtidos em cada dosagem. Os resultados encontram-se na Tabela 20 e na Figura 40.

Tabela 20 – Resultados de RRT obtido para as misturas contendo cal, pó de pedra+cal, cinzas +cal, com teor de CAP fixado em 5%.

Mistura	Teor de CAP (%)	RRT Médio (%)	Faixa de variação de RRT (%)
Fíler Natural + Cal	5,0	81,8	71,2 – 94,8
Cal CH-I	5,0	89,8	75,8 – 98,4
Cinza Pecém I + Cal	5,0	62,8	53,1 – 71,3
Cinza Pecém II + Cal	5,0	70,9	63,6 – 83,1
PA-01 + Cal	5,0	99,7	90,7 – 108,9
PA-13 + Cal	5,0	100,9	84,7 – 117,0

Fonte: próprio autor.

Figura 40– Resultados de RRT obtido para as misturas contendo cal, póde pedra+cal, cinzas +cal, com teor de CAP fixado em 5%.



Fonte: próprio autor.

Com relação às misturas asfálticas com o teor de CAP fixo em 5%, foi notado mudanças relevantes nos resultados de RRT obtidos para as misturas compostas por cinzas volantes “frescas” (Pecém I e II) misturadas a cal hidratada, pois os resultados de RRT obtidos nesta etapa são inferiores aqueles obtidos para as misturas avaliadas a partir do uso do teor de projeto de CAP de cada mistura. Isso pode ser resultante da variabilidade na distribuição de vazios no CPs confeccionados, e da própria variabilidade do ensaio de resistência a tração, uma vez que o volume de vazios é o mesmo daquele utilizado nas misturas que foram dosadas anteriormente. Ademais, deve-se levar em conta que os efeitos deletérios da água nessas misturas possa ter causados maiores danos, pois como o V_v é o mesmo para todas as misturas analisadas, deve haver maior conectividade entre os vazios na misturas, o que aumenta a área superficial de contato da água com as misturas asfáltica. Em contrapartida, as outras misturas asfálticas apresentaram os resultados de RRT bastante similares entre si, não havendo mudanças significativas.

5. CONCLUSÕES

5.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas acerca do trabalho desenvolvido e dos resultados alcançados, bem como as sugestões para estudos futuros utilizando as cinzas de carvão mineral como filler em misturas asfálticas. As conclusões e sugestões são referentes ao estudo desenvolvido que teve como objetivo testar a utilização de cinzas de carvão como melhoradoras de adesividade em misturas asfálticas quente. As cinzas utilizadas são provenientes das Termelétricas de Pecém I e II situada no Município de São Gonçalo do Amarante - CE.

5.2. Principais Conclusões

5.2.1. Caracterização das Cinzas

As cinzas coletadas apresentaram composições químicas muito distintas entre si, não sendo possível encontrar nenhuma amostra idêntica a outra. Foi possível constatar que 67,7% das cinzas coletadas pertencem a Classe C, sendo o restante das cinzas enquadradas na Classe F, segundo norma ASTM C618/2015. Porém, mesmo para as cinzas pertencentes a uma mesma classificação, estes materiais apresentaram composições químicas muito diferentes.

Verificou-se ainda que todas as cinzas coletadas apresentaram pH alcalino, com valores variando de 8,4 a 12,2. Foi observado também que as cinzas volantes “frescas” apresentaram em suas granulometrias partículas de diâmetro variando entre 0,138 μ m e 181,9 μ m para as cinzas de Pecém I, e partículas com diâmetro variando de 0,209 μ m a 4,365 μ m, para as cinzas coletadas em Pecém II. Com relação as cinzas coletadas no módulo de armazenamento, as cinzas coletadas em PA-01 os grãos que formam este material são predominantemente do tamanho dos grãos de areia fina (0,42mm - 0,074mm) e de silte (0,074mm - 0,005mm), apesar de existir uma parcela dos grãos a mais finos do tamanho de argila, e outra parcela de grãos mais graúdos que são do tamanho de areia média. No caso das cinzas coletadas em PA-13 os grãos que formam este material são predominantemente do tamanho dos grãos de silte (0,074mm - 0,005mm) e de argila (entre 0,001mm - 0,005mm), porém há uma parcela dos grãos que são mais graúdos sendo parte deles do

tamanho de areia fina e outra parcela do tamanho de areia média. Esses grãos com diâmetros maiores encontrados nas cinzas que compõem o material depositado no módulo de armazenamento de cinzas podem estar associados ao fato de que ali, ao longo do tempo, foram depositadas cinzas volantes e cinzas pesadas fazendo com que se obtivesse um material com granulometria mais graúda que as cinzas volantes “frescas” atualmente produzidas.

Apesar das diferenças encontradas na literatura sobre a definição das cinzas volantes, pode-se dizer que os grãos que formam as cinzas volantes frescas de Pecém I e II são predominantemente similares aos das cinzas volantes. Já para as cinzas coletadas em PA-01 e PA-13 não há como classificá-las como cinzas volantes devido a parcela mais graúda que compõe esse material.

5.2.2. Caracterização da cal, Filer Natural, Cinzas+Cal, Filer Natural+Cal

Quando se adicionou a cal hidratada às cinzas de carvão mineral (PA-01, PA-13 e cinzas volantes "frescas" de Pecém I e II), devido ao alto teor de CaO apresentado pela cal utilizada, foi possível observar que as amostras resultantes dessas misturas também apresentaram alto teor de óxido de cálcio em sua composição. No caso das cinzas, os aumentos mais significativos ocorreram naquelas pertencente a Classe F, pois no caso das cinzas coletadas em Pecém II, após a mistura com a cal, houve aumento no teor de CaO de 88,7%, já para as cinzas proveniente de PA-13 houve aumento de 79,4% no teor de CaO.

Após a mistura das cinzas com a cal, a composição química das cinzas+cal ficou semelhante a da cal, apresentando baixos teores de SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃ e altos teores de CaO. Foi ainda notado que mesmo a cinza que apresenta maior percentual de CaO em sua composição (cinza volante "fresca" de Pecém I) somente apresentou 43,5%, enquanto que todas as misturas de cinzas+cal apresentaram percentual de CaO acima de 60%. Houve ainda, após a mistura de cinza com filer natural com a cal, aumento de 89,1% no teor de CaO na composição química do filer natural+cal em relação ao filer natural sem cal.

5.2.3. Dosagens das Misturas Asfálticas

Com relação às dosagens das misturas asfálticas, as cinzas coletadas no módulo de armazenamento e as cinzas volantes “frescas” apresentaram resultados bastante distintos.

Já que o uso das cinzas volantes “frescas” apresentou uma economia no teor de CAP obtido durante processo de dosagem das misturas asfálticas, frente à mistura de referência, composta por filer natural.

Para se quantifica essa diferença, durante o processo de dosagem da mistura de referência obteve-se um teor de CAP de 5%, enquanto que para as cinzas volantes “frescas” oriundas de Pecém I obteve-se um teor de CAP de 4,1% e para as cinzas volantes “frescas” de Pecém II obteve-se um teor de CAP de 4,4%. Para as cinzas coletadas no módulo de armazenamento os resultados de teor ótimo de CAP foram de 4,8% e 5,2% para as cinzas oriundas de PA-13 e PA-01, respectivamente.

O fato das misturas asfálticas adicionadas de cinzas coletadas no módulo de armazenamento consumir maior quantidade de CAP durante as dosagens, pode estar associado a uma maior capacidade de absorção do ligante asfáltico por parte dos grãos que formam estes materiais. Pode ser que haja maior porosidade nestes grãos em relação àqueles que formam as cinzas volantes “frescas”.

5.2.4. Resistência à Tração

Nesta etapa do trabalho foram dosados dois conjuntos de misturas asfálticas. O primeiro conjunto foi formado por 6 (seis) misturas asfálticas contendo as seguintes composição: 1 (uma) mistura composta por 4% de filer natural (pó de pedra) em peso de agregado; 1 (uma) mistura composta por 4% de cal hidratada CH-I em peso de agregado; e, 4 (quatro) misturas compostas por 4% de cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, cinzas de PA-01 e de PA-13) em peso de agregado. O segundo conjunto de misturas foi composto também por 6 (seis) misturas asfálticas contendo os seguintes fileres: 1 (uma) mistura composta por 4% de cal hidratada CH-I em peso de agregado; 1 (uma) mistura composta por 2% de filer natural (pó de pedra) + 2% de cal hidratada CH-I em peso de agregado em peso de agregado; e, 4 (quatro) misturas compostas por 2% de cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, cinzas de PA-01 e de PA-13) + 2% de cal hidratada CH-I em peso de agregado em peso de agregado.

No caso do primeiro conjunto de misturas asfálticas, o uso das cinzas de carvão mineral num percentual de 4% em peso de agregado, adicionadas às misturas asfálticas, não representou incremento na resistência a tração das misturas estudadas. Pois quando se fixou o

percentual de CAP em 5% todas as misturas asfálticas avaliadas apresentaram valores de RT bem similares. Já para o segundo grupo de misturas asfálticas, percebeu-se que a associação da cal com as cinzas aumentou a rigidez das misturas asfálticas, obtendo-se, desse modo, valores de RT mais elevados. Pois enquanto os valores médios de RT médio obtidos para as misturas contendo 4% de cinzas em peso de agregado foi inferior a 1,6MPa, para as misturas contendo como filer a mistura de cal+cinzas, os valores de RT médio foram superiores a 2,0MPa, atingindo no caso das cinzas volantes “frescas” de Pecém II valores superiores a 2,6MPa.

Durante a análise dos resultados foi possível notar que o fato de algumas cinzas pertencerem a Classe C ou F, ou mesmo possuírem um maior, o menor, percentual de CaO em composição, não refletiu em melhores resultados. Nem mesmo o fato de algumas cinzas serem mais alcalinas que outras não refletiu em ganhos significativos de resistência à tração.

5.2.5. Resistência ao Dano por Umidade Induzido

Nesta etapa do trabalho também foram dosados dois conjuntos de misturas asfálticas. O primeiro conjunto foi formado por 6 (seis) misturas asfálticas contendo as seguintes composição: 1 (uma) mistura composta por 4% de filer natural (pó de pedra) em peso de agregado; 1 (uma) mistura composta por 4% de cal hidratada CH-I em peso de agregado; e, 4 (quatro) misturas compostas por 4% de cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, cinzas de PA-01 e de PA-13) em peso de agregado. O segundo conjunto de misturas foi composto também por 6 (seis) misturas asfálticas contendo os seguintes fileres: 1 (uma) mistura composta por 4% de cal hidratada CH-I em peso de agregado; 1 (uma) mistura composta por 2% de filer natural (pó de pedra) + 2% de cal hidratada CH-I em peso de agregado em peso de agregado; e, 4 (quatro) misturas compostas por 2% de cinzas (cinzas volantes “frescas” de Pecém I e II, cinzas de PA-01 e de PA-13) + 2% de cal hidratada CH-I em peso de agregado em peso de agregado.

O uso das cinzas de carvão mineral no primeiro conjunto de amostras analisadas, através do ensaio de *Lottman* modificado AASHTO T283/14, não apresentou resultados significativos com relação ao aumento da resistência ao dano por umidade de misturas asfálticas a quente. Na verdade, o que ficou evidente foi que o uso de cinzas num teor de 4% em peso de agregado apresentou resultados bem similares aos do filer natural, obtendo valores de RRT médio abaixo de 50%, o que foi inferior ao valor de 80% de RRT mínimo

estabelecido. Nesta etapa do trabalho apenas a mistura asfáltica contendo a cal como filer conseguiu ultrapassar o limite mínimo estabelecido, uma vez que se obteve um RRT médio de 84%, mostrando que a cal hidratada realmente agiu como melhoradora de adesividade da mistura asfáltica.

Com relação ao segundo conjunto de misturas asfálticas analisadas, percebeu-se que a introdução da cal às misturas asfáltica combinada com outros fileres apresentou resultados bem satisfatórios em relação ao aumento da resistência ao dano por umidade induzido. Pois nesta fase do trabalho todas as misturas conseguiram ultrapassar o limite mínimo de 80% de RRT estabelecido. Acredita-se que o aumento no teor de CaO na composição química dos fileres utilizados foi o responsável pela maior resistência ao dano por umidade induzida das misturas asfálticas.

Durante a análise dos resultados foi possível notar que o fato de algumas cinzas pertencerem a Classe C ou F, ou mesmo possuírem um maior, o menor, percentual de CaO em composição, não refletiu em melhores resultados de RRT. Nem mesmo o fato de algumas cinzas serem mais alcalinas que outras não refletiram em ganhos significativos de resistência ao dano por umidade.

5.2.6. Sugestões e Recomendações para Estudos Futuros

Objetivando complementar o estudo dada a relevância existente do mesmo, listou-se algumas sugestões e recomendações quanto à aplicabilidade das cinzas de carvão mineral em misturas asfáltica:

- a) Realizar de ensaios de imagem utilizando um microscópio de varredura eletrônica para se avaliar se as partículas que formam as cinzas contidas no módulo de armazenamento apresentam maior porosidade, em relação as partículas que formam as cinzas volantes “frescas”;
- b) Testar misturas asfálticas compostas por cinzas resultantes da mistura de vários pontos do módulo de armazenamento para se avaliar seus efeitos na mistura asfáltica;
- c) Testar proporções distintas de cinza + cal em relação às analisadas neste estudo para se verificar se há interação química entre estes materiais;

- d) Dosar misturas asfálticas com maiores percentuais de cinzas para se analisar o quanto o óxido de cálcio (CaO) presente nesse material pode funcionar como melhorador de adesividade;
- e) Dosar misturas asfálticas com uma matriz de agregados diferentes dos agregados graníticos usados nesta pesquisa para se analisar a interação das cinzas com outros materiais com relação ao aumento da adesividade;
- f) Realizar ensaios químicos de adesividade (Ex. Microscopia de Força Atômica - AFM) para se avaliar o quanto as cinzas podem melhorar, ou piorar, a resistência ao dano por umidade de misturas asfálticas a quente;
- g) Realizar outros ensaios (além do *Lottman*) para verificar os efeitos da adição de cinza em outros mecanismos de dano, além do dano por umidade induzida (Ex. Ensaio de módulo de resiliência, módulo complexo, *flow number*, deformação permanente, dentre outros);
- h) Avaliar o potencial contaminante do uso da cinza como filer em misturas asfálticas a partir do uso de células de percolação.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008.
- AIREY, G. D. *et al.* Moisture damage assessment of asphalt mixtures using the UK SATS test. **Transportation Research Board**, Washington D. C., 86th Annual Meeting, 2007.
- ANDROJIĆ, I.; KALUĐER, G.; KOMLJEN, M. **Usage of the fly ash in hot asphalt mixes**, Croácia, [s. n.], 2008.
- AKSOY, A. *et al.* Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 19, p. 11–18, 2005.
- AMELIAN, S.; ABTAHI, S. M.; HEJAZI, S. M. Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixes based on image analysis. **Construction and building materials**, 2014.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Handbook of hot-mix asphalt paving**. Washington, D.C.: [s. n.], 1991.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing**. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004.
- AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION. **An american recycling success story: beneficial use of coal combustion products**. Washington: Federal Highway Administration, 2013.
- AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION. **Fly ash facts for highway engineers**. Washington : Federal Highway Administration, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. West Conshohocken: ASTM International, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete**, C618. United States, 2014.
- ARAMBULA, E.; MASAD, E.; MARTIN, A. E. The influence of air void distribution on the moisture susceptibility of asphalt mixes. **Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)**, p. 655-664, 2007.
- ARAMRAKS, T. Experimental study of concrete mix with bottom ash as fine aggregate in Thailand. **Symposium on Infrastructure Development and the Environment**. p. 1-5, 2006.
- ASMAEL, N. M. Effect of mineral filler type and content on properties of asphalt concrete mixes. **Journal of Engineering**, v. 16, n. 3, sep 2010.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave mix design**. Lexington: Asphalt Institute, 2001. Série n. 2 (SP-2).

AZEVEDO, A. F. F. L. C. **Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes**. 2002. 456 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho. Minho, 2002.

BAHIA, H. U. Critical evaluation of asphalt modification using strategic highway research program concepts. **Transportation Research Record**, Washington , v. 1488, 1995.

BAHIA, H. U. *et al.* Testing methods to determine aggregate/asphalt adhesion properties and potential moisture damage. **Wisconsin Highway Research Program**, Madison - Wisconsin, 2007.

BAI, Y.; DARCY, F.; BASHEER, P. A. M. Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, 2005.

BAGAMPADDE, U.; ISACSSON, U.; KIGGUNDU, B. M. Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures. **International Journal of Pavement Engineering**. v. 6, n. 4, p. 229-239, 2005.

BAGAMPADDE, U.; ISACSSON, U.; KIGGUNDU, B. M. Impact of bitumen and aggregate composition on stripping in bituminous mixtures. **Materials and Structures**, v. 39, p. 303-315, 2006.

BARDINI, V.; KLINSKY, L.; FERNANDES JUNIOR, J. L. A importância do fíler para o bom desempenho de misturas asfálticas. São Carlos: Minerva, 2009.

BARRIE, P. J. Characterization of porous media using NMR methods. **Annual Reports on NMR Spectroscopy**, v. 41, p. 265–316, 2000.

BARROS, K. S. **Estudo sobre a possibilidade do uso de cinzas volantes advindas de uma termelétrica à carvão mineral da região metropolitana de Fortaleza-CE para aplicação em camadas granulares de pavimentos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

BASU, M. *et al.* Potential fly-ash utilization in agriculture: a global review. **Progress in Natural Science Progress in Natural Science**, v. 19, p. 1173–1186, 2009.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3. reimp. Rio de Janeiro: PETROBRAS-ABEDA, 2010.

BECHARA, M. F. *et al.* Propriedades reológicas de mástiques asfálticos a altas temperaturas. **Reunião Anual de Pavimentação**, Recife/PE, 13. ENACOR, 39. reunião, 2008.

BERETKA, J.; BROWN, T. The utilization of fly ash in building. **Journal of Australian Ceramic Society**, v. 13, n.2, p. 24-30, 1977.

BHASIN, A. **Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water.** Texas, 2006. Dissertation (Ph.D.) - College Station, Texas A&M University.

BHASIN, A. *et al.*. Limits on adhesive bond energy for improved resistance of hot-mix asphalt to moisture damage. **Transportation Research Board**, Transportation Research Board of the National Academies, n. 1970, 2006.

BLAZEJOWSKI, K. **Stone matrix asphalt: theory and practice.** 2nd ed. Washington, D. C.: Washington State Department of Transportation, 2010.

BOCK, A. L. **Efeitos da incorporação da cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado.** 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BOYES, A. J. **Reducing moisture damage in asphalt mixes using recycled waste additives.** 2011. Thesis (Master of Science and Civil and Environmental Engineering) - Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2011.

BROWN, E. R. *et al.* Relationship of air voids, lift thickness, and permeability in hot mix asphalt pavements. **Transportation Research Board of the National Academies.** Washington, D. C., n. 531, 2004.

CAVALCANTE, L. S. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas.** 2010. Dissertação (Mestrado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CHEN, J.S.; LIN, K.Y.; YOUNG, S.Y. Effects of crack width and permeability on moisture-induced damage of pavements. **ASCE Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 3, 2004.

CHEN, X.; HUANG, B. Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests. **Construction and Building Materials**, 2008.

CRAUS, J.; ISHAI, I.; SIDES, A. Some Physico-Chemical aspects of the effect and the role of the filler in bituminous paving mixtures. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists.** v. 46, p. 558-588, 1978.

CURTIS, C. W.; ENSLEY, K.; EPPS, J. A. **Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption.** Washington D. C.: National Research Council, final report SHRP A-341, 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Material de enchimento para misturas betuminosas.** DNER-EM 367/97. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregado – adesividade a ligante betuminoso.** DNER-ME 079/94. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral**. DNER-ME 138/94. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1994.

DONG-WOO, C. **Study of asphalt-aggregate bond in simple simulation using the dynamic shear rheometer**. 2008. Thesis (Ph.D.) - University of Wisconsin, Madison, 2008.

EMERY, J.; SEDDIK, H. Moisture damage of asphalt pavements and antistripping additives: causes, identification, testing, and mitigation. **Transportation Association of Canada**, Ottawa - Canada, 1997.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Using coal ash in highway constructions: a guide to benefits and impacts**, 2005.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. **Balanco energético nacional**. Rio de Janeiro, 2016.

EUROPEAN LIME ASSOCIATION. **Hydrated lime: a proven additive for durable asphalt pavements**. Report to the European Lime Association / Asphalt Task Force. September, 2010.

FABER, J. H.; DIGIOIA, A. M. Use of ash in embankment construction. **Transportation Research Board**, v. 593, p. 13-19, 1976.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Fly ash facts for highway engineers**. Washington: American Coal Association, 2003.

FERNÁNDEZ, A.V. **Influencia de la dosificación y empleo de diferentes tipos de cemento y adiciones en las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante**. 2009. Tesis (Doctoral) - Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2009.

GHAFOORI, N.; BUCHOLC J. Investigation of lignite based bottom ash for structural concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 8, n. 3, 1996.

GOETHE, C. A. Sistemas de controle e disposição final das cinzas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda – SC e da usina termelétrica de Jacuí – RS. *In: SEMINÁRIO DE ESTUDOS DA APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS DA COMBUSTÃO DO CARVÃO MINERAL*, 1990, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 1990.

HAMZAHA, M. O.; KAKAR, M. R.; HAININ, M. R. An overview of moisture damage in asphalt mixtures. **Journal Teknologi Sciences & Engineering**, p. 125-131, 2015.

HICKS, R. G. Moisture damage in asphalt concrete. **Transportation Research Board**, Washington D. C., 1991.

HICKS, R. G.; SANTUCCI, L.; ASCHENBRENER, T. Moisture sensitivity of asphalt pavements. **A national seminar**. San Diego, California, 2003.

HUANG, B. *et al.* Laboratory evaluation of moisture susceptibility of hot-mix asphalt containing cementitious fillers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2010.

ISHAI, I.; CRAUS, J. Effect of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures. **Proc. Association Asphalt Paving Technologies**, v. 43, p. 228-258, 1977.

INNOVATIVE PAVEMENT RESEARCH FOUNDATION. **Handbook for proportioning fly ash as cementitious material in airfield pavement concrete mixtures**. n. IPRF-01-G-002-06-2, 2011.

KANITPONG, K.; BAHIA, H. U. Role of adhesion and thin film tackiness of asphalt binders in moisture damage of HMA. *In: Asphalt paving technology: role of adhesion and thin film tackiness of asphalt binders in moisture damage of HMA*. St Paul: Association of Asphalt Paving Technologists, 2003.

KASEMCHASIRI, R.; TANGETERMSIRIKUL, S. A method of determine aterretainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete. **Construction and Building Materials**, 2007.

KAVUSSI, A.; HICKS, R.G. Properties of bituminous mixtures containing different fillers. **Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists**, 1997.

KSAIBATI, K.; SAYIRI, S. R. K. Utilization of wyoming bottom ash in asphalt mixes. **Department of Civil & Architectural Engineering University**. Wyoming, 2006.

KENNEDY, T. W.; MCGENNIS, R. B.; ROBERTS, F. L. Investigation of moistures damage to asphalt concrete and affect on field performance – a case study. **Transportation Research Record**. Washington D. C. 1983.

KIGGUNDU, B. M.; ROBERTS, F. L. Stripping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods. **National Center for Asphalt Technology (NCAT)**, Auburn Alabama, n. NCAT 88-02, 1988.

KIM, H. K.; LEE, H. K. Use of Power Plant bottom ash as fine and coarse aggregate in high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, 2011.

KIM, Y.; LUTIF, J. S. E. Material selection and design consideration for moisture damage of asphalt pavement. **Nebraska Department of Roads**. Lincoln, Nebraska, n. P564, 2006.

KOSEK, J.; STEPANEK, F.; MAREK, M. Modeling of transport and transformation processes in porous and multiphase bodies. **Advances in Chemical Engineering**, 2005.

KOU, S.; POON, C. Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, 2009.

KRINGOS, N. **Modeling of combined physical-mechanical moisture induced damage in asphaltic mixes**. Netherlands: Printed in Delft, 2007.

KRINGOS, N.; SCARPAS A.; BONDT A. Determination of moisture susceptibility of mastic-stone bond strength and comparison to thermodynamical properties. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**. v. 77, n. 1, p. 435-478, 2008.

LESUEUR, D.; LITTLE, D. N.; EPPS, J. A. Effect of hydrated lime on the rheology, fracture and aging of bitumen and asphalt mixtures. *In: Effect of hydrated lime on the rheology, fracture and aging of bitumen and asphalt mixtures*, Dusseldorf, [s. n.], 1998.

LIBERATORI, L. A.; CONSTANTINO, R. S. Melhoradores de adesividade para misturas asfálticas. *In: ENCONTRO DO ASFALTO*, 18., 2006, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro, 2006.

LIKITLERSUANG, S.; CHOMPOORAT, T. Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures. **Chinese Society of Pavement Engineering**. *Int. J. Pavement Res. Technol*, p. 1996-6814, 2016

LITTLE, D. N.; EPPS, J. A. **The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt**. National Lime Association the Versatile Chemical, 2001.

LITTLE, D.; JONES, D. Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot mix asphalt pavements. **Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements**, TRB Seminar Paper, 2003.

LITTLE, D.; PETERSEN, J. C. Unique effects of hydrated lime filler on the performance related properties of asphalt cements: physical and chemical interactions revisited. **ASCE Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 17, n. 2, p. 207-218, 2005.

LIU, M. J.; KENNEDY, T. W. Field evaluation of stripping and moisture damage in asphalt pavements treated with lime and antistripping agents. **Center for Transportation Research**, Austin, n. 441-2F, 1991.

LOPES, L. S. E. **Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de base de pavimentos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2011.

LU, Q. **Investigations for conditions for moisture damage in asphalt concrete and appropriate laboratory test methods**. [s.l.: s.n.], 2005.

LU, Q., HARVEY, J. T. Inclusion of moisture effect in fatigue test for asphalt pavements. **Transportation Research Board**, Washington, D. C., n. 86 Annual Meeting, 2007.

MASAD, E. *et al.* Nondestructive measurements of moisture transport in asphalt mixtures. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**. n. 76, p. 919-952, 2007.

MASAD, E.; CASTELBLANCO, A., BIRGISSON, B. Effects of air void size distribution, pore pressure, and bond energy on moisture damage. **Journal of Testing and Evaluation**, 2006.

MASAD, E.; KASSEM, E., CHOWDHURY, A. **Application of imaging technology to improve the laboratory and field compaction of HMA**. Texas: Texas Transportation Institute, 2009.

MENG, J. **Affinity of asphalt to mineral aggregate: pull-off test evaluation**. 2010. Thesis (Master of Science) - University of Wisconsin, Madison, 2010

MERCADO, E. A. **Influence of fundamental material properties and air void structure on moisture damage of asphalt mixes**. 2007. Tese (Doutorado) - Texas A&M University, Texas, 2007.

MISTRY, R.; ROY, T. K. Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt. **Engineering and Material Sciences**, p. 2213-3209, 2016.

MOHAMED, E. H. H.; HALIM, A. O. A. E.; KENNEPOHL, G. J. Assessment of the influence of compaction method on asphalt concrete resistance to moisture damage. **Construction and Building Materials**, Babol., 1993.

MODARRES, A.; RAHMANZADEH, M. Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. **Construction And Building Materials**, Babol., p.476-483, 2014.

MORAES, R.; VELASQUEZ, R.; BAHIA, H. Measuring effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test. Washington : Transportation Research Board, Annual Meeting, 2011.

MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M. Efeito do filler nas características mecânicas das misturas asfálticas. *In: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTE*, 11., 2000, Gramado, 2000. p. 1007-1017.

MOTOKI, A. **Descrição petrográfica de rochas ígneas: apostila didática para a Disciplina Petrologia I**. Rio de Janeiro: UERJ, 2004.

MOULTON, L. K. Bottom ash and boiler slag. *In: INTERNATIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIUM*, 3., 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: U.S. Bureau of Mines, n. 8640, 1973.

MUHARDI, MARTO A. *et al.* **Engineering** Characteristics of Tanjung Bin Coal Ash. [s.l.]: EJGE, 2010.

NAIK, T. R. *et al.* **Coal-combustion bottom ash for reducing shrinkage of concrete made with portland cement and sulfoaluminate cement**. p. 1–13, 2007.

NAVEED, A. **Asphalt mixture moisture sensitivity evaluation using surface energy parameters**. 2011. Dissertation (Ph.D.) - University of Nottingham, Nottingham, 2011.

NEVES, E. *et al.* Efeito da adição de Na₂O na viscosidade e devitrificação do vidro obtido a partir de cinzas volantes e Li₂O. **Química nova**, v. 21, n.4, p. 534-537, 1998.

PORTAL BRASIL. **Carvão mineral recebe investimentos em tecnologia**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/carvao-mineral-recebe-investimentos-em-tecnologia>>, Acesso em 13 jan. 2016.

RIBEIRO, E. A. **O efeito da modificação de ligante asfáltico com o líquido da castanha de caju (LCC) na resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

READ, J.; WHITEOAK, D. **The shell bitumen handbook**. London: Thomas Telford, 2003.

ROBERTSON, R. E. Chemical Properties of Asphalts and their Effects on Pavement Performance. *In: Transportation research board*. Washington: [s.n], 2000.

ROHDE, G. M. *et al.*. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil: aspectos técnicos e ambientais**. Porto Alegre: CIENTEC, 2006.

SANTUCCI, L. **Minimizing moisture damage in asphalt concrete**. Berkeley: Institute of Transportation Studies, 2010.

SANTUCCI, L. **Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: technology transfer program**. Berkeley: Institute of Transportation Studies, 2002.

SCHROEDER, R. L. **The Use of recycled materials in highway construction**. Washington: Department of Transportation. Federal Highway Administration, 1994.

SHAH, B. D. **Evaluation of moisture damage within asphalt concrete mixes**. 2003. Thesis (Master of Science) - Texas A&M University, Texas, 2003.

SHIWAKOTI, H. **Development of a rapid test to determine moisture sensitivity of HMA (superpave) mixtures**. 2007. Thesis (Master of Science) - Environmental and Architectural Engineering and the Graduate Faculty, University of Kansas. Kansas, 2007.

SIDDIQUE, R. **Waste materials and by-products in concrete**. Berlin: [s.n], 2008.

SILVA, H. **Caracterização do masticue betuminoso e da ligação agregado-masticue: contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas**. 2006. Tese (Doutorado) - Universidade do Minho, Braga, 2006.

SILVA, N. I. W. *et al.* **Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico**. São Paulo, 1999.

SILVEIRA, V. L.; SILVA, B. E. P.; GUIMARÃES, A. C. R. **Caracterização física, química e mecânica de misturas solo/cinza de caldeira a coque para emprego em camadas de base e subbase**. 28. ed. São Paulo: ANPET, 2014.

SINGH, M. **Effect of coal bottom ash on strength and durability properties of concrete**. Punjab, 2015. Thesis (Ph. D. Civil Engineering) - Thapar University, India, 2015.

SIQUEIRA, J. S.; SOUZA, C. A. G.; SOUZA, J. A. S. **Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas.** [s.l.: s.n.], 2012.

SNYDER, J. **Fly ash:** specifications, limitations, and restrictions. Pittsburg: Symposium on fly ash utilization, 1967.

SPINEL, S. C. **A coupled micromechanical model of moisture-induced damage in asphalt mixtures:** formulation and applications. [s.l.: s.n.], 2009.

TARRER, A. R.; WAGH, V. **The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding.** Washington: Strategic Highway Research Program Report, 1992.

TUNNICLIFF, D. G. A Review of mineral filler proceedings of asphalt association of. **Paving Technologists.** v. 31, p. 118-150, 1962.

VASUDEVAN, G. Performance on coal bottom ash in hot mix asphalt. **IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology**, 2013.

WEBER, R. C. *et al.* **Uso de cinzas pesadas em misturas asfálticas a quente.** São Paulo: SINICESP, 2012.

WEBER, R. C. **Cinzas pesadas geradas na região carbonífera do Rio Grande do Sul:** uso em misturas asfálticas a quente. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

XIAO, F. P.; AMIRKHANIAN, S. N.; JUANG, C. H. Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, China, 2007.

XIE, J. *et al.* Influence of surface treated fly ash with coupling agent on asphalt mixture moisture damage. **Construction and Building Materials.** China, p. 340–346, 2012.

YAN, K.; XU, H.; ZHANG, H. Effect of mineral filler on properties of warm asphalt mastic containing Sasobit. **Construction and Building Materials.** China, 2013.

YUKSEL, I.; GENÇ, A. Properties of concrete containing Non-ground ash and Slag as fine Aggregate. **ACI Materials Journal**, p. 397-403, 2007.

ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N. I. W. **Cinzas de carvão no Brasil:** características e possibilidades de uso. Porto Alegre: CIENTEC, 2006.