

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**NATÁLIA MISTURINI**

**ESTUDO COMPARATIVO DE MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS  
COM DIFERENTES FÍLERES**

**PATO BRANCO**

**2017**

NATÁLIA MISTURINI

**ESTUDO COMPARATIVO DE MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS  
COM DIFERENTES FÍLERES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Pato Branco.

Orientador: Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalita.

PATO BRANCO

2017



## TERMO DE APROVAÇÃO

### ESTUDO COMPARATIVO DE MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS COM DIFERENTES FÍLERES

#### Natalia Misturini

No dia 22 de novembro de 2017, às 08h15min, na SALA DE TREINAMENTO da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº33-TCC/2017.

Orientador: Prof.Dr.NEY LYZANDRO TABALIPA (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof. Msc. DANILO RINALDI BISCONSINI (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof.Msc. JAIRO TROMBETTA (DACOC/UTFPR-PB)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que me proporciona e me abençoa.

A minha família, ao qual sem seu apoio e incentivo no decorrer desses anos de graduação nada seria possível.

Ao Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalipa pela orientação e conselhos.

Aos professores do departamento de transportes da UTFPR, pelos ensinamentos, em especial, ao Professor Danilo Rinaldi Bisconsini, pela contribuição nesta pesquisa.

Ao meu namorado pelo apoio, auxílio nos ensaios e à grande amizade.

Ao técnico do laboratório de solos pela paciência e ajuda nas moldagens.

À pedreira Zancanaro pelos materiais concedidos para a realização da pesquisa.

E finalmente aos professores, banca avaliadora, que se disponibilizaram a avaliar e contribuir com este trabalho.

## RESUMO

MISTURINI, N. Estudo Comparativo de Misturas Asfálticas produzidas com diferentes fíleres. 55p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

As rodovias são ainda o principal meio de transporte no Brasil, recentes estudos afirmam que a malha rodoviária pavimentada no país é muito pequena, a necessidade do país faz com que esse dado aos poucos vá mudando, obrigando uma maior eficiência na infraestrutura de transporte, principalmente dispor de rodovias com maior nível de qualidade. Os pavimentos brasileiros são em quase toda sua totalidade, flexíveis ou asfálticos, estes tem o objetivo de promover a segurança ao tráfego e suportar os efeitos do clima e do fluxo de veículos. Sendo assim a estrutura do pavimento é imprescindível e deve ser composta por camadas que distribuam e suportem as cargas as quais são submetidas. Um pavimento é construído a partir de misturas asfálticas que são compostas de agregados e ligantes, dosadas a fim de atender parâmetros determinados. A mistura asfáltica é influenciada pelos materiais, modo de preparo e propriedades que a compõem. Esta pesquisa tem como objetivo contribuir para o entendimento dos efeitos que o filer, agregado presente na mistura asfáltica, tem sobre uma mistura asfáltica. Para alcançar o objetivo, a pesquisa propôs estudar dosagens de dois projetos de misturas, uma com filer pó-de-pedra e outra com filer de cimento Portland. Primeiramente foi realizada a caracterização dos agregados britados e ligante asfáltico convencional CAP 50/70, seguindo os procedimentos e requisitos normatizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT). A segunda parte da pesquisa foi a realização das dosagens através do método Marshall. Ao fim do estudo, com as duas dosagens ótimas para cada mistura, foram obtidos resultados que demonstraram que para esse estudo seria mais viável dosar misturas com filer pó-de-pedra, além de mais econômica, apresentaram melhores resultados. Deve-se ainda levar em conta, que outros ensaios laboratoriais e em campo, e estudos mais aprofundados devem ser realizados.

Palavras-chave: Dosagem Marshall. Fíler. Mistura asfáltica.

## **ABSTRACT**

Misturini, N. Comparative Study of asphalt mixtures produced with different fillers. 55p. Completion of course work (undergraduate) - Degree of Bachelor of Civil Engineering. Federal Technological University of Paraná, Pato Branco, 2017.

Roads are still the main means of transport in Brazil, recent studies say that the paved road network in the country is very small, the country's need makes this data gradually changing, requiring a greater efficiency in transportation infrastructure, mainly roads with a higher level of quality. Brazilian pavements are almost entirely, flexible or asphaltic, the purpose of which is to promote traffic safety and withstand the effects of the climate and the flow of vehicles. Therefore, the structure of the floor is essential and must be composed of layers that distribute and support the loads that are submitted. A pavement is constructed from asphalt mixtures that are composed of aggregates and binders, dosed in order to meet certain parameters. The asphalt mixture is influenced by the materials, the preparation process and the properties that make it up. This research aims to contribute to the understanding of the effects that the filler aggregate present in the asphalt mixture, has on an asphalt mixture. To achieve the goal, the proposed research study dosages of two mix designs, one with a powder-stone fillers and one with Portland cement filler. Firstly, the characterization of crushed aggregates and conventional asphalt binder CAP 50/70 was performed, following the procedures and requirements established by the National Department of Infrastructure and Transport (DNIT). The second part of the study was the realization of dosages by the Marshall method. At the end of the study, with the two optimum dosages for each mixture, results were obtained that demonstrated that for this study it would be more feasible to dose mixtures with powdered stone, and more economical, presented better results. It should also be taken into account that further laboratory and field trials and further studies should be carried out.

Keywords: Marshall dosage. Fillers. Asphalt mix.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Corpo-de-prova extraído de pista mostrando a composição do revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2006).....	15
Figura 2 - Exemplo da Composição dos Agregados (BERNUCCI et al., 2006) .....	21
Figura 3 - Gráfico de Estabilidade x Fluência (BERNUCCI et al., 2006) .....	23
Figura 4 - Coleta de amostras de materiais.....	26
Figura 5 - Quarteamento das amostras.....	27
Figura 6 - Peneiramento das amostras .....	27
Figura 7 - Massa do agregado na condição úmida .....	28
Figura 8 - Imersão do agregado em água .....	29
Figura 9 - Massa imersa em água.....	29
Figura 10 - Picnômetro com amostra .....	31
Figura 11 - Picnômetro com amostra no fogo para expulsar o ar.....	31
Figura 12 - Frasco Le Chatelier com querosene .....	32
Figura 13 – Frasco com querosene em banho maria.....	33
Figura 14 - Conjunto em banho maria.....	33
Figura 15 - Picnômetro em banho maria .....	35
Figura 16 - Pesagem do conjunto .....	35
Figura 17 - Picnômetro com água destilada e ligante em banho maria.....	36
Figura 18 - Proporções de agregados para cada teor de CAP .....	37
Figura 19 - Materiais aquecidos em estufa.....	38
Figura 20 - Mistura dos agregados com o CAP.....	39
Figura 21 - Compactação do corpo de prova .....	40
Figura 22 - Corpo de prova em repouso .....	40
Figura 23 - Ensaio Marshall.....	42
Figura 24 - Corpo de prova após a ruptura na prensa Marshall .....	43
Figura 25 - Curvas granulométricas .....	44
Figura 26 - Curva granulométrica da Mistura .....	47
Figura 27 - Fíler Pó de Pedra – Teor de Ligante versus: (a) Volume de Vazios; (b) Gmb; (c) VAM; (d) RBV; (e) DMT.....	49
Figura 28 - Fíler Cimento Portland – Teor de Ligante versus: (a) Volume de Vazios; (b) Gmb; (c) VAM; (d) RBV; (e) DMT. ....	50
Figura 29 - Requisitos de dosagem de concreto asfáltico .....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tamanho Nominal Máximo (TNM) dos agregados.....	45
Tabela 2 - Resultados dos ensaios das características dos agregados.....	45
Tabela 3 - Resultados da caracterização e Características dos ligantes asfálticos ..	46
Tabela 4 - Composição Granulométrica.....	46
Tabela 5 - Composição dos CPs, com Fíler Pó de Pedra e Fíler de cimento Portland .....	47
Tabela 6 - Temperaturas de mistura e de compactação dos CPs.....	48
Tabela 7 - Parâmetros volumétricos para a mistura com fíler Pó de Pedra .....	48
Tabela 8 - Parâmetros volumétricos para a mistura com fíler Cimento Portland.....	48
Tabela 9 - Resultados de dosagem Marshall .....	51



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS .....	12
1.1.1	Objetivo geral .....	12
1.1.2	Objetivos específicos .....	12
1.2	JUSTIFICATIVA .....	12
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
2.1	REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS.....	14
2.2	MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE .....	14
2.3	MATERIAIS UTILIZADOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE .....	15
2.3.1	Agregados.....	15
2.3.2	Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) .....	16
2.3.3	Material de enchimento – Fíler.....	17
2.4	INFLUÊNCIA DO FILER NAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	18
2.5	DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	20
2.5.1	Dosagem Marshall .....	21
2.6	DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	22
2.6.1	Ensaio convencionais.....	22
2.6.1.1	Estabilidade Marshall .....	22
2.6.2	Ensaio de módulo.....	23
2.6.3	Ensaio de ruptura .....	23
2.6.3.1	Ensaio de Resistência À Tração por Compressão Diametral (RT).....	24
2.6.3.2	Vida de Fadiga .....	24
2.6.4	Ensaio de Deformação Permanente.....	24
2.6.5	Ensaio Complementares .....	24
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>25</b>
3.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	25
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS .....	25
3.2.1	Agregados.....	25
3.2.1.1	Granulometria.....	26

3.2.1.2	Absorção e Densidade Aparente dos Agregados Graúdos .....	28
3.2.1.3	Densidade Real dos Agregados Miúdos .....	30
3.2.1.4	Densidade do Material Finamente Pulverizado .....	32
3.2.2	Ligantes Asfálticos .....	34
3.2.2.1	Massa Específica e Densidade Relativa do Ligante Asfáltico .....	34
3.3	DOSAGEM MARSHALL .....	37
3.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	41
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>44</b>
4.1	ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA MISTURA ASFÁLTICA.....	44
4.1.1	Agregados.....	44
4.1.1.1	Especificação dos Agregados .....	44
4.1.2	Ligante Asfáltico.....	45
4.2	DOSAGEM MARSHALL .....	46
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>52</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	52
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A importância das rodovias no âmbito econômico e social do Brasil é indiscutível, os sistemas de transportes são elementos estruturantes economicamente e socialmente de qualquer país.

O crescente aumento do tráfego rodoviário demanda maiores exigências aos pavimentos, surgindo assim a necessidade de melhorar o seu desempenho. Entende-se por desempenho o grau com o que o mesmo atende as funções que lhe são impostas ao longo de sua vida de serviço. A engenharia de pavimentação moderna é aquela que envolve a concepção, o projeto, a construção, a manutenção e a avaliação de pavimentos dentro de fatores e condicionantes técnicos, econômicos, operacionais e sociais.

Visando promover a segurança no tráfego das rodovias, o pavimento deve ser projetado e construído para suportar, principalmente os efeitos das mudanças de clima e resistir ao fluxo de veículos (DNIT, 2010a). Assim, uma construção de pavimentos de qualidade é fundamental para a eficiência dos investimentos no país.

Um fator que implica diretamente nessa eficiência é o aumento do volume de veículos, excesso de carga nas rodovias e a não utilização de métodos de dimensionamento que contemplam parâmetros mecânicos, tais fatores que implicam na deterioração prematura do pavimento. Buscando melhores condições para esses pavimentos, a engenharia rodoviária tem o desafio de utilizar misturas asfálticas mais eficientes, tais que variam de acordo com os materiais utilizados, garantindo assim o comportamento adequado dos materiais, assim com sua interação.

O fíler, agregado que compõe a mistura asfáltica, e seu importante papel no comportamento de misturas asfálticas, já é há um tempo reconhecido, a qualidade da interação, fíler, agregados e ligante influencia todas as respostas mecânicas das misturas, assim como sua trabalhabilidade, por exemplo, o processo de fadiga está fortemente relacionado às características do ligante asfáltico, às propriedades do fíler e a interação físico-químico entre os dois (BARDINI, 2013).

Assim este trabalho visa contribuir no entendimento dos efeitos do filer sobre as propriedades das misturas asfálticas, contribuindo na importância e na influência do melhor ou pior desempenho através do modo de preparo de misturas asfálticas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Estudar misturas asfálticas utilizando diferentes tipos de filer, o pó-de-pedra e o cimento Portland.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Dosar pela metodologia Marshall e comparar misturas asfálticas com filer pó-de-pedra e com filer de cimento Portland;
- Obter os parâmetros das misturas e demonstrar o comportamento mecânico dessas misturas, como a estabilidade e fluência Marshall;
- Avaliar os resultados dos ensaios de compressão diametral, das misturas utilizadas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Dos elementos que compõem os sistemas de transportes no Brasil, o modo rodoviário e a infraestrutura de estradas têm papel fundamental, são responsáveis por 62% do transporte de cargas e por 96% do transportes de passageiros (CNT, 2014).

Dessa forma justifica-se a importância e interesse de estudar o comportamento dos materiais para uso em pavimentos rodoviários.

Ao longo de sua vida útil esses revestimentos sofrem diversos processos de degradação sob ação do tráfego e das condições climáticas, entre os principais defeitos estruturais está as deformações permanentes, encontradas nas trilhas de rodas e as trincas por fadiga. Verificou-se que nos últimos anos as solicitações a que

estão sujeitos têm aumentado, quer em termos de volume de tráfego, quer em termos de sua agressividade (CUNHA, 2010).

Com a finalidade de reduzir os efeitos do tráfego e do clima, é então estudado o comportamento dos materiais que compõem essas misturas asfálticas, para que as propriedades especificadas sejam alcançadas. Dessa forma, este trabalho foca na utilização de diferentes fíleres utilizados nas misturas asfálticas, há um tempo tem sido reconhecido que o fíler tem papel importante no comportamento das misturas asfálticas, ele preenche os vazios entre os agregados graúdos e altera as propriedades dos ligantes asfálticos.

O fíler tem influência significativa no potencial de durabilidade da mistura, especialmente para longos períodos de vida em serviço, sendo que a atividade do fíler no comportamento da mistura asfáltica é um fator importante, pois após longos períodos as fortes ligações adquiridas pelos agregados com o ligante asfáltico começam a se deteriorar e o papel físico-químico dos diferentes tipos de fíler é então manifestado (BARDINI, 2013).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Pavimentos são estruturas compostas por diversas camadas. O revestimento asfáltico é a camada responsável por receber a carga dos veículos e a ação climática. O revestimento mais utilizado no Brasil é aquele que combina a mistura de agregados minerais com ligantes asfálticos, esta mistura é dosada afim de proporcionar requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga e ao trincamento térmico (Bernucci et al., 2006).

Segundo Bernucci et. al. (2006) estes requisitos são atendidos com um projeto adequado da estrutura e com o projeto de dosagem. As misturas de agregado e ligante podem ser feitas de diferentes formas: usinadas, *in situ* ou ainda podem ser recicladas.

A mistura utilizada nessa pesquisa, a usinada, pode ainda ser subdividida em mistura a quente e a frio, sendo a quente utilizada para esse estudo.

### 2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

As misturas asfálticas a quente tem distinção entre si de acordo com o padrão granulométrico empregado. O produto de uma mistura asfáltica a quente é aquele combinado de agregados e cimento asfáltico, aquecidos em temperaturas previamente estabelecidas em função da característica viscosidade-temperatura do ligante.

Segundo Bernucci et. al. (2006) as misturas asfálticas a quente conforme a graduação dos agregados e fíler podem ser de graduação densa, graduação aberta ou graduação contínua, conforme Figura 1. A graduação densa é aquela com curva granulométrica contínua e bem-graduada, proporcionando poucos vazios, a graduação aberta tem curva granulométrica uniforme e com agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho, proporciona um esqueleto com muitos vazios interconectados, e a graduação descontínua é aquela com uma curva granulométrica com grãos de maiores dimensões, com uma curva descontínua e com objetivo de um esqueleto mais resistente à deformação permanente.



Figura 1 - Corpo-de-prova extraído de pista mostrando a composição do revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2006).

## 2.3 MATERIAIS UTILIZADOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

Misturas asfálticas a quente são compostas de agregados, material de enchimento (filer) e ligantes, dosados de forma a atender os parâmetros determinados nos projetos, levando em consideração a demanda e tipos de tráfego, podem ainda ser utilizado, polímeros, materiais reciclados, aditivos, como por exemplo, melhoradores de adesividade.

Os materiais são misturados de forma a estar dentro de uma taxa determinada e oferecer uma estrutura compacta e resistente. São espalhados e compactados quentes.

### 2.3.1 Agregados

Segundo a norma ABNT NBR 9935/2011, que determina a terminologia dos agregados, o termo agregado é definido como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto.

Quanto a natureza, os agregados podem ser são classificados em natural, artificial e reciclado. Os agregados naturais são provenientes de rochas, prever o comportamento de uma rocha, em um projeto de pavimento e durante a vida útil do

mesmo, depende de experiência prática e de ensaios de laboratório (PRUDENTE, 2015).

Para Lopes (2010) a caracterização de agregados direciona a escolha adequada de materiais capazes de resistir às cargas as quais o pavimento será submetido. Alguns procedimentos do processo de caracterização dos agregados, como o detalhamento dos métodos de ensaio, os utilizados nesta pesquisa são apresentados ao longo do trabalho.

A distribuição granulométrica assegura a estabilidade da camada de revestimento asfáltico, por estar relacionada ao entrosamento entre as partículas e o conseqüente atrito entre elas (Bernucci et al., 2006).

Além da granulometria, os agregados possuem outras características importante quando utilizados para pavimentação asfáltica. São elas:

- Resistência à abrasão: devem apresentar resistência à quebras, degradação e desintegração;
- Textura superficial: ligado a trabalhabilidade, adesividade e resistência ao atrito;
- Forma das partículas: influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas;
- Absorção: quando muito poroso, o agregado absorve parte do ligante asfáltico, influenciando a coesão da mistura asfáltica;
  - Adesividade ao ligante asfáltico;
  - Sanidade: resistência à desintegração química;
  - Densidade específica/massa específica;

### 2.3.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Cimento asfáltico de Petróleo ou CAP é um líquido viscoso, semi-sólido ou sólido, a temperatura ambiente que apresenta comportamento termoplástico, tornando-se líquido se aquecido e retornando ao estado original após resfriamento.

É um ligante betuminoso obtido da destilação do petróleo pouco reativo. Apesar da pouca reatividade química, em contato com o ar e a água podem sofrer envelhecimento por oxidação lenta. Se enquadram em limites de consistência, conforme aplicação, e são caracterizados segundo as normas brasileiras (NBR) e da Agência Nacional de Petróleo (ANP).



A especificação brasileira do CAP convencional, segundo Resolução nº 19 (ANP, 2005), separa os ligantes em classes por penetração: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200, sendo esses números associados à faixa de penetração obtida no ensaio NBR 6576 (ABNT, 2007). Para o CAP modificado por polímero elastomérico estireno-butadienoestireno – SBS, segundo Resolução nº 32 (ANP, 2010), a classificação é de acordo com o ponto de amolecimento e recuperação elástica a 25°C, nos tipos 55/75-E, 60/85-E e 65/90-E, valores obtidos nos ensaios NBR 6560 (ABNT, 2008a) e NBR 15086 (ABNT, 2006), respectivamente.

Os principais ensaios para medir as propriedades físicas dos ligantes asfálticos são:

- Ensaio de penetração: qual mede a “dureza”;
  - Ensaio de viscosidade: resistência ao fluxo;
  - Ensaio de ponto de amolecimento: correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido;
  - Ensaio de ductilidade: capacidade do material se alongar;
  - Ensaio de durabilidade: envelhecimento do asfalto;
  - Ensaio de ponto de fulgor: ligado à segurança de manuseio;
  - Ensaio de massa específica e densidade relativa: usadas para uso na dosagem;
- entre outros.

### 2.3.3 Material de enchimento – Fíler

Material de enchimento (fíler), é por definição, um material inerte em relação aos demais componentes da mistura, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 75µm de abertura de malha quadrada (DNER-EM 367/97).

Fíler é o material de preenchimento, que reduz o tamanho dos vazios da mistura asfáltica, resultando em uma mistura mais densa, menos permeável e de textura mais fina, entretanto seu excesso pode reduzir a flexibilidade e durabilidade da mistura (BARDINI, 2013).

O fíler é constituído de partículas minerais provenientes dos agregados graúdos e/ou miúdos agregados na mistura, ou de outras fontes, como o pó calcário, cal hidratada, cimento Portland, etc.

Para SANTANA (1995) se o pó mineral é proveniente integralmente dos agregados graúdo e miúdo, o mesmo é então chamado de fíler mineral. O fíler da mistura pode ser constituído por 100% de fíler mineral, por 100% de fíler artificial ou pela mistura de fíler natural com fíler artificial.

Sendo a maior parte do fíler passante na peneira n° 200 ( $75\mu\text{m}$ ) é relativamente grosso (maior que  $40\mu\text{m}$ ), e a maior parte deste material vai cumprir a função de encher os vazios do esqueleto mineral, decrescendo o índice de vazios e alterando o teor ótimo de ligante. Se o fíler for ultrafino, com porcentagem significativa do material menor que  $20\mu\text{m}$ , e até com alguma porção menor que  $5\mu\text{m}$ , este material atuará muito mais no próprio ligante, incorporando-se ao cimento asfáltico e compondo um filme de ligante, envolvendo as partículas de agregados (MOTTA e LEITE, 2000, HARRIS e STUART, 1995).

O fíler ativa o ligante asfáltico, espessando-o e incorporando-o, fazendo com que o mástique tenha maior viscosidade que o ligante asfáltico puro, assim tem-se o aumento do ponto de amolecimento, diminuição da suscetibilidade térmica, aumento na resistência aos esforços de cisalhamento (estabilidade), no módulo de rigidez e na resistência à tração na flexão.

Usar fíleres na mistura é representativo para diminuir a desuniformidade na consistência e na suscetibilidade térmica provenientes de eventuais irregularidades na produção de cimentos asfálticos e na confecção da mistura asfáltica. (SANTANA, 1995).

## 2.4 INFLUÊNCIA DO FILER NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Dos vários problemas a serem resolvidos na pavimentação asfáltica, o aparecimento e propagação das trincas por fadiga e o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda e o trincamento térmico provocado pela variação térmica do pavimento são os que talvez merecem um destaque.

Um das soluções para tais problemas é o conhecimento dos efeitos dos ligantes asfálticos e dos fíleres minerais. Desenvolvendo assim melhores critérios

para o projeto das misturas asfálticas e o controle dos principais fatores durante a execução (BARDINI, 2013).

O fíler tem grande importância no comportamento das misturas asfálticas, ele preenche os vazios entre os agregados graúdos e age como parte ativa do mástique (combinação de ligante asfáltico, fíler e ar). O mástique, influencia na dosagem afetando os vazios do agregado mineral, as características de compactação e o teor ótimo do ligante asfáltico (BARDINI, 2013).

As propriedades mecânicas das misturas asfálticas e a trabalhabilidade também são respostas influenciadas pela qualidade do mástique. Segundo Bardini, o processo de fadiga está fortemente relacionado às características do ligante asfáltico, às propriedades do fíler e a interação físico-química entre os dois, afetada principalmente pela finura e características de superfície do fíler.

Segundo Bardini (2013), a utilização de fíler em misturas asfálticas melhora a adesão no sistema ligante-agregado através de mecanismos mecânico e físico-químico: o efeito mecânico do fíler na adesão é promover o aumento da viscosidade do ligante, que aumenta a resistência ao descolamento; o efeito físico-químico aparece nos fíleres que apresentam atividade na interface agregado-mástique, como por exemplo, a cal hidratada.

A graduação do fíler afeta a trabalhabilidade, quanto mais pó tiver contido no fíler, maior seu efeito na trabalhabilidade e no comportamento da mistura. Quanto menor o tamanho da partícula de fíler, maior a incorporação do mineral no ligante, aumentando a rigidez da mistura asfáltica (MOTTA e LEITE, 2000). Além de preencher os vazios, o fíler aumenta a viscosidade, diminuindo a penetração do ligante asfáltico.

A função que do fíler que irá predominar depende de vários fatores, como a granulometria dos agregados minerais, grau de compactação, espessura da película ligante, proporção entre fíler e ligante asfáltico, entre outros (BARDINI, 2013).

A utilização do fíler em misturas asfálticas melhora a adesão no sistema ligante agregado, um exemplo é a cal hidratada, usada como aditivo melhorador de adesividade em misturas asfálticas, a cal hidratada é utilizada sendo incorporada ao fíler (1 a 3% do peso dos agregados). Ela reage com o ligante asfáltico fazendo com que a mistura asfáltica se torne menos susceptível ao descolamento na presença de água.

A cal hidratada usada como fíler, possui maior efeito significativo em comparação com o cimento ou com o pó de pedra. Segundo MOURÃO (2003) isso se deve ao fato da cal hidratada ter em geral 80% de partículas de tamanho menor ou igual a 20 $\mu$ m e o cimento tem uma distribuição muito mais contínua, com diâmetro médio de aproximadamente 60 $\mu$ m, e o pó de pedra por sua vez possui graduação mais grossa, com partículas maiores que 40 $\mu$ m.

Além disso, o fíler influencia a durabilidade da mistura, para longos períodos de vida, sendo a atividade do fíler no comportamento da mistura asfáltica um fator importante após os longos períodos, devido as ligações agregados – ligante asfáltico, que começam a se deteriorar e então o papel físico- químico dos diferentes tipos de fíler são manifestados (BARDINI, 2013).

Bardini (2013) afirma que o teor de ligante asfáltico influencia a durabilidade das misturas, pois a partir do momento que a película que cobre a interface agregado ligante torna-se mais espessa, há redução do volume de vazios e assim diminuição da infiltração de água dentro da camada.

## 2.5 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A dosagem de uma mistura asfáltica consiste em uma escolha, através de procedimentos experimentais, de um teor “ótimo” de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida. Esse teor “ótimo” varia conforme uma avaliação, e é usualmente chamada de teor de projeto.

O processo da dosagem é complexo, a combinação da taxa de materiais deve satisfazer as propriedades volumétricas e mecânicas. A quantidade de ligante não deve estar nem abaixo e nem acima de 0,5% do teor de projeto, caso contrário pode sofrer desagregação ou exsudação, respectivamente.

Segundo Specht (2004) valores muito reduzidos de vazios levam a teores muito baixos de ligante, comprometendo assim o desempenho à fadiga e durabilidade, e valores altos de vazios podem levar a perda de intertravamento e redução da resistência ao cisalhamento das misturas.

O teor de projeto varia de acordo com os procedimentos de dosagem, como energia de compactação, tipo de mistura, temperatura, etc. Segundo Bernucci *et al.* (2006), o método de dosagem mais utilizado no mundo, e também o qual será

utilizado neste trabalho, é o método Marshall, o qual faz uso de compactação por impacto (golpes).

Na década de 80, devido a evidências de deformações permanentes nas rodovias norte-americanas, atribuídas ao excesso de ligante nas misturas, o congresso dos Estados Unidos desenvolveu o SHRP – *Strategic Highway Research Progra*, um programa para melhorar o desempenho, a durabilidade e a segurança das estradas. O principal objetivo desse estudo foram mudanças propostas nos procedimentos de ensaio de ligantes e misturas asfálticas, conhecido como *SUPERior Performing Asphalt PAVement (Superpave)*.

Dos dois métodos citados, a maior diferença entre eles está na forma de compactação, enquanto na dosagem Marshall a compactação é feita por impacto, na dosagem *Superpave* é realizada por amassamento (giros).

### 2.5.1 Dosagem Marshall

No Brasil, o método de dosagem Marshall de misturas asfálticas é descrito pela norma ME 043 (DNER, 1995b).

Os parâmetros gerados numa dosagem Marshall seguem um procedimento, no qual:

- 1) primeiramente é determinado as massas específicas do CAP e dos agregados;
- 2) em seguida é feita a seleção da faixa granulométrica a ser utilizada;
- 3) escolha da composição dos agregados, enquadrando a sua mistura nos limites da faixa granulométrica escolhida, conforme é apresentado na Figura 2:

Peneira	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-pedra	Areia de campo	Fíler	Faixa de projeto			Faixa C	
	25%	36%	20%	18%	1%	%mín.	%alvo	%máx.	%mín.	%máx.
3/4"	100	100	100	100	100		100,0			100
1/2"	72	100	100	100	100	86	93,1	100	80	100
3/8"	33	98	100	100	100	76	82,6	90	70	90
Nº 4	5	30	98	100	100	46	50,6	56	44	72
Nº 10	3	6	82	99	100	33	38,0	43	22	50
Nº 40	2	2	39	68	100	17	22,2	27	8	26
Nº 80	1	1	21	41	100	10	13,1	16	4	16
Nº 200	0	1	10	21	95	5	7,1	10	2	10

**Figura 2 - Exemplo da Composição dos Agregados (BERNUCCI et al., 2006)**

4) escolha das temperaturas de mistura e compactação;

5) adoção de teores de asfalto (T, em %);

6) após resfriamento e desmoldagem dos corpos-de-prova, obtêm-se as dimensões do mesmo (diâmetro e altura). Determina-se suas massas seca ( $M_s$ ) e submersa em água ( $M_{sub}$ ), para obter sua massa específica aparente ( $G_{mb}$ ), que, por comparação com a massa específica máxima teórica (DMT), vai ser possível obter as relações volumétricas típicas de dosagem;

7) Feitas as medidas volumétricas, os corpos de prova são submersos em banho-maria a 60°C de 30 a 40 minutos, tira-se rapidamente cada CP colocando-o dentro do molde de compressão e determina-se, então, por meio da prensa Marshall parâmetros mecânicos, como estabilidade e fluência.

## 2.6 DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

Pelos diversos fatores aos quais estão expostos os materiais de pavimentação, a caracterização é complexa. Por esse motivo, alguns aspectos são privilegiados, tomados de maior relevância para previsão do comportamento de misturas asfálticas em campo.

Os ensaios mecânicos que caracterizam as misturas asfálticas são divididos em categorias: ensaios convencionais, ensaios de módulo, ensaios de ruptura, ensaios de deformação permanente e ensaios complementares.

### 2.6.1 Ensaios convencionais

Nesta pesquisa o ensaio usado para caracterizar as misturas dosadas, se limitou ao ensaio convencional, a Estabilidade Marshall.

#### 2.6.1.1 Estabilidade Marshall

O ensaio para determinação da estabilidade Marshall é realizado através da aplicação de uma carga de compressão sobre o corpo-de-prova cilíndrico regular, o corpo-de-prova Marshall, de 10mm de diâmetro e 63,5mm de altura. A temperatura do ensaio é de 60°C e a taxa de carregamento de 5cm/minuto.

A parte superior da prensa é fixa e o prato inferior se desloca para cima conforme a taxa mencionada, essa força aumenta até ocorrer uma perda de estabilidade do material, ocasionada por deslocamento ou quebra de agregados.

A carga máxima correspondente a este ponto antes da ruptura é denominada estabilidade Marshall e é expressa em unidade de força, o deslocamento vertical, corresponde ao ponto de carga máxima, é denominado fluência, expressa em unidade de deslocamento, a Figura 3, a seguir, expressa esse dados de estabilidade e fluência no gráfico.

A força aplicada cresce até um determinado ponto em que ocorre uma perda de estabilidade do material, a carga máxima que corresponde este ponto é denominada estabilidade Marshall (expressa em kgf ou N), e o deslocamento vertical total correspondente ao ponto de carga máxima, é denominado fluência (expressa em mm) (Bernucci et al., 2006).

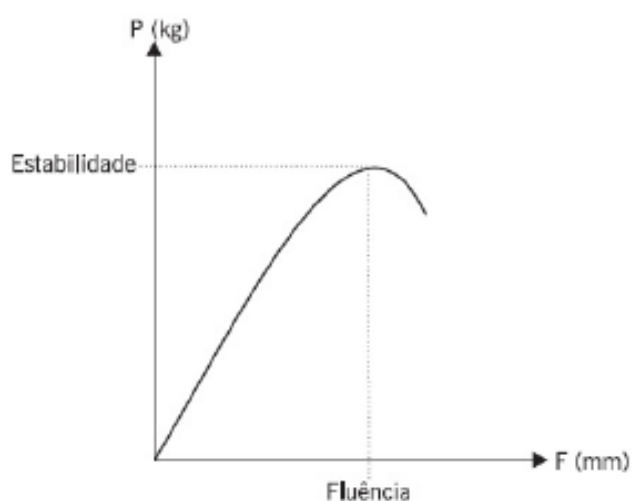


Figura 3 - Gráfico de Estabilidade x Fluência (BERNUCCI et al., 2006)

### 2.6.2 Ensaio de módulo

Os ensaios de módulo, mais usados no Brasil são o módulo de resiliência (MR) e o módulo complexo. O primeiro mede os deslocamentos sofridos pelos pavimentos que são ditos recuperáveis (resilientes).

### 2.6.3 Ensaio de ruptura

#### 2.6.3.1 Ensaio de Resistência À Tração por Compressão Diametral (RT)

É utilizado para determinação da resistência à tração de corpos de prova de concreto-cimento, por solicitações estáticas. No Brasil foi desenvolvido por Lobo Carneiro e Barcellos.

As misturas asfálticas devem possuir flexibilidade suficiente para suportar cargas de solicitações do tráfego e resistência à tração adequada para evitar precoces rupturas.

#### 2.6.3.2 Vida de Fadiga

A fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que não parecem críticas por si, se comparadas à resistência sob carregamento monotônico, mas na verdade são decisivas para a vida útil do material (Bernucci et al., 2006).

#### 2.6.4 Ensaio de Deformação Permanente

Um dos defeitos mais comuns, ocorre tanto no revestimento quanto nas subcamadas. Ocorre nos pavimentos devido a uma combinação do fluxo do material e do dano deste material, propagando o aparecimento de trincas.

Outros ensaios que designam a deformação permanente são o *creep* estático, *creep* dinâmico e simuladores de tráfego de laboratório.

#### 2.6.5 Ensaio Complementares

São ensaios empíricos que fornecem informações não obtidas a partir de ensaios mecânicos. Alguns dos mais utilizados no Brasil são: desgaste Cântabro e perda por umidade induzida.



### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento da fase experimental deste trabalho contempla a caracterização dos agregados e do ligante, a dosagem das misturas com os diferentes fíleres e o comportamento das misturas asfálticas.

Após os agregados estarem caracterizados, a dosagem foi realizada através da metodologia Marshall com compactação manual utilizando a faixa C da especificação ES 031 do DNIT (2006a) para a composição dos agregados do concreto betuminoso usinado a quente.

Feito a determinação dos parâmetros de dosagem Marshall, com o teor de asfalto definido, foram moldados 3 corpos de prova de cada mistura para a verificação do comportamento mecânico. A mistura asfáltica foi projetada seguindo as recomendações da DNER - ME 043 (1995b).

Foram moldados durante esta pesquisa, 3 corpos de prova cilíndricos para cada fíler (pó de pedra e cimento Portland) variando para cada um, o teor de ligante em 4,0, 4,5, 5,0, 5,5 e 6,0%.

#### 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

##### 3.2.1 Agregados

Neste trabalho foram utilizados agregados basáltico, fornecidos pelo Britador Zancanaro, localizado na cidade de Coronel Vivida/PR, este material foi escolhido por ser o mais comum utilizado nas obras de pavimentação realizadas na região do trabalho.

As amostras de materiais conforme Figura 4, foram coletadas aleatoriamente *in loco*, transportadas e armazenadas no laboratório de solos da UTFPR. Os tipos de agregados coletados foram, a brita 0, a brita 1, o pó de pedra, além do cimento Portland convencional. O pó de pedra foi utilizado na mistura tanto como agregado miúdo e também foi peneirado com a graduação de fíler, para ser utilizado como fíler.



**Figura 4 - Coleta de amostras de materiais**

Em laboratório, as amostras foram reduzidas de acordo com a PRO 199 (DNER 1996) e a NBR NM 27 (ABNT, 2001d) para a realização dos ensaios.

Foi determinada então a granulometria dos agregados, e as propriedades foram determinadas através de ensaios de massa específica real, aparente e absorção do agregado gráudo e massa específica real, aparente e absorção do agregado fino.

#### 3.2.1.1 Granulometria

Para cada material foi realizado a granulometria dos mesmos, através do peneiramento, de acordo com o DNER - ME 083 (1998a). As amostras dos agregados foram repartidas conforme Figura 5 até obter a quantidade estabelecida na norma, e então pesadas as suas massas úmidas. Após, as amostras foram levadas à estufa e secas à  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , por 24 horas. Em seguida foram retiradas, resfriadas à temperatura ambiente e pesadas suas massas secas.



**Figura 5 - Quarteamento das amostras**

Para o ensaio de granulometria foram utilizadas as peneiras: 25mm; 19mm; 12,5mm; 9,5mm; 4,75mm (n.4); 2mm (n.10); 0,425mm (n.40); 0,177mm (n.80) e 0,075mm (n.200), encaixadas da maior para a menor abertura como mostra a Figura 6. As amostras secas foram então peneiradas no conjunto montado. Anotou-se as massas de material retido em cada peneira e realizou-se os cálculos e a construção do gráfico da curva granulométrica.



**Figura 6 - Peneiramento das amostras**

Obtidas as curvas de cada agregado, preparou-se então composições granulométricas para as misturas asfálticas a quente, atendendo as faixas especificadas pela ES 031 (DNIT, 2006a) para camada de rolamento. Para esta pesquisa a faixa utilizada foi a Faixa C, escolhida pela sua maior utilização no Brasil.

### 3.2.1.2 Absorção e Densidade Aparente dos Agregados Graúdos

Este ensaio foi realizado com as britas 1 e a brita 0, seguindo as recomendações da norma NBR NM 53 (ABNT, 2009b). Para realização do ensaio foram separadas amostras de 3 kg de cada agregado, que foi lavado sobre a peneira nº 4 (Figura 7) e levado para secar na estufa à  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , por 24 horas. Em seguida, a amostra foi resfriada à temperatura ambiente e imersa em água também à temperatura ambiente, durante um período de  $2 \pm 4\text{h}$ , conforme Figura 8.



**Figura 7 - Massa do agregado na condição úmida**





**Figura 8 - Imersão do agregado em água**

Após imersão, a amostra foi espalhada sobre um pano absorvente até que as películas de água visíveis fossem eliminadas, e em seguida a amostra foi pesada, obtendo-se a massa na condição saturada superfície seca ( $M_s$ ). Depois a amostra foi colocada num cesto e pendurada numa balança, o conjunto foi então imerso em água à temperatura de  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ , obtendo-se sua massa imersa em água ( $M_a$ ) (Figura 9).



**Figura 9 - Massa imersa em água**

Depois, a amostra foi levada à estufa para secar à temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , resfriada à temperatura ambiente e então obtida a massa do agregado seco ( $M$ ).

Calculou-se então, através das Equações (3.1) e (3.2), a densidade aparente ( $Gsb$ ) do agregado e sua absorção ( $A$ ).

$$Gsb = \frac{M}{Ms - Ma} \quad (3.1)$$

$$A = \frac{Ms - M}{M} \quad (3.2)$$

Onde:

$Gsb$  = Densidade aparente do agregado;

$Ms$  = Massa na condição saturada superfície seca;

$M$  = Massa do agregado seco;

$Ma$  = Massa imersa em água;

$A$  = Absorção.

### 3.2.1.3 Densidade Real dos Agregados Miúdos

Para os agregados miúdos, o ensaio realizado seguiu as recomendações da norma NBR NM 52 (ABNT, 2009a). As amostras separadas foram as passadas na peneira nº 4 e retidas na peneira nº 200, após foram colocadas na estufa para secar à  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , por 24 horas.

Com as amostras secas, pesou-se um picnômetro vazio ( $Mps$ ), colocou-se uma quantidade da amostra, e então, pesou-se o conjunto ( $Mc$ ) (Figura 10). Em seguida, foi acrescentada ao picnômetro uma quantidade de água, suficiente para encobrir o agregado, e colocou-se o conjunto no fogo para eliminar a presença de ar (Figura 11). Após não aparecer mais bolhas, completou-se o picnômetro com água até a marca de volume conhecido, e pesou-se o conjunto ( $Ma$ ).



Figura 10 - Pichnômetro com amostra



Figura 11 - Pichnômetro com amostra no fogo para expulsar o ar

Em seguida, esvaziou-se o picnômetro, e anotou-se o peso obtido do picnômetro preenchido apenas com água até o volume conhecido (Mpa).

Os ensaios foram realizados com a água a 25°C, e calculou-se a densidade real ( $G_{sa}$ ) do agregado miúdo através da Equação (3.3)

$$G_{sa} = \frac{M_c - M_{ps}}{(M_{pa} - M_{ps}) - (M_a - M_c)} \quad (3.3)$$

Onde:

$G_{sa}$  = Densidade real do agregado miúdo;

$M_{ps}$  = Massa do picnômetro vazio;

$M_c$  = Massa do conjunto picnômetro e agregado;

$M_a$  = Massa do conjunto picnômetro e agregado acrescido de água, sem bolhas;

$M_{pa}$  = Massa do conjunto picnômetro e água.

#### 3.2.1.4 Densidade do Material Finamente Pulverizado

A densidade do material finamente pulverizado, o fíler, foi calculada utilizando-se a norma NBR NM 23 (ABNT, 2001e). Primeiramente colocou-se querosene no frasco Le Chatelier, com o auxílio de um funil, até que o líquido estivesse entre 0 e 1 ml (Figura 12). Em seguida, o frasco foi colocado em banho maria, para garantir a temperatura de 25°C no líquido (Figura 13). Pesou-se o conjunto ( $M_1$ ) e anotou-se o volume inicial de querosene ( $V_1$ ).



Figura 12 - Frasco Le Chatelier com querosene





**Figura 13 – Frasco com querosene em banho maria**

Colocou-se no frasco com querosene uma quantidade de fíler, sem ultrapassar a faixa superior da graduação do frasco, para expulsar o ar da amostra, fechou-se o frasco e fez-se movimentos giratórios. O frasco foi levado para o banho e, assim que a temperatura foi garantida (Figura 14), pesou-se o conjunto (M2) e anotou-se o volume final (V2).



**Figura 14 - Conjunto em banho maria**

Então, foi calculada a densidade do material finamente pulverizado, através da Equação (3.4).

$$Gf = \frac{M2-M1}{(V2-V1)} \quad (3.4)$$

Onde:

Gf = Densidade do material finamente pulverizado;

M1 = Massa do conjunto frasco e querosene;

V1 = Volume do conjunto frasco e querosene;

M2 = Massa do conjunto frasco e querosene acrescido de agregado;

V2 = Volume do conjunto frasco e querosene acrescido de agregado.

### 3.2.2 Ligantes Asfálticos

O ligante asfáltico utilizado neste trabalho foi o ligante convencional CAP 50/70. O uso desse ligante foi escolhido devido a sua disponibilidade no laboratório da universidade.

#### 3.2.2.1 Massa Específica e Densidade Relativa do Ligante Asfáltico

O ensaio para densidade relativa e massa específica do ligante asfáltico é realizado de acordo com a norma NBR 6296 (ABNT, 2012a), e são obtidas através de medidas de massa e volume utilizando o picnômetro.

Primeiro, pesou-se o picnômetro calibrado vazio (A) e encheu-se o mesmo com –água destilada e colocou-se a tampa. Após, foi posicionado o picnômetro com água no Becker e levou-se o conjunto ao banho maria, à temperatura de 25°C, por 30 minutos (Figura 15). Em seguida, removeu-se o picnômetro do Becker, secou-se sua superfície externa e pesou-se o conjunto picnômetro mais água (B).



**Figura 15 - Pícnômetro em banho maria**

Com o pícnômetro calibrado, selecionou-se uma amostra de ligante asfáltico e a colocou no pícnômetro limpo, seco e aquecido, até preencher  $\frac{3}{4}$  de sua capacidade, o conjunto foi resfriado em temperatura ambiente por 40 minutos e pesou-se o conjunto amostra e pícnômetro (C) (Figura 16).



**Figura 16 - Pesagem do conjunto**

Em seguida, removeu-se o Becker do banho e preencheu-se o volume restante do picnômetro com água destilada e colocou-se a tampa, voltando-se o conjunto para o banho (Figura 17). Depois de 30 minutos, removeu-se o picnômetro do banho, secou-se sua superfície externa e pesou-se o conjunto picnômetro, amostra e água (D).



Figura 17 - Picnômetro com água destilada e ligante em banho maria

Calculou-se então, a Densidade Relativa e a Massa Específica através das Equações (3.5) e (3.6)

$$\text{Densidade Relativa} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (3.5)$$

Onde:

A = Massa do picnômetro com tampa;

B = Massa do picnômetro cheio com água;

C = Massa do picnômetro parcialmente cheio com ligante asfáltico;

D = Massa do picnômetro acrescido de ligante e acrescido de água.

$$\text{Massa específica} = \text{densidade relativa} \times \rho \quad (3.6)$$

Onde:

$\rho$  = Massa específica da água à temperatura do ensaio (a 25°C  $\rho = 0,997\text{g/cm}^3$ ).

### 3.3 DOSAGEM MARSHALL

Foi realizado nesse trabalho através da metodologia Marshall, a dosagem a quente de duas misturas asfálticas, utilizando a faixa C do DNIT para a composição granulométrica dos agregados com dois diferentes tipos de fíleres, o pó-de-pedra e o cimento Portland.

A metodologia da dosagem em laboratório foi realizada segundo a norma ME 043 (DNER, 1995b) e posteriormente submetidas aos ensaios de estabilidade e fluência Marshall.

Com as curvas granulométricas obtidas, foram escolhidas taxas de agregados, pelo método de tentativas, combinadas de forma a atingir o centro da faixa C estabelecida pelo DNIT, os agregados que compõem a mistura foram quarteados, secos e ajustados nas exatas proporções para cada teor de CAP (Figura 18).



Figura 18 - Proporções de agregados para cada teor de CAP

A metodologia sugere para cada estudo de dosagem cinco teores de mistura, variando de 0,5%. Portanto nesta pesquisa, foram utilizados traços de dosagem para as misturas com teores de 4,0; 4,5; 5,0; 5,5 e 6,0% de ligante para cada estudo de dosagem. O teor que propiciou o enquadramento dos parâmetros e principalmente do volume de vazios é o teor de ligante ideal, tal utilizado e analisado no ensaio de propriedade mecânica.

O peso definido para o corpo de prova (CP) é de 1200g, assim foram definidas as massas de cada componente da mistura, e então preparado 3 CPs para cada tipo de mistura.

Para moldar os corpos de prova os materiais foram aquecidos (Figura 19), misturados em uma vasilha (Figura 20), como os teste de verificação de penetração e viscosidade não foram possíveis de ser realizados no laboratório, e sem dados do fabricante, as temperaturas de mistura e compactação do ligante asfáltico foram indicadas pela literatura.



**Figura 19 - Materiais aquecidos em estufa**





**Figura 20 - Mistura dos agregados com o CAP**

A mistura bem homogeneizada e com temperatura ideal, foi levada até o molde, onde foi compactado o corpo de prova, com um soquete, batendo 75 vezes em cada face (Figura 21). A compactação foi adaptada ao que possuía no laboratório, sofrendo assim algumas alterações da norma, como a haste guia, que não era fixa, e a base sólida do compactador, o peso e a altura seguiram os valores estabelecidos em norma. Após o CP foi desmoldado e deixado em repouso por 24 horas (Figura 22) para obter suas dimensões. Além de obtidas as suas massas seca (MS) e submersa (MSsub) para determinação de parâmetros volumétricos.



Figura 21 - Compactação do corpo de prova



Figura 22 - Corpo de prova em repouso

Para determinação da Densidade Máxima Teórica (DMT), foi utilizada a Equação (3.7)

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%Asf}{GAsf} + \frac{\%AgG}{GagG} + \frac{\%AgM}{GAgM} + \frac{\%F}{GF}} \quad (3.7)$$

Onde:

%Asf, AgG, AgM, F = Porcentagens de ligante, agregados graúdos, agregados miúdos e fíler, respectivamente, em relação a massa total da mistura;

GAsF, AgG, AgM, F = Massas específicas de ligante, agregados graúdos, agregados miúdos e fíler.



Após foram calculados os demais parâmetros, conforme as Equações (3.8 a 3.13)

Volume total do Corpo de Prova ( $V_t$ ):

$$V_t = MS - MS_{sub} \quad (3.8)$$

Massa específica aparente da mistura ( $G_{mb}$ ):

$$G_{mb} = \frac{MS}{V_t} \quad (3.9)$$

Porcentagem de Volume de vazios ( $V_v$ ):

$$V_v = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \times 100 \quad (3.10)$$

Vazios cheios com betume (VCB):

$$VCB = \frac{G_{mb} \times \%Asf}{G_{Asf}} \quad (3.11)$$

Volume do Agregado Mineral (VAM):

$$VAM = V_v + VCB \quad (3.12)$$

Relação betume/vazios (RBV):

$$RBV\% = \frac{VCB}{VAM} \times 100 \quad (3.13)$$

### 3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Esta pesquisa limitou-se ao estudo dos parâmetros Marshall das misturas asfálticas.

Tendo o resultado de todos os parâmetros volumétricos, foram construídas cinco curvas em função do teor de ligante, usadas para a definição do teor de projeto. A escolha do teor de projeto para camadas de rolamento mais utilizada no país é a baseada somente no volume de vazios ( $V_v$ ), correspondente a 4%, e a

partir do Vv, buscou-se atender aos demais parâmetros apresentados na ES 031 (DNIT, 2006a).

Para o ensaio mecânico foram selecionadas as misturas asfálticas misturadas com os dois tipos de filer em análise e dosadas com o teor ótimo. Assim os corpos de prova foram colocados na estufa por 2 horas, à temperatura de 60°C, depois colocado no suporte e levado para a prensa para realização do ensaio Marshall (Figura 23), visando a obtenção das características volumétricas, a estabilidade e a fluência.



**Figura 23 - Ensaio Marshall**



**Figura 24 - Corpo de prova após a ruptura na prensa Marshall**

Após rompido na prensa Marshall (Figura 24) o corpo de prova foi descartado.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA MISTURA ASFÁLTICA

#### 4.1.1 Agregados

Os agregados utilizados foram a brita 0, a brita 1, o pó de pedra, todos utilizados na confecção da mistura asfáltica da região e de origem natural, além dos fileres escolhidos para o estudo de comparação, o filer de pó de pedra e o cimento Portland, este último agregado de origem artificial. Foram realizados os ensaios descritos no capítulo 3, e verificado seus resultados obtidos para a então confecção das misturas asfálticas.

##### 4.1.1.1 Especificação dos Agregados

Realizada a granulometria de cada material através do peneiramento dos agregados, as curvas granulométricas obtidas estão apresentadas na Figura 25. Assim foi verificado que os resultados atendem aos parâmetros especificados em normas e podem ser utilizados para compor misturas asfálticas a quente.

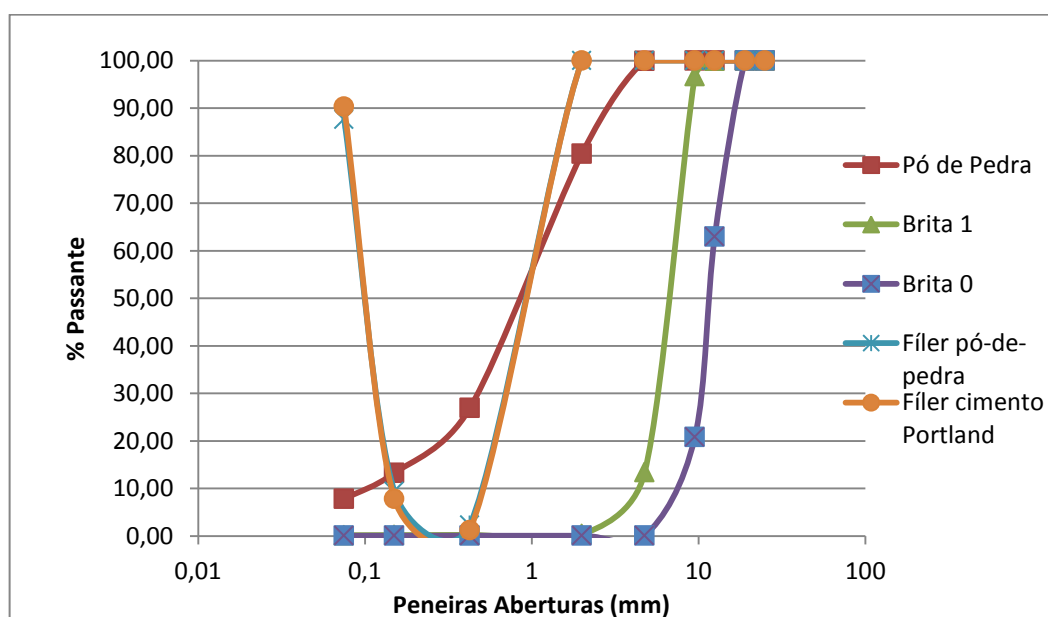


Figura 25 - Curvas granulométricas

A distribuição granulométrica é uma das principais características que influi diretamente no comportamento das misturas asfálticas. Nota-se que em geral os agregados apresentaram as curvas granulométricas uniformes, sendo os agregados praticamente de um mesmo tamanho. A brita 1 e a brita 0 apresentaram curvas mais próximas de uma graduação densa, que indica uma distribuição contínua, já o pó-de-pedra possui uma curva de graduação mais uniforme, ou seja, apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita.

O tamanho máximo do agregado é controlado por especificações que prescrevem uma determinada aplicação, a espessura mínima de execução de uma camada de asfalto, por exemplo, é em função do tamanho máximo de agregado usado em tal mistura, este foi encontrado através da abertura da primeira peneira acima da que retém mais de 10% de material, e está indicado na Tabela 1.

Agregados	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra
TNM	19mm	12,5mm	4,8mm

**Tabela 1 - Tamanho Nominal Máximo (TNM) dos agregados**

Os ensaios realizados que caracterizam cada agregado estão apresentados na Tabela 2.

Característica	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Fíler pó-de-pedra	Fíler Cimento Portland
Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,78	2,83	-	-	-
Absorção (%)	1,19	1,83			
Densidade Real (g/cm <sup>3</sup> )	-	-	2,93	-	-
Densidade pulverizado (g/cm <sup>3</sup> )	-	-	-	2,63	2,52

**Tabela 2 - Resultados dos ensaios das características dos agregados**

As massas específicas dos agregados apresentaram valores numericamente próximos, isso se deve ao fato deles terem a mesma rocha de origem. A absorção ficou dentro do recomendado, que apesar de não ter um valor limite estabelecido, a norma não recomenda alta absorção, acima de 2%, pois assim consomem maior quantidade de ligante asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2006).

#### 4.1.2 Ligante Asfáltico

A caracterização do ligante asfáltico utilizado, CAP 50/70, devido à limitação do laboratório na Universidade disponível para a pesquisa foi resumida na obtenção da massa específica e densidade relativa, e estão apresentados na Tabela 3.

Propriedade	CAP 50/70
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,014
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,011

**Tabela 3 - Resultados da caracterização e Características dos ligantes asfálticos**

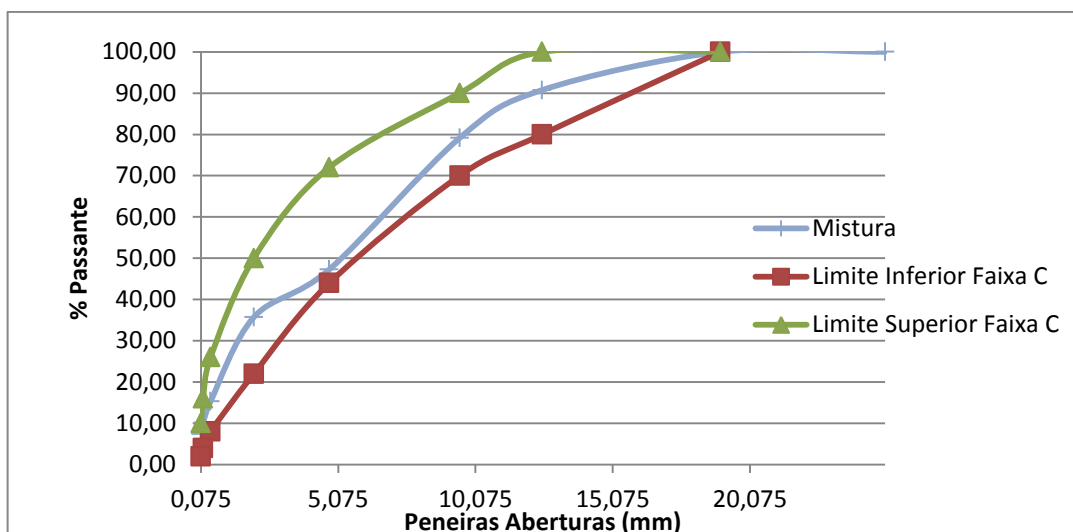
A massa específica do ligante utilizado está dentro do normal que considera-se entre 1 e 1,02g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.2 DOSAGEM MARSHALL

Para obter as taxas de agregados, as curvas granulométricas foram obtidas e as taxas foram combinadas conforme apresentado na Tabela 4, pelo método de tentativas, de forma a atender a faixa C para camada de rolamento estabelecida pelo DNIT. Os fíleres, por possuírem granulometrias muito parecidas, 65% passante na peneira 0,075mm, foram combinados apenas uma vez, considerando a mistura a mesma para os dois, mudando para cada mistura, apenas o tipo de fíler.

Peneiras		Faixa C Inf (%) - Sup (%)	Média	Brita 1 25%	Brita 0 32%	Pó de pedra 38%	Fíleres 5%	Faixa de Projeto
N	mm							
1"	25	-	-	100	100	100	100	100,00
3/4"	19	100	100	100	100	100	100	100,00
1/2"	12,5	80-100	90	63	99,96	100	100	90,74
3/8"	9,5	70-90	80	20,85	96,69	100	100	79,15
nº 4	4,75	44-72	58	0,07	13,4	99,94	100	47,28
nº 10	2	22-50	36	0,06	0,4	80,45	100	35,71
nº 40	0,425	8 - 26	17	0,06	0,24	26,92	100	15,32
nº 100	0,150	4 - 16	10	0,06	0,2	13,27	100	10,12
nº 200	0,075	2 - 10	6	0,06	0,18	7,81	87,65	7,42

**Tabela 4 - Composição Granulométrica**



**Figura 26 - Curva granulométrica da Mistura**

A curva granulométrica da mistura, conforme Figura 26, mostra que a mistura possui uma graduação densa, ou seja, uma curva granulométrica contínua proporcionando ao esqueleto mineral da mistura poucos vazios, fazendo com que os agregados de dimensões menores preencham os vazios dos maiores.

A composição dos corpos de prova, que foi realizada através da combinação dos materiais em diferentes teores de ligante, tiveram suas massas tanto para o fíler de pó de pedra e o fíler de cimento, iguais, com as massas variando apenas de acordo com esses teores de ligante, conforme mostra a Tabela 5.

Teor de ligante (%)	Brita 1 (%)	Brita 0 (%)	Pó de Pedra (%)	Fíler (%)
4,0	24,00	30,72	36,48	4,80
4,5	23,92	30,62	36,16	4,78
5,0	23,81	30,28	36,19	4,76
5,5	23,70	30,00	36,02	4,74
6,0	23,50	30,08	35,52	4,70

**Tabela 5 - Composição dos CPs, com Fíler Pó de Pedra e Fíler de cimento Portland**

Para a mistura dos materiais, é necessário obter uma temperatura ideal, na qual a viscosidade do ligante seja de  $170 \pm 20$  cP, e para a compactação, a temperatura deve ser a que o ligante apresente viscosidade de  $280 \pm 30$  cP. Como não foi realizado o ensaio de viscosidade no laboratório, para então se obter as curvas, essas temperaturas foram retiradas da literatura, aonde foram escolhidas as mais usuais para o CAP 50/70 e estão apresentadas na Tabela 6. Os agregados que

compõem a mistura foram aquecidos conforme indica a norma, 10°C a mais que a temperatura de mistura, portanto a 160°C.

Temperatura	CAP 50/70
Mistura	150°C
Compactação	140°C

**Tabela 6 - Temperaturas de mistura e de compactação dos CPs**

Após os corpos de prova serem extraídos dos moldes, foram obtidas suas dimensões e massas seca (MS) e submersa (MSsub) para a determinação dos parâmetros volumétricos, apresentados nas Tabela 7 e 8.

Propriedade					
% Ligante	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
DMT (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,62	2,60	2,58	2,56
Gmb média (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,53	2,49	2,51	2,46
Vv (%)	4,19	3,34	4,06	2,88	3,90
VCB (%)	10,05	11,27	12,34	13,63	14,60
VAM (%)	14,23	14,61	16,40	16,51	18,50
RBV (%)	70,58	77,17	75,24	82,55	78,92

**Tabela 7 - Parâmetros volumétricos para a mistura com filer Pó de Pedra**

Propriedade					
% Ligante	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
DMT (g/cm <sup>3</sup> )	2,64	2,62	2,60	2,57	2,55
Gmb média (g/cm <sup>3</sup> )	2,47	2,49	2,47	2,49	2,44
Vv (%)	6,41	4,89	5,17	3,24	4,18
VCB (%)	9,78	11,09	12,19	13,53	14,50
VAM (%)	16,19	15,99	17,36	16,77	18,68
RBV (%)	60,39	69,38	70,22	80,69	77,64

**Tabela 8 - Parâmetros volumétricos para a mistura com filer Cimento Portland**

Após obtenção dos parâmetros foram plotados gráficos no excel, Figura 27 e 28, em função do teor de ligante, com objetivo de determinar o teor de projeto, baseado no volume de vazios (Vv) de 4%.



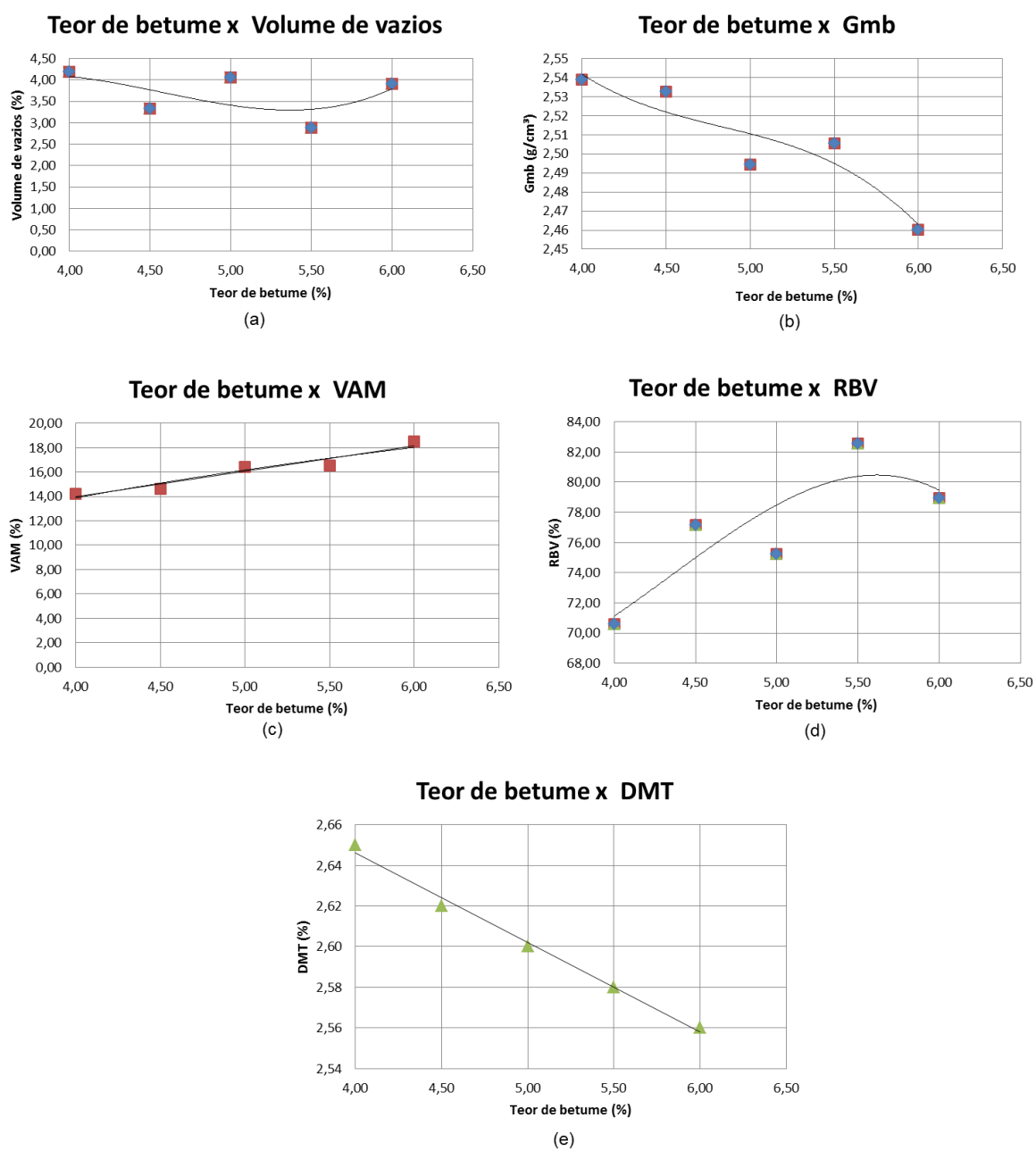
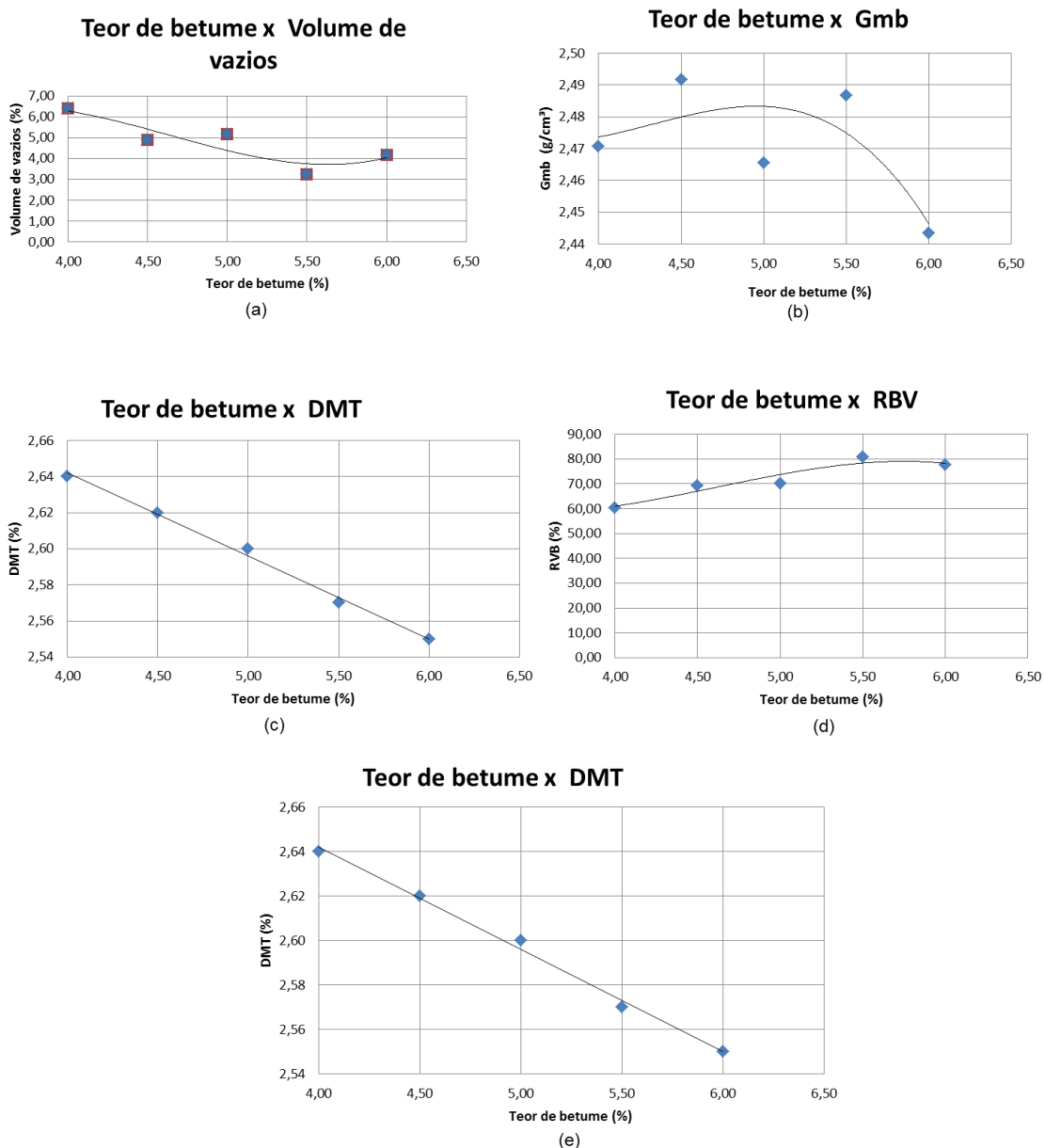


Figura 27 - Fíler Pó de Pedra – Teor de Ligante versus: (a) Volume de Vazios; (b) Gmb; (c) VAM; (d) RBV; (e) DMT.



**Figura 28 - Filer Cimento Portland – Teor de Ligante versus: (a) Volume de Vazios; (b) Gmb; (c) VAM; (d) RBV; (e) DMT.**

Nas misturas confeccionadas observou que as misturas com o filer de pó-de-pedra os valores de volumes de vazios ( $V_v$ ) foram menores em relação as misturas com o cimento Portland, os valores de massa específica (Gmb) foram maiores para as misturas com pó de pedra, os valores de volume de vazios do agregado mineral (VAM) foram menores para o pó de pedra e os valores de relação betume-vazios (RBV) para o pó de pedra foram maiores.

Com base apenas nos resultados da dosagem Marshall, pode-se concluir que as misturas com filer pó-de-pedra seriam mais indicadas para se utilizar, pois são as

que melhor atendem os requisitos estabelecidos, além de ser produzido no processo de britagem, como os outros agregados da mistura, sendo mais econômico.

Nesta pesquisa, os teores ideais adotados foram os mais próximos de 4,0%, para a mistura de fíler de pó-de-pedra foi com o teor de ligante de 5%, para a mistura com fíler de cimento Portland foi a com teor de ligante de 6%, para se ter um valor de teor de ligante inteiro, quais estão apresentados na Tabela 9.

Fíler	Teor de ligante (%)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)
Pó de Pedra	5	4	16,40	75,24	1012,30	7,23
Cimento	6	4	18,68	77,64	750	7,28

**Tabela 9 - Resultados de dosagem Marshall**

A estabilidade Marshall depois de lida na prensa Marshall foi corrigida em função da média de cada ponto das alturas de cada corpo de prova, conforme indica a norma.

As duas misturas atendem os requisitos de dosagem de concreto asfáltico do DNIT-ES 031, conforme indica Figura 29, enquanto a mistura com fíler de pó-de-pedra esta no limite de RBV, a mistura com fíler de cimento Portland está bem próxima do limite de estabilidade requerida. Devemos também levar em consideração, que o tipo da rocha de origem e o processo de britagem podem influenciar na estabilidade adquirida.

<b>Características</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Camada de Rolamento</b>	<b>Camada de Ligação (Binder)</b>
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade, mínima, (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65	0,65

**Figura 29 - Requisitos de dosagem de concreto asfáltico**

Fonte: Norma DNIT 031/2006 - ES

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa constatou-se que os agregados selecionados para o estudo atendem as especificações brasileiras, para confecção de concretos asfálticos aqui discutidas.

Quanto ao ensaio de estabilidade Marshall, as misturas mostraram-se sensíveis aos efeitos do tipo de fíler. As duas misturas apresentaram deformação máxima próximas (fluência), contudo a carga máxima de ruptura suportada pela mistura de fíler pó-de-pedra foi quase duas vezes a carga máxima suportada pela de cimento Portland.

Os resultados obtidos foram coerentes, uma vez que para a mistura de fíler pó-de-pedra, com o menor índice de vazios e a maior presença de finos no material, poderia esperar-se melhor comportamento que em relação a outra mistura.

MOTTA e LEITE (2000) estudaram os efeitos de fileres e constataram que quanto menor o tamanho da partícula do fíler maior é a sua incorporação ao ligante, aumentando assim sua resistência à deformação. Nesta pesquisa, o fíler de menor partícula, o cimento Portland, apresentou menor resistência à deformação, isso pode ser explicado teoricamente pela quantidade de ligante, que além de aumentar o índice de vazios, as partículas perdem contato entre elas e promove uma má aderência entre os agregados, diminuindo assim a rigidez da mistura, concluindo que quanto mais fino o pó, menor deve ser a relação fíler/ligante.

De forma geral, as misturas dosadas nesta pesquisa seguiram as tendências de Dosagem Marshall, em que a porcentagem do volume de vazios decresce com o aumento do conteúdo de asfalto e o valor da fluência aumenta com o conteúdo de asfalto.

Segundo o estudo realizado nesta pesquisa, levando em conta as dosagens ótimas obtidas ao longo do estudo, o ideal seria dosar misturas com fíler pó-de-pedra, além de apresentarem melhores resultados, o material é natural, mais econômico e pode ser obtido do peneiramento do próprio agregado miúdo usado na mistura.

Deve levar-se em conta que a dosagem Marshall mesmo padronizada pelas normas ABNT e DNER sofre uma dispersão significativa nos seus resultados, uma das causas dessa dispersão que pode ser citada para esta pesquisa, é a compactação dos corpos de prova, que não são executados igualmente para todos os corpos de prova, influenciando assim a determinação do teor de projeto, concluindo que o Método Marshall talvez não seja o mais indicado para a dosagem de misturas asfálticas efetivamente utilizadas em campo.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa limitou-se aos ensaios e estudos disponíveis no laboratório aonde foi realizado, portanto como sugestão para trabalhos futuros com resultados mais sensíveis, tem-se:

- Realizar ensaios laboratoriais para os agregados, como abrasão “Los Angeles”, adesividade ao ligante;
- Realizar ensaios laboratoriais para caracterizar o ligante asfáltico, como penetração, viscosidade, ponto de amolecimento e ponto de fulgor;
- Realizar estudos mais detalhados do comportamento do fíler (mástique asfáltico);
- Avaliar os corpos de prova produzidos em relação ao desgaste, à tração, à deformação e à fadiga.

## 6 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9935: Agregados – terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009b, 8p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR 6296: Produtos betuminosos semissólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa**. Rio de Janeiro, 2012a, 6p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001e, 5p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa aparente**. Rio de Janeiro, 2009a, 6p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR NM 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios em laboratório**. Rio de Janeiro, 2001d, 7p.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos. **Influência do filer mineral em propriedades de misturas asfálticas densas**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**: Petrobrás: ABEDA, Rio de Janeiro, 2006. 475p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE; SERVIÇO SOCIAL DE TRANSPORTE; SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM DE TRANSPORTE. Pesquisa CNT de Rodovias 2014: Relatório Gerencial. Brasília: Cnt, 2014. 389 p. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br>>. Acesso em: 01 out. 2017.

CUNHA, Célia Melo. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem**. 2010. Tese de Doutorado. INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA.

**DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem**. - *Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos*. Rio de Janeiro, Brasil, 1998. (DNER, 1998).

DNER \_\_\_\_\_. **PRO 199: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio em laboratório**. Rio de Janeiro. 1996.

DNER \_\_\_\_\_. **EM 367/97: Material de Enchimento para Misturas Betuminosas**. Rio de Janeiro, 1997.

DNER \_\_\_\_\_ **ME 043:** Misturas Betuminosas à quente – Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995b, 11p.

DNER \_\_\_\_\_ **ME 083:** Agregados – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998a, 5p.

**DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TRANSPORTES.**  
DNIT 031/2006 ES – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro. 2006a.

DNIT \_\_\_\_\_ **IPR 719. Manual de Pavimentação.** 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT \_\_\_\_\_ **Manual de Projeto e Práticas Operacionais para segurança nas rodovias.** Rio de Janeiro, 2010a.

HARRIS, B.M., STUART, K.D. (1995). *Analysis of Mineral Fillers and Mastic Used in Stone Matrix Asphalt. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT*, v. 64, p. 54-95, Portland, Oregon, EUA.

LOPES, M. M. **Programa Interlaboratorial de Agregados e Misturas Asfálticas da REDE ASFALTO N/NE.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2010. 176 fl.

MOURÃO, F.A.L. (2003) *Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA.* Dissertação de Mestrado COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MOTTA, L. M. G.; TONIAL, I.; LEITE, L. M. (2000). *Efeito do Fíler nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas.* Anais do 11º congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte, pp. 1007-1017, Gramado-RS, 19-23 Novembro.

PRUDENTE, Carolina Queiroz Arantes. *Estudo laboratorial de misturas asfálticas a quente utilizadas em Goiás.* 2015.

SANTANA, H. (1995). *Considerações sobre os Nebulosos Conceitos e definições de Fíler em Misturas Asfálticas.* 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá. Associação Brasileira de Pavimentação.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004. 280p.