

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA

MARCO ANTÔNIO EING

**ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE CINZA VOLANTE E PESADA EM
DOSAGENS DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS**

Joinville

2018

MARCO ANTÔNIO EING

**ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE CINZA VOLANTE E PESADA EM
DOSAGENS DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campos Joinville, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra

Joinville

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Eing, Marco Antônio
ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE CINZA VOLANTE E PESADA EM
DOSAGENS DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS / Marco Antônio
Eing ; orientador, Breno Salgado Barra, 2018.
68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia de Infraestrutura, Joinville, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia de Infraestrutura. 2. Estabilidade de pavimentos. 3. Cinzas de carvão mineral. 4. Misturas asfálticas densas. 5. Metodologia Marshall. I. Barra, Breno Salgado . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Infraestrutura. III. Título.

MARCO ANTÔNIO EING

**ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE CINZA VOLANTE E PESADA EM
DOSAGENS DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS**

Este Trabalho foi julgado para a obtenção do título de Graduado em Engenharia de Infraestrutura, e aprovado em sua forma final pela banca examinadora perante o curso de Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville.

Joinville, 06 de julho de 2018

Prof^a. Me. Valéria Bennack

UFSC – Campus Joinville

Coordenadora do Curso Engenharia de Infraestrutura

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Breno Salgado Barra

Orientador

UFSC – Campus Joinville

Prof. Dr. Leto Momm

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UFSC – Campus Joinville

Prof. Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UFSC – Campus Joinville

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me conceder a dádiva da vida e me colocar em uma família sem igual.

A meus pais Adélcio e Rosinei por me fornecerem a oportunidade de estudar e ir em busca de meus sonhos. As dificuldades foram imensas ao longo dos anos, três filhos para cuidar e criar em uma vida repleta de abalos. O companheirismo e amor de vocês pelos seus filhos me inspiram a continuar de cabeça erguida e jamais me arrepender das escolhas feitas. Saibam que vocês, minha família, são e sempre serão o bem mais precioso que eu poderia pedir a Deus, o meu amor por vocês é incondicional e imensurável. O meu mais sincero obrigado.

Aos meus avós José, Bernardo (*in memoriam*), Sabina e Inês, pois foram e são de fundamental importância em minha vida.

Ao meu professor e orientador Breno por me proporcionar um aprendizado prático das atividades desenvolvidas em laboratório.

Aos meus colegas e amigos de laboratório Estefani, Bruna e Claudia que mesmo com todas as dificuldades encontradas souberam superar os desafios e prestar um suporte um ao outro. O meu mais sincero obrigado.

Aos amigos que souberam neste período de tempo dar apoio emocional a mim. Amigos estes que muitas vezes à distância através de três ou quatro palavras puderam dar o apoio necessário a continuidade do mesmo.

A todas as pessoas que de alguma forma impactaram no desenvolvimento deste trabalho. São muitos amigos, colegas e familiares que por muitas vezes seus nomes passaram de forma silenciosa. Quero que vocês saibam que todos tiveram uma participação no desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, a todas as empresas e laboratórios parceiros. As dificuldades de desenvolvimento de pesquisas são enormes, mas graças a instituições como a de vocês somos capazes de dar continuidade ao processo de desenvolvimento tecnológico.

“Não espere por uma crise para descobrir o que é importante em sua vida”

Platão

RESUMO

As baixas qualidades dos pavimentos brasileiros ocasionaram nas últimas décadas um alto consumo de recursos através de ações mitigadoras. Tais problemas estão relacionados principalmente a formulações de esqueletos granulométricos inadequados, baixa capacitação de mão de obra e sobretudo a utilização de matérias primas de baixa qualidade. Em termos de matéria prima, uma das propostas de estudo de melhorias é a inclusão de cinzas oriundas da queima de carvão mineral em substituição de parcelas de finos da mistura. Atualmente grande parte das cinzas produzidas em termelétricas não apresentam destinação correta e, portanto, podem vir a propiciar a contaminação do solo e água do local. Visando uma alternativa aos problemas enfrentados, a presente pesquisa busca analisar o impacto da inserção de cinza volante e cinza pesada na dosagem de misturas asfálticas densas. As cinzas utilizadas têm origem na queima do carvão mineral no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda na cidade de Capivari de Baixo/SC. São abordados nesta pesquisa os diferentes métodos de composição granulométricas utilizados atualmente e dado um enfoque ao método racional de dimensionamento granulométrico uma vez que é este o adotado para as formulações de misturas na presente pesquisa. É realizado ainda uma caracterização dos materiais componentes das misturas asfálticas com o intuito de obter uma melhor compreensão dos parâmetros de comportamento das misturas confeccionadas. Foi utilizado a metodologia Marshall para a dosagem de misturas asfálticas e os parâmetros obtidos por tal, visam a determinação dos principais impactos relacionados a estabilidade (resistência) e fluência (deformabilidade) da inserção de cinzas em misturas asfálticas densas.

Palavras-chave: Estabilidade de pavimentos. Cinzas de carvão mineral. Misturas asfálticas densas. Metodologia Marshall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Organograma das atividades	15
Figura 2	- Instalações da empresa Rudnick Minérios S.A	19
Figura 3	- Máquina “Los Angeles”	20
Figura 4	- Equipamento para ensaio de penetração	21
Figura 5	- Equipamento para ensaio de ponto de amolecimento anel e bola	26
Figura 6	- Equipamento para ensaio de viscosidade Saybolt-Furol	27
Figura 7	- Curva de viscosidade Saybolt-Furol para o CAP 30/45	27
Figura 8	- Cinza oriunda do CTJL	29
Figura 9	- Curva de DRX da cinza volante	31
Figura 10	- Curva de DRX da cinza pesada	32
Figura 11	- Morfologia da cinza volante	32
Figura 12	- Morfologia da cinza de fundo	33
Figura 13	- Morfologia do pó de brita	34
Figura 14	- Faixa C do DNIT.	38
Figura 15	- Curvas enquadradas nos limites da Faixa C do DNIT	39
Figura 16	- Curva granulométrica segundo o Método de Rothfuchs	40
Figura 17	- Resultado de curva granulométrica segundo o Método de Rothfuchs	41
Figura 18	- Curva granulométrica teórica (BARRA, 2009)	44
Figura 19	- Curva granulométrica do material pétreo obtida pelo autor	46
Figura 20	- Curva granulométrica das cinzas	47
Figura 21	- Separação da amostra em parte graúda e miúda	49
Figura 22	- Acondicionamento das marmitas em estufa	50
Figura 23	- Processo de mistura dos componentes	51
Figura 24	- Molde metálico utilizado para acondicionamento da mistura	52
Figura 25	- Soquete Marshall	52
Figura 26	- Corpos de prova	53
Figura 27	- Medição dos corpos de prova	53
Figura 28	- Segregação da mistura	54
Figura 29	- Máquina de vácuo	55
Figura 30	- Corpos de prova em banho de água a 60°C	57
Figura 31	- Prensa Marshall com corpo de prova acomodado para rompimento	58
Figura 32	- Corpo de prova após ruptura	59
Figura 33	- Gráficos de resultados da mistura com cinza	61
Figura 34	- Gráficos de resultados da mistura convencional	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Características técnicas do material fornecido pela empresa Rudnick	18
Tabela 2	- Graduação para ensaio abrasão “Los Angeles”	20
Tabela 3	- Carga abrasiva	21
Tabela 4	- Quantidade mínima de material para ensaio de índice de Forma	22
Tabela 5	- Resultados de caracterização dos materiais granulares	23
Tabela 6	- Dimensões do recipiente para ensaio de penetração	24
Tabela 7	- Critérios para indicação de resultados	24
Tabela 8	- Resultados de caracterização do ligante betuminoso	28
Tabela 9	- Composição química majoritária das cinzas	31
Tabela 10	- Composição mineralógica da cinza volante	31
Tabela 11	- Composição mineralógica da cinza de fundo.	32
Tabela 12	- Propriedades dos poros das cinzas em análise	33
Tabela 13	- Resultados da caracterização química do pó de brita	35
Tabela 14	- Faixa granulométrica para pavimentos flexíveis (DNIT-ES 031,2006)	37
Tabela 15	- Faixa granulométrica para concreto asfáltico usinado a quente	38
Tabela 16	- Composição granulométrica da curva teórica (BARRA, 2009)	44
Tabela 17	- Sequência de peneiras utilizadas	45
Tabela 18	- Quantidade de material de cada fração por teor de betume	49
Tabela 19	- Valores limites estabelecidos por norma	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
REPAR	-	Refinaria Presidente Getúlio Vargas
CTJL	-	Complexo Termelétrico Jorge Lacerda
CTCL	-	Centro Tecnológico SATC
CV	-	Cinza Volante
CP	-	Cinza Pesada
CPs	-	Corpos de Prova
DNIT	-	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
MVR	-	Densidade Máxima Teórica Real das Misturas
MEA	-	Massa Específica Aparente
VAM	-	Vazios do Agregado Mineral
RBV	-	Relação Betume-Vazios
CNT	-	Confederação Nacional dos Transportes
DEINFRA	-	Departamento Estadual de Infraestrutura
CAP	-	Concreto Asfáltico de Petróleo
LDTPav	-	Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
D _{ap}	-	Densidade Volumétrica Aparente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos.....	13
1.2	PROCEDIMENTO PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	14
1.3	DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA	15
1.4	RELEVÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVAS	16
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPONENTES.....	18
2.1	MATERIAL PÉTREO	18
2.1.1	Abrasão Los Angeles	19
2.1.2	Ataque por Sulfato de Sódio Anidro.....	21
2.1.3	Índice de Forma.....	21
2.1.4	Adesividade ao Ligante Betuminoso.....	22
2.1.5	Resultados de Caracterização dos Granulares	23
2.2	LIGANTE BETUMINOSO	23
2.2.1	Penetração.....	24
2.2.2	Ponto de Amolecimento Anel e Bola.....	25
2.2.3	Viscosidade Saybolt Furol	26
2.2.4	Resultados de Caracterização do Ligante Betuminoso.....	28
2.3	CINZA.....	28
2.3.1	Processo de Formação das Cinzas em Centrais Termelétrica	29
2.3.2	Caracterização Química e Morfológica das Cinzas	30
2.3.3	Caracterização Química e Morfológica do Pó de Pedra.....	34

3	ANÁLISE DOS MÉTODOS DE FORMULAÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	36
3.1	METODOLOGIAS PARA FORMULAÇÃO DE ESQUELETOS MINERAIS	36
3.1.1	Método por Tentativa	36
3.1.2	Método Gráfico de Rothfuchs	39
3.1.3	Método Racional.....	41
3.1.4	Curvas Granulométricas Utilizadas	45
4	METODOLOGIA DE ENSAIO.....	48
4.1	ENSAIO MARSHALL	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil, o transporte de cargas e passageiros é realizado de forma majoritária pelo modal rodoviário. Segundo a Confederação Nacional dos Transportes – CNT, existem atualmente 1.735.621 Km de malha rodoviária no país, sendo que destes somente 212.866 Km (12,3%) são pavimentadas. Outro dado levantado, destaca a péssima qualidade das rodovias pavimentadas já existentes. Em um ranking de qualidade de vias o Brasil ocupa a posição 103 de um total de 137 países pesquisados. Ainda segunda a pesquisa, os pavimentos asfálticos no país apresentam normalmente pouco tempo de vida útil. Esta baixa expectativa de vida está relacionada a utilização de matéria prima de baixa qualidade, erros na execução do projeto, métodos de execução ultrapassados, falta de manutenção e falta de fiscalização e controle.

Outro aspecto relevante no cenário brasileiro, é a necessidade de se desenvolver misturas asfálticas que apresentem maior durabilidade, uma vez que os investimentos em infraestrutura não tendem a acompanhar as necessidades do mesmo. Desta forma, cada vez mais se faz necessário o uso de técnicas e materiais de boa qualidade, a fim de proporcionar melhores características mecânicas aos pavimentos asfálticos.

De acordo com Barra (2005), a má formulação, tanto na dosagem, como do esqueleto mineral da mistura asfáltica de uma rodovia, gera desconforto para o usuário, além de ser mais suscetível a acidentes e gerar precoces necessidades de manutenção.

Visando a necessidade constante de novas técnicas e melhor entendimento dos materiais utilizados nos processos de pavimentação asfáltica, ao longo das últimas décadas foram realizadas inúmeras pesquisas relacionadas ao tema. Nestas, verificou-se a possibilidade de inserção de determinados rejeitos industriais nas misturas, de modo que estes poderiam proporcionar um ganho significativo nas propriedades mecânicas das mesmas.

Um dos rejeitos industriais com maiores expressões em volume gerado, são as cinzas produzidas nas usinas termelétricas. Estas são geradas na queima de carvão mineral no processo de aquecimento da água. De forma simplificada, as cinzas geradas podem ser classificadas em três categorias. Tal classificação varia conforme o nível de carbono não queimado começando

pela escória, ao qual apresenta altos índices, passando pela cinza pesada e chegando a cinza leve, com baixo teor de carbono não queimado.

A presente pesquisa analisa o quão impactante é a incorporação de tais cinzas nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas. Esta análise se dará através de comparação entre amostras de misturas convencionais e amostras de misturas com teores de cinza incorporada. É esperado uma alteração das características mecânicas da última, visto que pequenas parcelas dos materiais finos da mistura serão substituídas por parcelas de cinzas.

O trabalho é de cunho experimental e se dará estritamente em âmbito laboratorial. Será realizada também uma revisão na literatura técnica de modo a se obter um melhor conhecimento referente aos parâmetros que regem as propriedades mecânicas das misturas, assim como uma melhor compreensão dos ensaios laboratoriais e seus parâmetros de controle.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar os impactos nas propriedades físico-químicas de misturas asfálticas gerados pela incorporação de cinzas leves e pesadas, de forma comparativa a uma mistura asfáltica convencional, verificando a implicação nos aspectos técnicos de dosagem em função desta inserção.

1.1.2 Objetivos Específicos

No intuito de alcançar o objetivo geral desta pesquisa, serão estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar os diferentes materiais que irão compor a mistura asfáltica (ligante betuminoso, materiais pétreos, cinza volante e cinza pesada);
- Formular o esqueleto granulométrico da mistura através do método teórico de Fuller-Talbot;
- Determinar os teores ótimos de ligante betuminoso das misturas asfálticas através do Ensaio Marshall;
- Compreender a caracterização química e morfológica das cinzas de modo a identificar as propriedades destes materiais;

- Verificar o comportamento da mistura com relação às propriedades de estabilidade (resistência) e fluência (deformabilidade).

1.2 PROCEDIMENTO PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

O desenvolvimento deste trabalho teve início a partir da obtenção dos materiais necessários à confecção dos corpos de prova. A empresa Rudnick Minérios Ltda., localizada na zona industrial norte de Joinville, foi a responsável pelo fornecimento dos materiais pétreos. No que diz respeito ao ligante betuminoso, a Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) foi a fornecedora do material e apresenta matriz localizada na cidade de Araucária, estado do Paraná. Por fim, a cinza volante (CV) e a cinza pesada (CP) foram cedidas pelo Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), localizado na cidade de Capivari de Baixo, no sul do Estado de Santa Catarina.

Após a obtenção dos materiais foram identificadas as características mecânicas dos materiais através de laudos técnicos fornecidos pelas empresas fornecedoras. A seguir são citados os ensaios de caracterização do ligante betuminoso e dos materiais pétreos.

Em relação aos materiais pétreos, os seguintes procedimentos foram realizados:

- Ensaio de Abrasão Los Angeles;
- Adesividade ao ligante betuminoso (com e sem a presença de CV e CP);
- Índice de Forma (agregado graúdo);
- Determinação da durabilidade ao ataque de Sulfato de Sódio Anidro;

Quanto ao ligante betuminoso, os procedimentos realizados foram:

- Penetração;
- Viscosidade Saybolt Furol;
- Verificação do ponto de amolecimento anel e bola.

Com base nos dados obtidos pela caracterização dos materiais, foram determinadas as formulações dos esqueletos granulométricos das misturas através do método teórico, utilizando a Equação de Füller-Talbot.

Em seguida, foram confeccionados os corpos de prova das misturas asfálticas a partir dos procedimentos de dosagem Marshall, devido a esta ser a metodologia oficialmente homologada no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

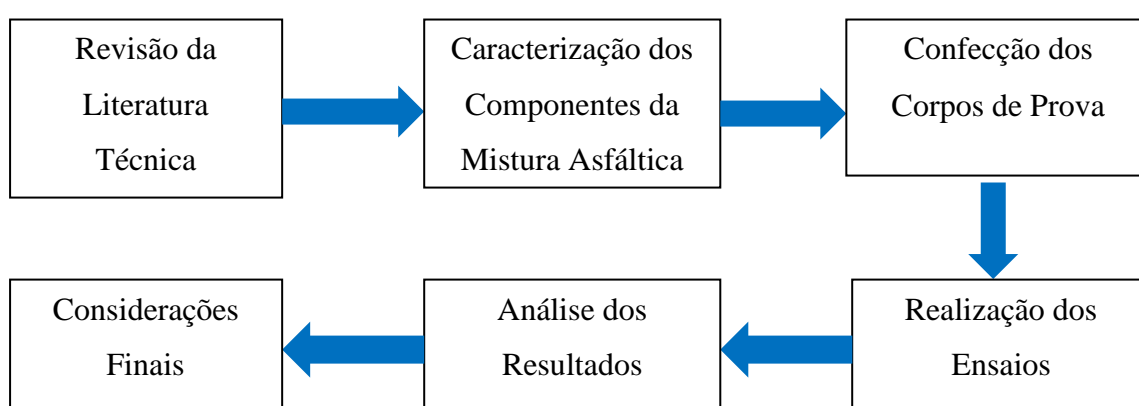
Ao todo, foram confeccionados 50 corpos de provas, sendo que destes 25 dizem respeito a mistura convencional e 25 dizem respeito a mistura com incorporação de cinzas em

substituição a parcelas de finos. Cada mistura apresenta 5 teores de ligante betuminoso diferentes e cada teor apresenta 5 amostras.

Concluída a confecção dos corpos de prova, deu-se início aos procedimentos de determinação dos parâmetros de dosagem das misturas asfálticas, como: massa específica aparente (MEA), estabilidade, fluência, teor de vazios (%V), vazios do agregado mineral (%VAM) e relação betume-vazios (%RBV).

A seguir apresenta-se, em forma de organograma, a sequência das atividades que se realizaram ao longo deste trabalho.

Figura 1– Organograma das atividades.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Esta sequência de atividades é considerada a forma mais eficiente para o andamento da pesquisa, uma vez na qual ela se inicia com uma fundamentação teórica e em seguida dá início aos procedimentos laboratoriais.

1.3 DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA

A presente pesquisa se desenvolveu de forma restrita ao ambiente laboratorial. As amostras confeccionadas não se destinaram à aplicação direta no campo ou mesmo ao estabelecimento de cenários comparativos com obras já executadas ou em andamento. Foram seguidos de forma rigorosa todos os parâmetros normativos para cada ensaio realizado. Tais parâmetros são descritos ao longo do capítulo 2 e 4.

A seguir são identificados os locais onde houveram procedimentos referentes à execução da pesquisa, assim como as empresas que forneceram os materiais.

- Centro Tecnológico SATC (CTCL), localizado em Criciúma/SC. Realização das análises químicas das cinzas;

- Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), campus Joinville. Confeção das amostras e realização de ensaios nas dependências do Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação;
- Rudnick Minérios S.A. localizada na zona industrial norte de Joinville. Responsável pelo fornecimento dos materiais pétreos;
- Refinaria Presidente Getúlio Vargas localizada em Araucária/PR, foi a fornecedora do ligante betuminoso;
- Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), localizado na cidade de Capivari de Baixo. Responsável por disponibilizar a CV e CP.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, por se tratarem de misturas confeccionadas em laboratório, são válidas somente nas condições descritas neste documento. Este trabalho trata-se de uma proposição de pesquisa para misturas asfálticas.

1.4 RELEVÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVAS

Usinas termelétricas alimentadas por carvão mineral produzem grandes volumes de cinzas durante o processo de combustão. Tais volumes, tornam-se rejeitos industriais e muitas vezes não apresentam vantagens quanto a sua utilidade perante as indústrias. Tais materiais devem receber destinações específicas, não sendo adequada a simples deposição destes resíduos na natureza. Locais destinados a acolherem estes rejeitos devem receber estudos e análises prévias de modo a avaliarem os impactos gerados desta deposição.

Durante a combustão do carvão, alguns elementos são volatizados e posteriormente condensam-se sobre a superfície das cinzas quando os gases são resfriados. Segundo Azzolini (2008), os elementos Mn, Ba, V, Co, Cr, Ni, Ln, Ga, Nb, As, Sb, Sn, Br, Zn, Se, Pb, Hg e S são mais facilmente volatizados durante o processo. Assim sendo, as cinzas apresentam em sua composição parcelas significativas de metais pesados e que necessitam de destinações específicas. Caso estes metais sejam despejados na natureza sem a presença de medidas mitigadoras de danos, podem ser lixiviados e promover a contaminação de lençóis freáticos e causarem danos irreversíveis a fauna e flora daquela região.

Desta forma, a presente pesquisa apresenta dois focos. O primeiro tem cunho ambiental e visa proporcionar uma destinação adequada dos rejeitos gerados pelas usinas termelétricas. O segundo é o foco técnico, que visa avaliar o impacto nas propriedades

mecânicas de misturas asfálticas geradas pela incorporação de CP e CV na parcela de finos da mistura.

Tais impactos serão determinados através de ensaios de caracterização de materiais assim como ensaios de cunho mecânico e que visam avaliar o grau de resistências a diferentes solicitações promovidas no material. Nesta pesquisa, se dará relevância ao foco técnico.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Visando uma melhor organização, o trabalho apresenta a seguinte divisão:

Capítulo 1: Introdução ao tema da pesquisa, deixando o leitor ciente dos objetivos gerais e específicos, assim como da relevância do tema no ambiente atual.

Capítulo 2: Caracterização dos materiais que compõem as misturas asfálticas e suas propriedades e apresenta uma contextualização sucinta sobre o processo de geração das cinzas na indústria termelétrica.

Capítulo 3: Realiza uma abordagem referente as metodologias de formulações dos esqueletos minerais que irão compor as misturas asfálticas analisadas.

Capítulo 4: Descrição dos procedimentos laboratoriais de cada ensaio, referente as análises das propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

Capítulo 5: Análise dos resultados obtidos dos ensaios laboratoriais das misturas asfálticas.

Capítulo 6: Apresenta as conclusões referentes a pesquisa e propõe recomendações a trabalhos futuros acerca do tema.

2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPONENTES

Serão abordados neste capítulo as principais características dos materiais que compõem as misturas asfálticas analisadas. Por fim é realizado uma breve explicação do processo de geração das cinzas nas centrais termelétricas.

2.1 MATERIAL PÉTREO

Os agregados pétreos necessários para a realização desta pesquisa foram fornecidos pela empresa Rudnick Minérios S.A. Esta localiza-se no bairro Pirabeirada na cidade de Joinville. O processo de obtenção dos materiais se dá através da britagem de rochas metamórficas do tipo Gnaiss. As principais características técnicas deste material estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Características técnicas do material fornecido pela empresa Rudnick.

Densidade	2,8 g/cm ³
Módulo de Elasticidade	46000 - 66000
Taxa de ruptura sob compressão	90 – 110 Mpa
Coefficiente de Poisson	0,23

Fonte: Rudnick Minérios S.A., adaptado pelo autor.

Segundo normativas do DNIT, são necessários a realização de ensaios de caracterização dos agregados minerais, de forma a se obter um melhor entendimento de suas propriedades. Tais ensaios são de fundamental importância uma vez que certos materiais podem não satisfazer condições mínimas de aplicabilidade em campo, ocasionando desta forma pavimentos com qualidades não satisfatórias.

Figura 2 – Instalações da empresa Rudnick Minérios S.A.



Fonte: Autor (2018).

Para a caracterização do material pétreo é necessário realizar os seguintes ensaios:

- Abrasão Los Angeles;
- Ataque por Sulfato de Sódio Anidro;
- Índice de Forma;
- Adesividade ao Ligante Betuminoso.

2.1.1 Abrasão Los Angeles

O ensaio de Abrasão Los Angeles mede o desgaste sofrido pelo agregado, quando este é colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com carga abrasiva e submetido a um determinado número de revoluções da máquina à uma velocidade compreendida entre 30 e 33rpm. O desgaste é convencionalmente expresso através da porcentagem do material que passa pela peneira de malha 1,7 mm após o ensaio.

Figura 3 – Máquina “Los Angeles”.



Fonte: Autor (2018).

O ensaio deve ser realizado com a granulometria mais próxima possível daquela que será utilizada em obra. Desta forma deve ser consultado e seguida as faixas granulométricas descritas na tabela 2.

Tabela 2 – Graduação para ensaio abrasão “Los Angeles”.

Peneiras abertura em mm		Amostra – massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500+/-50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500+/-50	-	-
50	38	-	-	-	-	5000+/-50	5000+/-50	-
38	25	1250+/-25	-	-	-	-	5000+/-25	5000+/-25
25	19	1250+/-25	-	-	-	-	-	5000+/-25
19	12,5	1250+/-10	2500+/-10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250+/-10	2500+/-10	-	-	-	-	-
9,5	6,3	-	-	2500+/-10	-	-	-	-
6,3	4,8	-	-	2500+/-10	-	-	-	-
4,8	2,4	-	-	-	5000+/-10	-	-	-
Massas totais em gramas		5000+/-10	5000+/-10	5000+/-10	5000+/-10	10000+/-100	10000+/-75	10000+/-50
N° de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: DNER-ME 035/98, adaptado pelo autor.

A carga abrasiva a ser usada para cada ensaio deve ser verificada na tabela 3.

Tabela 3 – Carga abrasiva.

Graduação	Número de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5000+/-25
B	11	4584+/-25
C	8	3330+/-20
D	6	2500+/-15
E	12	5000+/-25
F	12	5000+/-25
G	12	5000+/-25

Fonte: DNER-ME 035/98, adaptado pelo autor.

Por fim a abrasão “Los Angeles” é calculada pela equação 1.

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

A_n = Abrasão “Los Angeles” da graduação n, com aproximação de 1%;

n = Graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;

m_n = Massa total da amostra seca colocada na máquina;

m'_n = Massa da amostra lavada e seca após o ensaio (retida na peneira de 1,7mm).

2.1.2 Ataque por Sulfato de Sódio Anidro

O ensaio de durabilidade (DNER-ME 089/94, 1994), também conhecido sanidade, analisa a resistência do agregado quando exposto as intempéries do ambiente no qual o pavimento será implantado. Para tal é convencionalmente utilizado soluções de Sulfato de Sódio Anidro ou de Magnésio (BERNUCCI et al., 2010). Os agregados devem ficar submetidos ao banho desta solução por um período de tempo que varia de 16 à 18h, seguidos por processo de drenagem de 15min. Após a drenagem, a amostra deve ser seca em estufa, com temperatura de 105°C a 110°C, pelo mesmo período de tempo. Devem ser realizados 5 ciclos. Ao final do ensaio a amostra deve ser pesada, após 24h de secagem, no intuito de verificar a porcentagem de perda de material da amostra original.

2.1.3 Índice de Forma

O índice de Forma faz referência a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de cada fração granulométrica que a compõe (ABNT NBR 7809/2008).

- Comprimento de grão (c): maior dimensão possível de ser medida em qualquer direção do grão.
- Espessura de um grão (e): menor distância possível entre planos paralelos entre si em qualquer direção do grão.

Tabela 4 – Quantidade mínima de material para ensaio de índice de Forma.

Fração granulométrica (abertura da peneira)	Massa mínima da amostra inicial (kg)
≤19mm	5
>19mm e ≤25mm	10
>25mm e ≤37,5mm	15
>37,5mm	20

Fonte: NBR 7809/2008, adaptado pelo autor.

Em seguida deve ser calculado para cada fração, o número de grãos necessários.

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i}$$

Equação 2

Onde:

200 = Número de grãos necessários para a realização do ensaio;

N_i = Número de grãos a serem medidos na fração i . Para valores fracionários deve ser arredondado para a inteiro mais próximo;

F_i = Porcentagem de massa retida na fração i ;

2.1.4 Adesividade ao Ligante Betuminoso

O ensaio de adesividade verifica a capacidade do agregado ser aderido pelo ligante betuminoso. É verificado pelo não descolamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agregado-ligante é submetida à água destilada na temperatura de 40 °C por um intervalo de 72 horas (DNER-ME 78/94).

A amostra de material a ser ensaiada deve possuir 500g e ser pertencente ao material passante na peneira de 19mm e retido na de 12,7mm. Deve ser lavada e colocada em água destilada por um período de 1 minuto.

O resultado se dá satisfatório quando não houver nenhum descolamento da película betuminosa após o tempo de 72 horas. O teste não é satisfatório caso ocorra total ou parcial descolamento da película.

2.1.5 Resultados de Caracterização dos Granulares

A caracterização dos materiais granulares da empresa Rudnick Minérios S.A. foi realizada pela equipe do LDTPav. A tabela 5 apresenta os resultados referentes a análise dos materiais granulares.

Tabela 5 – Resultados de caracterização dos materiais granulares.

Ensaio	Resultado Obtido em Laboratório	Limite Normativo	Norma
Desgaste por Abrasão Los Angeles	17,5%	≤ 50%	DNER-ME 35/98 e DNER-EM 37/97
Durabilidade ao Sulfato de Sódio	5,3%	≤ 12%	DNER-ME 89/94 e DNER-EM 37/97
Índice de Forma (Lamellaridade)	0,6	≥ 0,5	ABNT NBR 7809/2006
Adesividade ao Agregado Graúdo	Má	-	DNER-ME 78/94
Equivalente de Areia	78%	-	DNER-ME 54/97
Teor de Material Pulverulento	0,4%	≤ 1,0%	DNER-ME 266/97 e DNER-EM 37/97
Absorção	0,5%	-	-

Fonte: Autor (2018),

Através da análise dos resultados obtidos, é possível afirmar que os materiais granulares atendem aos requisitos mínimos exigidos por norma, exceto a adesividade ao ligante betuminoso. É necessária a incorporação no ligante de aditivo melhorador de adesividade (dope) ou de adição que confira esta condição. No presente estudo não haverá adição de dope, devido a pretensão do autor em realizar uma análise do real impacto da inserção de tais cinzas nas misturas asfálticas.

2.2 LIGANTE BETUMINOSO

O ligante betuminoso (LB) utilizado nesta pesquisa foi fornecida pela REPAR e faz parte da classe CAP 30/45 de penetração.

Segundo Guerrero (2013), o conhecimento adequado das propriedades do LB é de fundamental importância para a mistura, uma vez na qual formam uma película sobre as partículas e garantem a aglutinação entre os grãos.

Para a caracterização do LB é necessário realizar os seguintes ensaios:

- Penetração;
- Viscosidade Saybolt Furol;

- Verificação do ponto de amolecimento anel e bola.

A seguir são apresentados tais ensaios.

2.2.1 Penetração

Regido pela norma DNIT 155/2010-ME, o ensaio de penetração mede a profundidade que uma agulha padronizada penetra na amostra de forma vertical sob as condições de carregamento, tempo e temperatura pré-determinadas. Quanto maior a penetração da agulha, menor será a consistência do ligante betuminoso. Para tanto se faz necessário a utilização de recipiente adequado. A tabela 6 mostra as dimensões padronizadas para recipientes.

Tabela 6 – Dimensões do recipiente para ensaio de penetração.

Para material com penetração (0,1mm)	Diâmetro interno (mm)	Altura interna (mm)
40 a 200	55	35
≥201	55 - 75	45 - 70

Fonte: DNIT 155/2010-ME, adaptado pelo autor.

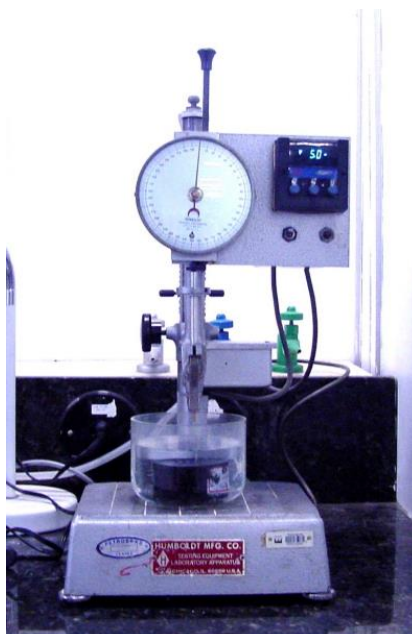
O valor resultante para a penetração, em décimos de milímetros, será a média de no mínimo três leituras, onde os valores não se afastem mais daqueles mencionados na tabela 7.

Tabela 7 – Critérios para indicação de resultados.

Penetração (0,1mm)	Diferença máxima entre o valor mais alto e valor mais baixo das determinações (0,1mm)
0 até 49	2
50 até 149	4
150 até 249	12
250 até 500	20

Fonte: DNIT 155/2010-ME, adaptado pelo autor.

Figura 4 – Equipamento para ensaio de penetração.



Fonte: DNIT 155/2010-ME.

2.2.2 Ponto de Amolecimento Anel e Bola

O presente ensaio é normatizado pela norma DNIT 131/2010-ME. Este procedimento tem por finalidade a obtenção da correlação de temperatura em que o ligante betuminoso amolece e escoar. Para a execução do ensaio é necessário a colocação de duas amostras do ligante no centro de um anel metálico. Em seguida posiciona-se uma esfera de aço sob a amostra. O conjunto é então inserido em um béquer contendo água. Terminado esta etapa, a amostra é aquecida a uma taxa de $5 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ por minuto.

Obtêm-se leituras de ponto de amolecimento no momento em que as amostras entram em contato com o fundo do béquer. Este contato se dará após a fluência do ligante. Para validação dos dados a diferença de temperaturas entre as amostras não poderá ser superior a 2°C . Para tanto, é possível a utilização de termômetros inseridos no interior do béquer. Por fim a obtenção do ponto de amolecimento da mistura será a média dos pontos de amolecimento das amostras.

Figura 5 – Equipamento para ensaio de ponto de amolecimento anel e bola.



Fonte: Autor (2018).

2.2.3 Viscosidade Saybolt Furol

O ensaio de viscosidade Saybolt-Furol é normatizado pela ABNT NBR 14950/2003. Sua função é a obtenção da curva de viscosidade do ligante betuminoso. Segundo Luz (2016), a curva de viscosidade fornece as temperaturas de usinagem e compactação utilizadas para confeccionar as misturas asfálticas utilizando o ligante ensaiado e visando também a garantia da boa cobertura dos agregados pelo LB.

Para a execução do ensaio é utilizado o viscosímetro Saybolt-Furol apresentado na figura 6. O ligante deve ser aquecido e estabilizado até a temperatura de ensaio. Verifica-se o tempo gasto para escoar 60ml do ligante, após estabilização, através da abertura de orifício proporcionada.

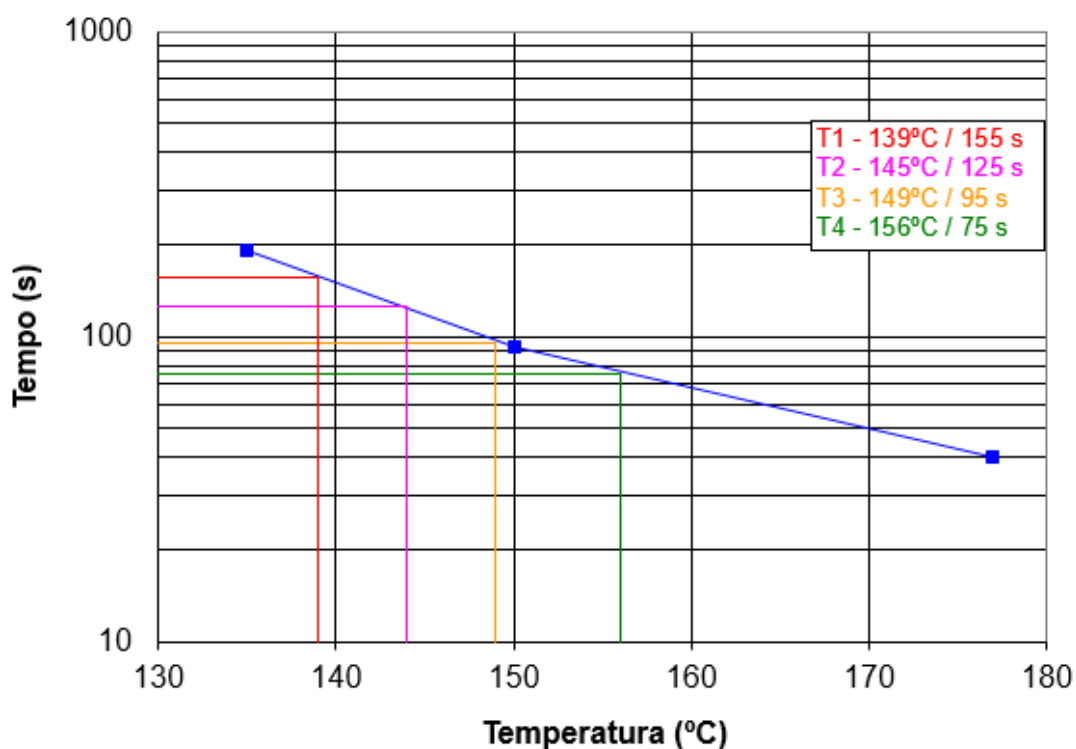
Figura 6 – Equipamento para ensaio de viscosidade Saybolt-Furol.



Fonte: Autor (2018).

O gráfico obtido pelos resultados de ensaio associa o tempo levado para escoar 60ml de ligante com a temperatura de ensaio. A figura 7 representa os resultados de ensaio para o CAP 30/45, segundo laudo técnico fornecido pela REPAR.

Figura 7 – Curva de viscosidade Saybolt-Furol para o CAP 30/45.



Fonte: Laudo técnico REPAR.

A análise do presente gráfico está exposta nos resultados de caracterização do LB.

2.2.4 Resultados de Caracterização do Ligante Betuminoso

A seguir, na tabela 8 estão representados os resultados da caracterização do ligante betuminoso. Tais dados foram obtidos através de laudo técnico fornecido pela REPAR.

Tabela 8 – Resultados de caracterização do ligante betuminoso.

Características	Unidade	Método de ensaio	Limites	
			Mínimo	Máximo
1 Ponto de amolecimento	°C	NBR 6560	52	-
2 Penetração, 100g, 5s, 25°C	0,1mm	NBR 6576	30	45
3 Viscosidade Saybolt Furol	135°C	NBR 14950	192	-
	150°C		90	-
	177°C		40	150
4 Viscosidade Brookfield	135°C-spindle 21, 20rpm	NBR 15184	374	-
	150°C-spindle 21, 50rpm		203	-
	177°C-spindle 21, 100rpm		76	285
5 Ponto de fulgor	°C	NBR 11341	235	-
6 Índice de susceptibilidade térmica	adimensional	-	-1,5	0,7
7 Ductilidade a 25°C	cm	NBR 6293	60	-
8 Solubilidade em tricloroetileno	% (em massa)	NBR 14855	99,5	-

Fonte: Laudo técnico REPAR, adaptado pelo autor.

Através de análise da figura 7, são identificadas as Temperaturas de Compactação e Usinagem. Para tanto são definidos T1, T2, T3 e T4. Tais valores são relacionados com os respectivos tempos de ensaio. Assim chegou-se a um intervalo de temperatura de compactação compreendido de 139°C à 145°C. Já a temperatura de usinagem esta compreendida na faixa que vai desde 149°C à 156°C. O autor analisou e adotou as seguintes temperaturas para trabalho:

- Temperatura de Compactação: 145°C
- Temperatura de Usinagem: 153°C

2.3 CINZA

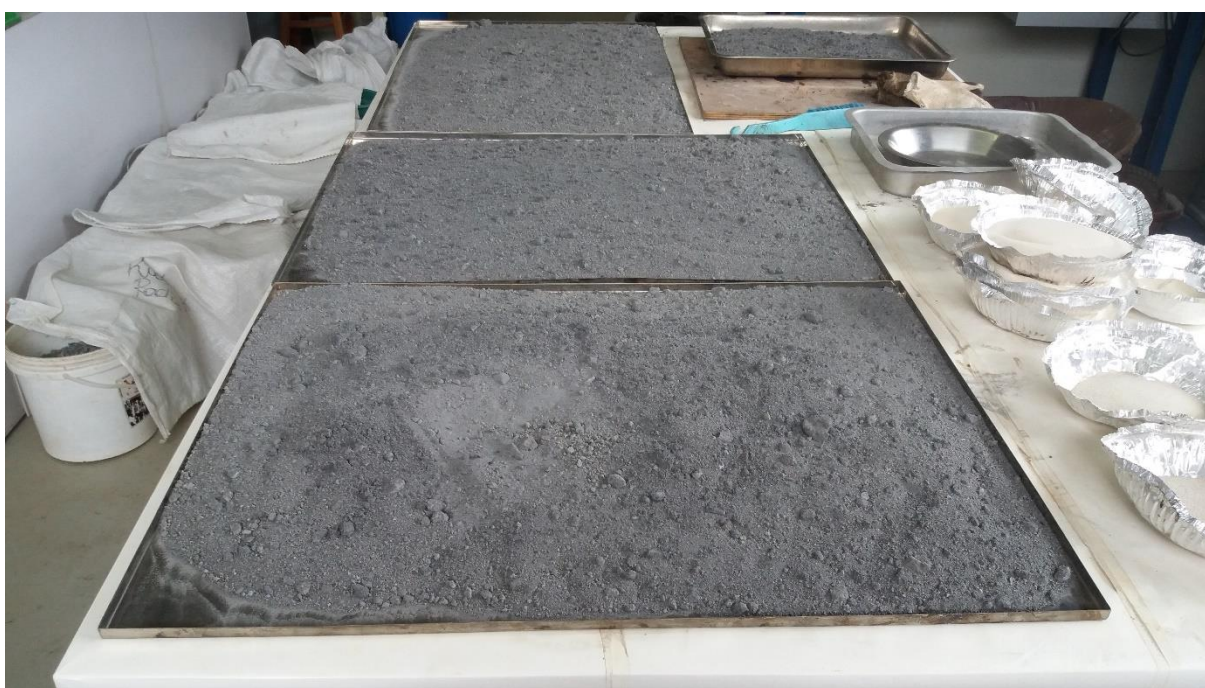
Para a caracterização adequada das cinzas, faz-se necessário primeiro realizar uma breve explicação do processo de geração das mesmas nas centrais termelétricas. Após esta etapa é então feita uma caracterização química e morfológica de tais cinzas.

2.3.1 Processo de Formação das Cinzas em Centrais Termelétrica

Para a geração de energia elétrica, o carvão mineral é queimado em grandes caldeiras no intuito de aquecer a água e gerar vapor d'água. Este por sua vez é canalizado, tornando-se vapor pressurizado, e direcionado para as turbinas. Devido as altas pressões atingidas pelos vapores d'água, há a movimentação das pás das turbinas geradores de energia elétrica.

O processo de combustão do carvão gera grande quantidade de resíduos, denominados genericamente por cinzas (AZZOLINI, 2008).

Figura 8 – Cinza oriunda do CTJL.



Fonte: Autor (2018).

As cinzas são constituídas de matéria não combustível do carvão e de partículas não queimadas, devido à combustão incompleta do carvão pulverizado na caldeira, em temperatura entre 1200 a 1600 °C.

Tais resíduos podem ser classificados de diferentes tipos:

- Escória: possuem de 10-20% de teores de carbono não queimado e apresentam granulometria grosseira. Ficam depositados ao fundo da fornalha e são retirados após serem resfriados;
- Cinzas pesadas: também conhecida por cinzas de fundo, tratam-se de resíduos com teores de carbono não queimados da ordem de 5-10%. Apresentam granulometria grosseira, depositam-se no fundo da fornalha e são retirados por fluxo de água;

- Cinzas leves: normalmente denominada como cinza volante, apresentam granulometria extremamente fina, inferiores à 0,15mm. Estas são arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas e são retidas, em sua maioria, por sistemas compostos de precipitadores e ciclones. Representam cerca de 80 % da cinza total gerada durante o processo de combustão.

Alguns setores industriais utilizam os resíduos desta queima em seus processos de beneficiamento de materiais, ou mesmo na composição final de seus produtos. Podemos citar a utilização de parcelas de CV na indústria cimenteira. Devido ao grande volume de resíduos gerados, a indústria atualmente não apresenta capacidade de absorver por total esta quantidade. O setor da construção civil por exemplo tem capacidade de consumo de 34% das cinzas geradas.

No processo de queima do carvão, há a liberação de alguns metais pesados na forma de partículas. Estas, normalmente se depositam na superfície da CV, fazendo com que a deposição inadequada delas na natureza venha a se tornar um problema ambiental. Segundo Martins (2002), alguns tipos de carvão possuem quantidades significativas de urânio, transformando tanto as usinas termelétricas como os depósitos de cinzas em fonte de radiação.

De acordo com Silva (2011), a disposição das cinzas geradas nos processos de queima das termelétricas, até o ano de 1990, era feita em depósitos nos arredores das fontes geradoras. Através da pressão da sociedade e ações dos órgãos governamentais e ambientais atualmente a disposição de grande parte destas cinzas é feita em depósitos especiais, bacias de decantação, e cavas de minas desativadas. Ainda assim, caso esta deposição ocorra, existe a possibilidade de contaminação do solo e do lençol freático do local. As cinzas volantes, por se tratarem de materiais relativamente leves, podem ainda ser transportadas pela ação do vento, ocasionando desta forma uma poluição do ar e contaminando áreas distantes das usinas.

2.3.2 Caracterização Química e Morfológica das Cinzas

Os resultados de caracterização das cinzas volante e de fundo do complexo termelétrico Jorge Lacerda foram apresentados no V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral (V CBCM). Desta forma, o autor fará aqui uma explanação de tais resultados e fará também considerações a respeito destes resultados.

Para a determinação da composição química das cinzas foram utilizados o Espectrômetro de Fluorescência de raios-x. A tabela 9 apresenta os resultados de composição química para as cinzas.

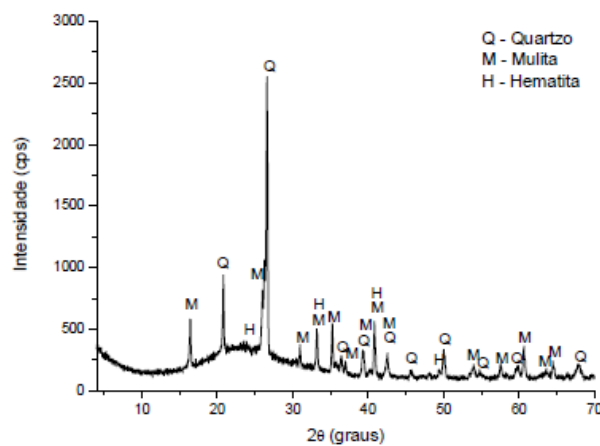
Tabela 9 – Composição química majoritária das cinzas.

Componentes	Cinza volante, % massa	Cinza de fundo, % massa
AL ₂ O ₃	25,59	24,40
CaO	1,55	1,37
Fe ₂ O ₃	5,02	6,19
K ₂ O	2,92	3,53
MgO	0,79	0,76
MnO	<0,05	<0,05
Na ₂ O	0,56	0,52
P ₂ O ₅	0,07	0,08
SiO ₂	61,02	57,30
SO ₃	0,47	0,33
TiO ₂	1,11	1,17
Perda ao fogo	1,33	3,97
SiO ₂ /AL ₂ O ₃	2,38	2,35

Fonte: AQUINO (2017), adaptado pelo autor.

Em questão de composição mineralógicas utilizou-se um Difratorômetro de raio-x e os seus resultados foram obtidos pelo método Rietveld. Os resultados das cinzas volante e de fundo estão expressos nas tabelas 10 e 11 respectivamente. As figuras 9 e 10 representam tais resultados obtidos.

Figura 9 – Curva de DRX da cinza volante.



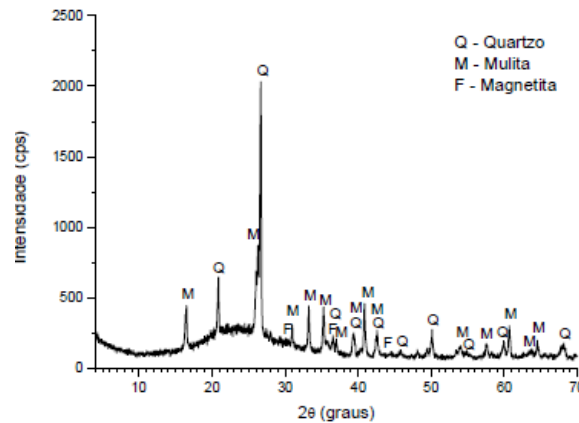
Fonte: AQUINO (2017).

Tabela 10 – Composição mineralógica da cinza volante.

Fase	Espécie	%Mássico
Amorfa	-	74
Cristalina	Quartzo	9
	Hematita	1
	Mulita	16

Fonte: AQUINO (2017), adaptado pelo autor.

Figura 10 – Curva de DRX da cinza pesada.



Fonte: AQUINO (2017).

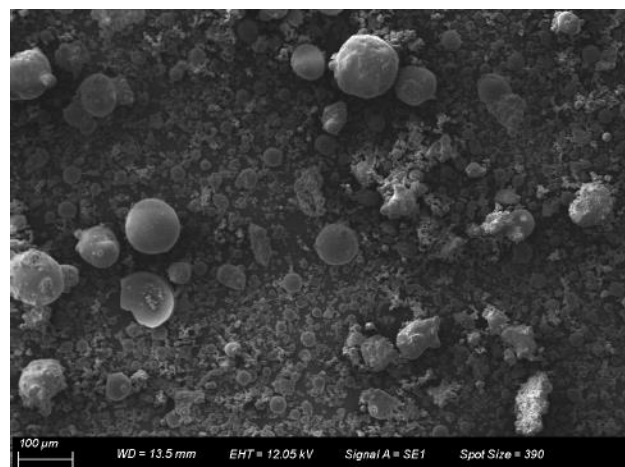
Tabela 11 – Composição mineralógica da cinza de fundo.

Fase	Espécie	%Mássico
Amorfa	-	75
Cristalina	Quartzo	12
	Magnetita	2
	Mulita	11

Fonte: AQUINO (2017), adaptado pelo autor.

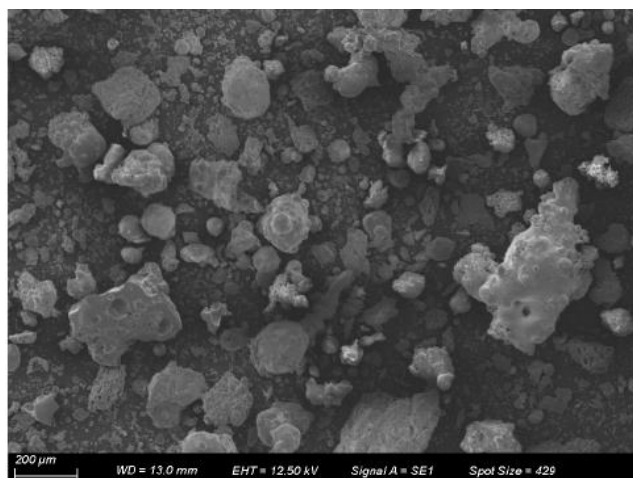
Em relação a morfologia das cinzas, esta foi realizada através de microscópio eletrônico de varredura (MEV). Para a determinação das áreas superficiais e as estruturas dos poros utilizou-se o modelo BET com auxílio do equipamento Autosorb 1. A figura 11 diz respeito a morfologia da cinza volante. Já a figura 12 diz respeito a morfologia da cinza de fundo.

Figura 11 – Morfologia da cinza volante.



Fonte: AQUINO (2017).

Figura 12 – Morfologia da cinza de fundo.



Fonte: AQUINO (2017).

Na tabela 12, são mostradas as propriedades dos poros das cinzas e suas superfícies. Em ambas as cinzas se verifica valores baixos de volume de poros. Já em relação a área superficial, a cinza de fundo apresenta valores superiores a cinza volante.

Tabela 12 – Propriedades dos poros das cinzas em análise.

Material	Diâmetro médio de poros (Å)	Volume total de poros (cm³g⁻¹)	Área superficial específica (m²g⁻¹)
Cinza Volante	138,8	2,047 x 10 ⁻³	2,556
Cinza de Fundo	46,25	2,955 x 10 ⁻³	0,5900

Fonte: AQUINO (2017), adaptado pelo autor.

Através da análise dos resultados obtidos por Aquino (2017), é possível afirmar que as cinzas em análise não apresentam diferenças significativas quanto a composição química das mesmas. Ambas apresentam apenas pequenas variações quanto a quantidade majoritária dos componentes químicos. Em se tratando de composição mineralógica, também não ocorrem discrepâncias entre os minerais predominantes. O mineral com a maior representatividade em ambas as cinzas é o quartzo.

Por meio da análise dos resultados do MEV, o autor constatou que as cinzas, sobretudo a volante, apresentam uma macrotextura arredondada e microtextura rugosa, além da forma do grão em geral apresentar porosidade, e de maneira a preservar as características originais do carvão mineral antes do processo de queima. Acredita-se que esta condição de porosidade fará com que as misturas asfálticas com a presença de cinza necessitem de mais ligante betuminoso para alcançar o teor ótimo de trabalho, quando comparada com uma mistura tradicional. Porém, esta afirmação será averiguada no final desta pesquisa.

Após análise dos resultados explanados anteriormente, julga-se a não necessidade de separação das cinzas em volante e pesada quando se tratando de proposições de misturas

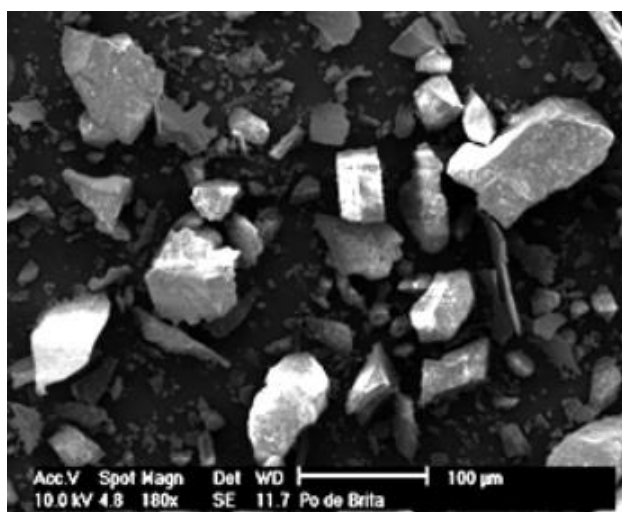
asfálticas densas com granulometrias iguais. Isto se deve ao fato de haver pouca variação entre elas quando se leva em conta composição química, mineralógica e morfologia. Desta forma, para a presente pesquisa, será realizada a junção das cinzas volante e pesada em uma única “cinza”, e com esta será realizada a composição dos corpos de prova para servir de comparação com a amostra asfáltica convencional.

É necessário realizar a análise das granulometrias das cinzas separadamente e verificar a viabilidade da mistura. A granulometria dos materiais constituintes é realizada no capítulo 3.

2.3.3 Caracterização Química e Morfológica do Pó de Pedra

De forma a realização de uma análise comparativa das morfologias dos materiais utilizados na pesquisa, buscou-se na pesquisa de Barra (2009) os resultados obtidos da caracterização morfológica do pó de brita. A imagem 13, mostra o resultado da análise através da utilização de MEV.

Figura 13 – Morfologia do pó de brita.



Fonte: BARRA (2009).

Com base nos resultados obtidos por Barra (2009), é possível afirmar que as frações finas dos granulares apresentam macrotextura sub-ângular e microtextura rugosa. Esta característica dos granulares pétreos ocasiona um embricamento das partículas quando estas são aproximadas pelo processo de compactação. Ainda na pesquisa de Barra, foram obtidos os dados referentes a área superficial específica do pó de brita, ao qual indicaram resultado de $0,1311\text{m}^2\text{g}^{-1}$.

Em relação a caracterização química do pó de brita, buscou-se na pesquisa de Siroma (2016), os resultados obtidos para o mesmo, uma vez que este realizou análise química dos

materiais da empresa Rudnick Minérios S.A. Através do ensaio de fluorescência de raio X, foram obtidos os valores presentes na tabela 13.

Tabela 13 – Resultados da caracterização química do pó de brita.

Elemento	Porcentagem (%)
SiO ₂	58,1
Al ₂ O ₃	13,4
Fe ₂ O ₃	9,2
Cr ₂ O ₃	<0,1
MgO	4,2
K ₂ O	1,8
Na ₂ O	3,3
SO ₃	0,1
TiO ₂	0,8
CaO	6,3
Cl	0,1
MnO	0,2
SrO	0,1
P ₂ O ₅	0,2
ZrO ₂	<0,1
Perda ao Fogo	2,29

Fonte: Siroma (2016), adaptado pelo autor.

Vale ressaltar que 58,1% do pó de pedra é composta por SiO₂, resultado este muito próximo do obtido para as cinzas volante e pesada (61,2 para a cinza volante e 57,30 para a cinza pesada).

Através da análise das composições químicas e sobretudo da morfologia das cinzas e dos granulares pétreos, espera-se que a mistura asfáltica com adição de cinza apresente maior absorção de ligante betuminoso, uma vez que apresenta superfície específica muito superior àquela apresentada pelo pó de brita.

3 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE FORMULAÇÃO GRANULOMÉTRICA

No presente capítulo são abordadas as diferentes metodologias de formulação de esqueletos minerais das misturas asfálticas.

3.1 METODOLOGIAS PARA FORMULAÇÃO DE ESQUELETOS MINERAIS

Existem atualmente diversas metodologias normatizadas para a determinação de esqueletos minerais de misturas asfálticas. Dentre elas podemos citar o método por Tentativa normatizado pela norma DNER-ME 043/95 (1995), o método gráfico de Rothfuchs e por fim o método Racional, ao qual será dada ênfase neste trabalho.

3.1.1 Método por Tentativa

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), é o órgão brasileiro que rege o uso do método por tentativas para compor a curva granulométrica. Este preconiza faixas granulométricas para o enquadramento dessa curva. Primeiramente é necessária a escolha da faixa granulométrica que será utilizada para que a mistura seja enquadrada e assim, aceita para aplicação em obra. Segundo o DNIT, a faixa granulométrica a ser adotada deverá ser selecionada em função da utilização prevista para a mistura asfáltica, ou seja, se a mesma for aplicada para camadas de rolamento, ligação ou reperfilagem. A Tabela 14 mostra as porcentagens limite para cada faixa granulométrica segundo o DNIT.

Tabela 14 – Faixa granulométrica para pavimentos flexíveis (DNIT-ES 031,2006).

Abertura de peneira		Porcentagem em massa passando (%)			
Série ASTM	Abertura	A	B	C	Tolerâncias
2''	50,8	100	100	100	-
1 ½''	38,1	95 – 100	100	100	+/- 7%
1''	25,4	75 – 100	95 – 100	100	+/- 7%
¾''	19,1	60 – 90	80 – 100	100	+/- 7%
½''	12,7	-	-	80 – 100	+/- 7%
3/8''	9,5	35 – 65	45 – 80	70 – 90	+/- 7%
Nº4	4,8	25 – 50	28 – 60	44 – 72	+/- 5%
Nº10	2	20 – 40	20 – 45	22 – 50	+/- 5%
Nº40	0,42	10 – 30	10 – 32	08 – 26	+/- 5%
Nº80	0,18	05 – 20	08 – 20	04 – 16	+/- 3%
Nº200	0,075	01 - 08	03 – 08	02 – 10	+/- 2%
Asfalto solúvel no CS2 (+) (%)		4,0 – 7,0 Camada de ligação (Blinder)	4,5 – 7,5 Camada de ligação de rolamento	4,5 – 9,0 Camada de rolamento	+/- 0,3%

Fonte: DNIT-ES 031,2006, adaptado pelo autor.

O Departamento Estadual de Infraestrutura (DEINFRA) também recomenda algumas faixas para o enquadramento das misturas asfálticas tendo basicamente os mesmos pressupostos do DNIT, porém se diferem em questões de materiais passantes em cada peneira e suas classificações.

A seguir é ilustrada na Tabela 15 a relação das faixas do DEINFRA disponibilizada para o enquadramento da mistura asfáltica.

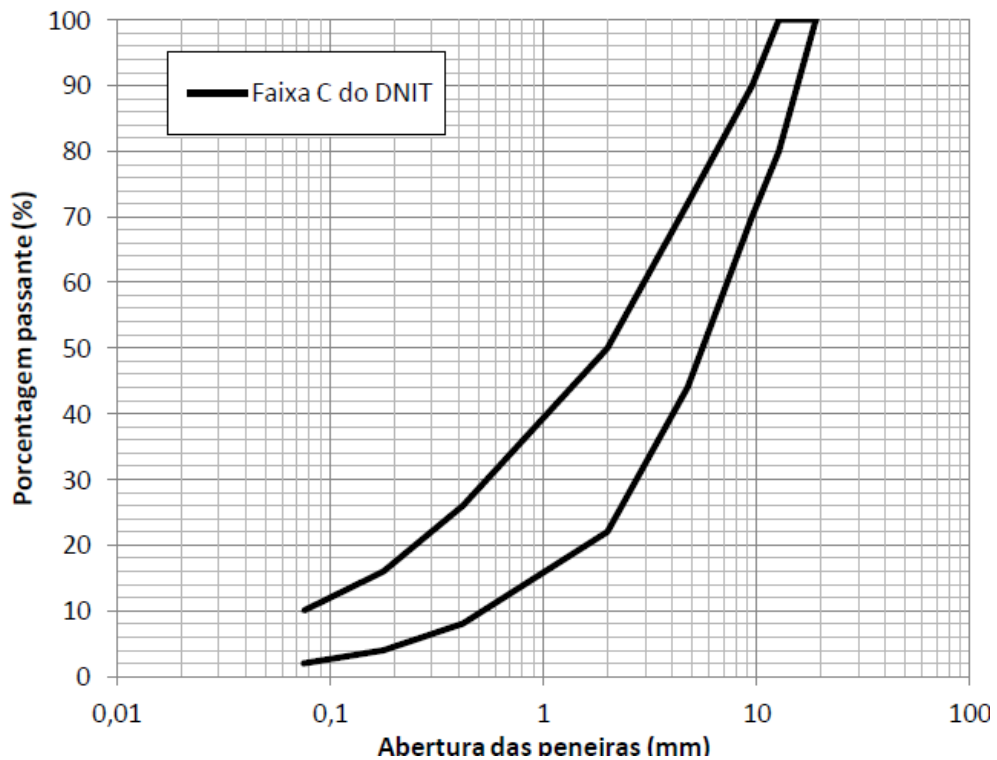
Tabela 15 – Faixa granulométrica para concreto asfáltico usinado a quente.

Abertura de peneira		Porcentagem em massa passando (%)					
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	D	E	F
2''	50,8	100	100	100	100	100	100
1 ½''	38,1	95 – 100	100	100	100	100	100
1''	25,4	75 – 100	95 – 100	100	100	100	100
¾''	19,1	60 – 90	80 – 100	100	100	100	100
½''	12,7	x	60 – 90	85 – 100	90 – 100	80 – 100	100
3/8''	9,5	35 – 65	45 – 80	75 – 100	76 - 93	70 – 90	100
Nº4	4,8	25 – 50	28 – 60	50 – 85	50 – 70	50 – 70	75 – 100
Nº10	2	20 – 40	20 – 45	30 – 75	33 – 48	33 – 48	50 – 90
Nº40	0,42	10 – 30	10 – 32	15 – 40	15 – 25	15 – 25	20 – 50
Nº80	0,18	05 – 20	08 – 20	08 – 30	08 - 17	08 – 17	07 – 28
Nº200	0,075	01 - 08	03 – 08	05 – 10	04 - 10	04 – 10	3 - 10
Camadas	Ligação	Ligação ou rolamento	Rolamento			Reperfilagem	

Fonte: DEINFRA-SC-ES-P05/92 (1992), adaptado pelo autor.

Com a faixa granulométrica estabelecida, a composição do esqueleto mineral deverá ser enquadrada entre seus limites. A Figura 14 ilustra a faixa granulométrica C do DNIT.

Figura 14 – Faixa C do DNIT.

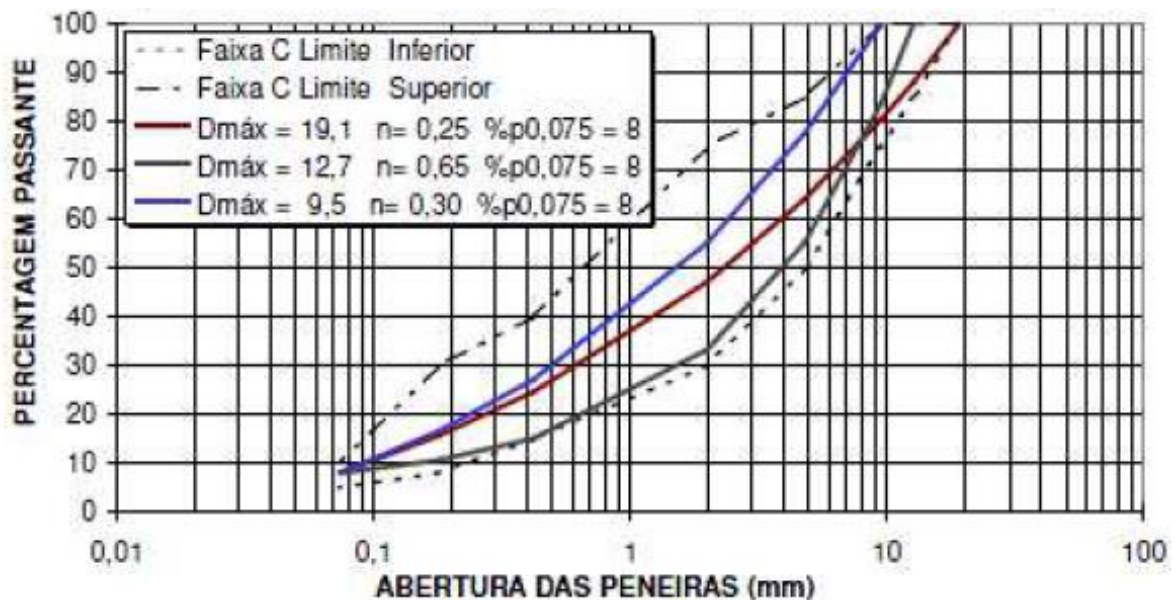


Fonte: DNIT.

Os intervalos amplos entre os limites inferior e superior dessa metodologia implica na possibilidade de haver uma ampla variação de curvas granulométricas, tornando evidente que as propriedades de produto obtido serão muito diferentes (MOMM, 1998).

A crescente necessidade de pavimentos de melhores qualidades tem gerado em algumas empresas a criação de “faixas de trabalho”. Tais empresas buscando a obtenção de curvas com menores variações têm realizado uma redução dos intervalos dos limites fixados pela norma vigente. A norma catarinense DEINFRA/ES/P/05/2016, diferente da vigente do DNIT, traz uma observação que cita que outras curvas granulométricas podem ser utilizadas, desde que apresente critérios como boa trabalhabilidade, qualidade e atenda as características específicas descritas pela norma.

Figura 15 – Curvas enquadradas nos limites da Faixa C do DNIT.



Fonte: Momm (1998, p.58).

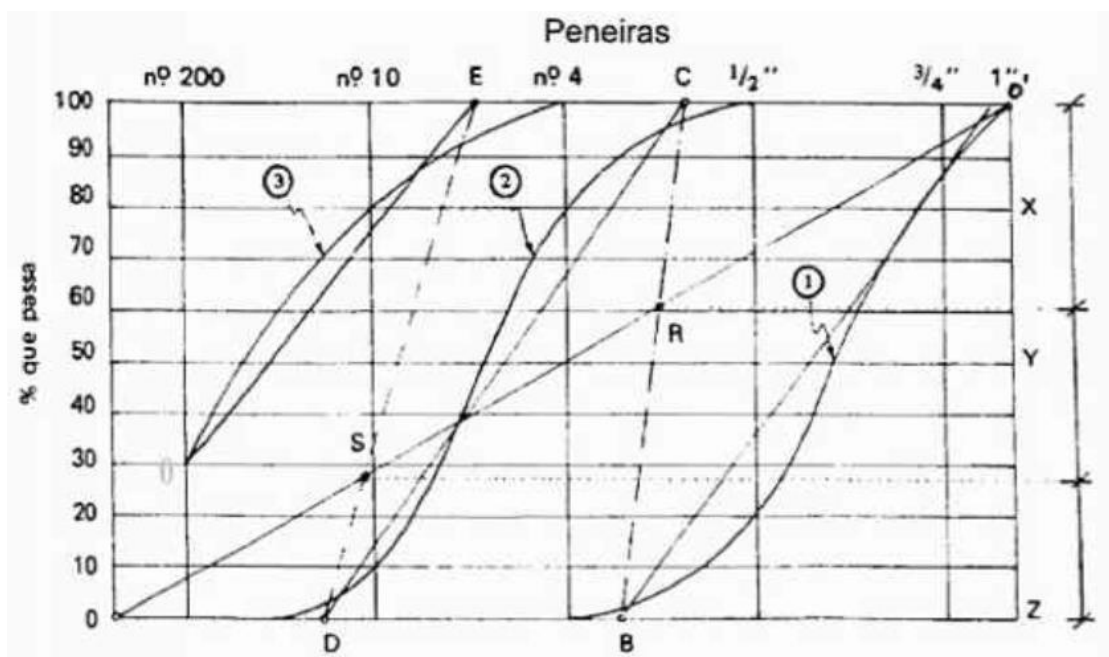
Devido à grande variabilidade de curvas granulométricas que podem ser enquadradas entre os limites da Faixa C, existe a possibilidade de haver curvas com desempenhos mecânicos diferentes e assim podendo não atender aos padrões de obras de pavimentação.

3.1.2 Método Gráfico de Rothfuchs

O Método Gráfico de Rothfuchs consiste em calcular uma curva média para a mistura. A seguir serão descritos a sequência de passos que devem ser seguidos para a obtenção desta curva.

Marcam-se em papel milimetrado e na direção vertical as porcentagens passantes em cada peneira. Em seguida cria-se um ponto 0' na extremidade do gráfico e sobre a linha correspondente a 100% de material passante. Após realizada esta etapa deve ser traçada uma diagonal ligando o ponto 0' e a origem do gráfico (reta 00'). A próxima etapa é determinar a escala horizontal das "aberturas das peneiras", levantando-se linhas verticais para cada peneira, de tal modo que a ordenada obtida sobre a reta 00' corresponda às "porcentagens que passam" nesta peneira para a mistura desejada. A etapa seguinte será plotar no gráfico, as curvas de distribuição granulométrica dos materiais. Para cada material utilizado deve ser determinada e identificada uma reta que separe de forma igualitária duas áreas, S1 e S2. Desta forma são criadas as retas 0'B, CD e EO. Como etapa seguinte é necessário ligar com uma reta os pontos C e D. Os pontos de intersecção das retas CB e ED com a diagonal 00' dizem respeito as proporções dos materiais componentes que devem entrar na mistura.

Figura 16 – Curva granulométrica segundo o Método de Rothfuchs.



Fonte: Wlastermiller (2008, p.883).

Por fim verifica-se a composição granulométrica da mistura através da equação 3.

$$P_i = a_i X + b_i Y + c_i Z \quad \text{Equação 3}$$

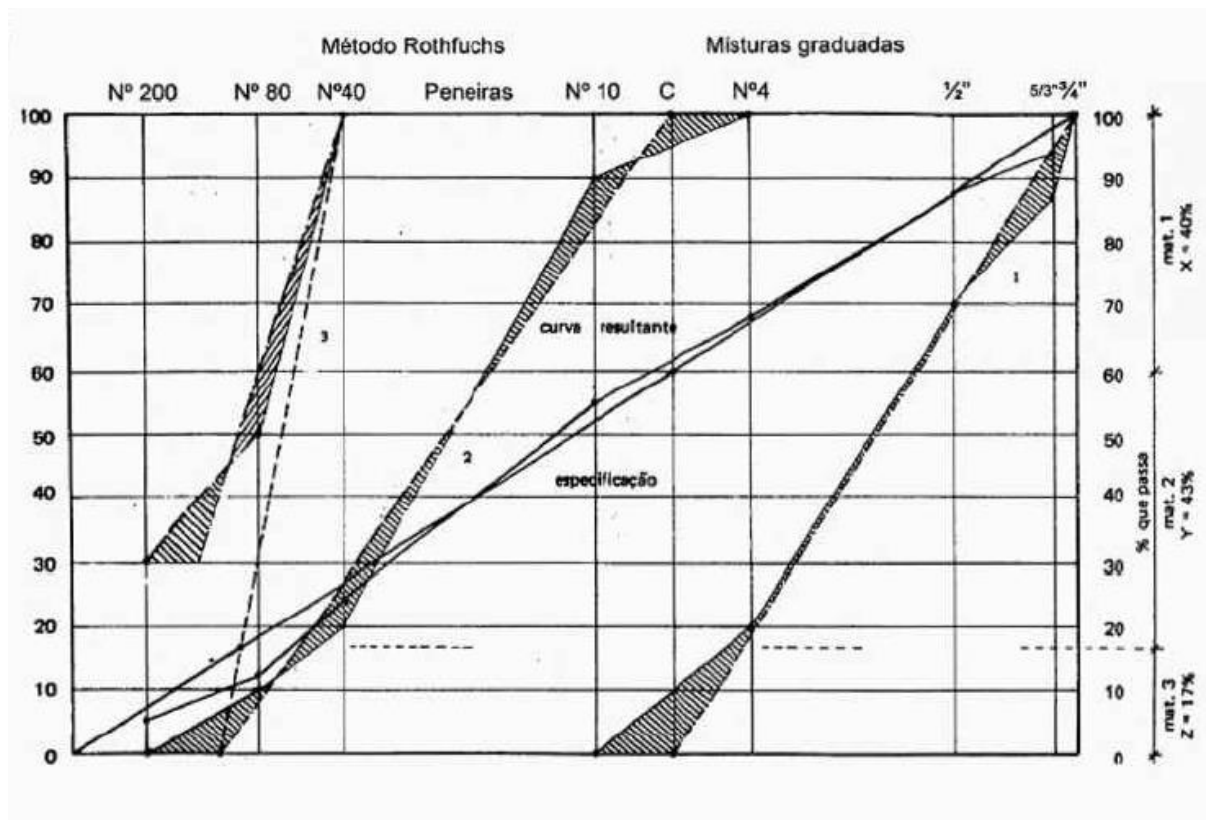
Onde:

- a_i , b_i e c_i são as porcentagens dos materiais 1, 2 e 3 que passam na peneira P_i ;
- X , Y e Z , as porcentagens dos materiais 1, 2 e 3 determinados.

Verificado que as porcentagens calculadas satisfazem à especificação, dosa-se, em laboratório, uma mistura com as porcentagens determinadas pelo método e executa-se o ensaio

de peneiramento, que deve proporcionar resultados semelhantes. A seguir é ilustrado um exemplo de gráfico resultante.

Figura 17 – Resultado de curva granulométrica segundo o Método de Rothfuchs.



Fonte: Wlastermiller (2008, p.885).

3.1.3 Método Racional

O método racional, também conhecido por método teórico, pode ser entendido como uma forma de calcular as porcentagens dos agregados na composição granulométrica de uma mistura asfáltica. Este método determina a utilização de peneiras de modo que se obtenha uma provisão de granulometria descontínua. Desta forma, os vazios formados pelas partículas maiores podem ser preenchidos por partículas de menor diâmetro.

Para a ocorrência deste fenômeno é necessário a fixação de valores para diâmetro máximo e mínimo da composição do esqueleto mineral referente a série de peneiras escolhida pelo projetista. Em seguida calcula-se o percentual de cada fração correspondente a 100% das partículas passantes na peneira através da equação 2 proposta por Fuller-Talbot (DNIT, 2006). Deve ser levado em conta nesta etapa, a variação de diâmetros que ocorrem nas peneiras.

$$\%p = a. \left(\frac{d}{D}\right)^n$$

Equação 4

Onde:

%p = porcentagem em peso passante na peneira d (menor diâmetro);

a = constante, tomada igual a 100;

d = abertura de uma dada peneira (mm);

D = tamanho máximo, abertura da peneira que passa 100% (mm);

n = expoente.

O expoente “n” é obtido através da equação 3

$$n = \frac{\log(\%pi) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)}$$

Equação 5

Onde:

n = expoente;

%pi = porcentagem em peso que passa na peneira de menor diâmetro;

d = abertura de uma dada peneira (mm);

D = tamanho máximo, abertura da peneira que passa 100% (mm).

Os resultados das equações 2 e 3 tendem a representar uma curva granulométrica contínua e de maior proporção entre os grãos. De acordo com DNIT (2006), o expoente “n” indica o comportamento da curva, isto é, se a curva é densa, aberta ou do tipo macadame.

- Agregado de graduação densa: $0,35 < n < 0,55$;
- Agregado de graduação aberta: $0,55 < n < 0,75$;
- Agregado tipo macadame: $D \approx 2.d, n \approx 1,00$.

As graduações mais densas apresentam um maior contato entre as partículas e um baixo teor de vazios. Segundo Bernucci *et al* (2010), estes fatores são os responsáveis pela maior estabilidade da mistura. Porém, é necessário haver certa quantidade de vazios de modo a propiciar a incorporação do ligante betuminoso na mistura. Caso a mistura não apresente vazios, ocorrerá a exsudação do ligante, isto é, o ligante irá migrar em direção a superfície da mistura, ocasionando assim a segregação dos materiais e por consequência haverá perda de estabilidade da mistura asfáltica.

Já em relação a graduações abertas, ocorre o processo inverso. Os tamanhos das partículas são maiores, gerando assim pouco contato entre os grãos e desta forma ocasionando maiores volumes de vazios. Por consequência deste processo, o ligante tenderá a permanecer nestes locais. Portanto, deve ser analisado se a granulometria resultante é adequada para o projeto em questão.

O método teórico, não emprega o uso de faixas de enquadramento, uma vez que utiliza diâmetros bem definidos ao longo da composição do esqueleto mineral. Desta forma, as frações heterogêneas oriundas do campo não resultam em dificuldades para a formulação.

De modo a exemplificar o método descrito, será utilizado valores presentes na tabela 16. Tais valores são oriundos da curva granulométrica teórica oriunda da pesquisa de Barra (2009). Assim, foram fixados valores de 19,1mm e 0,075mm para diâmetro máximo (D) e mínimo (d) respectivamente e estabelecido uma porcentagem de 6% de material passante na peneira de diâmetro mínimo. Em seguida utilizando as equações 5 chegou-se em um expoente com valor numérico de 0,51. O cálculo é expresso a seguir:

$$n = \frac{\log(\%pi) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} = \frac{\log(6) - \log(100)}{\log\left(\frac{0,075}{19,1}\right)} = 0,51$$

Após determinado valor de “n”, aplica-se este na equação 4 para todas as peneiras utilizadas pelo autor. Este processo fornecerá valores de porcentagens de material passante em cada peneira. A seguir está exemplificado o cálculo para a peneira 12,7mm.

$$\%p = a \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n = 100 \cdot \left(\frac{12,7}{19,1}\right)^{0,51} = 81,3$$

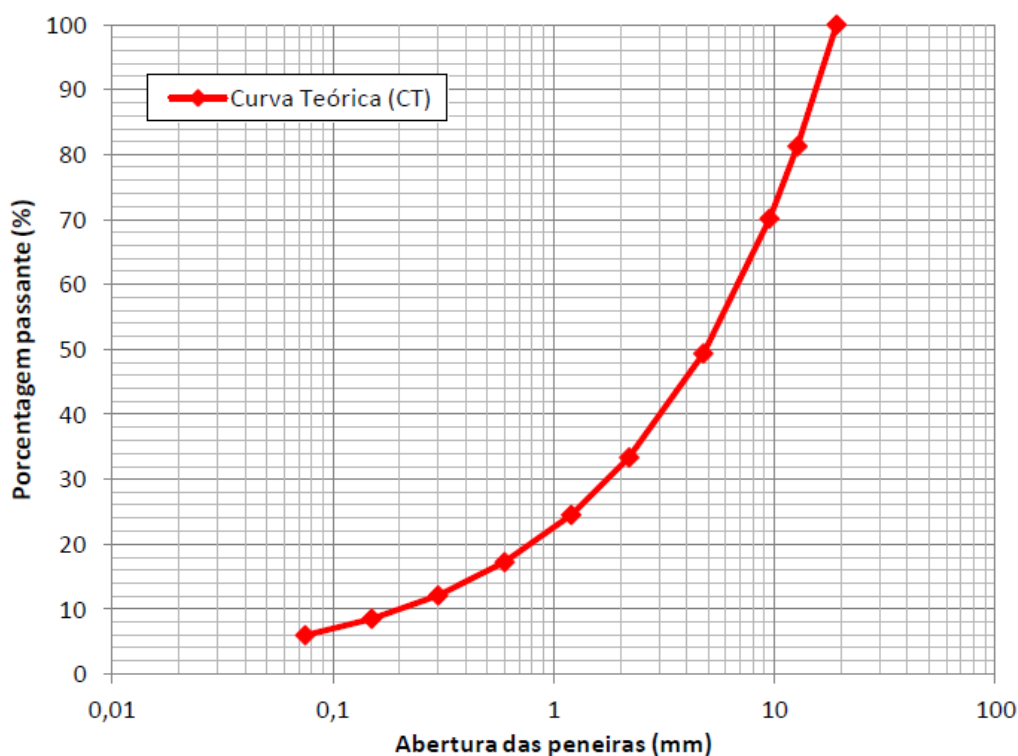
O processo deve ser feito para as demais peneiras e os resultados estão identificados na tabela 16. Em seguida, os valores da tabela estão expressos na figura 18 através de um gráfico em escala logarítmica.

Tabela 16 – Composição granulométrica da curva teórica (BARRA, 2009)

Peneiras	Abertura (mm)	Porcentagem passante (%)	Porcentagem retida (%)
3/4''	19,1	100	-
1/2''	12,7	81,3	18,7
3/8''	9,5	70,1	11,2
Nº 4	4,76	49,4	20,8
Nº 10	2,20	33,4	16,6
Nº 16	1,20	24,5	8,8
Nº 30	0,60	17,2	7,3
Nº 50	0,30	12,1	5,1
Nº 100	0,15	8,5	3,6
Nº 200	0,075	6,0	2,5
Fundo	-	-	6,0

Fonte: Barra (2009), adaptado pelo autor.

Figura 18 – Curva granulométrica teórica (BARRA, 2009).



Fonte: Barra (2009).

É identificado que a curva granulométrica teórica é bem definida. Isso se dá pelo preenchimento gradativo dos vazios deixados pelos agregados de maior diâmetro por aqueles menores, de maneira contínua à razão da metade dos diâmetros imediatamente superiores, principalmente nas frações médias e finas, entre os diâmetros 4,76mm e 0,075mm. O que resulta em um controle mais eficaz da formulação do esqueleto mineral pelo projetista. Desta forma, o autor julga ser de maior adequabilidade o uso desta metodologia na presente pesquisa.

3.1.4 Curvas Granulométricas Utilizadas

O autor realizou o processo de peneiramento dos materiais granulares nas dependências do LDTPav. A sequência de peneiras utilizadas é apresentada na tabela 17 juntamente com os percentuais de material passante e retido nas mesmas. A curva granulométrica obtida é apresentada no Figura 19. Para compor a curva foi utilizado o método racional.

Tabela 17 – Sequência de peneiras utilizadas.

Peneira (mm)	% Passante	% Retida
19,1	100,0	-
12,5	80,6	19,4
9,5	70,0	10,5
4,76	49,2	20,8
2,2	33,2	16,0
1,2	24,4	8,8
0,6	17,1	7,3
0,3	12,0	5,1
0,15	8,4	3,6
0,075	6	2,5
-	-	6

Fonte: Autor (2018).

Figura 19 – Curva granulométrica do material pétreo obtida pelo autor.

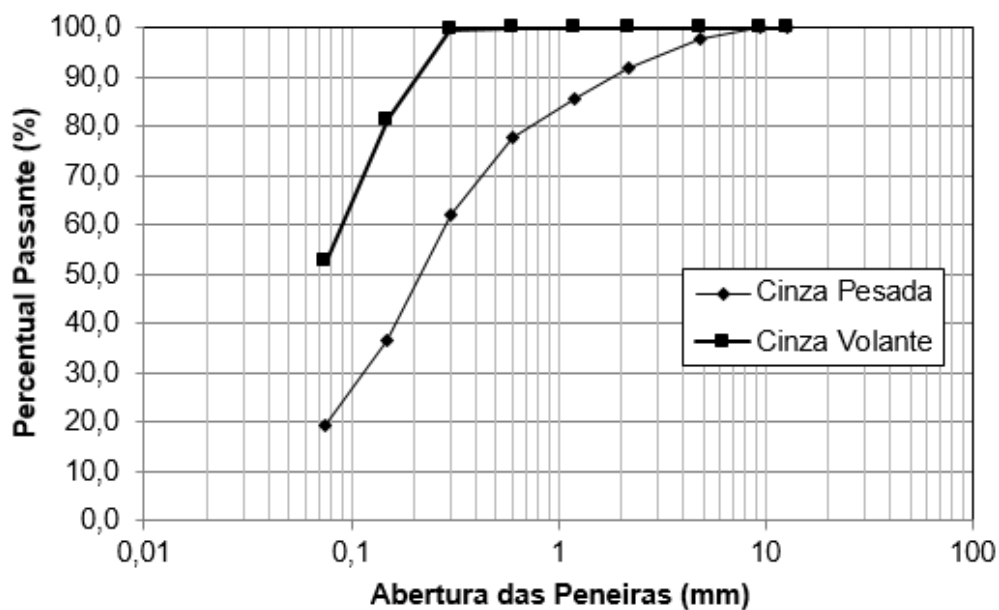


Fonte: Autor (2018).

Através da análise do gráfico obtido, afirmar que existe um crescimento gradativo da curva. Isto significa que existe um preenchimento gradual dos vazios formados pelas partículas de maiores diâmetros, ocasionando um melhor entrosamento e estabilidade da estrutura. A comprovação desta afirmação necessariamente passa pelos ensaios de comportamento mecânico das misturas em análise. Tais ensaios são descritos e analisados nos capítulos 4 e 5 respectivamente.

Com relação as cinzas, foram também realizados o peneiramento com a sequência de peneiras da tabela 17. A figura 20 diz respeito a curva granulométrica das cinzas. Anteriormente ao peneiramento foi realizado o aquecimento e revolvimento das cinzas de modo a desfazer os grumos presentes no material.

Figura 20 – Curva granulométrica das cinzas.



Fonte: Autor (2018).

Através da granulometria obtido pelo peneiramento, constata-se que as maiores quantidades de cinzas, tanto volante como pesada, se concentram nas duas peneiras de menor abertura e no fundo. Assim, no intuito de avaliar o real impacto da incorporação destes materiais nas misturas asfálticas, será realizada a substituição dos materiais pétreos, retidos nas peneiras de abertura 0,15 0,075mm e do material de fundo, por cinza de mesma granulometria.

4 METODOLOGIA DE ENSAIO

O presente capítulo aborda os ensaios laboratoriais necessários a serem executados, segundo a metodologia Marshall, para a obtenção dos valores de teores de trabalho do ligante betuminoso e para a caracterização do comportamento mecânico das misturas asfálticas em análise. Os ensaios foram realizados nas dependências do Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A metodologia Marshall é regida pela DNER-ME 043/95. Segundo Barra (2009), é possível afirmar que tal metodologia apresenta deficiências no que diz respeito a compactação das amostras. Este fato se dá pela diferença de métodos de compactação do material em campo quando comparado com a compactação realizada em laboratório. Em campo, o material é compactado através do amassamento e em laboratório está se dá por impacto.

4.1 ENSAIO MARSHALL

A metodologia Marshall para a dosagem de misturas asfálticas trata da definição do teor de trabalho do ligante que deve ser adicionado ao agregado no intuito de que a mistura atenda aos requisitos normativos prescritos nas especificações de serviço de pavimentos flexíveis (DNIT-ES 031,2006). Tal metodologia é amplamente utilizada no país, devido a esta ser regida pela norma DNER-ME 043/95.

Para a realização deste estudo, os teores de ligante betuminoso adotados foram: 4,54%, 4,70%, 4,86%, 5,18% e 5,50%. Com base nas pesquisas de Burigo (2015) e Araldi (2017), espera-se que estes teores compreendam o teor de trabalho do LB da mistura convencional. Já em relação as cinzas, espera-se um aumento do teor de trabalho do LB. Este aumento está associado a macrotextura arredondada e microtextura rugosa, além da forma dos grãos apresentarem porosidade, de grande parte das partículas de cinza.

O primeiro passo para realização da metodologia Marshall é a determinação das quantidades de material de cada fração granulométrica e do ligante betuminoso que irá compor os corpos de prova. Cada corpo de prova apresenta peso total de 1200 gramas. As quantidades

de cada material conforme os teores de betume são apresentados na tabela 18 e foram obtidos através da curva granulométrica racional exposto no capítulo 3.1.4.

Tabela 18: Quantidade de material de cada fração por teor de betume (gramas).

#	4,54	4,70	4,86	5,18	5,50
19,1	-	-	-	-	-
12,7	222,7	222,4	222,0	221,2	220,5
9,5	120,5	120,3	120,1	119,7	119,3
4,76	238,3	237,9	237,5	236,7	235,9
2,2	183,5	183,2	182,9	182,3	181,7
1,2	101,2	101,0	100,8	100,5	100,2
0,6	83,2	83,0	82,9	82,6	82,3
0,3	58,4	58,3	58,2	58,0	57,8
0,15	41,0	40,9	40,9	40,7	40,6
0,075	28,8	28,8	28,7	28,6	28,5
FUNDO	67,9	67,8	67,7	67,5	67,2
LB	54,5	56,4	58,3	62,2	66,0
TOTAL	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0

Fonte: Autor (2018).

Tendo as quantidades de material definido, é necessário realizar a separação dos granulares em dois recipientes distintos. Para tanto foram utilizadas marmitas de alumínio. Estas são preferencialmente utilizadas pelo fato de terem reduzida condutividade térmica (uma vez que ao longo do processo estas estarão submetidas a altas temperaturas) e elevada praticidade. No primeiro recipiente são colocados os materiais pétreos retidos nas peneiras superiores à 1,2 mm (agregado graúdo). Já no segundo recipiente são colocados todos os materiais passantes na peneira 2,2 (agregado miúdo). A figura 21 ilustra a separação da parte graúda e fina nas marmitas.

Figura 21 – Separação da amostra em parte graúda e miúda.



Fonte: Autor (2018).

Esta separação é necessária porque primeiro deve ser feita a mistura do ligante betuminoso com a parte graúda e somente após todo esse agregado estar devidamente recoberto

pelo ligante se deve adicionar a parte miúda da mistura e formar assim o mástique betuminoso (BARRA 2009). Outro fato que influencia este processo é o fato da fração miúda ter superfície específica superior à fração graúda. Isto faz com que o ligante betuminoso seja “sugado” pela fração miúda tornando o processo de mistura menos eficaz.

Após todos os materiais pétreos estarem devidamente pesados e separados nas frações graúdas e miúdas é realizado o acondicionamento das marmitas em estufa (figura 22). Esta estufa deve estar 13°C acima da temperatura de usinagem estabelecida pelo ensaio de viscosidade Saybolt Furol. Sendo assim, a temperatura da estufa de agregados é mantida em 166°C. Já a estufa de ligante é mantida na temperatura de usinagem estabelecida anteriormente (153°C). Os agregados devem ficar com temperatura superior ao ligante pelo fato do ligante trocar temperatura muito rapidamente com o ambiente e neste caso os agregados mais aquecidos tendem a manter a temperatura de usinagem do ligante próximo da temperatura de usinagem.

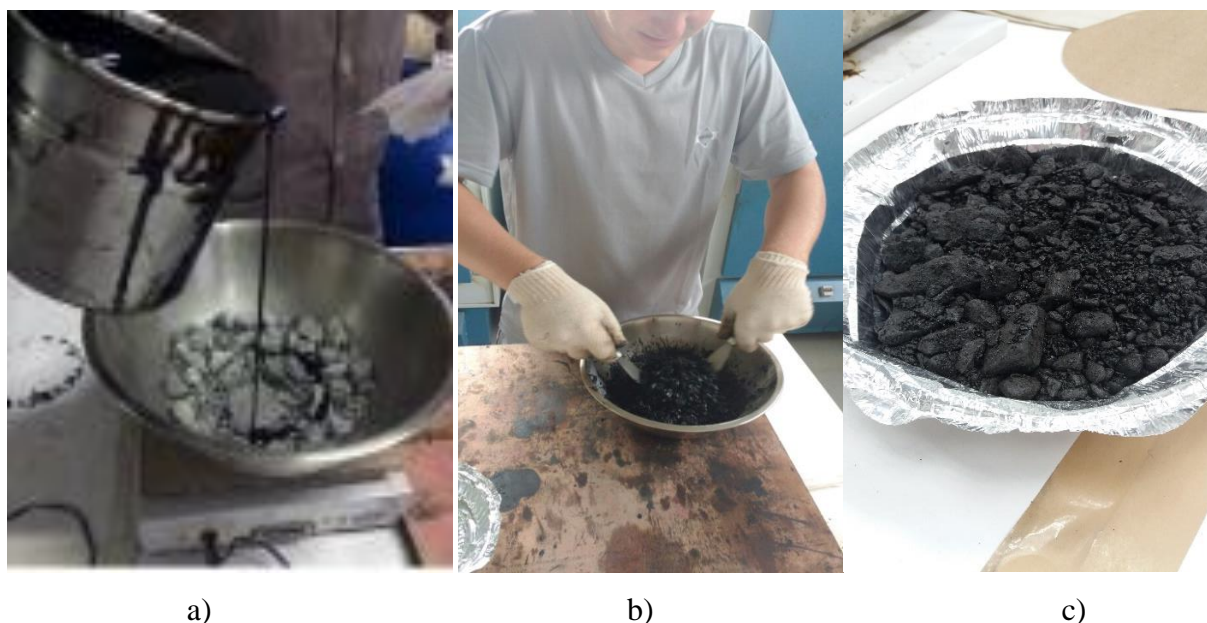
Figura 22 – Acondicionamento das marmitas em estufa.



Fonte: Autor (2018).

O procedimento de mistura se inicia com a retirada da fração graúda da estufa e posicionamento desta em balança. Em seguida é adicionado a quantidade de ligante aquecido sobre a fração graúda e realizado uma mistura dos componentes. O processo de mistura da parte graúda é concluído quando toda a superfície deste estiver recoberta por ligante. Em seguida deve ser adicionado a fração miúda sobre a parte graúda já misturada e então realizar novamente um agitação da amostra com o intuito de que toda a amostra fique recoberta pelo ligante. A Figura 23 representa partes do processo de mistura.

Figura 23 – Processo de mistura dos componentes: a) Adição de ligante betuminoso, b) Mistura dos componentes, c) Processo de mistura finalizado.



Fonte: Autor (2018).

A etapa seguinte é o acondicionamento da mistura asfáltica em estufa na temperatura de compactação. É necessário que a mistura asfáltica fique nesta temperatura por um período de 2 horas. É neste período de tempo que serão realizadas as ligações químicas entre os materiais componente. É de fundamental importância que este tempo seja respeitado para todas as amostras afim de garantir grau de similaridade entre elas.

Após o período de duas horas em estufa, as amostras estão prontas para a compactação. Estas devem ser introduzidas dentro de molde metálico (Figura 24). Tal molde deve estar também na temperatura de compactação, sendo comum a utilização de estufa compartilhada para a amostra e o molde. Na parte interna e inferior do molde é utilizado um papel filtro no intuito de evitar que a amostra “grude” na base do mesmo. Após a inserção da amostra é necessário fazer um pré-acondicionamento da mesma. Para tanto, é realizado por 15 vezes a inserção de uma espátula nas laterais internas do molde desde a parte superior da amostra até o fundo do mesmo. O processo deve ser realizado também no centro da amostra, porém são necessários apenas 10 “espatuladas”. Por fim é feito uma regularização da parte superior da amostra com a mesma espátula e então coberto com um novo papel filtro.

Figura 24 – Molde metálico utilizado para acondicionamento da mistura.



Fonte: Autor (2018).

Com o processo de acondicionamento em molde pronto, é realizado a compactação da amostra com o auxílio do soquete Marshall (figura 25). A metodologia prevê a necessidade de 75 golpes por face da amostra. Pelo fato do soquete ser automatizado, a variabilidade de energia de compactação entre os corpos de prova é pequena.

Figura 25 – Soquete Marshall.



Fonte: Autor (2018).

Com o término do processo de compactação, as amostras são identificadas e repousam por um período de tempo. A amostras estarão prontas para serem retiradas dos moldes quando for possível o laboratorista pegar no molde por um tempo de 5 segundos. Não é recomendado a extração das amostras com temperaturas ainda muito quentes e nem com temperaturas muito baixas. A extração é realizada com o auxílio de uma base metálica e do soquete Marshall.

Foram confeccionados ao todo 50 corpos de prova (figura 26). Destes, os 25 primeiros apresentam substituição de frações finas por cinzas e os 25 últimos apresentam composição convencional (mistura convencional, sem adição de cinzas).

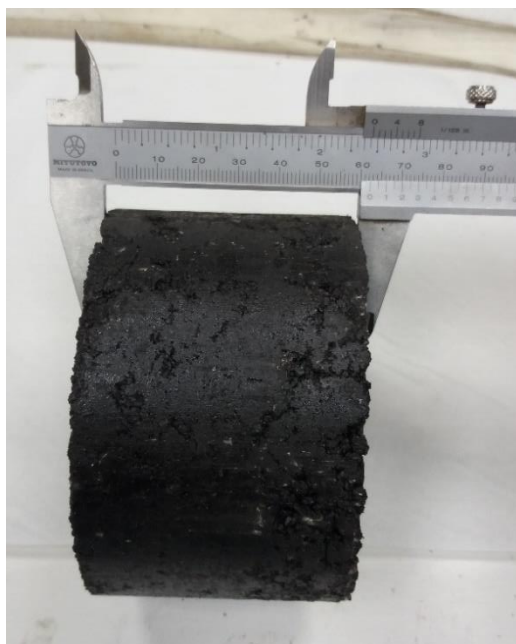
Figura 26 – Corpos de prova.



Fonte: Autor (2018).

Com a etapa de confecção dos corpos de prova concluída, deu-se início à medição dos corpos de provas (CPs). Para tanto, são retiradas 3 medidas de altura dos CPs (figura 27). Tais medidas devem ser feitas em locais sem imperfeições (rebarbas ou buracos ocasionados pela desagregação de material) e preferencialmente formarem um “Y” na face do CPs.

Figura 27 – Medição dos corpos de prova.



Fonte: Autor (2018).

A etapa seguinte diz respeito ao cálculo da densidade volumétrica aparente (D_{ap}). Este cálculo é realizado através da equação 6.

$$D_{ap} = \frac{P}{\pi.(R^2).H} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

P = Peso da amostra seca em gramas;

R = Raio do corpo de prova em centímetros;

H = Altura média do corpo de prova em centímetros.

Os gráficos de densidade volumétrica aparente são mostrados e discutidos no capítulo 5. A próxima etapa a ser desenvolvida é a determinação da densidade máxima teórica real das misturas (MVR). Para tanto é realizado uma nova mistura asfáltica, porém com apenas 635gramas. São necessários 2 amostras para cada teor de betume. O procedimento de mistura é igual ao de mistura asfáltica para confecção dos corpos de prova, com exceção que as amostras não vão para estufa após mistura. Após a mistura a amostra repousa em local limpo por um período de 24 horas. É realizado uma “segregação” do material (figura 28) após o esfriamento da mistura e anterior ao início do ensaio MVR.

Figura 28 – Segregação da mistura.



Fonte: Autor (2018).

O ensaio se inicia com a pesagem da amostra. Utiliza-se um conjunto (picnômetro mais rolha) calibrado e com peso e volume conhecidos. Preenche-se o picnômetro com aproximadamente 800ml de água, em seguida se adiciona a rolha e pesa-se o conjunto novamente. Após, se adiciona a mistura no interior do picnômetro e novamente pesa-se a o conjunto. Na etapa seguinte, o picnômetro deve ser enchido com água até a sua borda e com o auxílio de uma haste se faz uma agitação da amostra no intuito de retirar as bolhas de ar aprisionadas em seu interior. Feita essa retirada do excesso de bolhas leva-se o conjunto (picnômetro, água, amostra) para a máquina de vácuo por um período de 30 minutos. Após este tempo, com muito cuidado, retira-se mais uma vez as bolhas que a máquina não pode tirar. Acrescenta-se então a rolha e preenche de água até o menisco da rolha. Por fim, pesa-se o conjunto.

Figura 29 – Máquina de vácuo.



Fonte: Autor (2018).

Após o término do ensaio e de posse de todos os valores devidamente medidos, aplica-se a equação 7 para a determinação da massa específica real da mistura.

$$D_{real} = \frac{(c - a)}{(b - a) - (d - c)} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

D_{real} = Massa específica real da mistura;

a = Massa do picnômetro vazio (tara);

b = Massa do picnômetro cheio de água até o menisco;

c = Massa do picnômetro contendo a amostra;

d = Massa do picnômetro contendo a amostra e cheio de água até o menisco.

Com base nos dados de densidade real da mistura obtidos anteriormente, é possível dar continuidade a determinação dos demais parâmetros da metodologia Marshall. O primeiro parâmetro derivado é o teor de vazios da mistura ($V\%$). Este faz a relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra. O cálculo do teor de vazios é calculado através da equação 8.

$$V(\%) = \frac{D_{real} - D_{ap}}{D_{real}} * 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$V(\%)$ = Teor de vazios;

D_{real} = Massa específica real do corpo de prova;

D_{ap} = Massa específica aparente do corpo de prova

A etapa seguinte diz respeito a determinação do vazio cheio de betume (VCB). Este cálculo é realizado através da equação 9.

$$VCB(\%) = \frac{D_{ap} * \%L}{d_{ligante}} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$VCB(\%)$ = Vazio cheio de betume;

D_{ap} = Massa específica aparente do corpo de prova;

$\%L$ = Teor de ligante;

$d_{ligante}$ = Massa específica do ligante.

O próximo parâmetro obtido é o vazio do agregado mineral (VAM). Este diz respeito as partículas que não granulares. Sua determinação é feita a partir da soma dos vazios preenchidos com ar e com ligante betuminoso. Sua determinação é feita pela equação 10.

$$VAM(\%) = V + VCB \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

VAM(%) = Vazio do agregado mineral;

V = Porcentagem de vazios;

VCB = Vazios cheios de betume.

Por fim, é realizado a determinação da relação de betume/vazio (RBV) da mistura. Sua determinação é realizada pela fórmula 11.

$$RBV(\%) = \frac{VCB}{VAM} * 100 \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

RBV(%) = Relação betume/vazios;

VCB = Vazios cheios de betume;

VAM = Vazios do agregado mineral.

Após a determinação dos índices físicos, é iniciado os procedimentos para a realização da ruptura dos corpos de prova. Para tanto, se faz necessário o acondicionamento dos mesmos em água, previamente aquecida, a 60°C. Cada corpo de prova deve ficar obrigatoriamente acondicionado neste banho por um período de 30 minutos. Estima-se que o processo de rompimento de cada corpo de prova leve em torno de 1 minuto, já considerados os processos de acomodamento da amostra, ruptura e desacoplagem da mesma. Assim, os corpos de prova foram colocados em banho com intervalos de 1 minutos entre eles. A figura 30 ilustra os corpos de prova em banho de água a 60°C.

Figura 30 – Corpos de prova em banho de água a 60°C.



Fonte: Autor (2018).

Decorrido o período de banho das amostras é iniciado o processo de acomodamento da amostra nos moldes da prensa Marshall. A figura 31 representa a prensa Marshall já com a amostra acomodada.

Figura 31 – Prensa Marshall com corpo de prova acomodado para rompimento.



Fonte: Autor (2018).

A prensa Marshall apresenta duas formas de leituras de cargas de ruptura. Uma é realizada através de anel dinamométrico onde as leituras são feitas manualmente e um segundo modo onde as leituras são realizadas através de célula de carga. O autor verificou em procedimentos anteriores que o equipamento responsável pela leitura dos valores da célula de carga estava danificado. Desta forma, o autor realizou o procedimento de leitura da carga de ruptura de forma manual através da utilização de anel dinamométrico. Os valores de carga de ruptura na metodologia Marshall são comumente chamadas de estabilidade.

Um segundo parâmetro extraído da ruptura do corpo de prova é a fluência da amostra. Este valor representa a variação de tamanho da amostra entre o instante imediato antes do

carregamento e o instante exato da ruptura. A fluência também é conhecida como deformabilidade do corpo de prova. A figura 32 representa um corpo de prova após a ruptura.

Figura 32 – Corpo de prova após ruptura.



Fonte: Autor (2018).

A análise dos resultados é realizada através da confecção de gráficos obtidos pela determinação dos parâmetros descritos acima. Tais resultados são descritos no capítulo 5.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos dos ensaios realizados através da metodologia Marshall de dosagem de misturas asfálticas. Um dos principais resultados a serem obtidos é o teor ótimo de trabalho das misturas analisadas. Para tanto, são mostrados a seguir os gráficos referentes aos parâmetros físicos explanados no capítulo 4. As linhas tracejadas em vermelho dizem respeito aos limites estabelecidos pela norma DNER-ME 43/95 (1995). A tabela 19 mostra os limites estabelecidos por norma para as misturas asfálticas.

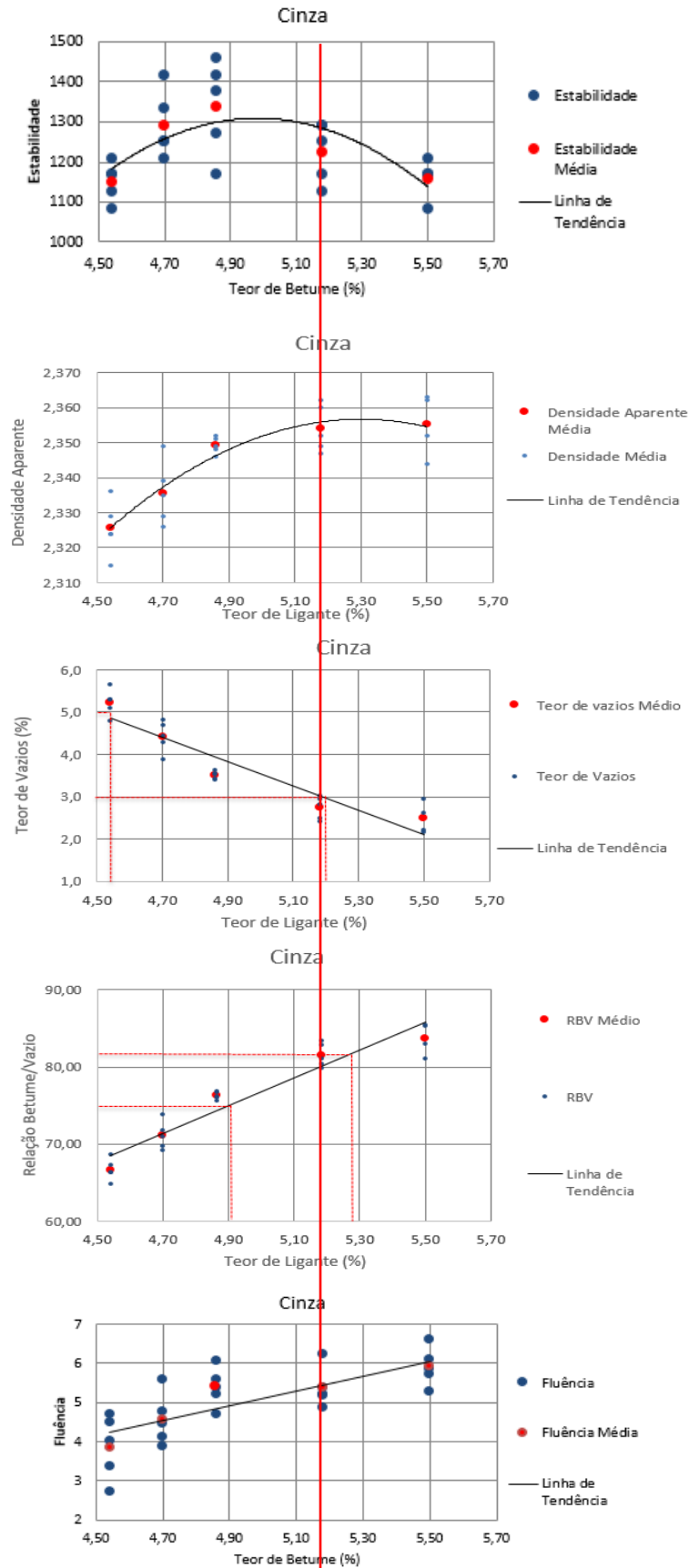
Tabela 19 – Valores limites estabelecidos por norma.

Parâmetro	DNER-ME 43/95 (1995)
Estabilidade Mínima (KN)	5,0
Porcentagem de Vazios (%)	3,0 a 5,0
Relação Betume/Vazios (RBV)	75,0 a 82,0
Fluência (mm)	-
Vazios Cheios com Betume (CCB) (%)	75,0 a 82,0

Fonte: DNER-ME 43/95 (1995), adaptado pelo autor.

Vale ressaltar que os valores de fluência estabelecidos pela DNER-ME 43/95 (1995), não são levados muito em consideração pelas práticas atuais de dosagem de misturas asfálticas.

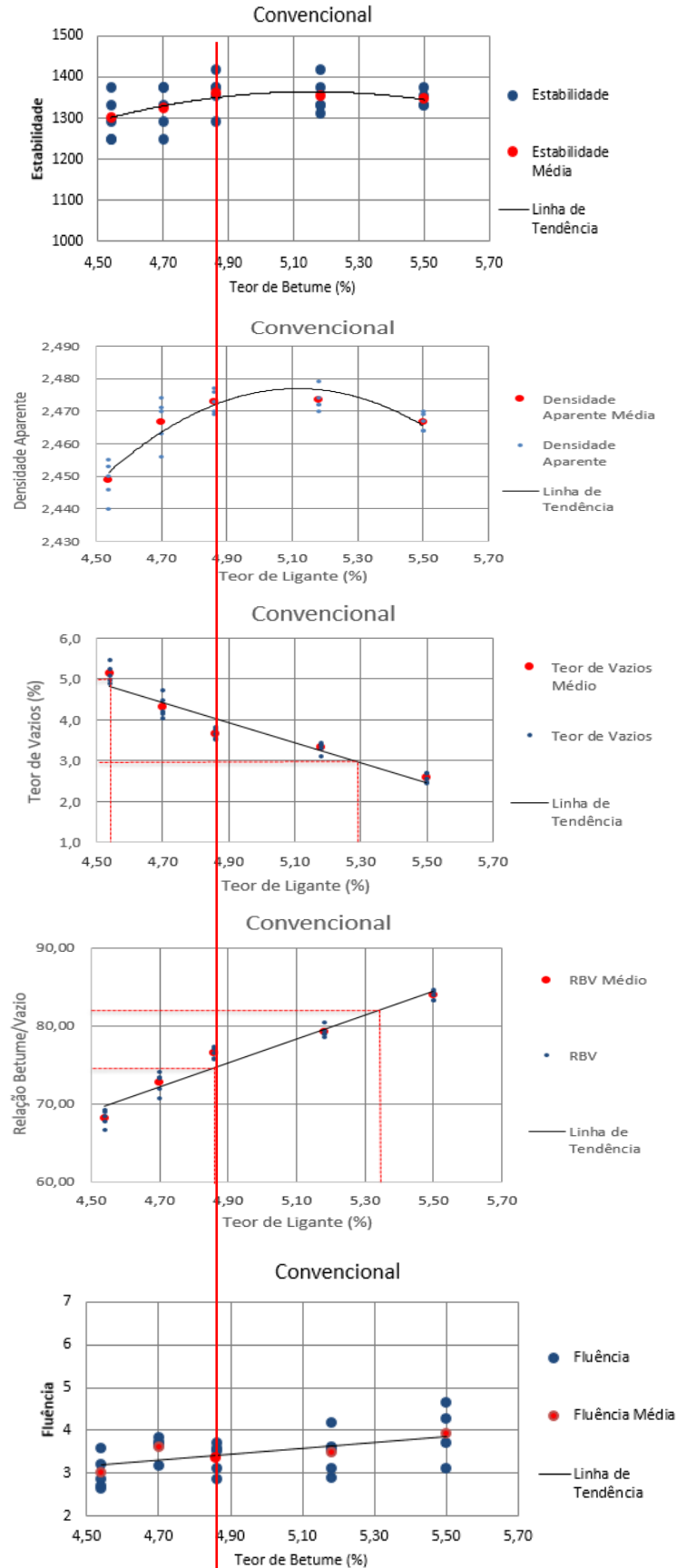
Figura 33 – Gráficos de resultados da mistura com cinza.



Fonte: Autor (2018).

5,18%

Figura 34 – Gráficos de resultados da mistura convencional.



Fonte: Autor (2018).

4,86%

Através da análise dos resultados de tais gráficos, além das observações realizadas durante os procedimentos de laboratório, constatou-se que o teor de trabalho ótimo da mistura convencional encontra-se em 4,86%, uma vez que os limites mínimos são respeitados. A metodologia Marshall apresenta certa fragilidade em relação aos critérios levados em conta para a interpretação do comportamento físico e mecânico das misturas asfálticas, este fato aliado à falta de sensibilidade do mesmo quanto à realização de aferições no domínio visco elástico linear pode gerar análises equivocadas dos parâmetros de comportamento da mistura. Vale ressaltar que a determinação dos valores do teor ótimo de trabalho não se deu apenas a partir dos gráficos. Também foram analisados alguns sinais durante a realização dos ensaios, como a trabalhabilidade da mistura, o brilho da sua superfície e a quantidade de ligante absorvida pelo papel-filtro, uma vez que estas informações podem ser mascaradas pelo empirismo do método.

Em se tratando de cinza, o teor ótimo de trabalho se encontra um pouco acima daquele obtido para a mistura convencional, ficando em 5,18%. Julga-se a ocorrência deste fenômeno válido, uma vez que a superfície específica da cinza é superior ao do pó de pedra, além disso, grande parte das partículas de cinza apresentam macrotextura arredondada e microtextura rugosa, além da forma do grão apresentar porosidade em geral, ocasionando assim uma maior absorção de ligante.

Ainda em relação a cinza, esta apresenta um teor de vazios menor do que a mistura convencional, provocando uma maior densificação da mistura e por sua vez promovendo uma densidade volumétrica aparente menor. Este fato é em parte também promovido pela morfologia da cinza, e em parte pela utilização do método racional de dimensionamento que fazem com que as partículas mais finas preencham de forma mais gradual os vazios deixados pelos granulares graúdos e assim promoverem uma redução do volume total da amostra.

Outro aspecto importante das cinzas é apresentarem uma densidade menor que o material pétreo. Isto proporciona uma maior necessidade de material em volume. Este fato associado com uma maior superfície específica real das cinzas ocasionaram uma maior necessidade de ligante e também uma maior dificuldade dos processos de mistura das mesmas a baixos teores.

Com base na análise das granulometrias julga-se válido o emprego das cinzas de carvão nos processos de confecção de misturas asfálticas densas. Porém, para a sua boa aplicabilidade em misturas asfálticas, se faz necessário um estudo mais aprofundado a respeito das características mecânicas das mesmas.

Outro aspecto relevante a respeito das cinzas foi a constatação da viabilidade da realização da mistura entre as cinzas volante e pesada. Tal constatação foi aferida através da análise da composição química, mineralógica e também através da granulometria de ambas. A única diferença a respeito de ambas se dá pelo método de retirada de tais cinzas das caldeiras.

Em se tratando dos resultados de estabilidade, verifica-se uma estabilidade maior da mistura convencional quando comparada com a mistura com adição de cinza. Tal fato está associado com a maior resistência do pó de pedra juntamente com a morfologia sub-ângular e microtextura rugosa do mesmo. Isto proporciona um maior embricamento do material pétreo quando comparado com as cinzas que apresentam uma dureza menor e grandes quantidades de partículas com macrotextura arredondadas, o que por sua vez resulta em um ângulo de atrito deficiente. Verifica-se ainda, uma queda acentuada dos valores de estabilidade da cinza para teores acima de 5,18%. Assim, espera-se que um acréscimo de ligante que ocasione teores acima de 5,18%, não gerem um acréscimo de estabilidade, muito pelo contrário, deverá ocorrer neste caso uma queda da mesma.

Por fim, em relação aos gráficos de fluência das misturas, é visível a grande variabilidade dos valores correspondentes a mistura com adição de cinza. Enquanto a mistura convencional apresentou baixa variação entre os teores iniciais e finais, a mistura com adição de cinza apresentou variações altas. Vale ressaltar, que os resultados de fluência não foram considerados pelo seu valor absoluto, apenas de forma comparativa entre as misturas e também para realizar a análise do comportamento da fluência ao passo em que o teor de ligante é variado.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados desta pesquisa, comprovam que as dosagens de misturas asfálticas com a substituição de parte dos finos pétreos por parcelas de cinzas promovem uma alteração dos índices físicos da mistura. Em uma análise simplista e levando-se em conta somente os parâmetros da metodologia Marshall percebe-se um decréscimo do desempenho mecânico da mistura com adição de cinza.

Uma segunda conclusão relevante, foi a constatação da frivolidade da diferenciação das cinzas em termos de cinza volante e pesada quando se tratando de utilização em misturas asfálticas densas com a mesma granulometria. Tal constatação foi realizada através das análises de composição química, mineralógica e também da análise da morfologia de tais cinzas. Nestas verificou-se a ausência de diferenças significantes entre as mesmas. Em se tratando de análise química, constatou-se que a cinza apresenta uma carga elétrica negativa. Desta forma, e lembrando que o objetivo principal da pesquisa foi analisar o real impacto promovido pela inserção da cinza, não foi realizado a adição de nenhum tipo de melhorador de adesividade na mistura, justamente com o intuito de poder realizar uma análise mais precisa de tais impactos.

Com relação as análises granulométricas, verificou-se que as cinzas apresentam quantidades de grandes expressões nas duas peneiras de menores diâmetros (0,015 e 0,075) e no fundo. Como existe grande disponibilidade de material na indústria termelétrica, optou-se pela realização da substituição de três frações pétreas pelas respectivas três frações da cinza. Isto confere economicidade ao processo, uma vez que há o aproveitamento de frações que normalmente são descartadas.

Em se tratando de metodologia Marshall, é necessário fazer uma observação. Embora esta metodologia seja largamente difundida, utilizada e normatizada no Brasil como o método oficial de dosagem de misturas asfálticos, existem críticas em relação ao seu uso. Uma primeira crítica está relacionada com a forma de compactação das amostras. Em campo, as amostras são compactadas através do processo de amassamento da mistura enquanto que em laboratório o processo é realizado por impacto através do soquete Marshall. Este impacto sobre o corpo de prova tenderá a ocasionar uma fragmentação dos granulares, e assim ocasionar uma alteração

da composição granulométrica da mistura. Outro efeito desta fragmentação é o aumento da superfície específica dos grãos. Como a metodologia Marshall avalia o comportamento mecânico da amostra, o efeito de fragmentação dos granulares tem um impacto muito significativo nos resultados dos ensaios.

Ainda em relação a metodologia Marshall, existe uma incerteza relacionada com a determinação dos teores ótimos de trabalho que está relacionada intrinsecamente com a falta de sensibilidade do método. Esta falta de sensibilidade está em grande parte ligada ao modo em que os esforços são aplicados nos corpos de prova durante os processos de compactação e ruptura. Tais esforços podem vir a ocasionar a quebra dos agregados minerais, alterando assim, a densidade aparente, volume de vazios, entre outros parâmetros, além de modificar a formulação da matriz granular inicialmente calculada.

Uma alternativa para a obtenção de parâmetros mecânicos mais acurados é a utilização de outras metodologias de formulação de dosagens asfálticas. Um exemplo de metodologia que apresenta uma alta eficácia e eficiência é a metodologia francesa. Esta aprofunda a análise dos comportamentos a flexão alternada dos pavimentos através de ensaios como deformação permanente, ensaio de duriez, ensaio PCG e ensaio de comportamento à fadiga.

Em relação a futuros trabalhos acerca do tema, recomenda-se a execução do ensaio de rigidificação do ligante betuminoso. Ainda é recomendado a realização de ensaios, como da metodologia francesa, utilizando teores de ligante um pouco menores que os obtidos como ótimo na presente pesquisa (4,86 e 4,54), uma vez que o excesso de ligante ocasiona problemas tanto mecânicos como também o efeito de exsudação do ligante em campo. Lembrando ainda que um dos componentes que apresentam maiores custos é o ligante betuminoso. Desta forma, recomenda-se haver também uma análise dos custos relacionados à utilização de maiores teores de ligante nas misturas asfálticas nas pesquisas vindouras.

REFERÊNCIAS

BARRA, B. S. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do Estado do Pará com o emprego de pó de calcário.** 2005, 177 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

AZZOLINI, M. **Restauração ecológica de áreas impactadas por cinzas de carvão mineral: contribuição da mamona e respostas da espécie a metais pesados.** Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/17470/000652138.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 07 set. 2017.

Confederação Nacional dos Transportes. **Pesquisa CNT de rodovias 2016.** Disponível em: <[http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio_Geral/Pesquisa CNT \(2016\) - LOW.pdf](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio_Geral/Pesquisa_CNT_(2016)_-LOW.pdf)>. Acesso em: 16 set. 2017.

MARTINS, A.F. (2002). Elementos – traços em matrizes ambientais. In TEIXEIRA, E.E.; PIRES, M.J.R. **Meio ambiente e carvão: Impactos da exploração e utilização. Cadernos de Planejamento e gestão ambiental.** Fundação Estadual de Proteção Ambiental – FEPAM. N.2p. 229-233.

COSTA, A. B. **Potencial Pozolânico da cinza volante como material de substituição parcial de cimento.** Disponível em: <<file:///C:/Users/marqu/Downloads/2015AndressaBiancadaCosta.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2017

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico.** 1998. 347 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, Brasil, 1998.

MEURER, P. **Caracterização de materiais rochosos do norte de Santa Catarina para fins de aplicação em obras de pavimentação.** 2015. 92 p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

GUERRERO, Y. A. P. **Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas.** 2013. 326 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

BÚRIGO, A. S. **Influência da formulação de esqueletos minerais no comportamento mecânico de misturas de concreto asfáltico.** 2015. 60 p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

LUZ, A. S. **Influência da formulação de esqueletos minerais no comportamento mecânico de misturas de concreto asfáltico.** 2015. 60 p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

LUZ, Ruan Carlo da. **Estudo comparativo da formulação de esqueletos minerais na dosagem de misturas de concreto asfáltico densas**. 2016. 80 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

BERNUCCI, L. B. et al **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.proasfalto.com.br/07_download.htm. >. Acesso em: 12 nov.2017.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

____DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Determinação da Abrasão Los Angeles**. Disponível em: <http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume_03_PDF/DNER-ME_035-98.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2017.

____DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura. **Determinação da penetração**. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit155_2010_me.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2017.

____DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura. **Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola**. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit131_2010_me.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2017.

AQUINO, Thiago Fernandes de. **Síntese de zeólitas do tipo X a partir de cinzas volantes e de fundo de carvão mineral**. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, Criciúma, 2017. p. 1 - 12.