

## RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE CINZA PESADA

Evelice Pavei (1), Pedro Arns (2); Joe Villena (3).

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
(1) [evelicepavei@gmail.com](mailto:evelicepavei@gmail.com), (2) [par@unesec.net](mailto:par@unesec.net) (3) [joevillena@gmail.com](mailto:joevillena@gmail.com).

### RESUMO

A cinza pesada é um subproduto proveniente da queima do carvão fóssil, pulverizado nas caldeiras das termelétricas, para a produção de energia elétrica. Não há um destino adequado para esse tipo de resíduo, sendo que o volume gerado é depositado em bacias de decantação, causando, dessa forma, problemas ambientais. O objetivo desta pesquisa foi estudar a influência da incorporação de diferentes porcentagens de cinza pesada, na resistência à tração em misturas asfálticas de camadas de revestimento. Foram estudadas misturas sem e com adição de 2, 4, 8 e 12% de cinza pesada. A cinza é proveniente do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo, SC. As misturas foram dosadas mediante a metodologia Marshall (DNER-ME 043/95) para estimar o teor ótimo de ligante. Com o valor do teor ótimo de ligante foram moldados corpos de prova para serem ensaiados à tração diametral. Os resultados destes ensaios mostraram que a adição de cinza pesada até um valor de 5,9%, permite incrementar a resistência à tração das misturas, com adição de cinza, em comparação com a mistura de referência, sem cinza. Baseados nos resultados obtidos, o uso da cinza pesada no revestimento asfáltico em pavimentos flexíveis, permitirá a utilização de um grande volume deste resíduo colaborando, desta forma, com a gestão ambiental do mesmo e com uma economia no uso de agregados pétreos naturais.

*Palavras-Chave: Misturas asfálticas, Cinza pesada, dosagem Marshall, resistência à tração.*

### 1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos são estruturas de camadas múltiplas e espessuras finitas, que têm por finalidade resistir aos esforços gerados pelo tráfego dos veículos, propiciando aos usuários boas condições de rolamento, conforto, economia e segurança. Atualmente, o pavimento flexível ou asfáltico é o tipo mais utilizado no Brasil e no Mundo.

A camada superficial desta estrutura é denominada de revestimento asfáltico, composta, basicamente, de agregados e ligante asfáltico. A função principal do revestimento é suportar diretamente os esforços impostos pelo tráfego e transmiti-los às camadas subjacentes. As tensões e deformações sofridas na camada asfáltica

pelas cargas do tráfego, estão associadas às patologias de deformação permanente e fadiga. No entanto, estas podem ser mitigadas mediante a escolha de ligantes e agregados de boa qualidade.

“A variedade de agregados passíveis de utilização nos revestimentos asfálticos é muito grande. Contudo, cada utilização em particular requer agregados com características específicas e isso inviabiliza muitas fontes potenciais”. (BERNUCCI, *et al.*, 2006; p. 116).

A preocupação com a possibilidade de esgotamento dos recursos naturais e os efeitos que a extração dos agregados pode causar sobre o meio ambiente torna indispensável o estudo de materiais alternativos empregados na pavimentação, que muitas vezes tem sido subutilizados ou mesmo descartados de maneira não sustentável ambientalmente. Somado a este fato, grandes quantidades de resíduos e subprodutos são gerados por usinas termelétricas, como é o caso das cinzas originadas a partir da queima do carvão.

As usinas termelétricas utilizam carvão fóssil para a geração de energia elétrica, material que apresenta uma elevada taxa de matéria mineral em sua composição, tanto no processo de combustão quanto na gaseificação do carvão, as cinzas são geradas. As cinzas podem ser classificadas em três categorias, segundo Rohde (2006, p. 139):

Escória: originada na queima ou gaseificação do carvão granulado em grelhas fixas e móveis, apresentando granulometria grosseira e blocos sintetizados, com alto teor de carbono não queimado (10 a 20%);

Cinza leve (*fly ash*): também chamada de cinza volante, são constituídas de partículas extremamente finas (100% <0,15mm) e leves, que são arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas;

Cinza Pesada (*bottom ash*): também chamada de cinza de fundo, são de granulometria mais grossa, que caem para o fundo das fornalhas e gaseificadores, sendo frequentemente retiradas por fluxo d'água. Originadas nos processos de queima do carvão em forma pulverizada a da queima ou gaseificação do carvão em leito fluidizado, contém geralmente teores de carbono não queimado de 5 a 10%.

As cinzas volantes e pesadas são materiais promissores para o uso tanto na Construção Civil, quanto na pavimentação. Sua utilização em pesquisas sobre solos estabilizados com cinza e cal, ou como matéria-prima na produção de artefatos de cimento, substituindo tanto o cimento Portland quanto o agregado, apresentam resultados satisfatórios. Silva (2005), afirma que “anualmente no Complexo

Termelétrico Jorge Lacerda são gerados 286,3 mil toneladas de cinza pesada”. A destinação de quantidades significativas da cinza pesada torna-se um grave problema de caráter ambiental, devido ao alto teor de matéria mineral do carvão sul-brasileiro. “É de conhecimento corrente da bibliografia mundial e brasileira que as cinzas de carvão contêm elementos químicos, metais, substâncias e possuem propriedades químicas e toxicológicas que podem causar danos à saúde humana e ao ambiente”. (ROHDE, 2006, p. 142).

Para contribuir com a gestão ambiental deste resíduo sólido, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da adição da cinza pesada em substituição parcial do agregado mineral na resistência à tração de misturas asfálticas, com a perspectiva de seu emprego em camadas de revestimento dos pavimentos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. MATERIAIS

#### 2.1.1 Agregados

Os agregados minerais são de origem basáltica e foram fornecidos pela Empresa Nunes Britadora, localizada em Rio Cedro Médio, Nova Veneza-SC. A Figura 1 apresenta os agregados minerais utilizados: (a) brita “3/4”, (b) pedrisco e (c) areia artificial.

Figura 1 – Agregados minerais utilizados na pesquisa: a) brita 3/4”, b) pedrisco e c) areia artificial.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Evelice Pavei (2014).

### 2.1.2 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico (Figura 2) possui 0,07% de melhorador de adesividade “Dope” e foi fornecido pela Confer Construtora Fernandes LTDA.

Figura 2 – Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).



Fonte: Evelice Pavei (2014).

### 2.1.3 Cinza Pesada

A cinza pesada foi coletada nas bacias de decantação do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, Capivari de Baixo – SC. Conforme apresenta a figura 3.

Figura 3 – Cinza pesada: a) local de coleta e b) cinza pesada selecionada.



(a)

(b)

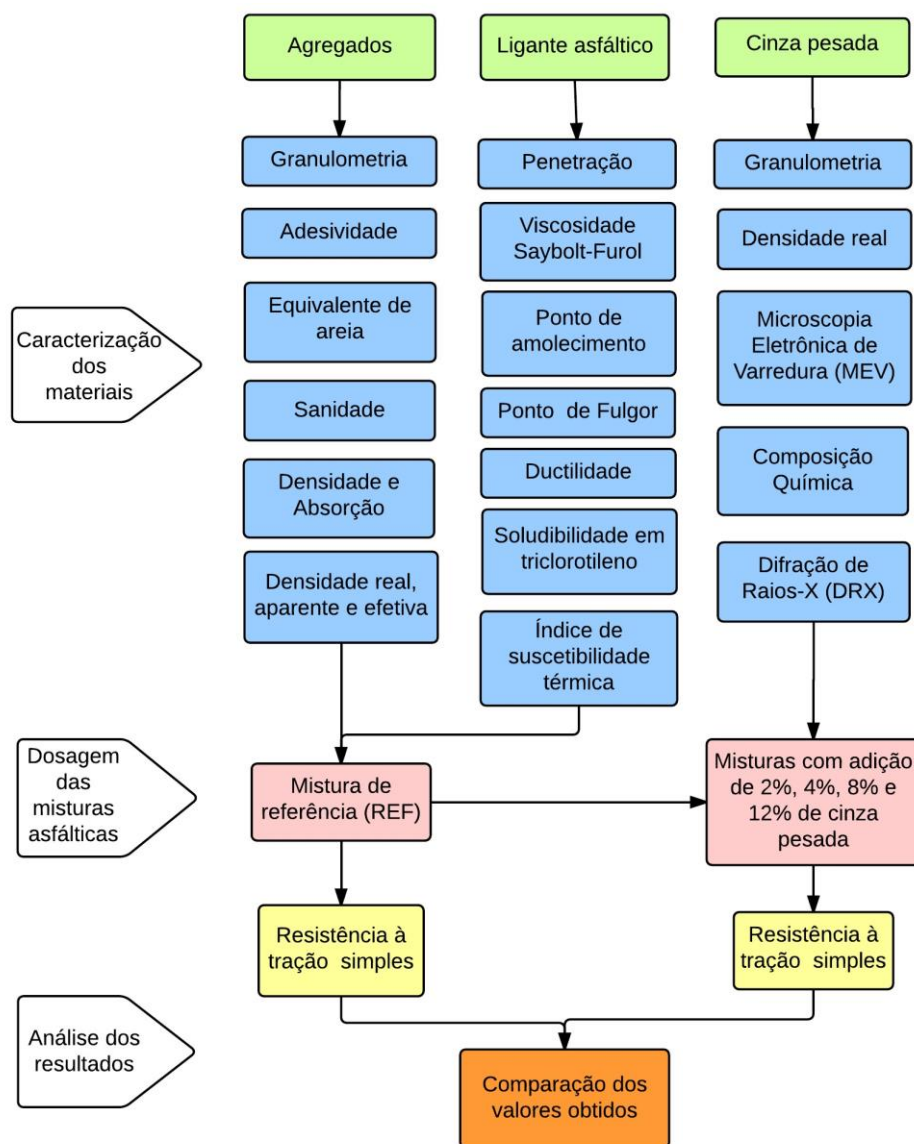
Fonte: Evelice Pavei (2014).

## 2.2 MÉTODOS

A metodologia da pesquisa consistiu na moldagem de corpos de prova cilíndricos de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), cuja granulometria se encaixa na

faixa “C” do Departamento Estadual de Infraestrutura (DEINFRA). Foram moldados dois tipos de misturas asfálticas, sem e com adição de diversas porcentagens de cinza pesada, (2%, 4%, 8% e 12%) em substituição do agregado mineral. As etapas que compõem a pesquisa são mostradas na Figura 4.

Figura 4 – Metodologia da pesquisa.



Fonte: Evelice Pavei (2014).

## 2.2.1 Caracterização dos materiais

Os ensaios para caracterizar os materiais, à exceção do ligante asfáltico, foram executados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Asfalto (LMSA), do Instituto de

Engenharia e Tecnologia (IDT), da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). Para a caracterização química da cinza pesada, a mesma foi enviada ao Laboratório de Aprendizagem e Caracterização dos Materiais (LDMC) do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), ao laboratório de Cerâmica Técnica (CerTec) e ao Laboratório de Caracterização de Materiais (CECAM).

#### 2.2.1.1 Agregados

Para a caracterização dos agregados foram realizados os seguintes ensaios:

- Granulometria (DNER-ME 083/98);
- Equivalente de Areia (DNER-ME 054/97);
- Densidade e Absorção (DNER-ME 081/98);
- Sanidade (DNER-ME 089/94);
- Adesividade (DNER-ME 078/94), e;
- Densidade Real, Aparente e Efetiva dos grãos (DNER-ME 084/95 e DNER-ME 085/94).

#### 2.2.1.2 Ligante asfáltico

Para caracterização do ligante asfáltico foram realizados os seguintes ensaios:

- Penetração (NBR 6576/2007);
- Viscosidade Saybolt-Furol (NBR 14950/2003);
- Viscosidade Brookfield (NBR 15184/2005);
- Ponto de amolecimento (NBR 6560/2008);
- Ductilidade (NBR 6293/2001);
- Índice de suscetibilidade térmica (DNER-ME 204/95);
- Solubilidade em tricloroetileno (NBR 14855/2002), e;
- Ponto de fulgor (NBR 11341/2014).

#### 2.2.1.3 Cinza pesada

Para caracterização da cinza pesada foram realizados os seguintes ensaios:

- Granulometria (DNER-ME 083/98);

- Densidade Real (DNER-ME 093/94);
- Composição química; (Espectrometria de fluorescência de raios x e espectrometria de absorção atômica);
- Difração de Raios-X (DRX), e;
- Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

### 2.2.2 Dosagem das misturas asfálticas

A aplicação das misturas asfálticas, em revestimento de pavimentos flexíveis deve ser precedida por ensaios que permitam a obtenção de teor de ligante a ser utilizado nas mesmas. O método mais utilizado no Brasil faz uso da compactação por impacto e é denominado de Metodologia de Dosagem Marshall (DNER-ME 043/95). Este procedimento prevê a dosagem de misturas asfálticas considerando valores admissíveis empíricos para estabilidade e fluência. Leva em consideração a granulometria, densidade dos materiais e a porcentagem de vazios (BERNUCCI, 2007, p. 57).

Descreve-se a seguir, passo a passo, o procedimento de determinação dos parâmetros gerados numa dosagem Marshall, para concreto asfáltico utilizado em camada de rolamento e na confecção dos corpos de prova.

1. Determinação das massas específicas reais do cimento asfáltico de petróleo (CAP) e dos agregados;
2. Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com a mistura asfáltica;
3. Escolha da composição dos agregados, de forma a enquadrar a sua mistura aos limites da faixa granulométrica escolhida [...]. Ou seja, é escolhido o percentual em massa de cada agregado para formar a mistura. Neste momento não se considera ainda o teor de asfalto [...].
4. Escolha das temperaturas de mistura e compactação, a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante escolhido [...]. A temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que sua viscosidade esteja situada entre 75 e 150SSF (segundos Saybolt-Furol), de preferência entre 75 e 95SSF ou 0,17 +/- 0,02 Pa. s. se medida com viscosímetro rotacional. A temperatura do ligante não deve ser inferior a 107°C e nem superior a 177°C. A temperatura dos agregados deve ser de 10°C a 15°C acima da temperatura definida para o ligante, sem ultrapassar 177°C. A temperatura de compactação deve ser tal que o ligante apresente viscosidades na faixa de 125 a 155SSF ou 0,28 +/- 0,03 Pa.s.;
5. Adoção de teores de asfalto para diferentes grupos de corpos de prova a serem moldados. Cada grupo deve ter no mínimo três corpos de prova. Conforme experiência do projetista, para a granulometria selecionada, é sugerido um teor de asfalto (T, em %) para o primeiro grupo de corpos de prova. Os outros grupos terão teores de asfalto acima (T+0,5% e T+10%) e abaixo (T-0, 5% e T-1, 0%).

6. Após o resfriamento e a desmoldagem dos corpos de prova, obtêm-se as dimensões dos mesmos (diâmetro e altura). Determinam-se para cada corpo de prova suas massas seca ( $M_s$ ) e submersa em água ( $M_{s\text{sub}}$ ). Com estes valores é possível obter a massa específica aparente dos corpos de prova ( $G_{mb}$ ), que, por comparação com a massa específica máxima teórica (DMT), vai permitir obter as relações volumétricas típicas de dosagem;  
Volume dos corpos de prova,  $V = M_s - M_{s\text{sub}}$ ;  
Massa específica aparente da mistura,  $G_{mb} = M_s / V$ ;  
Volume de vazios,  $V_v = DMT - G_{mb} / DMT$ ;
7. A partir do teor de asfalto do grupo de corpos de prova em questão (%a), ajusta-se o percentual em massa de cada agregado, ou seja,  $\%n = \%n^* \times (100 - \%a)$ , onde  $\%n$  é o percentual em massa do agregado "n" na mistura asfáltica já contendo o asfalto. Note-se que enquanto  $\Sigma \%n^* = 100\%$ , após o ajuste,  $\Sigma \%n = 100\% - \%a$ , [...];  
Vazios do agregado mineral  $VAM = 100 - (G_{mb} \times \Sigma \%n / G_{sb})$ ;  
Relação betume /vazios  $RBV = 100 \times (VAM - V_v / VAM)$ ;
8. Após as medidas volumétricas, os corpos de prova são submersos em banho-maria a 60°C por 30 a 40 minutos, [...]. Retira-se cada corpo de prova colocando-o imediatamente dentro do molde de compressão [...]. Determinam-se, então, por meio da prensa Marshall, [...], os seguintes parâmetros mecânicos, estabilidade e fluência. (Bernucci *et al.* 2008, p.218).

#### 2.2.2.1 Estabilidade Marshall

A estabilidade Marshall é a resistência máxima à compressão radial apresentada pelo corpo de prova antes da ruptura. O ensaio consiste na aplicação de uma carga de compressão sobre o corpo de prova cilíndrico, de 101,6 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, esta última varia em função do comportamento da mistura quando de sua compactação no molde metálico. São colocados no molde aproximadamente 1.265 g de mistura asfáltica, mantida previamente em estufa na temperatura de 145°C. Essa carga é aplicada no corpo de prova por meio de cabeçotes curvos padronizados. A temperatura do ensaio é de 60°C e a taxa de carregamento é de 50,8 mm/minuto, até o rompimento da amostra. Durante o ensaio, são registrados os valores de força aplicada e de deformação sofrida diametralmente pela amostra de mistura asfáltica. Após a aplicação da carga é denominada estabilidade Marshall (kgf ou N).

A Figura 5 apresenta os corpos de prova moldados segundo a metodologia Marshall.



Figura 5 – Corpos de prova moldados segundo a metodologia Marshall: a) corpos de prova da mistura de referência (REF), sem adição de cinza pesada e (b) corpos de prova com diferentes porcentagens de cinza pesada.



(a)

Fonte: Evelice Pavei (2014).

(b)

### 2.2.3 Ensaio de resistência à tração (RT)

Após a definição do teor ótimo de ligante foram moldados três corpos de prova para cada mistura estudada (sem e com adição de cinza pesada). Uma vez moldados, os mesmos foram submetidos ao ensaio de resistência à tração diametral, (DNIT 136/2010-ME).

BERNUCCI *et al.* (2008; p. 308) explicam que, “a configuração do ensaio de tração considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro [...]”.

Para iniciar o ensaio, os corpos de prova devem estar na temperatura especificada para o procedimento e em seguida posicionados na horizontal no prato inferior da prensa, onde é verificado a retineidade do corpo de prova. Aplica-se a carga progressivamente, com uma velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até que se dê a ruptura, por separação em duas metades do corpo de prova. Registra-se a carga de ruptura (F) no ensaio, e o valor da resistência à tração é calculado. Na Figura 6 é possível observar os corpos de prova cilíndricos condicionados à temperatura de ensaio e o ensaio de resistência à tração.

Figura 6 – (a) corpos de prova cilíndricos condicionados à temperatura de ensaio, (b) ensaio de resistência à tração.



(a)



(b)

Fonte: Evelice Pavei (2014).

#### 2.2.4 Análise dos resultados

Nesta etapa serão analisados os resultados referentes à dosagem das misturas, visando avaliar a influência da adição da cinza pesada nos parâmetros de densidade, estabilidade Marshall, teor ótimo de ligante e resistência à tração.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados e discutidos dizem respeito aos ensaios realizados para a avaliação do aproveitamento da cinza pesada na pavimentação, quando adicionada as misturas asfálticas.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

##### 3.1.1 Agregados

Os ensaios de caracterização dos agregados minerais são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Ensaio realizados para caracterização dos agregados

| Ensaio                   | Brita "3/4"  | Pedrisco | Areia artificial |
|--------------------------|--------------|----------|------------------|
| Densidade real média     | 3,02         | 2,94     | 2,88             |
| Densidade aparente média | 2,84         | ----     | ----             |
| Absorção média (%):      | 1,97         | ----     | ----             |
| Equivalente de areia (%) | ----         |          | 0,71             |
| Sanidade (%)             | 6,50         | ----     | ----             |
| Adesividade              | Satisfatório | ----     | ----             |

Fonte: Evelice Pavei (2014).

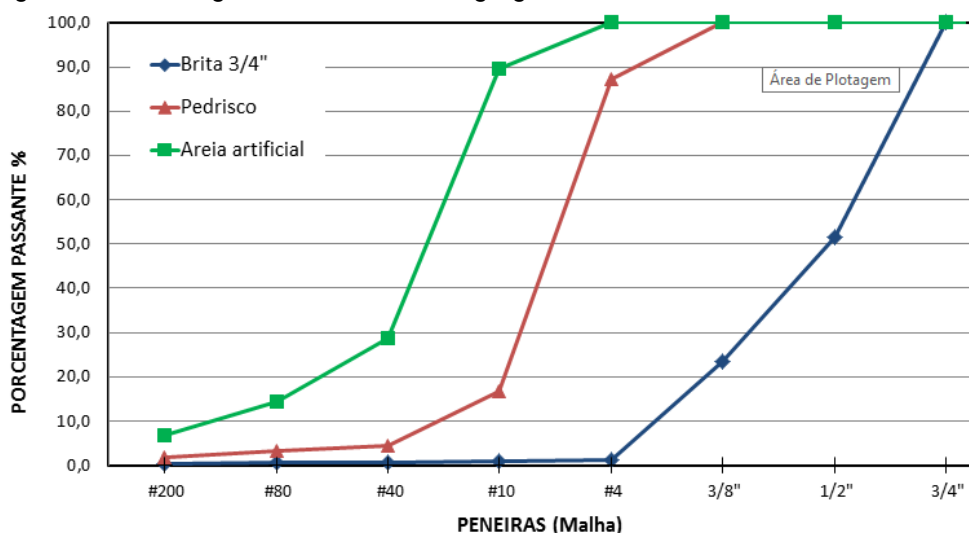
A Tabela 2 e a Figura 7 apresentam a granulometria de cada um dos agregados e as curvas granulométricas, utilizadas na composição da mistura de referência.

Tabela 2 – Granulometria dos agregados

| Peneiras |        | Porcentagem passante (%) |          |                  |
|----------|--------|--------------------------|----------|------------------|
| Malha    | mm     | Brita "3/4"              | Pedrisco | Areia artificial |
| 3/4"     | 19,100 | 100,0                    | 100,0    | 100,0            |
| 1/2"     | 12,700 | 51,5                     | 100,0    | 100,0            |
| 3/8"     | 9,500  | 23,5                     | 100,0    | 100,0            |
| #4       | 4,800  | 1,3                      | 87,3     | 100,0            |
| #10      | 2,000  | 0,8                      | 16,8     | 89,5             |
| #40      | 0,420  | 0,8                      | 4,5      | 28,8             |
| #80      | 0,180  | 0,7                      | 3,4      | 14,4             |
| #200     | 0,075  | 0,4                      | 1,9      | 6,7              |

Fonte: Evelice Pavei (2014).

Figura 7 – Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: Evelice Pavei (2014).

### 3.1.2 Ligante asfáltico

Os resultados obtidos na caracterização do ligante asfáltico (Tabela 3) enquadraram-se dentro das especificações vigentes no Brasil.

Tabela 3 – Especificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70

| Características                       | Unidades | Especificação   | Resultados | Método    |
|---------------------------------------|----------|-----------------|------------|-----------|
| Penetração (100g, 5s, 25°C), mín.     | 0,1mm    | 50 a 70         | 59         | NBR 6576  |
| Ponto de amolecimento                 | °C       | 46              | 47,5       | NBR 6560  |
| Viscosidade Saybolt-Furol             |          |                 |            |           |
| a 135°C, mín.                         |          | 141 mín.        | 158,5      |           |
| a 150 °C, mín.                        | s        | 50              | 84,5       | NBR 14950 |
| a 177°C, mín.                         |          | 30              | 37,2       |           |
| Viscosidade Brookfield                |          |                 |            |           |
| a 135°C, mín. SP 21, 20 rpm, mín.     |          | 274             | 305        |           |
| a 150 °C, mín.                        | cP       | 112             | 159        | NBR 15184 |
| a 177°C, SP 21.                       |          | 57              | 68         |           |
| Ductilidade a 25°C, mín.              | cm       | 600             | >100       | NBR 6293  |
| Índice de Suscetibilidade Térmica     |          | (-1,5) a (+0,7) | -1,5       |           |
| Ponto de Fulgor, mín.                 | °C       | 235             | >300       | NBR 11341 |
| Solubilidade em tricloroetileno, mín. | % massa  | 99,5            | 99,9       | NBR 14855 |

Fonte: REPAR/OT/QP - PETROBRAS (2014).

Tabela 4 – Temperaturas do ligante asfáltico utilizadas no projeto

| Temperaturas                   | Ótima | Faixa de Trabalho |   |       |
|--------------------------------|-------|-------------------|---|-------|
| Aquecimento do ligante (°C)    | 155,0 | 151,2             | - | 158,5 |
| Aquecimento dos agregados (°C) | 165,0 | 165,0             | - | 170,0 |
| Compactação da mistura (°C)    | 140,0 | 138,0             | - | 143,5 |

Fonte: Evelice Pavei (2014).

### 3.1.3 Cinza pesada

A análise granulométrica da cinza pesada pode ser observada na Tabela 5 e na Figura 8. Este ensaio mostrou que a cinza pesada é um material granular com distribuição granulométrica, do tamanho de areia e silte, com baixo teor de fração argila.

A presença significativa de partículas ocas nas cinzas pesadas provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (Capivari de Baixo – SC), resulta em uma baixa densidade real média para este agregado, sendo que, através da realização

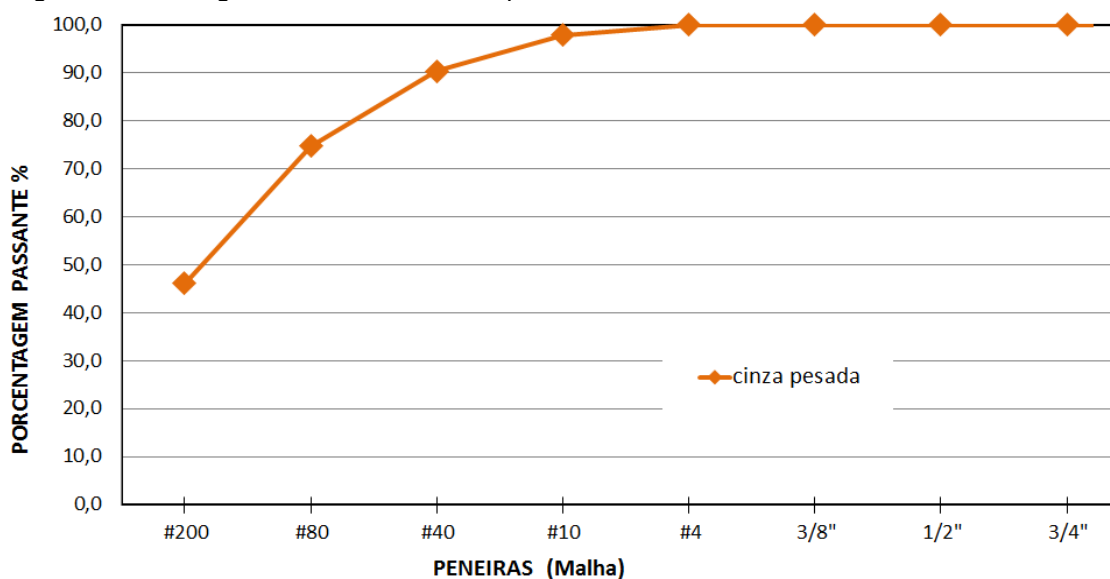
do ensaio pelo método do picnômetro, foi encontrado um valor de densidade em torno de 2,097 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 5 - Granulometria da cinza pesada

| Peneiras |        | Porcentagem  |
|----------|--------|--------------|
| Malha    | mm     | Passante (%) |
| 3/4"     | 19,100 | 100,0        |
| 1/2"     | 12,700 | 100,0        |
| 3/8"     | 9,500  | 100,0        |
| #4       | 4,800  | 100,0        |
| #10      | 2,000  | 97,9         |
| #40      | 0,420  | 90,4         |
| #80      | 0,180  | 74,7         |
| #200     | 0,075  | 46,1         |

Fonte: Evelice Pavei (2014).

Figura 8 – Curva granulométrica da cinza pesada



Fonte: Evelice Pavei (2014).

Os resultados da análise química, realizada mediante espectrometria de fluorescência de raios x e espectrometria de absorção atômica, mostram que a cinza pesada é composta em mais de 87% de vidros formados de sílica, alumina, responsável pela alta porosidade da cinza, e óxido de ferro III, com porcentagens menores de óxidos, como elemento alcalino-terroso, cálcio, magnésio, sulfatos e outras combinações. Presente, também, um alto teor de ferro e baixas

concentrações de metais alcalinos. A Tabela 6 apresenta os resultados da análise química da cinza pesada proveniente do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda.

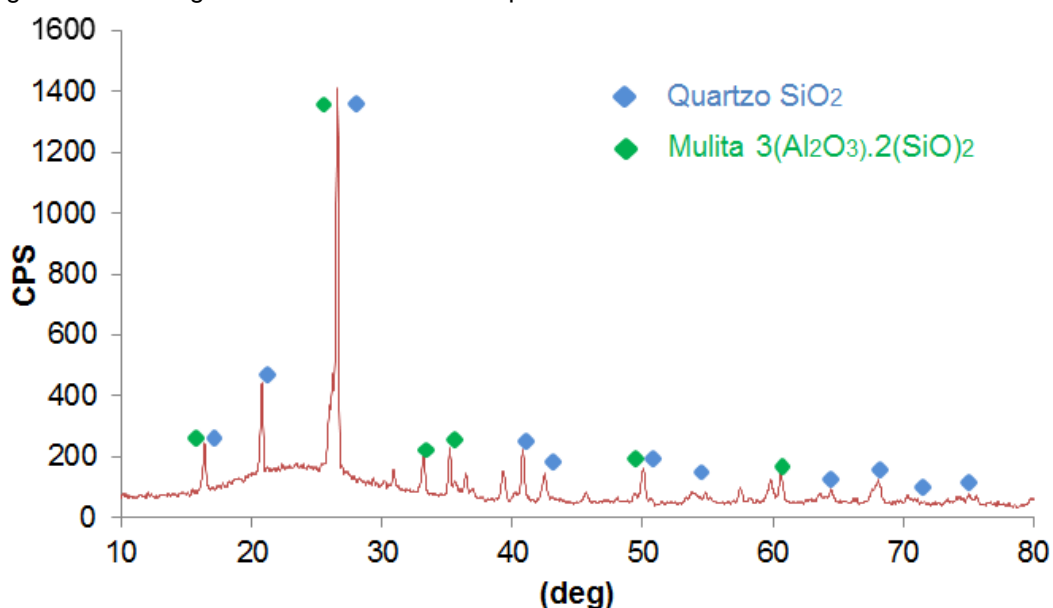
Tabela 6 – Composição química da cinza pesada.

| Elementos                      | Teor (%) | Elementos                      | Teor (%) |
|--------------------------------|----------|--------------------------------|----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 58,46    | MgO                            | 0,81     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 23,63    | Na <sub>2</sub> O              | 0,55     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,00     | BaO                            | 0,1      |
| K <sub>2</sub> O               | 2,83     | Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,09     |
| CaO                            | 1,17     | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,07     |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,01     | MnO                            | < 0,05   |
| Perda ao fogo                  |          | 6,06                           |          |

Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais – LDCM- SENAI SC (2014).

Os resultados obtidos com a cinza pesada, a partir de análise por difratometria de raios-X (DRX), indicaram a presença de fases cristalinas e amorfas. A fase cristalina é constituída por quartzo e mulita como minerais principais. A mulita tem sua origem decorrente das reações de multilização da caulinita e ilita-esmectita, associadas ao carvão, no processo de combustão. O quartzo é um mineral de origem detrítica, Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 9.

Figura 9 – Difratograma de raios-X da cinza pesada

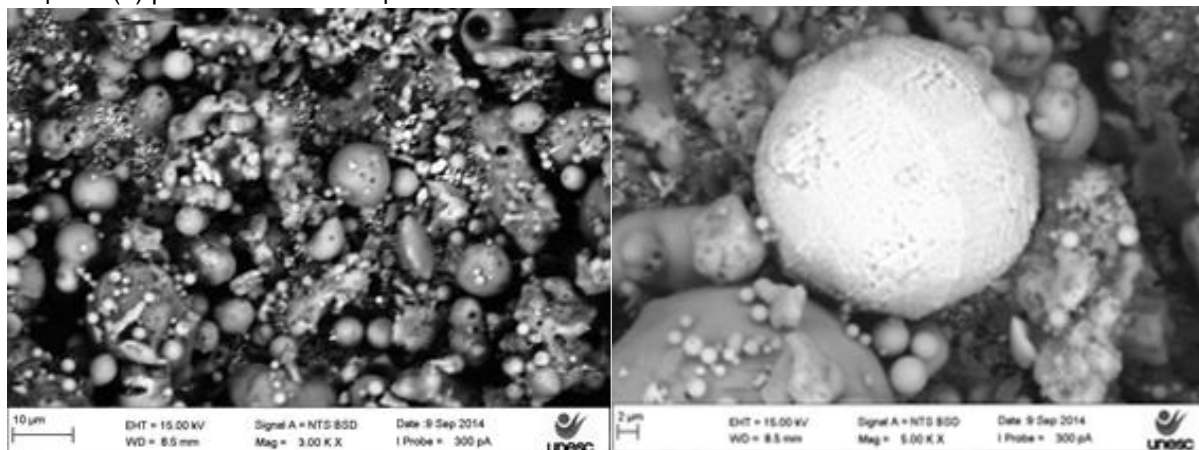


Fonte: CECAM – IDT (2014).

As partículas das cinzas pesadas, de uma forma geral, são formadas por aglomerados de grãos esféricos, muito ocos, por vezes preenchidos por grãos menores de forma também esférica ou irregular (Figura 10; Figura 11). “Esta morfologia aplica-se tanto para partículas não metálicas como para as metálicas. Quanto à coloração, varia de cinza escura a cinza clara para partículas não metálica e preta para as metálicas” (ROHDE, 2006, p. 83). O tamanho das esferas está na faixa de 2  $\mu\text{m}$  a 20  $\mu\text{m}$ , podendo formar aglomerados de até 0,5 cm. As principais estruturas observadas são apresentadas na Figura 12.

- Esfera densa, composta de sílica e alumina, alta concentração de oxigênio e ferro;
- Esferas com textura lunar. Trata-se de partículas compostas de alumina mostrando caráter esponjoso, e;
- A fase vítrea de natureza sílico-aluminosa é a mais importante constituída, principalmente, por grãos não opacos e forma arredondada. Sua formação está relacionada ao conteúdo de argilo-minerais e às condições de calcinação do carvão.

Figura 10 – Microfotografias da cinza pesada (MEV): (a) estruturas esféricas com superfícies lisas de 10  $\mu\text{m}$  e (b) partícula de ferro 2  $\mu\text{m}$ .

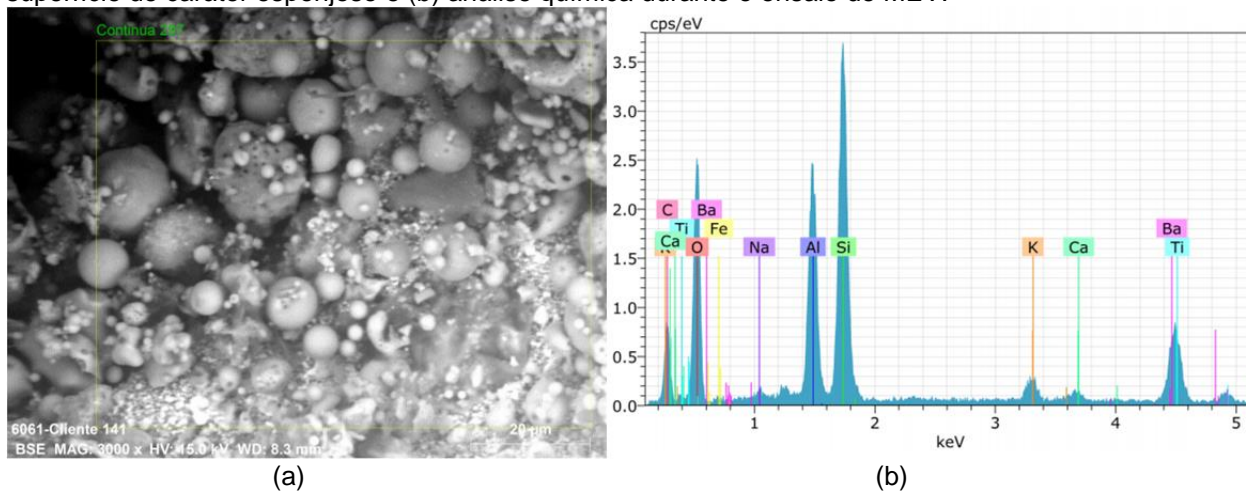


(a)

(b)

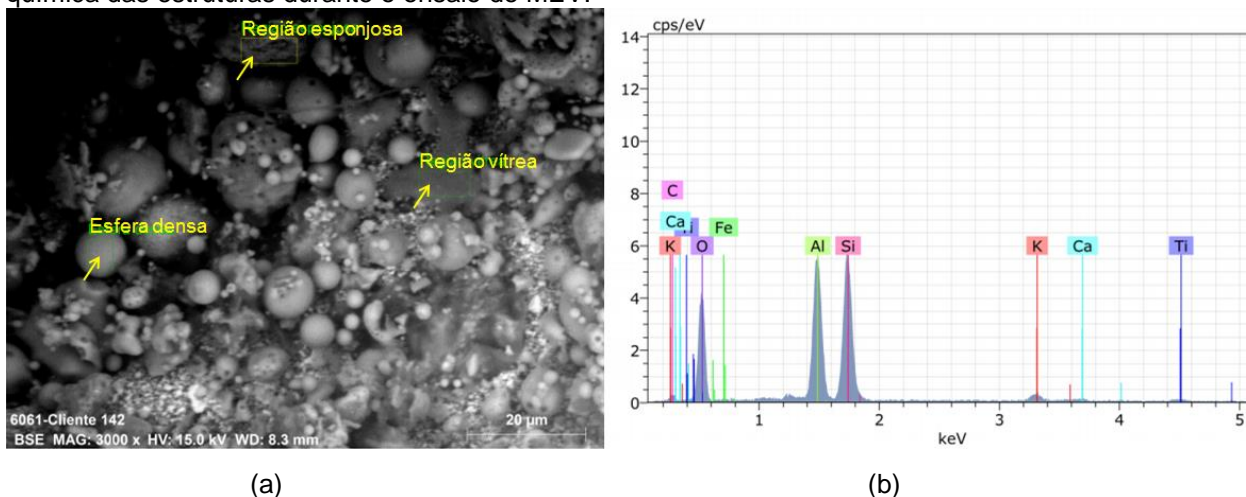
Fonte: Laboratório de Cerâmica Técnica – CerTec (2014).

Figura 11 – Microfotografias da cinza pesada 20  $\mu\text{m}$  (MEV): (a) aglomerados de grãos esféricos com superfície de caráter esponjoso e (b) análise química durante o ensaio de MEV.



Fonte: Laboratório de Cerâmica Técnica – CerTec. (2014).

Figura 12 – Microfotografias da cinza pesada 20  $\mu\text{m}$  (MEV): (a) estruturas observadas e (b) análise química das estruturas durante o ensaio de MEV.



Fonte: Laboratório de Cerâmica Técnica – CerTec. (2014).

## 3.2 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

### 3.2.1 Composição granulométrica

Para a composição granulométrica da mistura de referência foram utilizados os três agregados disponíveis, brita 3/4", pedrisco e areia artificial, nas porcentagens de 22%, 14% e 64% respectivamente. A granulometria resultante se enquadrou na faixa C do DEINFRA.

A Tabela 7 e a Figura 13 apresentam a composição granulométrica da mistura de referência.

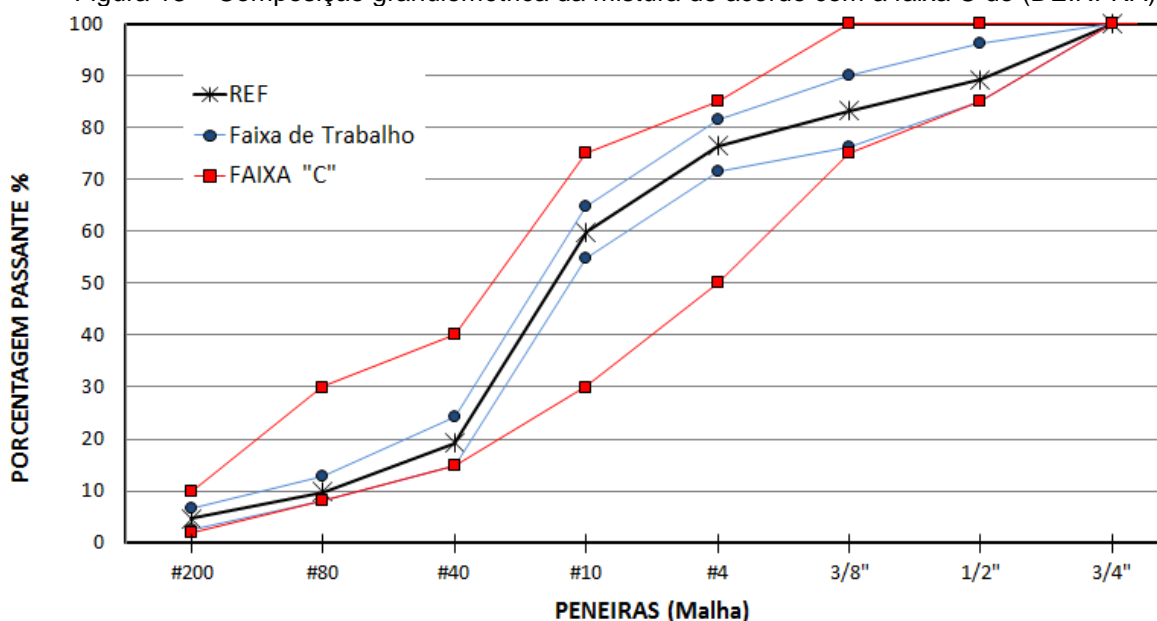


Tabela 7 – Composição granulométrica da mistura de referência (REF).

| Malha | mm    | Brita 3/4" |         | Pedrisco |         | Areia artificial |         | Projeto (% passante) |                   |      | Especificação |     |
|-------|-------|------------|---------|----------|---------|------------------|---------|----------------------|-------------------|------|---------------|-----|
|       |       | 22,0%      |         | 14,0%    |         | 64,0%            |         | Granulometria        | Faixa de Trabalho | CAUQ | Faixa "C"     |     |
|       |       | % Pass.    | % Comp. | % Pass.  | % Comp. | % Pass.          | % Comp. |                      |                   |      |               |     |
| 3/4"  | 19,1  | 100        | 22      | 100      | 14      | 100              | 64      | 100                  | 100               | 100  | 100           | 100 |
| 1/2"  | 12,7  | 51,46      | 11,32   | 100      | 14      | 100              | 64      | 89,32                | 85,0              | 96,3 | 85            | 100 |
| 3/8"  | 9,5   | 23,46      | 5,16    | 100      | 14      | 100              | 64      | 83,16                | 76,2              | 90,2 | 75            | 100 |
| #4    | 4,8   | 1,29       | 0,28    | 87,31    | 12,22   | 100              | 64      | 76,51                | 71,5              | 81,5 | 50            | 85  |
| #10   | 2     | 0,80       | 0,18    | 16,82    | 2,35    | 89,54            | 57,31   | 59,84                | 54,8              | 64,8 | 30            | 75  |
| #40   | 0,42  | 0,76       | 0,17    | 4,53     | 0,63    | 28,79            | 18,43   | 19,23                | 15                | 24,2 | 15            | 40  |
| #80   | 0,18  | 0,68       | 0,15    | 3,40     | 0,48    | 14,35            | 9,18    | 9,81                 | 8                 | 12,8 | 8             | 30  |
| #200  | 0,075 | 0,45       | 0,10    | 1,94     | 0,27    | 6,72             | 4,30    | 4,67                 | 2,7               | 6,7  | 2             | 10  |

Fonte: Evelice Pavei (2014).

Figura 13 – Composição granulométrica da mistura de acordo com a faixa C do (DEINFRA).



Fonte: Evelice Pavei (2014).

Como se pode observar na Figura 13, a granulometria resultante apresenta uma deficiência de material fino a partir da peneira #40. Espera-se que a adição de cinza pesada, que é um material mais fino, ajude a compensar esta deficiência.

Para realizar a composição granulométrica das misturas com cinza pesada foi realizada a adição de cinza nas porcentagens de 2, 4, 8 e 12% à mistura de referência. Esta adição permitiu incrementar a porcentagem de material fino da composição a partir da peneira #40. A Tabela 8 e Tabela 9 apresentam a composição granulométrica das misturas sem e com a adição de cinza pesada. A composição granulométrica com adição de cinza pesada é mostrada na Figura 14.

Tabela 8 – Composição granulométrica das misturas sem e com adição de cinza pesada.

| Mistura | Brita "3/4" | Pedrisco | Areia artificial | Cinza pesada |
|---------|-------------|----------|------------------|--------------|
| REF     | 22%         | 14%      | 64%              | 0%           |
| CP-2    | 22%         | 14%      | 62%              | 2%           |
| CP-4    | 22%         | 14%      | 60%              | 4%           |
| CP-8    | 22%         | 14%      | 56%              | 8%           |
| CP-12   | 22%         | 14%      | 52%              | 12%          |

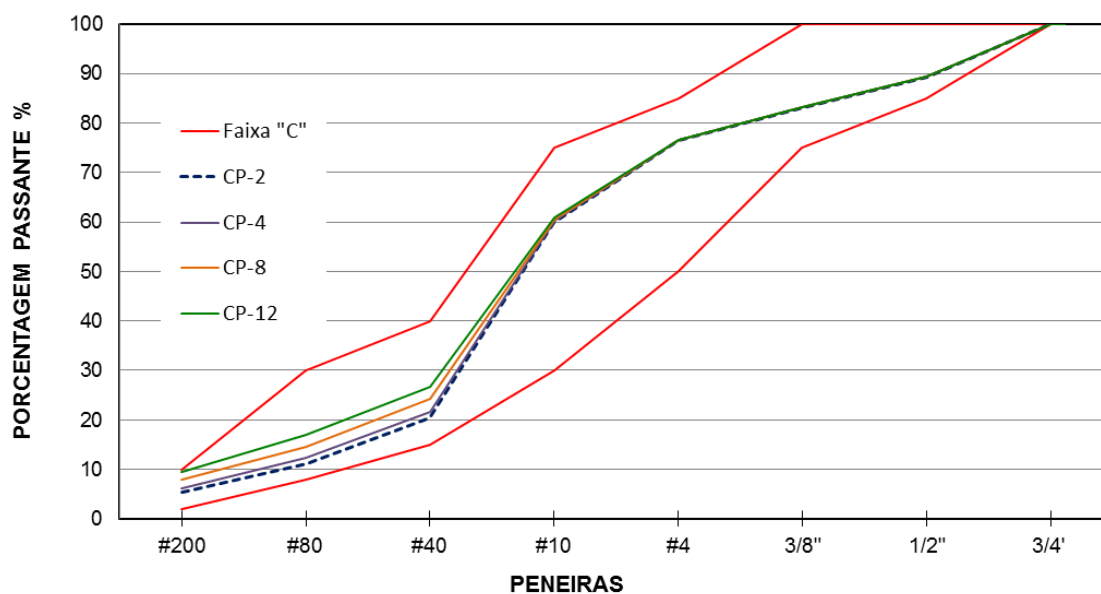
Fonte: Evelice Pavei (2014).

Tabela 9 – Composição granulométrica das misturas sem e com adição de cinza pesada.

| Peneiras |       | REF   | CP-2  | CP-4  | CP-8  | CP-12 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Malha    | mm    |       |       |       |       |       |
| 3/4"     | 19,1  | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   |
| 1/2"     | 12,7  | 89,32 | 89,32 | 89,32 | 89,32 | 89,32 |
| 3/8"     | 9,5   | 83,16 | 83,16 | 83,16 | 83,16 | 83,16 |
| #4       | 4,8   | 76,51 | 76,51 | 76,51 | 76,51 | 76,51 |
| #10      | 2     | 59,84 | 60,00 | 60,50 | 60,50 | 60,84 |
| #40      | 0,42  | 19,23 | 20,46 | 24,16 | 24,16 | 26,62 |
| #80      | 0,18  | 9,81  | 11,02 | 14,64 | 14,64 | 17,05 |
| #200     | 0,075 | 4,67  | 5,46  | 7,82  | 7,82  | 9,40  |

Fonte: Evelice Pavei (2014).

Figura 14 – Curvas granulométricas das misturas com adição de cinza pesada.



Fonte: Evelice Pavei (2014).

O incremento do material fino a partir da peneira #40 devido à adição de cinza permite que a mistura asfáltica possua um maior número de pontos de contato intergranular. O maior contato intergranular propiciaria uma maior resistência mecânica das misturas com adição de cinza, em comparação com a mistura sem cinza. No entanto, isso não significa que quanto maior a porcentagem de adição maior será a resistência à tração, pois existe uma quantidade a partir da qual, a adição de cinza, causará uma diminuição da resistência mecânica devido à perda de contato intergranular dos grãos maiores, causada pelo excesso de material fino.

### 3.2.2 Dosagem Marshall

Os resultados da dosagem Marshall para a mistura de referência e para as misturas com adição de cinza são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros Marshall para todas as misturas.

| Misturas                                | Teor de asfalto 5,6 (%) |       |        |        |        | Especificações     |
|---|-------------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------|
|   | REF                     | CP-2  | CP-4   | CP-8   | CP-12  |                    |
| Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,543                   | 2,449 | 2,419  | 2,392  | 2,345  |                    |
| Volume de vazios (Vv), %                | 4,14                    | 7,54  | 8,34   | 8,69   | 9,87   | Mín. 3<br>Máx. 5   |
| Relação Betume Vazios (RBV), %          | 77,07                   | 63,77 | 61,05  | 59,82  | 56,29  | Mín. 75<br>Máx. 85 |
| Vazios Agregado Mineral (VAM), %        | 18,06                   | 20,77 | 21,41  | 21,62  | 22,54  |                    |
| Volume de betume (VB), %                | 13,92                   | 13,23 | 13,07  | 12,93  | 12,67  |                    |
| Estabilidade Marshall (Kgf) 75 golpes   | 1498,4                  | 1498  | 1512,4 | 1621,1 | 1406,9 | Mín. 500           |

Fonte: Evelice Pavei (2014).

A Tabela 10 mostra que os valores de densidade aparente das misturas asfálticas diminuem com o aumento da porcentagem de cinza. Isso porque a cinza pesada, com densidade de 2,097 g/cm<sup>3</sup>, é um material mais leve do que os agregados de origem basáltica utilizados na mistura de referência.

O volume de vazios aumenta junto com o incremento da cinza. A mistura com adição de 12% de cinza, por exemplo, chega a ter um volume de vazios que é duas vezes maior ao da mistura de referência. No entanto esses resultados não refletem o comportamento real da mistura, visto que o procedimento de cálculo da densidade máxima teórica, item 2.2.2 (DMT - parâmetro necessário para o cálculo do volume

de vazios) se realiza mediante a ponderação matemática das massas específicas dos agregados. O cálculo do DMT considera que todos os vazios dos agregados sejam preenchidos pelo ligante durante a usinagem das misturas asfálticas. Neste sentido, o cálculo da densidade máxima teórica das misturas com cinza é inadequada, pois como se viu nas Figuras 10,11 e 12 as partículas de cinza pesada possuem vazios micrométricos que, dificilmente, são preenchidos pelo ligante.

Para a estimação da DMT nas misturas com cinza o mais apropriado seria a realização do ensaio RICE, o qual considera a massa específica dos agregados com os vazios superficiais envolvidos pelo ligante.

A relação betume vazios (RBV), da mistura de referência atendeu os critérios da Norma (DNER-ME 043/95), diferente das misturas com adição de cinza, as quais apresentaram valores inferiores aos critérios estabelecidos. Estes resultados não estariam certos, pois para o cálculo da relação betume vazios (RBV), é utilizado o parâmetro de volume de vazios das misturas asfálticas.

Os valores de estabilidade Marshall foram satisfatórios e atenderam os critérios estabelecidos. Apresentando todas as misturas valores similares.

### 3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

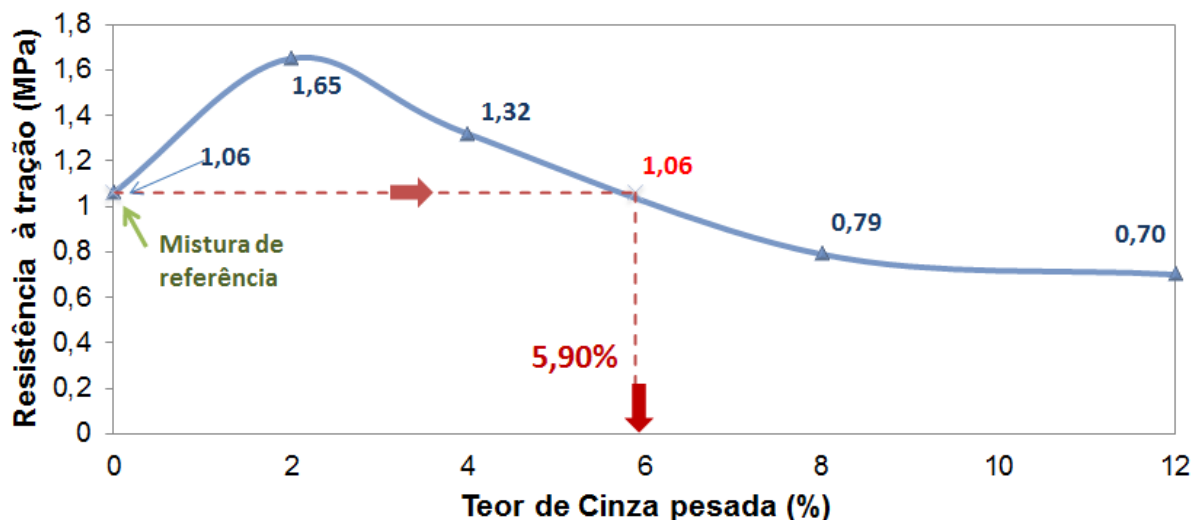
Os resultados do ensaio de resistência à tração das misturas sem e com adição de cinza pesada são mostrados na Tabela 11. A influência do teor de cinza pesada na resistência à tração das misturas asfálticas são mostrados na Figura 15.

Tabela 11 – Resistências à tração das misturas asfálticas sem e com adição de cinza pesada.

| Cinza pesada (%)           | 0    | 2    | 4    | 8    | 12  |
|----------------------------|------|------|------|------|-----|
| Resistência à Tração (MPa) | 1,06 | 1,65 | 1,32 | 0,79 | 0,7 |

Fonte: Evelice Pavei (2014).

Figura 15 – Influência do teor de cinza pesada na resistência à tração das misturas asfálticas.



Fonte: Evelice Pavei (2014).

A Figura 15 mostra que a resistência à tração das misturas asfálticas é incrementada com o aumento do teor de cinza pesada. Este aumento, porém, atinge o seu valor máximo (1,65 MPa) para uma porcentagem de 2% de cinza. A partir desse valor, o incremento de cinza causa uma diminuição da resistência à tração. Para uma porcentagem de, aproximadamente, 5,9%, a resistência à tração da mistura com adição de cinza coincide com a mistura de referência, o incremento do teor de cinza, a partir desse valor diminui a resistência à tração das misturas com cinza em relação à mistura de referência.

Os resultados obtidos permitiram identificar que a adição de 2% de cinza seria a porcentagem ótima que pode ser adicionada nas misturas asfálticas para atingir o máximo valor de resistência à tração das mesmas. Da mesma forma a máxima porcentagem de cinza que pode ser adicionada nas misturas asfálticas sem que a mesma apresente valores de resistência à tração, menores aos da mistura de referência é de 5,9%.

#### 4. CONCLUSÕES

A adição de cinza pesada nas misturas asfálticas, para camada de revestimento, incrementou a resistência à tração das mesmas.

O incremento da resistência à tração pode estar relacionado com o aumento de pontos de contato intergranular nas misturas asfálticas, decorrente da modificação

da composição granulométrica, por ser um material mais fino a cinza pesada preenche os vazios e a deficiência de finos das misturas a partir da peneira #40.

Neste estudo foi avaliado a resistência à tração das misturas asfálticas com o mesmo teor de ligante, ou seja, 5,6%. No entanto, como as misturas com adição de cinza pesada apresentam granulometria um pouco mais fina, é esperado que o teor ótimo de ligante para estas misturas seja superior a 5,6%. Possivelmente, a dosagem de misturas com adição de cinza com um teor ótimo de ligante superior a 5,6% resulte em misturas com resistência à tração semelhante, aos encontrados nesta pesquisa. A cinza pesada é um material fino com presença de vazios micrométricos as quais dificilmente serão preenchidos com ligante. O cálculo dos parâmetros volumétricos das misturas com cinza pesada deve levar em consideração este fato. A produção de misturas com maior resistência à tração permitiria o dimensionamento de pavimentos flexíveis mais duráveis e, inclusive, com menor espessura.

Quanto ao requisito de estabilidade, todas as misturas dosadas atendem os critérios estabelecidos. Com relação aos requisitos de RBV e volume de vazios, os resultados não se mostraram satisfatórios devido aos procedimentos de cálculo desses parâmetros.

A porcentagem ótima de cinza necessária para atingir o máximo valor de resistência à tração é de 2%. Se essa porcentagem fosse utilizada para a construção de uma rodovia de 7,20 m de largura e com um revestimento asfáltico de 10 cm de espessura; o consumo de cinza seria de aproximadamente 34,56 t por quilômetro.

Se o consumo de cinza fosse de 5,9% (porcentagem máxima de adição sem risco de perda da resistência), poderiam ser utilizados até, aproximadamente 102 t de cinza por quilômetro.

A adição de cinza pesada nas misturas asfálticas, permitiria colaborar com a gestão ambiental deste resíduo, dando uma finalidade útil ao mesmo. O uso da cinza em substituição ao agregado mineral permitiria a economia de agregados pétreos naturais e uma menor agressão ao meio ambiente.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Dosagem Marshall para estimar o teor ótimo de ligante das misturas com adição de cinza pesada;

- Verificar a resistência dessas misturas;
- Fazer a dosagem de misturas com os mesmos teores de cinza, utilizando agregados de origem diferentes, para a verificação da influência dos mesmos na resistência à tração;
- Estudar a influência da adição de cinza pesada em outras camadas da estrutura do pavimento, e;
- Fazer uma análise de custos para verificar a viabilidade econômica da construção dos revestimentos com adição de cinza pesada.

## 5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6293/2001**: Materiais betuminosos - Determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR 6560/2008**: Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 6576/2007**: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_. **NBR 11341/2014**: Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 14950/2003**: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 14855/2002**: Materiais betuminosos - Determinação da solubilidade em tricloroetileno. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 115184/2005**: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2005.

BALDO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BERNUCCI L. B., MOTTA L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B., **Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro. Petrobras. Abeda, 2006. 501p.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 043/95**: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 054/97**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 078/94**: Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 081/98**: Agregados - determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 083/98**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 084/95**: Agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 085/94**: Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 089/94**: Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 093/94**: Solos – determinação de densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 204/95**: Cimentos asfálticos de petróleo. Rio de Janeiro, 1995.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 136/2010-ME**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

SILVA DA, A. J. **Estudo da viabilidade de utilização da cinza pesada em adição ao concreto compactado com rolo (ccr) destinado a camada de base de pavimentos híbridos**. 2006. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, Florianópolis.

ROHDE, G. M. **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil**: aspectos técnicos e ambientais. 1. Ed. Porto Alegre-RS: CIENTEC, 2006. 202p.

WEBER, R. C. **Cinzas pesadas geradas na região carbonífera do Rio grande do Sul**: uso em misturas asfálticas a quente. 2010. 79f. Trabalho de Diplomação para o título de Engenheiro Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS. Porto Alegre.