

## VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE CINZA PESADA

Letícia Tramontin Martins (1), Joe Arnaldo Villena Del Carpio (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) [leticia.tramontin@hotmail.com](mailto:leticia.tramontin@hotmail.com), (2) [joevillena@gmail.com](mailto:joevillena@gmail.com)

### RESUMO

A cinza pesada, também chamada de cinza de fundo, é proveniente das usinas termelétricas por meio da queima do carvão fóssil pulverizado nas caldeiras para geração de energia. As mesmas são descartadas e depositadas em bacias de sedimentação localizadas aos arredores do complexo termelétrico. Não obstante, a cinza pesada em geral pode ser classificada como resíduo sólido Classe II - A, ou seja, um material não perigoso, porém, não inerte, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 1004: 2004 – Classificação de Resíduos Sólidos. Por estes fatores é necessário o estudo ambiental prévio da cinza pesada em integração com a massa asfáltica utilizada, para que essa associação (cinza pesada/mistura asfáltica) não apresente problemas ambientais quando submetida a situações similares às condições naturais em que seria empregada, buscando conciliar o reaproveitamento do rejeito inutilizado e exposto a risco ambiental com a produção de um revestimento asfáltico mais resistente e durável, trazendo benefícios à sociedade, sem gerar impactos ambientais. No presente estudo, foi avaliada a resistência à tração indireta e o potencial poluente de misturas asfálticas de granulometria densa com adição de diversas porcentagens de cinza pesada. Os resultados dos ensaios mostraram que a mistura asfáltica, com adição de cinza pesada, tem uma elevada resistência à tração, no valor de 1,86 Mpa, o qual é superior ao valor mínimo exigido para este tipo de material. A avaliação ambiental mostrou que os elementos químicos, considerados tóxicos, presentes na cinza pesada, quando envoltos pelo ligante asfáltico, não solubilizam no meio aquoso. Resultando, assim, em um material não perigoso e também inerte, o qual não irá causar contaminação do meio ou do lençol freático. Deste modo a cinza se mostra viável, técnica e ambientalmente, para ser usada nas camadas de revestimento de pavimentos asfálticos, gerando benefícios relativos à redução da demanda por materiais primários, redução de custos e dos problemas ambientais associados com a estocagem e disposição da cinza pesada nas bacias de sedimentação.

*Palavras Chaves: Cinza Pesada, Resistência à Tração, Mistura Asfáltica, Meio Ambiente*

## 1. INTRODUÇÃO

As propriedades cimentantes e pozolânicas das cinzas provenientes da queima de carvão fóssil já são há muito tempo conhecidas, e por tal motivo, o emprego das mesmas vem sendo aplicado na área da construção civil, com qualidade e benefício ao meio ambiente (LEANDRO, 2005). As cinzas são produzidas nas usinas termelétricas por meio da queima do carvão fóssil pulverizado nas caldeiras para geração de energia. Essa queima gera três tipos de resíduos tóxicos. ROHDE (2006) classifica esses três tipos de resíduos como escória, que é aquela de granulometria grosseira e apresenta blocos sintetizados com alto teor de carbono não queimado (10 a 20%); cinza leve, também chamada de cinza volante, a qual é constituída por partículas extremamente finas e leves; e a cinza pesada, também denominada cinza de fundo, que possui granulometria mais grossa que a cinza leve e teor de carbono não queimado entre 5 e 10%.

SILVA (2006) destaca que a cinza leve ou volante é toda consumida pelas indústrias de cimentos. Já a cinza pesada ou de fundo é depositada em bacias de sedimentação, localizadas aos arredores do complexo termelétrico. ROCHA (2001) cita que a produção de cinza pesada no Brasil está concentrada na região sul, sobretudo nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e que somente em Santa Catarina a produção anual de cinzas alcança 818.000 toneladas, sendo que 30% desse total, aproximadamente 245.400 t, é correspondente a cinza pesada. Este material é quase todo descartado a céu aberto nas bacias de sedimentação. Não obstante, a demanda deste sub-produto é muito maior que o seu consumo. Deste modo, é importante proporcionar um destino adequado a ele, buscando o desenvolvimento sustentável.

Aliado a isso a norma brasileira ABNT NBR 10004: 2004 – Classificação de Resíduos Sólidos, indica as concentrações máximas de determinados elementos químicos dentro dos rejeitos e resíduos como a cinza pesada. Com isso, os resíduos podem ser classificados como perigosos: aqueles que em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, entre outras, causam poluição evidente, de forma a não ser possível filtrá-los ou removê-los do meio ao

qual são expostos, causando, assim, riscos à saúde pública e ao meio ambiente; não inertes: aqueles que, por terem propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, podem causar poluição, porém são passíveis de remoção ou filtragem.

Segundo SANTAREM *et al* (2015) a cinza pesada em geral pode ser classificada como um resíduo sólido Classe II A, ou seja, um material não perigoso, porém não inerte, baseando-se nos limites preconizados na ABNT NBR 10004/2004 e em ensaios de lixiviação e solubilização, realizados com diversas cinzas pesadas provenientes de diferentes termelétricas do país. Contudo, DEPOI (2008) ressalta que a concentração de elementos na cinza é extremamente variável e depende da composição do carvão que lhe deu origem, das condições e eficiência da sua combustão e dos dispositivos do controle de emissão. Da mesma forma, a composição química do carvão também é variável, dependendo de como este se formou e de seus teores de enxofre e matéria inorgânica, os quais implicam diretamente na sua qualidade, no seu poder de queima e na periculosidade dos resíduos gerados.

Considerando esses fatores, é necessário o estudo ambiental prévio da cinza pesada em integração com a massa asfáltica utilizada, para que esta associação (cinza pesada/mistura asfáltica) não apresente problemas ambientais quando submetida a situações similares as condições naturais em que seriam empregadas, evitando, assim, que os elementos de alta toxicidade da mesma entrem em contato com o lençol freático ou possam contaminar fontes de abastecimento de água.

No mesmo âmbito, considerando a crescente preocupação da sociedade com relação às questões ambientais, busca-se, neste trabalho, conciliar o reaproveitamento do rejeito inutilizado e exposto a risco ambiental com a produção de um revestimento asfáltico mais resistente e durável, trazendo benefícios à sociedade, sem gerar impactos ambientais. Porém, os materiais tradicionais utilizados na mistura asfáltica restringem-se, majoritariamente, a agregados naturais ou britados. Então, é necessário o aprimoramento das técnicas de produção, para ter melhoria na qualidade associada a um bom desempenho técnico e ambiental do revestimento asfáltico com adição de cinza pesada.

Contudo, grande parte dos estudos de aproveitamento da cinza pesada foi voltada para os processos de estabilização de solos, bases e sub-bases de rodovias, tanto para pavimento flexível como rígido, além do uso em aterros industriais, artefatos de concreto e estabilização de solos em geral. Como exemplo, pode-se citar o estudo de SILVA (2006), sobre a adição de cinza pesada em substituição da areia natural, no comportamento mecânico do Concreto Compactado com Rolo Vibratório (CCR), com a perspectiva de seu emprego em camadas de base de pavimentos. O mesmo atesta que a adição da cinza pesada aumenta a resistência à compressão simples de todas as misturas, mesmo quando a cinza pesada substituiu 100% da areia natural.

Já PAVEI (2014) buscou adicionar cinza pesada à mistura asfáltica e comprovou que a resistência à tração das misturas asfálticas é incrementada com o aumento do teor da mesma. Porém, este aumento se restringe a uma porcentagem em torno de 2 a 5,9% de cinza pesada adicionada e distribuída por toda a faixa granulométrica dos agregados. A melhoria obtida, neste caso, deve-se exclusivamente ao refinamento da curva granulométrica que o autor utilizou. Neste sentido, estudos mais abrangentes são necessários para determinar a efetividade da adição de cinza pesada na mistura, independentemente da curva granulométrica adotada.

## **2. OBJETIVO GERAL**

Analisar a viabilidade técnica e ambiental de misturas asfálticas com o uso de cinza pesada.

## **3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Dosar uma mistura asfáltica pela metodologia Marshall cuja granulometria se encaixe nos valores médios da “Faixa C” do Departamento Estadual de Infraestrutura– DEINFRA; esta mistura será utilizada como referência durante o presente estudo.

- Elaborar misturas asfálticas com adição de 10, 15, 25 e 50% de cinza pesada, em substituição da fração granulométrica, a partir da peneira #40, da mistura de referência.
- Determinar a resistência à tração por compressão diametral da mistura asfáltica de referência e das misturas asfálticas com adição de cinza pesada.
- Determinar o teor de elementos potencialmente perigosos ao meio ambiente, da mistura com adição de cinza pesada por meio do ensaio de solubilização.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

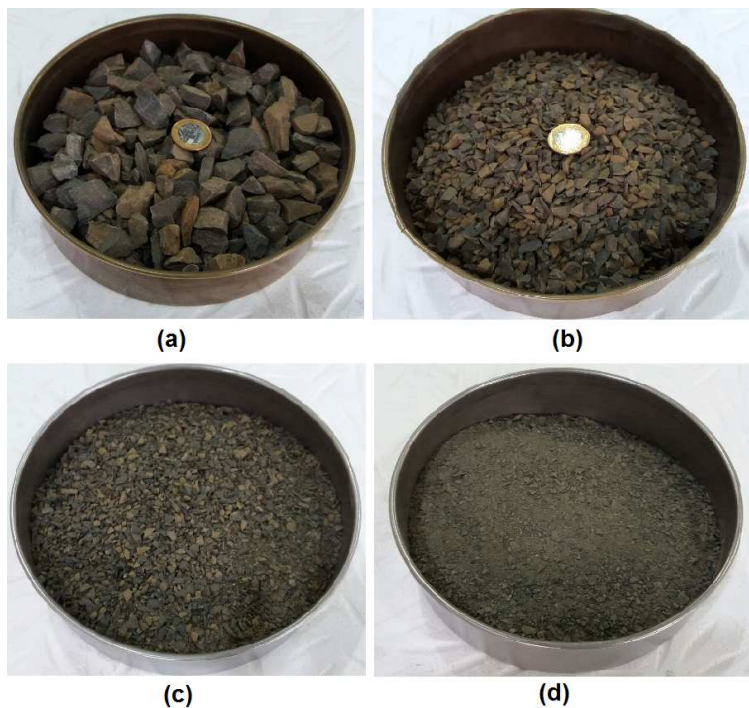
### **4.1 MATERIAIS**

Os materiais deste estudo possuem a mesma origem e fornecedor que os materiais utilizados no artigo de PAVEI (2014).

#### **4.1.1 Agregados**

Os agregados utilizados são provenientes da britagem de minerais basálticos, em Rio Cedro Médio - Nova Veneza/SC, fornecidos pela Nunes Britadora. A Figura 01 apresenta os agregados utilizados: brita 3/4", pedrisco, pó de pedra e areia artificial.

Figura 01 - Agregados Utilizados: (a) Brita 3/4"; (b) Pedrisco;  
(c) Pó de Pedra; (d) Areia Artificial



Fonte: Do autor (2015)

#### 4.1.2 Ligante Asfáltico

A Figura 02 apresenta o ligante asfáltico utilizado, fornecido pela Construtora Fernandes LTDA - Confer.

Figura 02 - Ligante Asfáltico (CAP 50/70)



Fonte: Do autor (2015)

### 4.1.3 Cinza Pesada

A cinza pesada mostrada na Figura 03 foi coletada por PAVEI (2014) no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, na cidade de Capivari de Baixo/SC, e trazida ao laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMS - IPARQUE).

Figura 03 - Cinza Pesada: (a) Retida na Peneira #10; (b) Retida na Peneira #40; (c) Retida na Peneira #80; (d) Retida na Peneira #200; (e) Retida ao Fundo



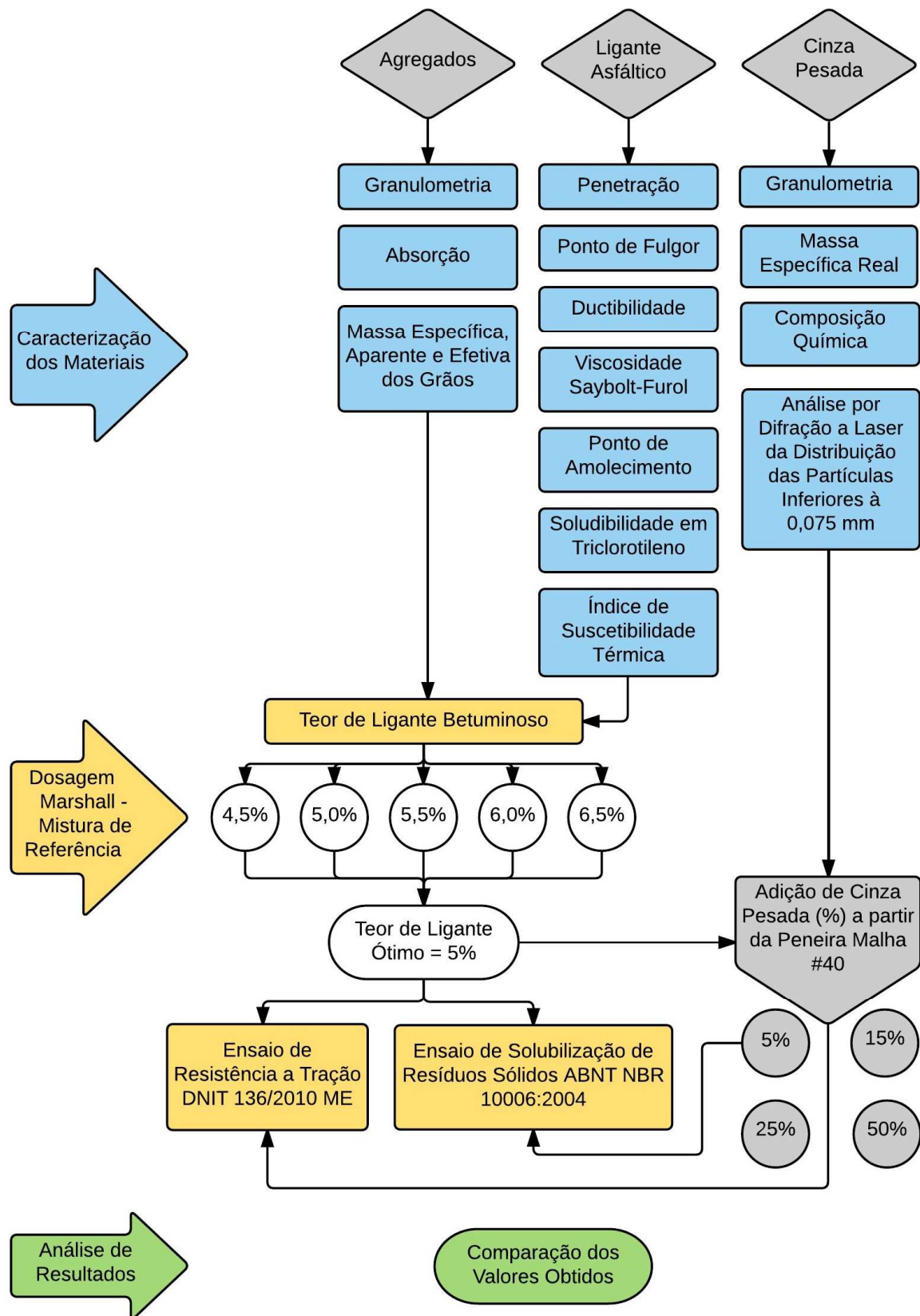
Fonte: Do autor (2015)

## 4.2 METODOLOGIA

Os procedimentos experimentais tiveram por finalidade analisar as características de uma mistura asfáltica, com ligante convencional, CAP 50/70, quando a ela são adicionadas porcentagens de cinza pesada, provenientes da queima do carvão fóssil, com intuito de ter-se melhora voltada especificamente para a resistência à tração, do material asfáltico betuminoso.

As etapas que compõem a pesquisa podem ser observadas na Figura 04, onde após determinado o teor de betume ótimo, por meio do ensaio Marshall, foram adicionadas variadas porcentagens de cinza pesada à mistura, para posterior ensaio de Resistência à Tração e ensaio de Solubilização de Resíduos Sólidos.

Figura 04 – Fluxograma dos Procedimentos Realizados



Fonte: Do autor (2015)



## 4.2.1 Caracterização dos Materiais

### 4.2.1.1 Agregados

Os ensaios para caracterizar os agregados naturais 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). Os ensaios realizados foram:

- Granulometria (DNER-ME 083/98);
- Absorção (DNER-ME 081/98);
- Massa Específica Real, Aparente e Efetiva dos Grãos (DNER-ME 084/95 e DNER-ME 085/94).

### 4.2.1.2 Ligante Asfáltico

A especificação das características do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) é proveniente da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) – PETROBRAS (2014). As características do ligante são mostradas na Tabela 01.

Tabela 01 - Especificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70

Características	Unidades	Especificação	Resultados	Método
Penetração (100g, 5s, 25°C), mín.	0,1 mm	50 a 70	59	NBR 6576
Ponto de Amolecimento	°C	46	47,5	NBR 6560
Viscosidade Saybolt - Furol:				
a 135°C, mín.		146 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	
150°C, mín.	cP	112	159	NBR 15184
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.	% em massa	99,5	99,9	NBR 14855

Fonte: REPAR/OT/QP – PETROBRAS (2014)

#### 4.2.1.3 Cinza Pesada

Os ensaios para caracterizar a cinza pesada foram realizados no LMSA (IDT - UNESC). Os ensaios realizados foram:

- Granulometria (DNER-ME 083/98);
- Massa Específica Real (DNER-ME 093/94);

Foi realizada, também, a análise granulométrica a laser para determinação das partículas menores, inferiores a 0,075 mm, correspondentes ao material passante na peneira de malha #200. A difração a laser (difração da luz) baseia-se no princípio de que, quanto menor o tamanho da partícula, maior o ângulo de difração de um feixe luminoso que atravessa uma população de partículas (INSTRUTEC). O

procedimento foi executado no Laboratório de Química do Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT), da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). O mesmo pode ser denominado: Análise por Difração a Laser da Distribuição do Tamanho de Partículas Inferiores a 0,075 mm.

A cinza pesada deste artigo foi utilizada nos estudos de PAVEI (2014), que fez a caracterização química da mesma. A composição química dos elementos da cinza pesada é mostrada na Tabela 02.

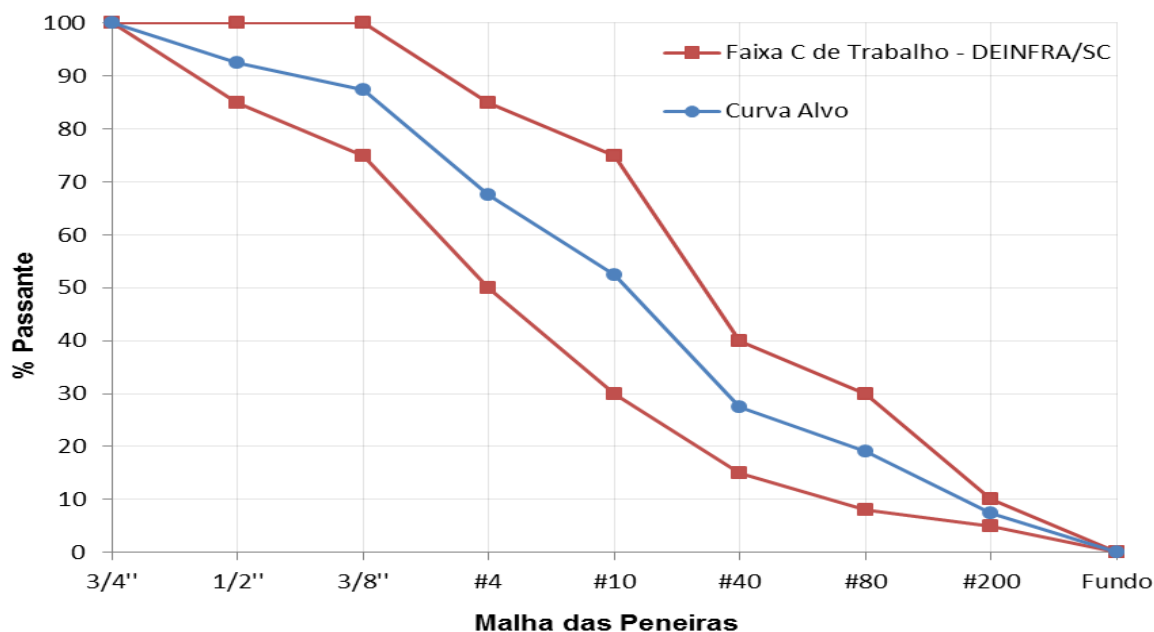
Elementos	Teor (%)	Elementos	Teor(%)
SiO <sub>2</sub>	58,46	MgO	0,81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,63	Na <sub>2</sub> O	0,55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	BaO	0,1
K <sub>2</sub> O	2,83	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09
CaO	1,17	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07
TiO <sub>2</sub>	1,01	MnO	<0,05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

Fonte: PAVEI (2014)

#### 4.2.2 Composição Granulométrica

A curva granulométrica, adotada para todas as misturas deste estudo, enquadra-se exatamente nos pontos médios de cada abertura de peneira da Faixa "C" de Especificação do Departamento Estadual de Infraestrutura (DEINFRA), usada para pistas de rolamento com concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ). Neste sentido foi criada uma curva artificial na mediana dos pontos, proposta segundo a Figura 05 e a Tabela 03, sendo a porcentagem passante da curva alvo, aquela referente a mediana enquadrada na faixa C de especificação do DEINFRA.

Figura 05 - Curva Granulométrica das Misturas Asfálticas



Fonte: Do autor (2015)

Tabela 03 – Composição Granulométrica dos Agregados (% Passante)

Peneiras		Faixa "C"		Curva Alvo
Malha	mm	Mín	Máx	
3/4"	19,10	100	100	100
1/2"	12,7	85	100	92,5
3/8"	9,50	75	100	87,5
#4	4,8	50	85	67,5
#10	2	30	75	52,5
#40	0,42	15	40	27,5
#80	0,18	8	30	19
#200	0,075	5	10	7,5

Fonte: Do autor (2015)

Os agregados, posteriormente à definição da curva granulométrica, foram peneirados e pesados de forma que a mistura se encaixasse na curva granulométrica média constituída.

### 4.2.3 Dosagem das Misturas

Para realização do ensaio Marshall, foram moldados três corpos de prova, sem adição de cinza, com teores de ligante estabelecidos em 4,5; 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5% de CAP 50/70, como apresentados na Figura 06.

Figura 06 - Corpos de Prova de Referência (Sem adição de cinza pesada)



Fonte: Do Autor (2015)

Este ensaio seguiu a norma DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall, com objetivo de obter-se o teor ótimo de ligante, estipulado em 5% e que será adotado para as próximas misturas realizadas neste estudo.

### 4.2.4 Resistência a Tração

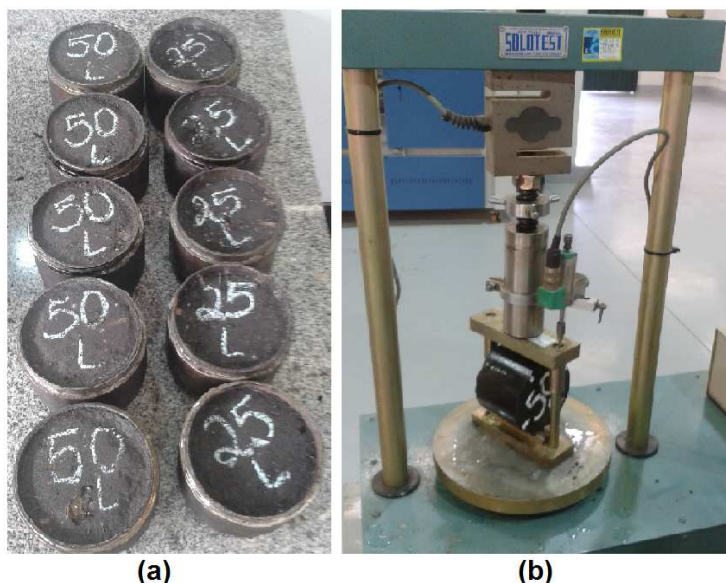
Moldou-se 5 corpos de prova de controle, sem adição de cinza pesada à mistura. Estas misturas são adotadas como ideais, tomando por base os parâmetros analisados a partir dos primeiros corpos de prova ensaiados pelo Método Marshall, e servem como referência para comparativo nas composições com adição de cinza pesada.

Deste modo, objetivou-se fazer a substituição gradual da porcentagem de finos da mistura de agregados naturais pela cinza pesada, a partir da peneira #40 (0,42mm), até o passante na peneira número #200 (0,075mm). Esta substituição foi realizada nas porcentagens 0% de cinza pesada, que corresponde à mistura de referência, 5, 15, 25 e 50% de reposição de cinza pesada aos agregados naturais. Desta forma, a granulometria dos agregados utilizados na mistura não é alterada, ou seja, não está ocorrendo nem o engrossamento, nem o refinamento da curva granulométrica devido a esta adição.

Por conseguinte, foram moldados 5 corpos de prova de controle (0% de cinza pesada) e também para cada porcentagem (5, 15, 25 e 50%) em massa de cinza pesada, na substituição aos agregados finos passantes, a partir da peneira de malha #40, respeitando a curva granulométrica artificial criada e considerando o teor de ligante fixo, no valor de 5% para todas as composições.

Todos os corpos de prova moldados, de acordo com o proposto neste estudo, foram submetidos ao ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral, especificado pela norma DNIT 136/2010 - ME. Os corpos de prova moldados com 25% e 50% de cinza pesada (adicionados a partir da peneira malha #40) e o ensaio realizado são mostrados na Figura 07.

Figura 07 – Misturas Asfálticas Moldadas: (a) Corpos de Prova com 25 e 50% de Cinza Pesada; (b) Ensaio de Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral



Fonte: Do Autor (2015).

A massa em gramas dos agregados naturais e da cinza pesada que compõe a curva granulométrica dos corpos de prova moldados para cada porcentagem de cinza pesada, está quantificada conforme a Tabela 04, e todos os corpos de prova deste trabalho possuem massa total de 1.200,00 gramas.

Tabela 04 – Quantitativo (Massa Retida) dos Agregados que Compõem a Mistura Asfáltica

Peneiras		Massa Passante Agregado (%)									
		REF		CP - 5		CP - 15		CP - 25		CP - 50	
Malha	mm	Nat.	Cin.	Nat.	Cin.	Nat.	Cin.	Nat.	Cin.	Nat.	Cin.
3/4"	19,10	100,00	-	100,00	-	100,00	-	100,00	-	100,00	-
1/2"	12,7	92,50	-	92,50	-	92,50	-	92,50	-	92,50	-
3/8"	9,50	87,50	-	87,50	-	87,50	-	87,50	-	87,50	-
#4	4,80	67,50	-	67,50	-	67,50	-	67,50	-	67,50	-
#10	2,00	52,50	-	52,50	-	52,50	-	52,50	-	52,50	-
#40	0,42	27,50	-	26,13	1,38	23,38	4,13	20,63	6,88	13,75	13,75
#80	0,18	19,00	-	18,05	0,95	16,15	2,85	14,25	4,75	9,50	9,50
#200	0,08	7,50	-	7,13	0,38	6,38	1,13	5,63	1,88	3,75	3,75

Fonte: Do autor (2015).

A cinza pesada somente foi adicionada nas peneiras de malha #40, #80 e #200, sem alterar a quantidade de finos estipulada para os corpos de prova de controle, conseqüentemente, mantendo invariável a proporção da composição granulométrica adotada para o estudo.

#### 4.2.5 Análise Ambiental da Mistura Asfáltica com Adição de Cinza Pesada

A cinza pesada trata-se de um rejeito tóxico da indústria energética. Por este motivo foi classificada de acordo com as normas brasileiras que disciplinam a classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade. Segundo SANTAREM et al (2015) a cinza pesada, em geral, pode ser classificada como um resíduo sólido Classe II A, ou seja, de acordo com ensaios feitos com a mesma isolada, foi classificada como

um resíduo não perigoso no ensaio de lixiviação, porém não inerte no ensaio de solubilização, baseando-se nos limites preconizados na ABNT NBR 10004: 2004 que especificam os limites máximos de elementos prejudiciais ao meio ambiente em sua composição.

Deste modo, adaptados à situação particular deste estudo, foram produzidas duas misturas asfálticas: a primeira, sem adição de cinza pesada, somente com agregados naturais e ligante asfáltico, para servir de amostra de controle; a segunda, contendo além do ligante asfáltico e agregados naturais, a adição de 5% de cinza pesada a partir da peneira de malha #40. A porcentagem de 5% de cinza pesada, foi adotada como ótima nos ensaios de resistência à tração simples.

Estas duas amostras foram fixadas com o teor de betume de 5%, e assim foram submetidas ao procedimento de obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando avaliar a inerticidade da utilização deste material residual em situação similar àquelas que serão submetidas no revestimento do pavimento.

#### 4.2.5.1 Ensaio de Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos

Este método está estabelecido pela norma ABNT NBR 10006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. O mesmo consiste em avaliar a quantidade de elementos tóxicos nas misturas analisadas verificando os limites máximos admitidos e preconizados pela norma NBR ABNT 10004:2004 – Classificação de Resíduos Sólidos. Diferencia-se, assim, o material em inerte (extrato solubilizado com os elementos tóxicos dentro do limite da norma) e não inerte (extrato solubilizado com elementos tóxicos acima do limite da norma), conforme classificação da norma já citada.

Na cinza pesada estudada, existem vários elementos químicos considerados tóxicos, presentes em baixas quantidades (em nível de  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), e caracterizados por PAVEI (2014) no item 4.2.1.3 deste trabalho. Os elementos analisados neste ensaio foram:

- Alumínio (Al)
- Ferro (Fe)



- Sódio (Na)
- Bário (Ba)
- Manganês (Mn)

Por conseguinte, as duas amostras foram submetidas ao procedimento de secagem à temperatura de até 42°C, utilizando uma estufa com circulação forçada de ar e exaustão ou estufa a vácuo e após, foi determinada a percentagem de umidade. Na sequência, foi colocada uma amostra representativa de 250 g (base seca) do resíduo em frasco de 1.500 mL e adicionados 1.000 mL de água destilada desionizada e isenta de orgânicos. O frasco foi agitado por 5 minutos em baixa velocidade, coberto com filme de PVC e deixado em repouso por 7 dias, em temperatura até 25°C. Após este período, a solução foi filtrada por aparelho de filtração, guarnecido com membrana filtrante com 0,45 µm de porosidade, resultando em extrato solubilizado, para o qual se definiram o pH, o teor de umidade e as concentrações dos elementos já citados.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Solos, Corretivos, Fertilizantes e Resíduos Sólidos Industriais do IDT (UNESC).

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

#### **5.1.1 Agregados**

Os resultados dos ensaios realizados para caracterização dos agregados naturais são apresentados na Tabela 05.

Tabela 05 – Ensaio de caracterização dos agregados naturais

Ensaio	Brita 3/4"	Pedrisco	Areia Artificial
Massa específica real	3,025	2,944	2,904
Massa específica aparente	2,931	-	-
Absorção média (%):	1,07	-	-

Fonte: Do autor (2015)

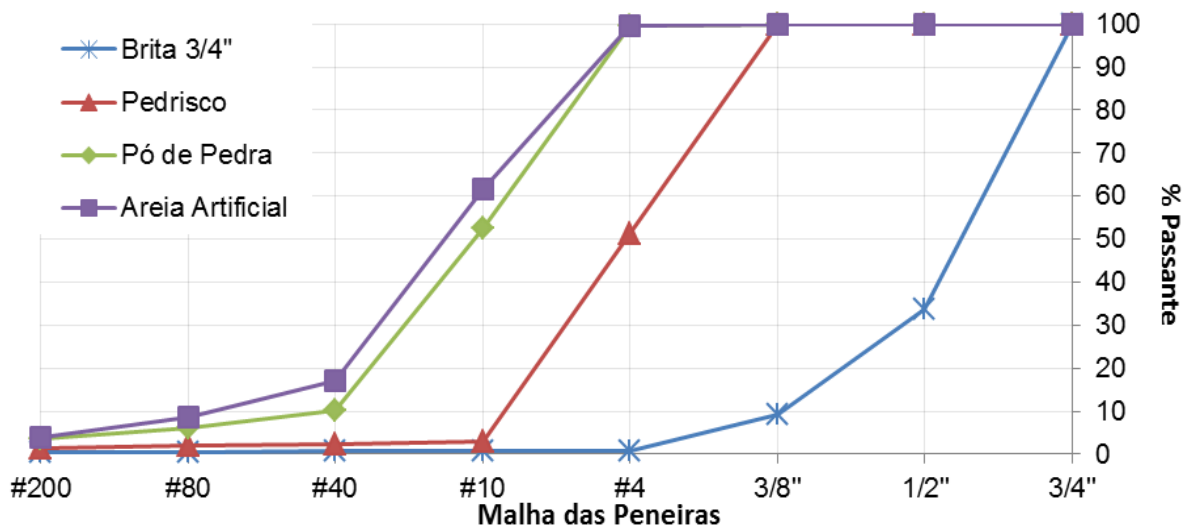
As curvas granulométricas encontradas por meio do ensaio de granulometria dos materiais e especificadas pela norma DNER-ME 083/98, podem ser visualizadas na Tabela 06 e na Figura 08.

Tabela 06 – Granulometria dos Agregados Naturais

Peneiras		Porcentagem Passante (%)			
Malha	mm	Brita 3/4"	Pedrisco	Pó de Pedra	Areia Artificial
3/4"	19,10	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	33,85	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,50	9,25	100,00	100,00	100,00
#4	4,800	0,76	51,35	99,72	99,66
#10	2,000	0,72	2,94	52,64	61,66
#40	0,420	0,63	2,41	10,22	17,18
#80	0,180	0,54	2,13	6,22	8,55
#200	0,075	0,34	1,47	3,54	4,06

Fonte: Do Autor (2015)

Figura 08 – Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: Do autor (2015)

### 5.1.2 Ligante Asfáltico

As temperaturas do ligante, agregados e da compactação da mistura, foram controladas em estufa e descritas na Tabela 07.

Tabela 07 – Temperaturas de aquecimento dos materiais da mistura.

Temperaturas	Ótima	Faixa de Trabalho Adotada	
Aquecimento do Ligante (°C)	155,00	151,20	158,50
Aquecimento dos Agregados (°C)	165,00	165,00	170,00
Compactação da Mistura (°C)	140,00	138,00	143,50

Fonte: Do autor (2015)

### 5.1.3 Cinza Pesada

A cinza pesada é um material que tem como tamanho máximo os grãos retidos em peneira de malha #4 (4,80 mm). Porém seus grãos são muito pequenos e sua maioria é inferior a 0,18 mm (equivalente ao passante na peneira de malha #80).

O material passou por ensaio granulométrico, assim como os demais agregados. Não obstante, constata-se que 46,10% da cinza pesada está passando na peneira de malha #200 (0,075 mm); para esta porção foi realizado o procedimento de análise

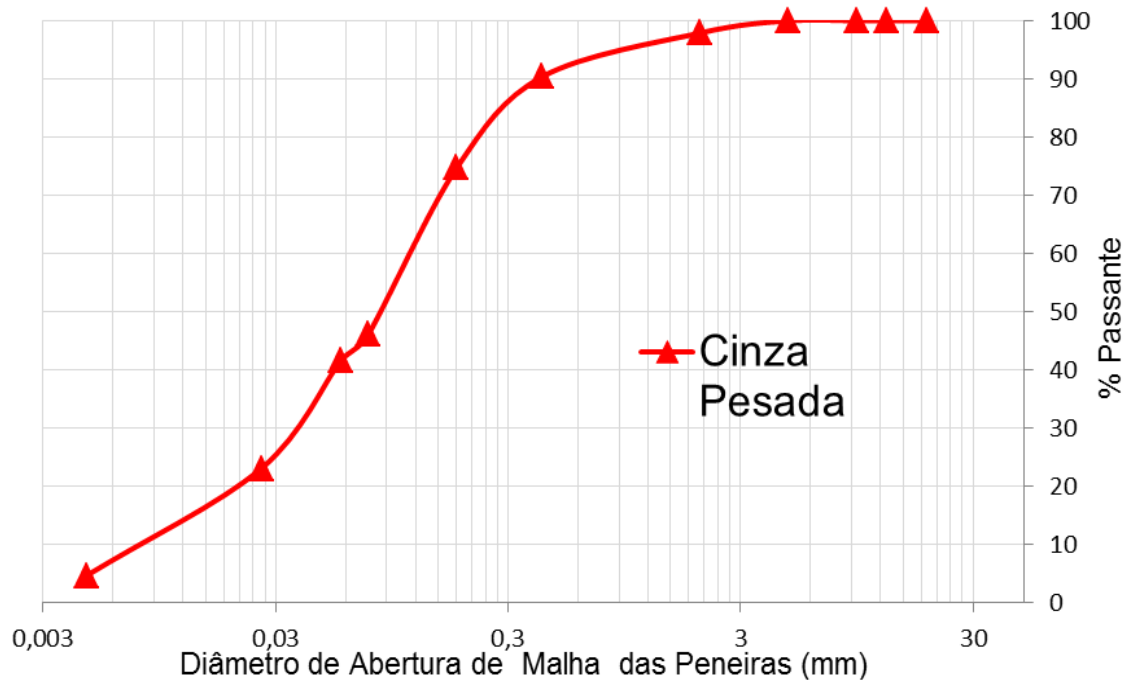
granulométrica por difração a laser, considerando que a porcentagem de 46,10 representa o total de 100% do volume a ser submetido à análise. Os resultados são apresentados na Tabela 08 e ilustrados na Figura 09.

Tabela 08 –Granulometria Cinza Pesada

Peneiras		Porcentagem Passante (%)	
Malha	mm	Cinza Pesada	
3/4"	19,10	100,00	
1/2"	12,70	100,00	
3/8"	9,50	100,00	
#4	4,800	100,00	
#10	2,000	97,89	
#40	0,420	90,37	
#80	0,180	74,69	
#200	0,075	46,10	
	0,057	41,489	
Granulometria a Laser	0,026	23,050	
	0,005	4,610	

Fonte: Do autor (2015)

Figura 09 – Curva Granulométrica Cinza Pesada



Fonte: Do autor (2015)

## 5.2 ANÁLISE TÉCNICA DA MISTURA ASFÁLTICA COM ADIÇÃO DE CINZA PESADA

### 5.2.1 Dosagem das Misturas Asfálticas

Moldou-se 3 corpos de prova sem adição de cinza pesada, para cada teor de ligante adotado (4,5; 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5%), como apresentado na Tabela 09. Os mesmos foram submetidos ao ensaio Marshall, com o objetivo principal de definir uma porcentagem ótima de ligante, adequado para a faixa granulométrica do presente trabalho.

Tabela 09 – Composição dos Materiais da Mistura Asfáltica de Referência para Dosagem Marshall

Nomenclatura	CP - 1	CP - 2	CP - 3	CP - 4	CP - 5
Teor de Ligante (%)	4,5	5	5,5	6	6,5
Massa do Ligante (g)	54	60	66	72	78
Massa do Agregado (g)	1146	1140	1134	1128	1122

Fonte: Do autor (2015)

Com o ensaio Marshall foi possível determinar os valores de estabilidade, fluência e os parâmetros volumétricos de dosagem, como apresentado na Tabela 10.

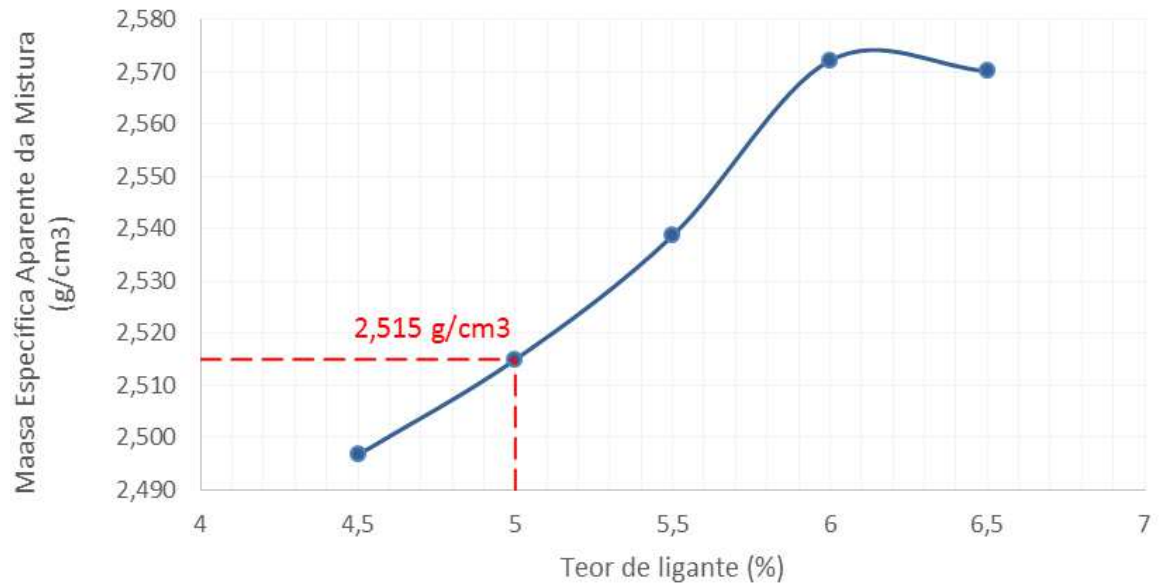
Tabela 10 – Parâmetros volumétricos de dosagem para as misturas de referência (sem adição de cinza pesada)

Misturas	CP - 1	CP - 2	CP - 3	CP - 4	CP - 5	Especificações	
						Mín	Máx
VB - Volume de Betume (%)	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50		
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,50	2,51	2,54	2,57	2,57		
DMT - Massa Específica Máxima Teórica (g/cm <sup>3</sup> )	2,66	2,64	2,62	2,59	2,57		
Vv - Volume de Vazios (%)	6,21	4,69	2,95	0,81	0,04	3,00	5,00
VAM - Vazios do Agregado Mineral (%)	22,41	22,66	22,75	22,55	23,43		
RBV - Relação Betume Vazios (%)	72,29	79,38	87,11	96,40	99,85	75,00	82,00
Estabilidade Marshall (Kgf) 75 golpes	1.629,79	1.675,72	1.888,96	2.238,05	1.481,55	500,00	
Fluência (mm)	2,33	2,35	2,53	3,13	3,07		

Fonte: Do autor (2015)

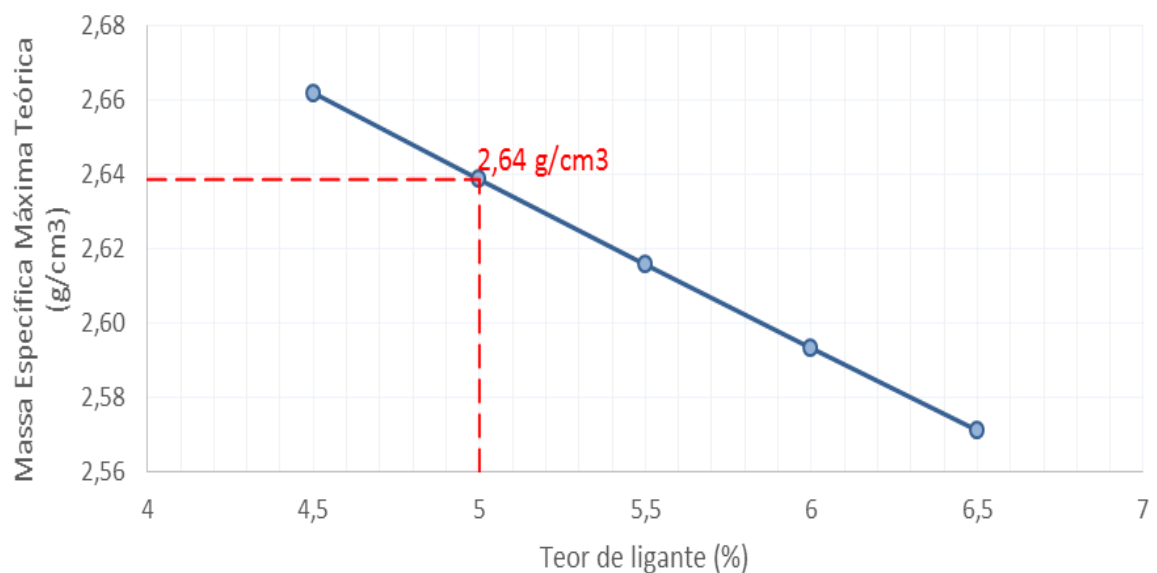
Com todos os valores dos parâmetros volumétricos e mecânicos determinados, são plotadas 6 curvas em função do teor de asfalto, apresentadas nas Figuras 10, 11, 12, 13, 14 e 15.

Figura 10 – Massa Específica Aparente Estimada da Mistura ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
em função do Teor de Ligante



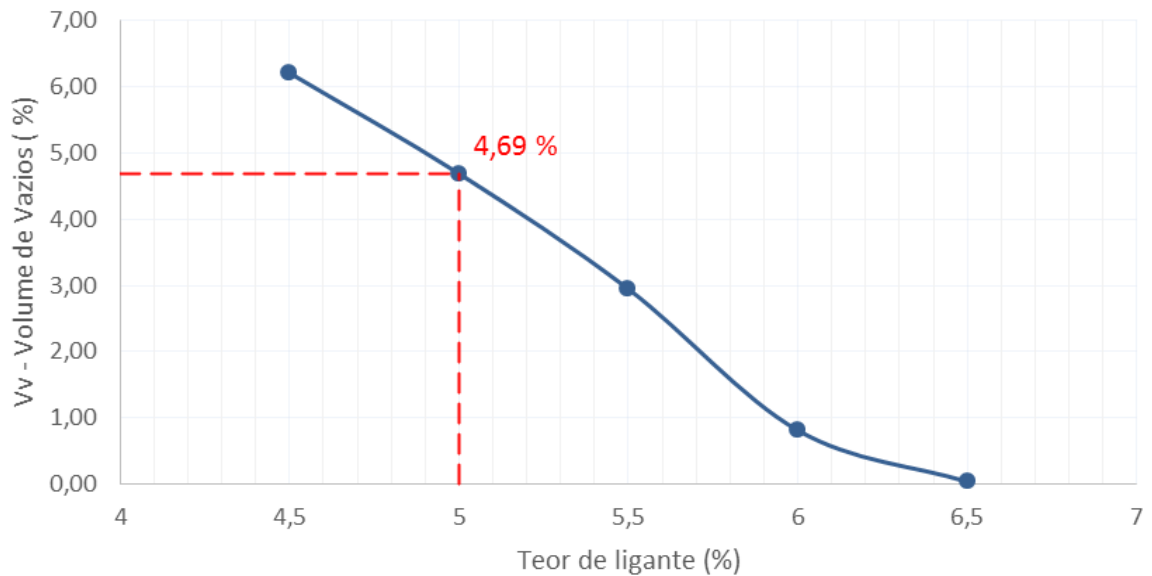
Fonte: Do Autor

Figura 11 – DMT - Massa Específica Máxima Teórica da Mistura ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
em função do Teor de Ligante



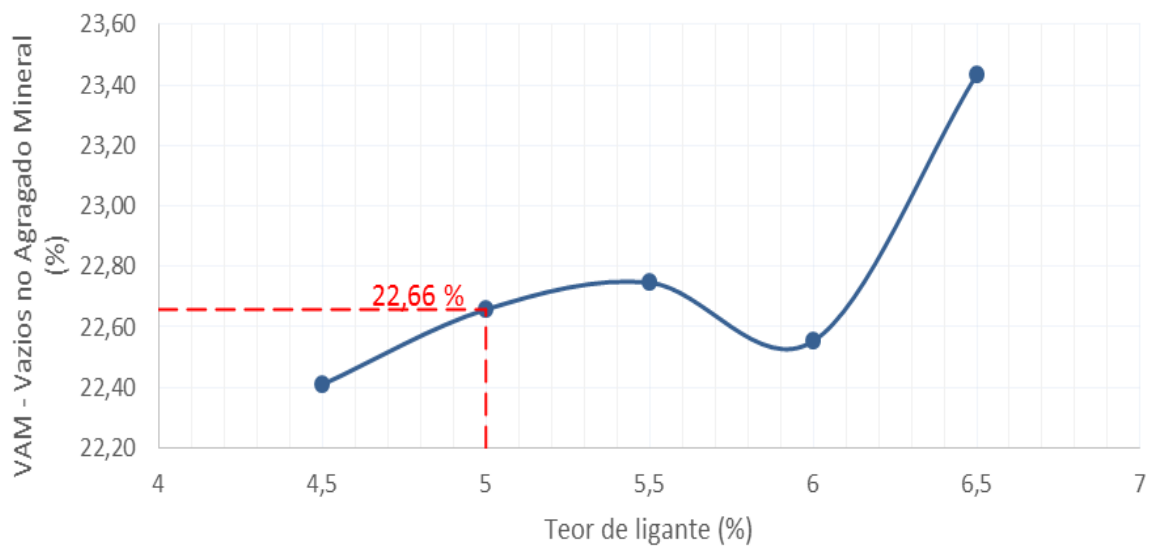
Fonte: Do Autor

Figura 12 – Vv - Volume de Vazios da Mistura (%) em função do Teor de Ligante



Fonte: Do Autor

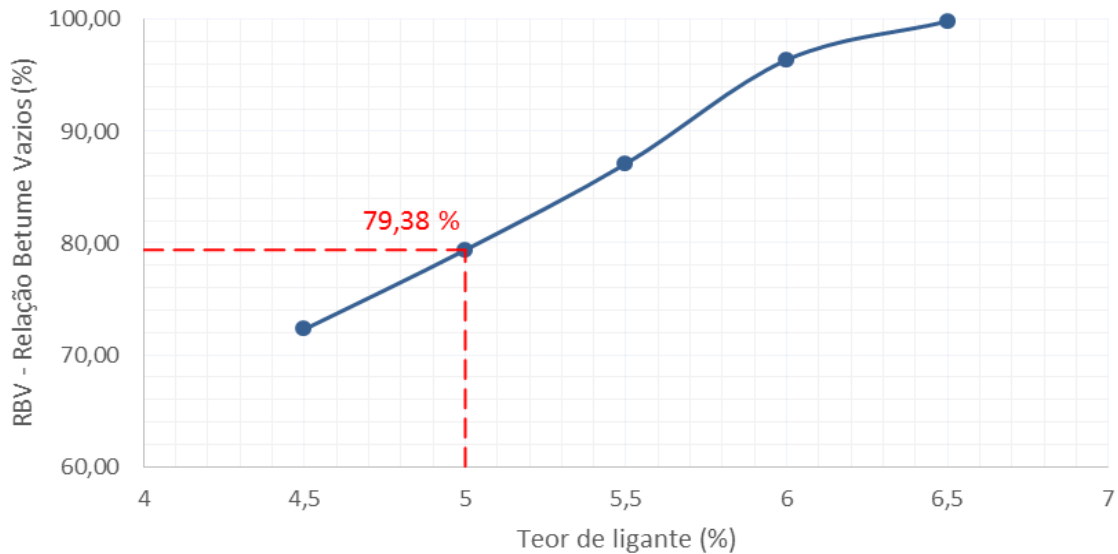
Figura 13 – VAM - Vazios do Agregado Mineral (%) em função do Teor de Ligante



Fonte: Do Autor

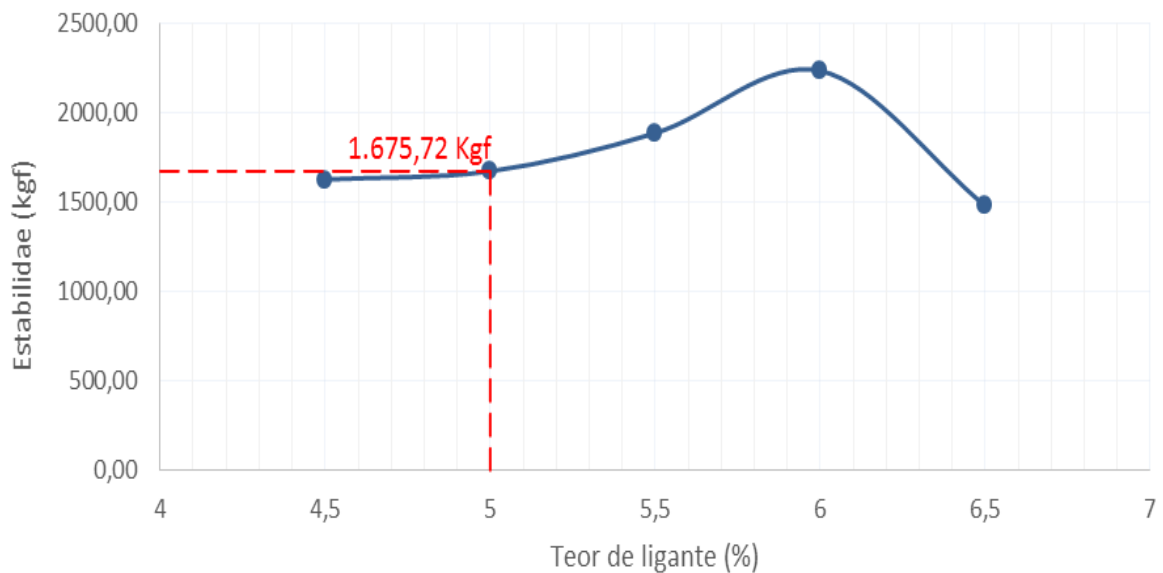


Figura 14 – RBV - Relação Betume Vazios da Mistura (%) em função do Teor de Ligante



Fonte: Do Autor

Figura 15 – Estabilidade Estimada da Mistura (Kgf) em função do Teor de Ligante

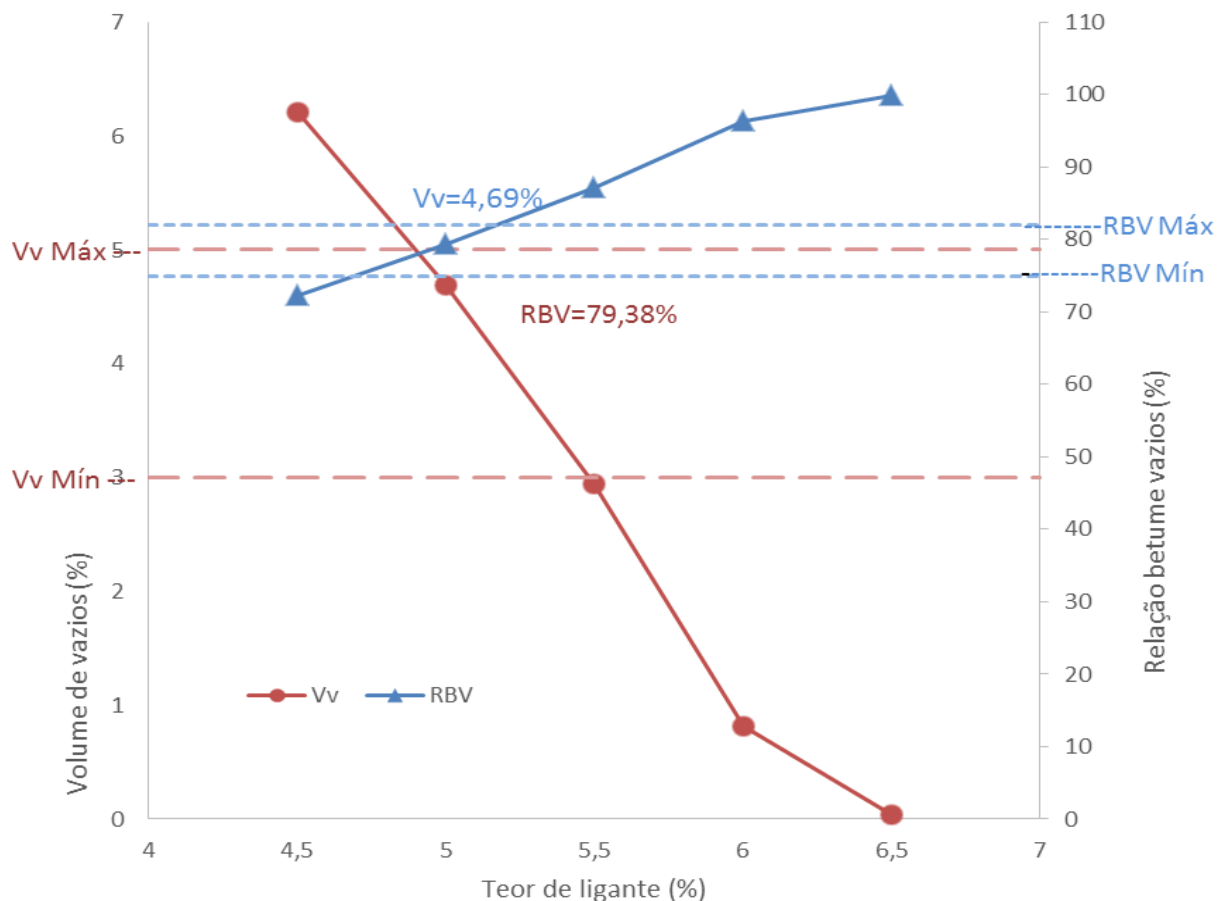


Fonte: Do Autor

A partir dos parâmetros de dosagem Vv (Volume de Vazios) e RBV (Relação Betume Vazios) pode-se determinar o teor ótimo de projeto, traçando-se os limites específicos das duas variáveis indicadas pelas linhas tracejadas, apresentadas na Figura 16. Deste modo, a partir da intersecção das linhas de tendência de Vv e RBV

com os limites respectivos de cada um destes parâmetros, é determinado o valor ótimo de ligante betuminoso para as próximas misturas, fixado no valor de 5%.

Figura 16 – Vv - Volume de Vazios e RBV – Relação Betume Vazios em função do Teor de Ligante da Mistura



Fonte: Do autor (2015)

### 5.2.2 Resistência à Tração

BERNUCCI *et al* (2008) assegura que a resistência à tração (RT) é um importante parâmetro para a caracterização de materiais como o concreto de cimento Portland e misturas asfálticas. Ademais, o ensaio de determinação da resistência à tração simples, se tornou muito popular no mundo pela facilidade e rapidez de execução. Este ensaio seguiu a norma DNIT 136/2010 – ME: Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral, onde foram moldados 5 corpos de prova para

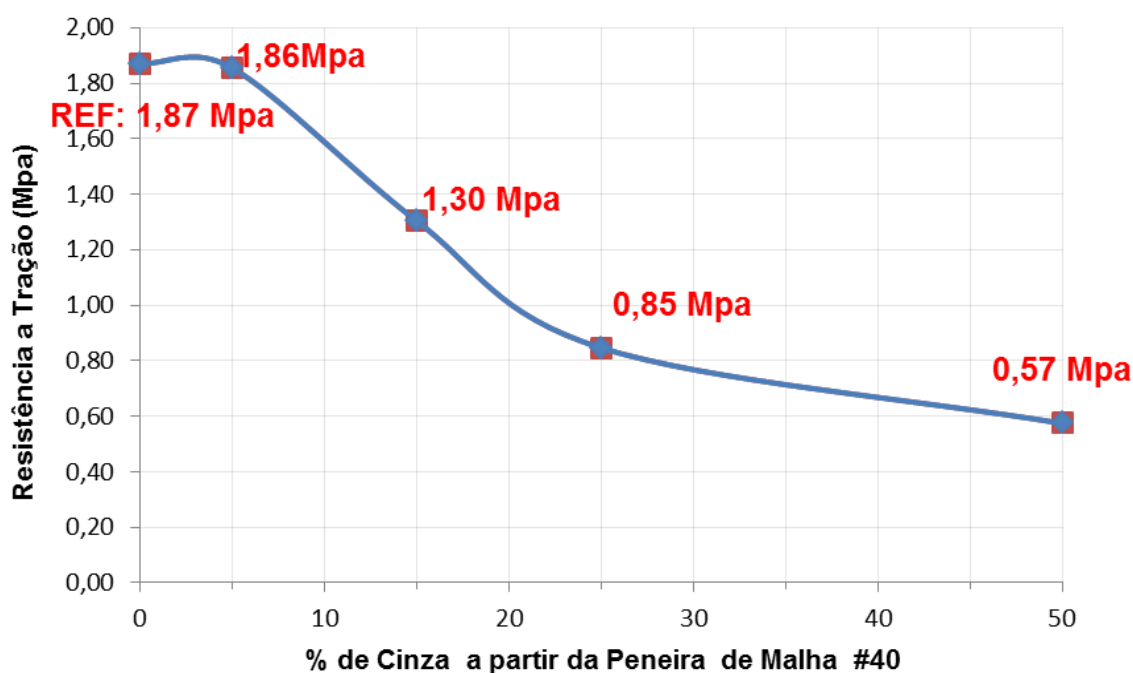
cada teor de cinza pesada adicionada, em substituição ao agregado natural passante na peneira de malha #40. Após ruptura dos mesmos, obteve-se 5 valores de resistência para cada grupo de cinza pesada. Ao se fazer uma análise estatística simples destes dados, pode-se constatar a presença de alguns valores espúrios. Deste modo, para ter maior precisão de resultados, descartou-se os 2 valores mais díspares de cada grupo, originando a Tabela 11, ilustrada pela Figura 12.

Tabela 11 – Valores de Resistência à Tração (Mpa) de Cada Grupo de Mistura Asfáltica

N°. dos CP's Moldados	Grupos de Teores de Cinza Pesada adicionadas a partir da Peneira de Malha #40				
	0	5%	15%	25%	50%
1	1,72	1,78	1,34	0,84	0,54
2	1,98	1,80	1,29	0,84	0,55
3	1,90	1,99	1,29	0,86	0,63
<b>Média (Mpa)</b>	<b>1,87</b>	<b>1,86</b>	<b>1,30</b>	<b>0,85</b>	<b>0,57</b>

Fonte: Do Autor (2015)

Figura 12 – Influência da Cinza Pesada (adicionada a partir da peneira malha #40) na Resistência à Tração



Fonte: Do Autor (2015)

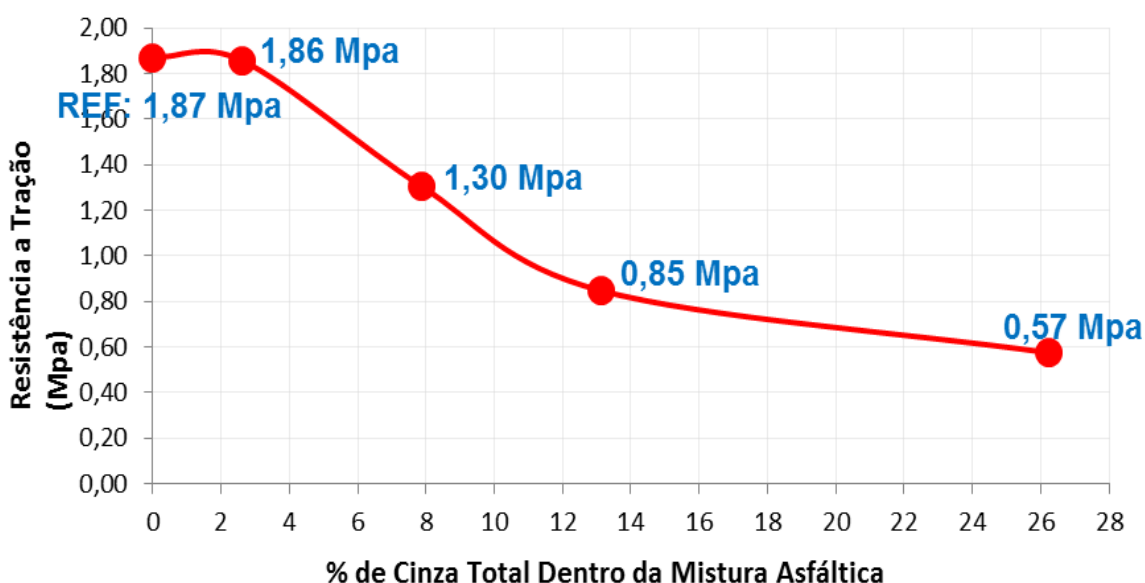
As porcentagens de cinza pesada acrescentadas a partir da peneira de malha #40, podem ser convertidas em porcentagem total dentro da mistura asfáltica. Pode-se observar isto na Tabela 13 e na Figura 19.

Tabela 13 – Resistência à Tração das Misturas Asfálticas

Nomenclatura	REF	CP - 5	CP - 15	CP - 25	CP - 50
Cinza Pesada Total na Mistura (%)	0,00	2,63	7,88	13,13	26,25
Resistencia a Tração (Mpa)	1,87	1,86	1,30	0,85	0,57

Fonte: Do Autor (2015)

Figura 19 – Influência da Cinza Pesada (Porcentagem Total Dentro da Mistura) na Resistência à Tração



Fonte: Do Autor (2015)

Em vista disso, a norma DNIT 031/2006-ES especifica o valor mínimo de resistência à tração (RT) igual a 0,60 Mpa para concretos asfálticos. Então se constata que acima de 47,00% (acrescentada a partir da malha #40) e 24,50% (do total dentro da mistura) de cinza pesada, a resistência à tração dos corpos de prova fica abaixo do permitido por norma. Já a porcentagem de cinza pesada ótima para este estudo é de 5% de cinza pesada adicionada a partir da peneira de malha #40, a qual é

equivalente a 2,63% de cinza pesada, dentro do total da mistura asfáltica. Obtém-se, assim, uma resistência à tração de 1,86 Mpa, que ficou com um valor bastante aproximado da resistência à tração máxima encontrada de 1,87 Mpa, identificada na mistura de referência deste trabalho.

### 5.2.3 Comparação de Resultados

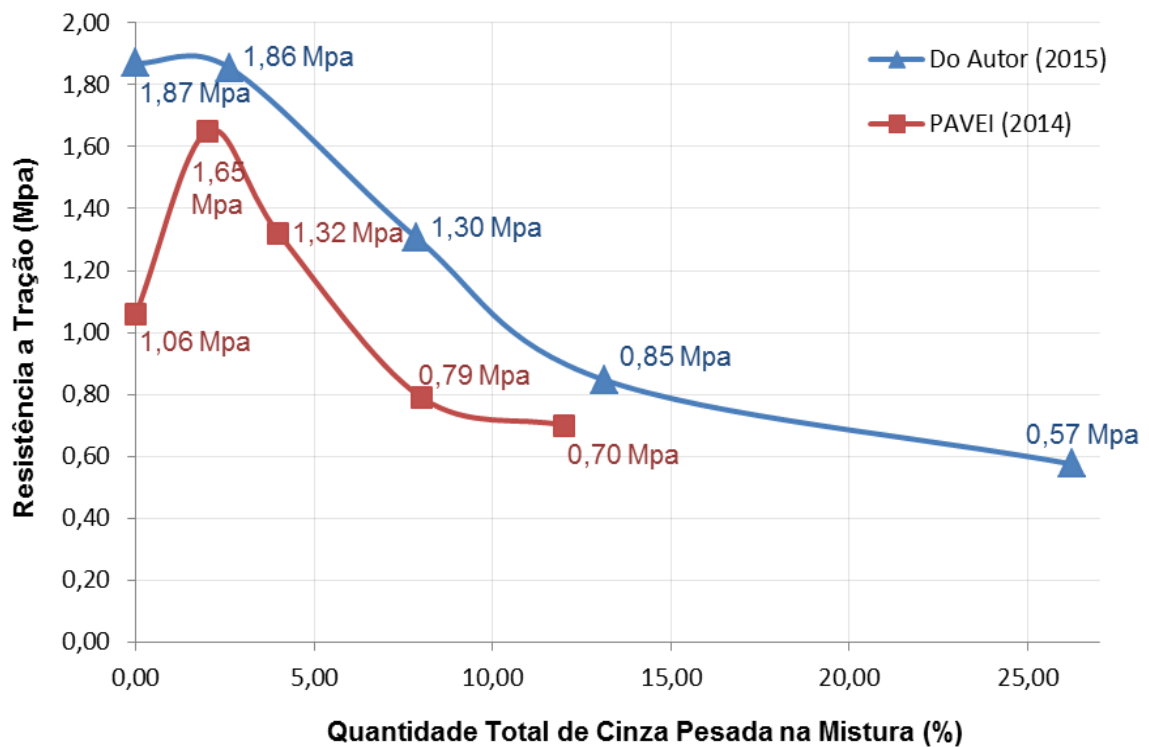
Por meio dos dados obtidos neste trabalho, adotaram-se os resultados auferidos no estudo de PAVEI (2014) como base comparativa, os quais resultaram do mesmo ensaio de determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Embora PAVEI (2014) tenha utilizado a mesma faixa de especificação C do DEINFRA que o presente estudo, esta curva granulométrica não foi fixada, diferentemente do que foi proposto neste trabalho. Além disso, PAVEI (2014) adicionou porcentagens de cinza pesada sem observar as quantidades acrescentadas a cada peneira. Os valores encontrados por PAVEI (2014) e pelo Autor (2015) são mostrados na Tabela 14 e ilustrados graficamente na Figura 20.

Tabela 14 – Comparação de Resultados Entre os Valores Encontrados por PAVEI (2014) e pelo Autor (2015)

<b>Do Autor (2015)</b>	Cinza Pesada Total na Mistura (%)	0,00	2,63	7,88	13,13	26,25
	Resistencia a Tração (Mpa)	1,87	1,86	1,30	0,85	0,57
<b>PAVEI (2014)</b>	Cinza Pesada Total na Mistura (%)	0,00	2,00	4,00	8,00	12,00
	Resistencia a Tração (Mpa)	1,06	1,65	1,32	0,79	0,70

Fonte: Do Autor (2015)

Figura 20 – Gráfico Comparativo dos Estudos de PAVEI (2014) e Do Autor (2015)



Fonte: Do Autor (2015)

### 5.3 ANÁLISE AMBIENTAL DA MISTURA ASFÁLTICA COM ADIÇÃO DE CINZA PESADA

Após realizado o procedimento para obtenção de extrato solubilizado, segundo a norma ABNT NBR 10006:2004, foram avaliadas as quantidades de elementos tóxicos nas misturas analisadas e verificados os limites máximos admitidos pela norma NBR ABNT 10004:2004 – Classificação de Resíduos Sólidos, conforme a Tabela 15.

Tabela 15 – Análise quantitativa do extrato solubilizado das misturas asfálticas com e sem cinza pesada.

Parâmetros Orgânicos (mg/L)		Limite Máximo no Solubilizado NBR 1004:2004 (mg/L)	Concentração (mg/L) no Extrato Solubilizado		Relação entre as Concentrações da Mistura Referência e da Mistura com Cinza Pesada (%)
Substância	Nomenclatura		Mistura Referência	Mistura com 5% de Cinza Pesada	
Al	Alumínio <sup>(*)</sup>	<b>0,2</b>	0,1	0,1	100,00
Fe	Ferro <sup>(*)</sup>	<b>0,3</b>	0,06	<0,02	33,33
Na	Sódio <sup>(*)</sup>	<b>200</b>	7,34	9,74	75,36
Ba	Bário <sup>(*)</sup>	<b>0,7</b>	<0,1	<0,1	100,00
Mn	Manganês <sup>(*)</sup>	<b>0,1</b>	<0,01	<0,01	100,00
pH Inicial do Extrato Solubilizado <sup>(*)</sup>		<b>2 &lt; pH &lt; 12,5</b>	5,47	5,77	94,80
pH Final do Extrato Solubilizado <sup>(*)</sup>		<b>2 &lt; pH &lt; 12,5</b>	7,3	7,52	97,07
pH em água (1:1) <sup>(**)</sup>		<b>2 &lt; pH &lt; 12,5</b>	8,13	8,18	99,39
Umidade 42°C (%)		-	0	0	100,00
Umidade 105°C (%)		-	0,05	0,04	80,00

(\*): Metodologia segundo ABNT NBR 10006:2004 - Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos

(\*\*): Proporção de 50g de amostra para 50ml de água, segundo a ABNT NBR 10004:2004 - Classificação de Resíduos Sólidos

Fonte: Do Autor (2015)

Com os resultados apresentados, pode-se perceber que tanto a mistura asfáltica de referência (sem adição de cinza pesada) quanto a mistura com adição de cinza, ficaram dentro de todos os limites propostos pela norma. Conclui-se, então, que em conjunto com os materiais da mistura asfáltica ocorre a inertização da cinza pesada, classificada como inerte quando desta adição.

A análise do valor de pH destes materiais também é importante, uma vez que este parâmetro indica o potencial de elementos químicos nocivos que podem solubilizar e lixiviar devido a alcalinidade. Todavia, visto que as taxas de solubilização são muito

influenciadas pelas variações do pH do meio, a presença de um pH mais neutro, como o valor encontrado de 7,52 para a mistura com cinza pesada deste estudo, tende a minimizar a solubilização de metais pesados quando da percolação de água, sendo favorável no aspecto ambiental.

## 6 CONCLUSÕES

- O teor ótimo de ligante estimado para a granulometria correspondente ao valor médio dos limites da Faixa “C” do DEINFRA/SC foi de 5%.
- O valor da resistência à tração da mistura asfáltica sem adição de cinza pesada foi de 1,87 Mpa.
- Nas misturas com adição de cinza, não houve um incremento significativo do valor da resistência à tração. No entanto, para um teor de adição de cinza de 25%, em relação ao total do peso da mistura, e de 45%, em relação ao total passante pela peneira #40, a mesma apresenta um valor de resistência à tração de 0,60; valor mínimo especificado na norma DNIT 031/2006-ES.
- Os resultados do ensaio de solubilização mostraram que nenhum dos elementos e compostos químicos analisados nas duas misturas asfálticas, sem e com adição de cinza, não ultrapassaram o limite máximo permitido pela norma ABNT NBR 10004:2004, ou seja, os elementos potencialmente perigosos e nocivos ao meio ambiente da mistura com adição de cinza não percolam e não contaminam o meio o qual estão, nem o lençol freático.
- Desta forma, a partir dos resultados de todos os ensaios realizados, pode-se concluir que o uso da cinza pesada é viável tanto tecnicamente quanto ambientalmente, propiciando seu uso em revestimentos asfálticos em substituição aos agregados naturais, gerando assim benefícios relativos à redução da demanda por materiais primários, redução de custos com extração e recuperação dos passivos ambientais gerados pela exploração de jazidas além de reduzir os problemas ambientais associados com a estocagem e disposição da cinza pesada nos aterros e bacias de sedimentação.



## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Verificar a viabilidade econômica do uso da cinza pesada na mistura asfáltica.
- Realizar ensaios de caracterização e desempenho mecânico, módulo de resiliência, fadiga e deformação permanente na mistura asfáltica com adição de cinza pesada.
- Determinar o dano por umidade induzida da mistura asfáltica com adição de cinza pesada, mediante o ensaio de adesividade; método de Lottman Modificado.
- Determinar o potencial poluente dos metais pesados da mistura asfáltica com adição de cinza pesada, mediante o ensaio de Lixiviação.

## 7 REFERÊNCIAS

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

\_\_\_\_\_. **NBR 10006**: Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **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 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 093/94: Solos – determinação de densidade real.** Rio de Janeiro, 1994.

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.

\_\_\_\_\_. **DNIT 031/2006-ES: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro, 2004.

DEPOI, F. S., POZEBON, D., KALKREUTH, W. D. **Chemical characterization of feed coals and combustion-by-products from Brazilian power plants.** International Journal of Coal Geology 76 (2008) 227–236.

INSTRUTÉCNICA. Instrumentação para Pesquisa e Indústria. **Análise de Distribuição de Tamanho de Partículas: Difração a Laser.** Disponível em: <<http://www.instrutec.com.br/produtos/particulas/Difracao.html>>. Acesso em: 17 de nov. 2015.

LEANDRO, R. P. **Estudo laboratorial acerca da possibilidade de aproveitamento da cinza pesada de termelétrica em base e sub-bases de pavimentos flexíveis.** 2005. 195p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Paulo.

PAVEI, E. **Resistência à Tração de Misturas Asfálticas com Adição de Cinza Pesada.** 2014. 24p. Artigo submetido ao Curso de Engenharia Civil. Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). Criciúma, Santa Catarina.

ROCHA, J. C. **Aproveitamento de cinzas volantes e pesadas para a produção de concretos usinados, blocos e pavimentos de concretos:** Relatório Final do

Convênio GS-15/99 – Gerasul Aneel. UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 2001, v.1. 206 p.

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

SANTAREM, L. M. S., MALLMANN, J. E. C., KAUTZMANN, R. M., ALVES, K. R., SABEDOT, S. **Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental para o Aproveitamento de Cinzas Pesadas de Carvão Geradas em Termelétricas, para a Construção de Bases e Sub-Bases de Pavimentos Rodoviários.** 2015. 18p. 44° RAPv – Reunião Anual de Pavimentação e 18° ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Foz do Iguaçu, Paraná.

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.