

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

GUSTAVO BRESSIANI ARALDI

IMPACTO DA FORMULAÇÃO DE DIFERENTES MATRIZES GRANULOMÉTRICAS  
NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Joinville

2017

GUSTAVO BRESSIANI ARALDI

IMPACTO DA FORMULAÇÃO DE DIFERENTES MATRIZES GRANULOMÉTRICAS  
NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Infraestrutura, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra

Joinville

2017

IMPACTO DA FORMULAÇÃO DE DIFERENTES MATRIZES GRANULOMÉTRICAS  
NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Este trabalho foi julgado para a obtenção do título de Bacharel 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), Centro Tecnológico de Joinville.

---

Prof<sup>a</sup>. M.Sc. Valéria Bennack  
UFSC - Centro Tecnológico de Joinville  
Coordenadora do Curso de Engenharia de Infraestrutura

**Comissão Examinadora**

---

Prof. Dr. Breno Salgado Barra  
Orientador  
UFSC - Centro Tecnológico de Joinville

---

Prof. Dr. Leto Momm  
UFSC - Centro Tecnológico de Joinville

---

Prof. Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez  
UFSC - Centro Tecnológico de Joinville

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, por iluminar meu caminho e tornar possível a conclusão desta etapa.

Aos meus pais, Rudimir e Edi, por tudo que fizeram e fazem por mim, pelas oportunidades que me concederam e por não medirem esforços para atender as minhas necessidades em cada etapa da minha vida. Ao meu irmão Guilherme, que sempre tive como um exemplo, que me inspirou a encarar a engenharia e esteve sempre por perto no período da graduação.

À minha namorada Micheli Carla Durante, que é muito especial para mim, que esteve ao meu lado em todos os momentos, sempre soube o que me falar quando eu estava desanimado, me ajudou nas escolhas difíceis e me apoiou quando estas não davam certo.

Aos meus tios, que apesar de não estarem próximos, sempre estavam disponíveis quando eu precisei. Pelos finais de semana de descontração nos momentos de apuro na faculdade.

Aos amigos e companheiros de laboratório, Marco Aurélio, Pedro, Ruan, Rodrigo, Priscila, Aziz, Paulo e Arethusa, que me receberam com muito carinho, sempre estiveram dispostos a ensinar e a auxiliar nos ensaios, que tornaram mais prazerosos os trabalhos laboratoriais e as disputas pela temperatura da estufa. Um agradecimento em especial à Viviane Dias Andrade, que faz sua dissertação de mestrado junto ao meu trabalho e sempre esteve comigo em todos os passos da pesquisa.

Aos meus colegas e amigos de graduação, que ao longo desses cinco anos, de alguma forma influenciaram no meu crescimento, tanto pessoal quanto profissional, além dos momentos de entretenimento, especialmente ao pessoal do Capim Canela F.R., que agregou muito aprendizado e sempre foi um fator motivador para seguir nessa caminhada.

Ao meu orientador Breno Salgado Barra, por ter me aceito no laboratório, concedendo a oportunidade de expandir meus conhecimentos, por sempre acreditar no meu potencial e não medir esforços em sanar minhas dúvidas e dificuldades.

À empresa Greca Asfaltos, por disponibilizar os dados de um de seus projetos neste trabalho, e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pelo apoio financeiro através da bolsa de pesquisa.

## SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIACÕES .....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS .....	IX
RESUMO.....	X
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
<i>1.1.1. Objetivo Geral.....</i>	<i>2</i>
<i>1.1.2. Objetivos Específicos.....</i>	<i>2</i>
<b>1.2. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. RELEVÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVAS .....</b>	<b>4</b>
<b>1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....</b>	<b>4</b>
<b>2. METODOLOGIAS PARA FORMULAÇÃO DE ESQUELETOS MINERAIS.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. MÉTODO POR TENTATIVAS .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. MÉTODO RACIONAL .....</b>	<b>11</b>
<b>3. MATERIAIS E CURVAS GRANULOMÉTRICAS UTILIZADAS.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS GRANULARES .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2. CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE BETUMINOSO.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3. CURVAS GRANULOMÉTRICAS SELECIONADAS .....</b>	<b>17</b>
<i>3.3.1. Curva granulométrica por tentativas.....</i>	<i>18</i>
<i>3.3.2. Curva granulométrica controlada .....</i>	<i>19</i>
<i>3.3.3. Curva granulométrica teórica.....</i>	<i>20</i>
<i>3.3.4. Comparação entre as curvas granulométricas.....</i>	<i>22</i>
<b>4. ENSAIOS LABORATORIAIS.....</b>	<b>24</b>
<b>4.1. METODOLOGIA MARSHALL .....</b>	<b>24</b>
<b>4.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA (RTI).....</b>	<b>36</b>

<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>38</b>
<b>5.1. ENSAIO MARSHALL .....</b>	<b>38</b>
<b>5.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA (RTI) .....</b>	<b>44</b>
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>48</b>

## LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CC	Curva Controlada
CP	Curva Prática
CT	Curva Teórica
CTJ	Centro Tecnológico de Joinville
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DAER	Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem
DEINFRA/SC	Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina
DER/PR	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ES	Especificação de Serviço
IP	Índice de Pfeiffer e Van Doormaal
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LDTPav	Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
LTDA	Limitada
ME	Método de Ensaio
MVR	<i>Masse Volumique Réele</i>
NBR	Norma Brasileira
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro
RBV	Relação Betume/Vazios
REPLAN/SP	Refinaria de Paulínia
RTI	Resistência à Tração Indireta
S.A.	Sociedade Anônima
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
V%	Teor de Vazios
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VCB	Vazios Cheios de Betume

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Faixa C do DER/PR. ....	8
Figura 2. 2 - Curva granulométrica prática enquadrada na Faixa C do DNIT... ..	10
Figura 2. 3 - Curva granulométrica teórica. ....	13
Figura 3. 1 - Britagem Rudnick Minérios – Joinville/SC.....	14
Figura 3. 2 - Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 50/70. ....	17
Figura 3. 3 - Curva Prática.....	19
Figura 3. 4 - Curva granulométrica teórica. ....	21
Figura 3. 5 - Comparativo das curvas granulométricas. ....	22
Figura 4. 1 - Molde e colar utilizados para moldar os corpos de prova. ....	24
Figura 4. 2 - Marmitas com agregado miúdo e graúdo, respectivamente. ....	25
Figura 4. 3 - Realização das misturas asfálticas: (a) adição do ligante aos agregados graúdos, (b) envolvimento total dos agregados graúdos, (c) colocação dos agregados finos e (d) mistura homogeneizada. ....	26
Figura 4. 4 - Realização da compactação: (a) molde aquecido sobre a base do Marshall, (b) molde com o papel-filtro na sua base, (c) mistura asfáltica dentro do molde e (d) processo de pré-adensamento da mistura asfáltica. ....	27
Figura 4. 5 - Soquete Marshall automático. ....	27
Figura 4. 6 - Extração dos corpos de prova: (a) molde sobre o suporte extrator, (b) soquete Marshall auxiliando na extração e (c) corpo de prova extraído. ....	28
Figura 4. 7 - Corpos de prova Marshall.....	28
Figura 4. 8 - Medição das alturas com paquímetro. ....	29
Figura 4. 9 - Pesagem hidrostática. ....	29
Figura 4. 10 - Realização do ensaio MVR.....	31
Figura 4. 11 - Mistura na máquina de vácuo. ....	31
Figura 4. 12 - Corpos de prova em banho-maria a 60°C. ....	33
Figura 4. 13 - Prensa Marshall e equipamentos de leitura e medição. ....	34
Figura 4. 14 - Corpo de prova posicionado na prensa Marshall.....	35
Figura 4. 15 - Corpo de prova antes e depois da ruptura.....	35
Figura 4. 16 - Corpo de prova antes e depois da ruptura.....	36



Figura 5. 1 - Gráficos da densidade aparente e do teor de vazios das misturas asfálticas.....	39
Figura 5. 2 - Gráficos de vazios de agregado mineral (VAM) e de relação betume/vazios (RBV) das misturas asfálticas. ....	40
Figura 5. 3 - Gráficos de estabilidade e fluência das misturas asfálticas. ....	41
Figura 5. 4 - Gráfico dos resultados de RTI. ....	45

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2. 1 - Faixas granulométricas para pavimentos flexíveis.....	7
Tabela 2. 2 - Faixas granulométricas para concretos asfálticos usinados à quente. ....	8
Tabela 2. 3 - Composição granulométrica de uma curva prática. ....	9
Tabela 2. 4 - Curva granulométrica teórica. ....	13
Tabela 3. 1 - Resultados da caracterização dos agregados. ....	15
Tabela 3. 2 - Resultados da caracterização do ligante CAP 50/70. ....	16
Tabela 3. 3 - Composição das frações dos granulares da curva prática (CP). ....	18
Tabela 3. 4 - Composição das frações dos granulares da curva prática controlando as frações. .....	19
Tabela 3. 5 - Curva granulométrica teórica. ....	21
Tabela 3. 6 - Distribuição das frações granulométricas.....	22
Tabela 5.1 - Resumo dos valores médios obtidos pelo ensaio Marshall. ....	38
Tabela 5.2 - Prováveis teores de trabalho de ligante para cada mistura asfáltica.....	42
Tabela 5.3 - Resistência à tração indireta média das misturas asfálticas. ....	44

## RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é comparar o comportamento mecânico, com base na estabilidade e fluência Marshall, de uma mistura asfáltica aplicada em campo, a partir da adaptação de um projeto executado na cidade de Curitiba/PR, considerando a formulação do esqueleto mineral por tentativa (prática), em relação a outras duas misturas asfálticas, sendo uma concebida pelo método racional (teórica) e outra pelo controle das frações granulométricas a cada peneira, tomando em conta a mesma distribuição percentual utilizada na formulação prática (controlada). O método por tentativas é empregado na maioria das produções de misturas asfálticas do Brasil, em que o objetivo é enquadrar as formulações em faixas preestabelecidas pelos organismos regulamentadores das esferas do poder público. Porém, este método é caracterizado pelo uso de frações granulares comerciais heterogêneas, ou seja, com graduações dimensionais distintas, devido aos processos de beneficiamento adotados nas pedreiras, contribuindo para o controle deficiente do processo de formulação. Em consequência, não é raro se deparar com misturas asfálticas mal dosadas e com comportamento mecânico não satisfatório. No caso do método racional, utilizando a equação de Füller-Talbot, são fixados os parâmetros característicos da curva granulométrica que se deseja formular, assim, pode-se controlar as frações dos agregados por peneira, a partir da distribuição normalizada dos percentuais de distribuição das partículas, dispensando o uso de faixas granulométricas. Para tanto, foram caracterizados e utilizados agregados de origem granítica provenientes de jazida localizada na região metropolitana de Joinville, bem como o ligante asfáltico de classificação por penetração 50/70, fornecido pela refinaria REPLAN/SP. A metodologia Marshall foi a escolhida para determinar a dosagem de trabalho do ligante betuminoso, com base nos parâmetros físicos e mecânicos de avaliação das misturas asfálticas, em razão de ser a metodologia oficialmente adotada no Brasil para esta finalidade. Ato contínuo, a partir da verificação dos teores de trabalho pela metodologia Marshall, tem-se que a análise foi complementada pelo ensaio de tração indireta, a fim de verificar possíveis variações de indicadores de resistência das misturas formuladas. Os resultados obtidos indicam que a formulação teórica apresenta maior resistência à ruptura, menor fluência e menor consumo de ligante, em comparação às demais misturas asfálticas formuladas, e ainda que a formulação controlada apresenta resultados mais satisfatórios que a mistura prática utilizada como referência.

**Palavras-chave:** formulação, esqueletos minerais, granulometria, misturas asfálticas, dosagem, comportamento mecânico.

## 1. INTRODUÇÃO

O transporte no Brasil se dá em sua maioria pelo modal rodoviário, e esse se mostra bastante presente na economia do país. Grande parte das estradas brasileiras encontra-se danificada, e segundo Morilha (2004), isso ocorre devido a diversos fatores, sendo alguns deles a má formulação das misturas asfálticas, o excesso de carga sobre o pavimento, a falta de manutenção e falha de execução.

De acordo com Barra (2009), o projeto e execução dos pavimentos devem atender de forma satisfatória a trilogia conforto, segurança e economia. Para tal é necessário o estudo constante de melhorias a fim de garantir bom desempenho e capacidade de suporte, com necessidade mínima de reparos e manutenção.

Os parâmetros que implicam diretamente na qualidade e vida útil das misturas asfálticas estão ligados à composição da matriz granular e ao ligante betuminoso, sendo assim, o conhecimento dos materiais envolvidos é algo que se deve prezar.

A pesquisa desenvolvida foi de caráter experimental, baseada em resultados de ensaios laboratoriais utilizando materiais (ligante betuminoso e agregado) provenientes da Refinaria de Paulínia (REPLAN), de propriedade da Petrobrás S.A., em São Paulo e, da Rudnick Minérios Ltda., localizada no município de Joinville/SC.

Neste contexto, um estudo de caso foi executado, tendo-se como objetivo principal avaliar comparativamente o impacto das formulações de misturas asfálticas densas concebidas pelos métodos por tentativa e racional.

## **1.1. Objetivos**

Os seguintes objetivos geral e específicos foram traçados para a pesquisa executada:

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Avaliar, comparativamente, o impacto da formulação de diferentes matrizes granulométricas no comportamento mecânico de misturas asfálticas densas.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar os agregados e ligante betuminoso utilizados nas formulações das misturas asfálticas;
- Formular esqueletos granulométricos a partir dos métodos racional e por tentativa;
- Produzir misturas asfálticas utilizando a metodologia Marshall;
- Determinar os parâmetros físicos e mecânicos das misturas asfálticas, com base na metodologia supracitada;
- Avaliar de forma comparativa as formulações concebidas e definir qual a mais adequada para uso em serviços de pavimentação.

## **1.2. Procedimentos para alcançar o objetivo**

A empresa Greca Asfaltos disponibilizou o relatório de um de seus trabalhos realizados na cidade de Curitiba/PR (GRECA ASFALTOS, 2016), possibilitando o entendimento do traço utilizado, formulado a partir do método por tentativa, e permitindo a realização da comparação com a curva granulométrica oriunda da pesquisa de Barra (2009), formulada pelo método racional.

Os materiais utilizados na pesquisa também foram fornecidos por empresas parceiras, sendo o ligante betuminoso (CAP 50/70) cedido pela Refinaria REPLAN/Petrobrás, localizada em Paulínia/SP, enquanto os agregados graníticos foram retirados diretamente das leiras da empresa Rudnick Minérios Ltda., localizada na zona industrial norte de Joinville-SC.

Neste contexto, tem-se que as características dos agregados e do ligante betuminoso foram obtidas dos estudos prévios recentes executados por Meurer (2015) e Zagolin (2016),

respectivamente, em razão de terem sido utilizadas amostras de mesma frente de lavra e lote de fornecimento.

Para o estudo comparativo, foram elaboradas 3 misturas asfálticas distintas, a primeira, denominada teórica (CT), foi determinada a partir do controle racional das frações granulométricas calculado pela equação de Füller-Talbot, utilizada por Barra (2009).

A segunda, de acordo com o relatório da Greca Asfaltos (2016), teve sua curva granulométrica obtida através do método por tentativas, utilizando a Faixa C do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR), chamada de mistura prática (CP). Porém, neste traço havia originalmente 1,5% de cal passante na peneira 0,075mm, insumo que não foi utilizado no presente trabalho, pois foge ao objetivo traçado para a pesquisa. Assim, foi adaptado o traço original com a substituição do percentual indicado de cal na fração de pó de pedra.

Por fim, a terceira foi obtida utilizando a distribuição granulométrica prática, porém controlando os diâmetros das frações correspondentes aos percentuais definidos na curva prática, sendo esta chamada de curva controlada (CC).

Com as formulações definidas, foi realizado o ensaio Marshall a fim de determinar o teor de trabalho de ligante, para tal, foram moldados 25 corpos de prova cilíndricos para cada mistura, sendo 5 de cada teor de ligante, totalizando 75 corpos de prova. Com o intuito de verificar o teor de trabalho determinado, foi realizado complementarmente o ensaio de Resistência à Tração Indireta com os 2 possíveis melhores teores de ligante para cada mistura.

### **1.3. Delimitação do espaço da pesquisa**

A presente pesquisa foi realizada no âmbito laboratorial, sem qualquer pretensão de execução de análises de campo ou computacionais. Os ensaios previstos para a pesquisa foram realizados no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Este dispõe de todos os recursos necessários ao cumprimento dos objetivos previstos para a execução deste trabalho. As discussões de resultados e conclusões obtidas neste trabalho são válidas apenas para as condições assumidas e testadas na campanha experimental estabelecida, não devendo serem extrapoladas para outras situações de aplicação.

#### 1.4. Relevância do tema: justificativas

Conforme Barra (2005), as metodologias para a concepção das misturas de concreto asfáltico formuladas no Brasil, comumente, são originadas de estudos empíricos. Nestes casos, as curvas granulométricas que constituem os esqueletos minerais são obtidas a partir da tentativa de enquadramento dos percentuais das graduações dos agregados nos limites das faixas granulométricas, dados por normas homologadas por órgãos responsáveis pelas obras de infraestrutura. Exemplos desses órgãos são o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR).

As faixas granulométricas normatizadas costumam permitir o enquadramento de misturas asfálticas com comportamentos mecânicos muito variados, isso se dá, pela abrangência dos seus limites (MOMM, 1998), o que pode implicar na aprovação de curvas mal formuladas, cujo desempenho mecânico é insatisfatório, reduzindo assim a vida útil dos pavimentos.

Diante dos argumentos acima descritos, esta pesquisa é justificada pela apresentação do estudo de um método racional para a formulação de misturas asfálticas, em comparação ao método empírico usualmente praticado no Brasil, com o intuito de contribuir para a melhoria da formulação dos esqueletos minerais, e em consequência, da dosagem dos pavimentos de concreto asfáltico, visando a construção de estradas com melhor qualidade e durabilidade.

#### 1.5. Organização do trabalho

O presente trabalho está dividido em capítulos, organizados da seguinte forma:

**Capítulo 1:** Introdução do tema abordado na pesquisa, esclarecendo ao leitor o problema, os objetivos e a justificativa do autor.

**Capítulo 2:** Revisão literária das metodologias utilizadas nesta pesquisa para a formulação dos esqueletos minerais.

**Capítulo 3:** Caracterização dos materiais que compõem as misturas asfálticas e suas propriedades, além de considerações sobre as curvas granulométricas abordadas na pesquisa.

**Capítulo 4:** Apresentação dos ensaios executados em laboratório que avaliam o comportamento mecânico das misturas asfálticas.

**Capítulo 5:** Exposição dos resultados obtidos nos ensaios e análise comparativa das propriedades determinadas para cada mistura.

**Capítulo 6:** Apresentação das conclusões referentes ao estudo realizado, bem como recomendações para trabalhos futuros.



## 2. METODOLOGIAS PARA FORMULAÇÃO DE ESQUELETOS MINERAIS

Existem diversos métodos para a determinação de uma composição dos esqueletos minerais das misturas asfálticas que se enquadre nas faixas normatizadas (SENÇO, 2008), dentre eles, tem o método por tentativas, o método Racional e o método gráfico de Rothfuchs.

Neste trabalho serão apresentadas apenas duas metodologias, a utilizada pela empresa Greca Asfaltos (2016), que é enquadrada pelo método por tentativas e a proposta neste estudo, pelo método racional (BARRA, 2009).

### 2.1. Método por Tentativas

A metodologia mais aplicada no Brasil para dosagem de misturas asfálticas é a metodologia Marshall, em que se busca estabelecer o teor de trabalho de ligante a ser adicionado ao agregado pétreo para que a mistura atenda aos requisitos preconizados na Especificação de Serviço de pavimentos flexíveis (DNIT-ES 031, 2006). A metodologia Marshall é regida pela norma DNER-ME 043/95 e será apresentada no Capítulo 4.

Como citado anteriormente, são vários os métodos para a determinação da composição da curva granulométrica das misturas asfálticas. O DNIT, antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), sugere o uso do método por tentativas e prescreve faixas granulométricas, que variam em função da aplicação da mistura, podendo ser de rolamento, ligação ou reperfilagem.

A Tabela 2.1 mostra as porcentagens limites para cada faixa para o DNIT.

Tabela 2.1 - Faixas granulométricas para pavimentos flexíveis.

Abertura de Peneira		Porcentagem em massa passando (%)			
Série ASTM	ABERTURA (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	–	–	–
1 ½"	38,1	95 – 100	100	–	± 7%
1"	25,4	75 – 100	95 – 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%
Nº 4	4,8	25 – 50	28 – 60	44 – 72	± 5%
Nº 10	2	20 – 40	20 – 45	22 – 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 – 30	10 – 32	08 – 26	± 5%
Nº 80	0,18	05 – 20	08 – 20	04 – 16	± 3%
Nº 200	0,075	01 – 08	03 – 08	02 – 10	± 2%
		4,0 – 7,0	4,5 – 7,5	4,5 – 9,0	
Asfalto solúvel no CS2 (+) (%)		Camada de ligação (Binder)	Camada de ligação e rolamento	Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: DNIT ES 031 (2006).

Além do DNIT, os estados também possuem departamentos singulares com normativas aplicáveis apenas nos seus limites, como o Departamento Estadual de Infraestrutura (DEINFRA/SC) em Santa Catarina, Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER) e Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem (DAER) no Rio Grande do Sul.

A empresa Greca Asfaltos, segue os limites preconizados pelo DER/PR e a curva granulométrica por eles disponibilizada diz respeito à faixa C. Abaixo é ilustrada a Tabela 2.2, na qual é apresentada a relação das faixas granulométricas pelo DER/PR.

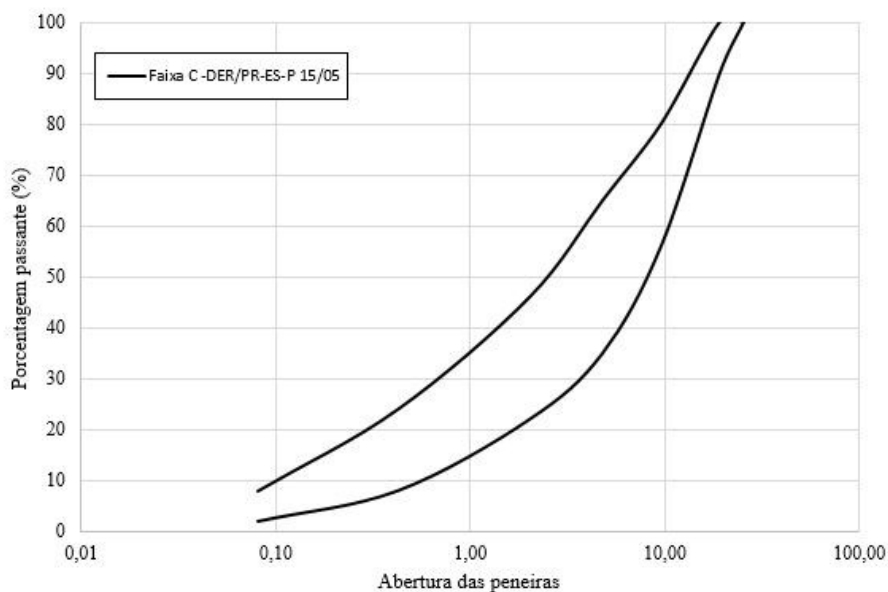
Tabela 2.2 - Faixas granulométricas para concretos asfálticos usinados à quente.

Peneira		Porcentagem passando (%)					
ABNT	Abertura (mm)	A	B	C	D	E	F
1 ½"	38,1	100	100	–	–	–	–
1"	24,4	95–100	90–100	100	–	–	–
¾"	19,1	80–100	–	90–100	100	100	–
½"	12,7	–	56–80	–	80–100	90–100	–
3/8"	9,5	45–80	–	56–80	70–90	75–90	100
Nº04	4,8	28–60	29–59	35–65	50–70	45–65	75–100
Nº10	2,2	20–45	18–42	22–26	33–48	25–35	50–90
Nº40	0,42	10–32	08–22	08–24	15–25	08–17	20–50
Nº80	0,18	08–20	–	–	08–17	05–13	07–28
Nº200	0,075	03–08	01–07	02–08	04–10	02–10	03–10
Utilização como		Ligação	Rolamento		Reperfilagem		

Fonte: DER/PR-ES-P 015 (2005).

Com a faixa granulométrica estabelecida, a composição do esqueleto mineral deverá ser enquadrada entre seus limites. Em busca de um melhor entendimento do leitor, a Figura 2.1 ilustra graficamente a faixa C do DER/PR.

Figura 2.1 - Faixa C do DER/PR.



Fonte: DER/PR.

O método por tentativas é um método empírico, dado que é baseado na tentativa e erro das porcentagens empregadas para cada graduação do agregado mineral. Deve-se conhecer bem a granulometria de cada uma das frações que serão utilizadas na composição da mistura para montar uma curva granulométrica que atenda aos requisitos normatizados.

Para enquadrar a curva granulométrica na faixa determinada, deve-se definir quais frações de agregados serão adotados no esqueleto mineral, a partir disso, é necessário conhecer a granulometria dessas frações, para então estimar porcentagens de cada fração a fim de que a soma de cada diâmetro determinado no ensaio de granulometria esteja entre os limites normativos da faixa determinada.

Uma das razões para essa metodologia ser considerada falha, é o modo com que os agregados são comercializados no Brasil, pois não há o devido controle do peneiramento de cada fração, visto que a norma não exige, podendo conter partículas do mesmo diâmetro em mais de uma fração. Um exemplo disso é a brita 1, que em sua composição granulométrica apresenta grãos que são encontrados tanto na brita 0 quanto no pedrisco. Diante dessa imprecisão, a granulometria final não fica bem definida, o que induz na produção de misturas asfálticas com parâmetros indesejáveis.

A título de exemplificação do método, a Tabela 2.3 foi adaptada de Barra (2005), a qual apresenta as graduações dos agregados, abaixo deles, o resultado de suas granulometrias e ao lado a porcentagem de cada graduação na composição da mistura.

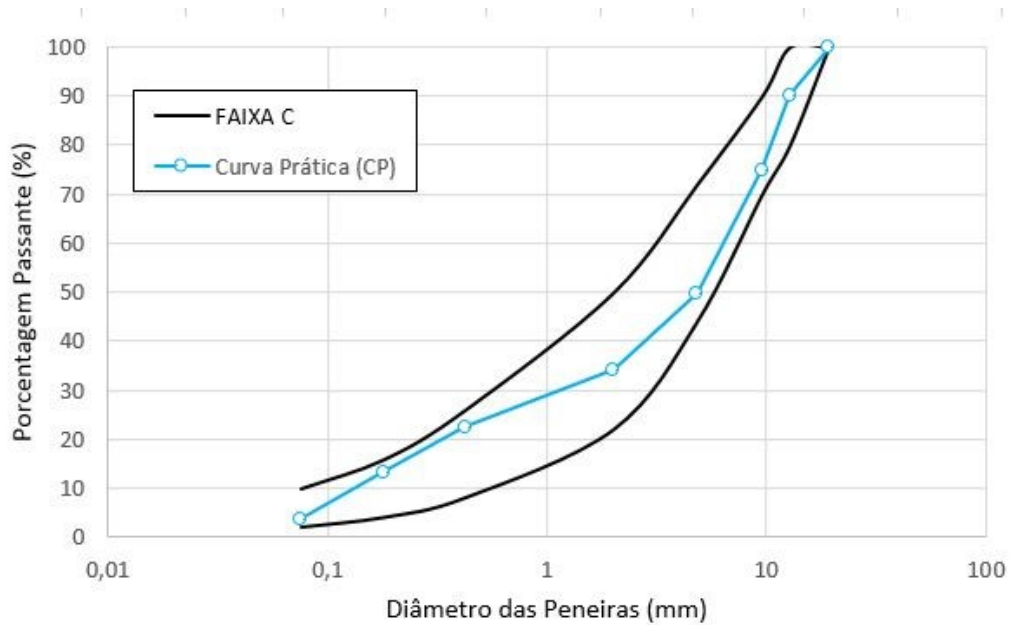
Tabela 2.3 - Composição granulométrica de uma curva prática.

Peneiras	Agregado "A"		Agregado "B"		Agregado "C"		Agregado "D"		Agregado "E"		Curvas	Faixa "C" do DNIT	
	Brita 01	27%	Brita 00	36%	Pó de Brita	28%	Areia	7%	Fíler	2%			
1 1/2"	100	27	100	36	100	28	100	7	100	2	100	100	100
1	100	27	100	36	100	28	100	7	100	2	100	100	100
3/4"	100	27	100	36	100	28	100	7	100	2	100	100	100
1/2"	65,1	17,6	98,8	35,6	100	28	100	7	100	2	90,1	80	100
3/8"	19,2	5,2	90,8	32,7	100	28	100	7	100	2	74,9	70	90
Nº 4	0,6	0,2	35,5	12,8	99,4	27,8	100	7	100	2	49,8	44	72
Nº 10	0,4	0,1	5,9	2,1	82,6	23,1	99,8	7	100	2	34,3	22	50
Nº 40	0,3	0,1	1,4	0,5	52,5	14,7	75,1	5,3	100	2	22,5	8	26
Nº 80	0,3	0,1	0,6	0,2	35,6	10	21,6	1,5	77,1	1,5	13,3	4	16
Nº 200	0,1	0	0,2	0,1	8,8	2,5	1,6	0,1	50	1	3,7	2	10

Fonte: Barra (2005), adaptada pelo autor.

A Figura 2.2 representa o encaixe da curva determinada na Tabela 2.3 na faixa C do DNIT.

Figura 2.2 - Curva granulométrica prática enquadrada na Faixa C do DNIT..



Fonte: Barra (2005), adaptada pelo autor.

Pode-se apreciar na Figura 2.2 o encaixe de uma curva granulométrica nos limites normativos do DNIT, as linhas de cor preta são os limites superior e inferior da faixa C do DNIT e a linha em azul é a curva prática determinada na Tabela 2.3.

Conforme Senço (2008), uma curva que encosta nos dois extremos da faixa especificada, representa um material mal distribuído, contudo, satisfaz a especificação da norma. “As variações amplas de percentagens passantes em todas as peneiras tornam evidente que as propriedades do produto obtido serão muito diferentes” (MOMM, 1998, p. 57). Na Figura 2.2 percebe-se que há uma proximidade considerável com os limites superior e inferior, o que indica a má distribuição granulométrica do esqueleto mineral.

Esse fator, somado à problemática das graduações comercializadas no Brasil, tornam essa metodologia tão empírica e fazem com que as misturas de concreto asfáltico no país não atendam de forma satisfatória as solicitações a elas impostas.

## 2.2. Método Racional

Outra maneira de calcular as porcentagens dos agregados na composição granulométrica de uma mistura asfáltica é pelo método racional, também chamado de método teórico. Para a aplicação desse método, determinam-se as peneiras que serão utilizadas na execução do traço, para que os diâmetros menores preencham de forma satisfatória os vazios gerados pelas partículas maiores.

Nesse âmbito, são fixados os diâmetros máximo e mínimo da composição do esqueleto mineral, de acordo com a sequência de peneiras determinada pelo projetista. Após isso, a partir da Equação 2.1 de Füller-Talbot (DNIT, 2006), é calculado o percentual de cada fração correspondente a 100% das partículas passantes, considerando a variação do diâmetro que ocorre em todas as peneiras.

$$\%p = a \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (2.1)$$

Onde:

%p = porcentagem em peso que passa na peneira de abertura d;

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 2.2.

$$n = \frac{\log(\%pi) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} \quad (2.2)$$

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).

As equações 2.1 e 2.2 tendem a resultar em uma curva granulométrica contínua com maior proporção entre os grãos. De acordo com o DNIT (2006), o expoente “n” indica se a curva é densa, aberta ou tipo macadame. O DNIT os define desse modo:

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

De acordo com Bernucci *et al.* (2010) as graduações mais densas, acarretam em uma maior estabilidade devido ao contato entre as partículas e ao baixo teor de vazios. Entretanto, é necessária a existência de vazios para garantir a incorporação de ligante, pois sem isto, pode ocorrer exsudação, em que o ligante betuminoso migra para a superfície da mistura asfáltica, gerando a segregação entre o agregado e o betume, o que resulta na redução da sua estabilidade.

O contrário é visto nas graduações abertas, em que o volume de vazios é muito alto em consequência do maior diâmetro de suas partículas, o que implica em um menor contato entre os grãos. Em vista disso, é necessário verificar se a granulometria resultante gera uma mistura adequada para a obra que será aplicada.

Diferente do método por tentativas, o método teórico dispensa o enquadramento nas faixas normatizadas, isso se dá devido ao controle dos diâmetros na sua composição.

Para exemplificar a metodologia, apresenta-se na Figura 2.3 a curva resultante da aplicação da Equação 2.1. Porém, para o uso de tal equação, deve-se conhecer o valor do expoente “n”, calculado na Equação 2.2. Fixou-se como diâmetro máximo (D) 19,1mm e o mínimo (d) 0,075mm. Também foi determinada a porcentagem de material passante na peneira de diâmetro mínimo, que foi de 6%, resultando em um “n” igual a 0,51, o que caracteriza a curva como densa. O cálculo pode ser apreciado a seguir.

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

Com o “n” calculado, aplica-se a Equação 2.1 para todas as peneiras determinadas pelo projetista, a fim de determinar a porcentagem passante em cada diâmetro, A tabela 2.4 apresenta os resultados e o cálculo abaixo é o exemplo para a peneira de diâmetro 12,7mm.

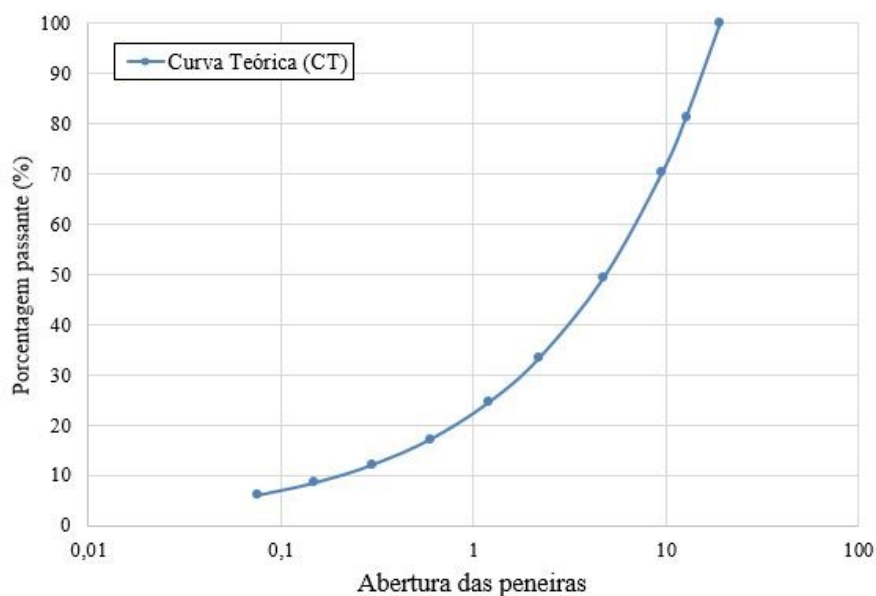
$$\%p = a \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n = 100 \cdot \left(\frac{12,7}{19,1}\right)^{0,51} = 81,3$$

Tabela 2.4 - Curva granulométrica teórica.

Peneiras	Abertura (mm)	Percentagem passante (%)	Percentagem retida (%)
3/4"	19,10	100,0	–
1/2"	12,70	81,3	18,7
3/8"	9,50	70,1	1,1
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, p. 153), adaptada pelo autor.

Figura 2.3 - Curva granulométrica teórica.



Fonte: Barra (2009, p 157), adaptada pelo autor.

Nota-se que a trajetória da curva granulométrica da Figura 2.3 é mais bem definida quando comparada à curva exposta na Figura 2.2. 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 (Tabela 2.4). O que resulta em um controle mais eficaz da formulação do esqueleto mineral pelo projetista.



### 3. MATERIAIS E CURVAS GRANULOMÉTRICAS UTILIZADAS

Para a realização e compreensão dos resultados da pesquisa, é necessário o conhecimento das propriedades e características dos materiais utilizados. Neste capítulo, essas características serão apresentadas, bem como a comparação das curvas granulométricas adotadas.

#### 3.1 Caracterização dos materiais granulares

Os agregados minerais utilizados nas misturas asfálticas fabricadas pela empresa Greca Asfaltos são do tipo Riolito, diferentes dos materiais disponibilizados pela empresa Rudnick Minérios S.A., que são de Gnaisse. Sabendo que este trabalho é um estudo comparativo das curvas granulométricas, teóricas e práticas, os materiais granulares utilizados nas misturas asfálticas não precisam ser os mesmos utilizados pela empresa parceira, logo, serão adotados os agregados obtidos pela Rudnick Minérios S.A.

Figura 3.1 - Britagem Rudnick Minérios – Joinville/SC.



Fonte: Autor.

Para tomar conhecimento das propriedades dos agregados minerais, existe uma série de ensaios normatizados pelo DNER, que limitam, de forma quantitativa e qualitativa, para determinadas características. Estes ensaios estabelecem se os materiais atendem ou não as necessidades para aplicação na pavimentação.

Tendo em vista que o material utilizado já foi previamente caracterizado e ensaiado por Meurer (2015), foram adotados os resultados encontrados em sua pesquisa. Estes são apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Resultados da caracterização dos agregados.

Ensaio	Normativa	Resultado		Limite
		Quantitativo	Qualitativo	
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98	14,20%	-	Máx. 50%
Índice de forma	ABNT NBR 6954/1989	0,7	Boa cubicidade	Mín 0,5
Resistência ao ataque químico (Durabilidade)	DNER-ME 089/94	2,71%	Não houve quebra	Máx. 12%
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER-ME 078/94	-	Não houve descolamento da película betuminosa quando adicionado 0,5% de Betudope	Sem descolamento da película betuminosa
Massa específica real - agregados graúdos	DNER-ME 081/98	2,759g/cm <sup>3</sup>	-	-
Massa específica aparente - agregados graúdos	DNER-ME 081/98	2,700g/cm <sup>3</sup>	-	-
Absorção - agregados graúdos	DNER-ME 081/98	0,41%	-	-
Massa específica real - agregados miúdos (Chapman)	DNER-ME 194/98	2,731g/cm <sup>3</sup>	-	-
Massa específica real - material finamente pulverizado (Le Chatelier)	DNER-ME 085/94	2,759g/cm <sup>3</sup>	-	-

Fonte: Meurer (2015).

Os resultados de Meurer (2015) mostram que o agregado mineral se enquadra nos limites normatizados, o que indica que este material pode ser utilizado na pavimentação asfáltica.

### 3.2. Caracterização do Ligante Betuminoso

De acordo com Guerrero (2013, p. 11 e 12), “O ligante asfáltico é produto da destilação do petróleo e é o componente encarregado de exercer a aglutinação entre as frações granulares a partir da formação de uma película que envolve a superfície destas”.

Do mesmo modo dos agregados, por ser um estudo comparativo, não se faz necessário o uso do mesmo ligante utilizado pela empresa parceira, sendo assim, o ligante betuminoso utilizado é um Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 disponibilizado pela REPLAN.

Para a caracterização dos ligantes, são normatizados cinco ensaios, ponto de amolecimento anel e bola, penetração, índice Pfeiffer e Van Doormaal (IP), viscosidade Saybolt-Furol e massa específica. De forma semelhante aos ensaios do esqueleto mineral, o ligante utilizado na composição dos corpos de prova também foi empregado em estudos prévios, neste caso foi de Zagolin (2016), desse modo, os resultados da caracterização do ligante foram aproveitados nesta pesquisa e seus resultados foram compilados na tabela 3.2.

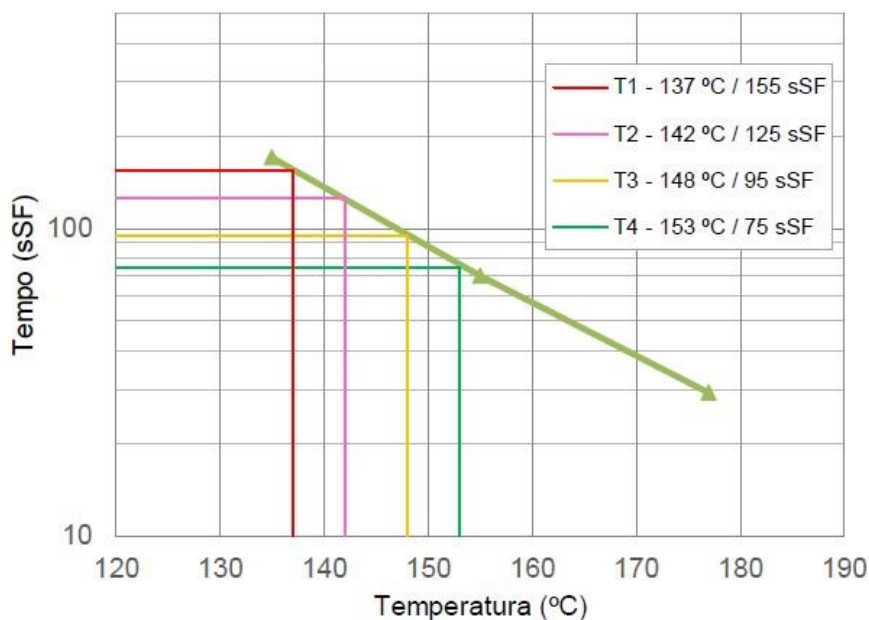
Tabela 3.2 - Resultados da caracterização do ligante CAP 50/70.

Ensaio	Normativa	Resultado Quantitativo	Limite
Ponto de amolecimento Anel e Bola	DNIT-ME 131/2010	49°	>46°
Penetração	DNIT-ME 155/2010	52 (0,1mm)	50-70
Índice de Pfeiffer e Van Doormaal	Resolução nº19 de 11/07/2005 da Agência Nacional do Petróleo (ANP).	-1,5	de -1,5 até 0,7
Viscosidade Saybolt-Furol	ABNT NBR 14950/2003	Compactação entre 137° e 142° Usinagem entre 148° e 153°	-
Massa Específica	ABNT NBR 6296/2012.	1,007g/cm <sup>3</sup>	-

Fonte: Zagolin (2016).

Por se tratar de um dado de considerável relevância, a Figura 3.2 apresenta o gráfico gerado a partir do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol realizado por Zagolin (2016).

Figura 3.2 - Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 50/70.



Fonte: Zagolin (2016).

Os resultados extraídos da pesquisa de Zagolin (2016) trazem informações relevantes para a continuidade da pesquisa, pois apenas com esses dados pode-se prosseguir para o ensaio Marshall, uma vez que as temperaturas de usinagem e compactação foram determinadas, além da densidade do ligante, propriedade determinante para a obtenção dos parâmetros da metodologia Marshall.

### 3.3. Curvas granulométricas selecionadas

Nesta seção serão apresentadas as três curvas granulométricas adotadas na pesquisa, a determinada pelo método por tentativas, a curva controlada, que será explicada na seção 3.3.2, e a mistura teórica, bem como o modo que elas foram obtidas. Por fim, será feita uma comparação entre elas.

### 3.3.1. Curva granulométrica por tentativas

A composição da curva granulométrica por tentativas utilizada nesta pesquisa, denominada de curva prática (CP), foi estabelecida pela empresa Greca Asfaltos, sendo os seus dados retirados do relatório de uma obra de pavimentação urbana na cidade de Curitiba, (GRECA ASFALTOS, 2016).

O material por eles utilizado, tanto os agregados quanto o ligante betuminoso, não foram os mesmos que compuseram as misturas desta pesquisa, uma vez que não havia a necessidade, visto que este estudo objetiva comparar a influência da formulação da matriz granulométrica e não adota nenhum resultado disponibilizado pela empresa, apenas as informações referentes ao esqueleto mineral da mistura.

A composição da curva granulométrica da mistura asfáltica prática seguiu as diretrizes de enquadramento da faixa C do DER/PR, cujos limites já foram anteriormente ilustrados na Tabela 2.2. Vale ressaltar que a empresa utiliza em sua composição 1,5% de cal hidratada (CH-1), porém, neste estudo foi feita uma adaptação da curva, transferindo a porcentagem de cal hidratada para a porcentagem de pó de pedra. Isso foi feito pois a análise do impacto gerado pela utilização de materiais estabilizantes extrapola os objetivos da pesquisa.

A Tabela 3.3 apresenta as porcentagens estabelecidas para cada uma das graduações de agregados pétreos comerciais utilizados na mistura. Já a Tabela 3.4 demonstra os percentuais de material em cada uma das peneiras adotadas na composição granulométrica segundo o DER/PR. A Figura 3.3 demonstra graficamente a CP.

Tabela 3.3 - Composição das frações dos granulares da curva prática (CP).

<b>Material</b>	<b>Porcentagem de material da composição da mistura asfáltica (%)</b>
Brita ¾"	30
Pedrisco	21
Pó de Pedra	49

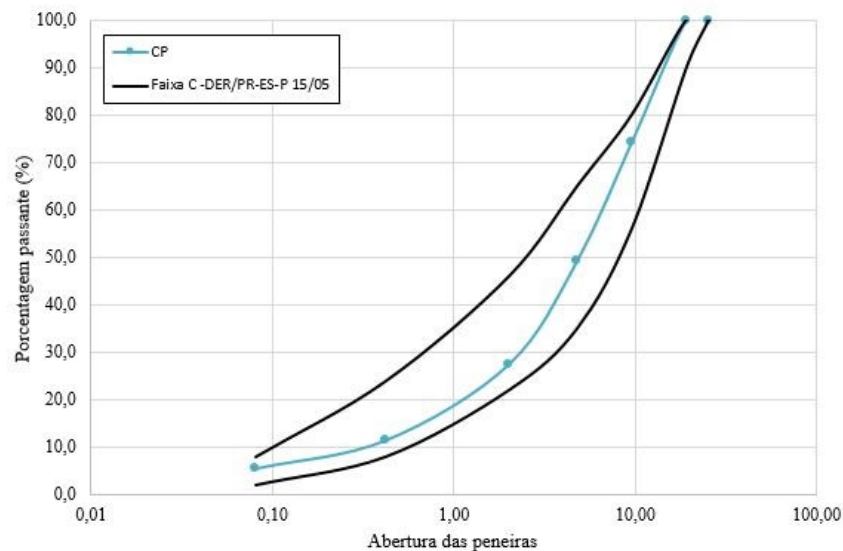
Fonte: Greca Asfaltos (2016), adaptada pelo autor.

Tabela 3.4 - Composição das frações dos granulares da curva prática controlando as frações.

Peneiras	Abertura (mm)	Percentagem Passante (%)	Percentagem das frações retidas dos grãos das Curvas teóricas (%)
1"	25,4	100	-
¾"	12,7	100	-
3/8"	9,5	74,2	25,8
Nº04	4,76	49,3	24,9
Nº10	2,2	28,1	21,2
Nº40	0,42	12,5	15,6
Nº200	0,075	6,6	5,9
FUNDO	-	-	6,6

Fonte: Greca Asfaltos (2016), adaptada pelo autor.

Figura 3.3 - Curva Prática.



Fonte: Greca Asfaltos (2016), adaptada pelo autor.

### 3.3.2. Curva granulométrica controlada

A curva granulométrica controlada (CC) é uma variação da CP, pois ela utiliza a distribuição granulométrica prática, porém controlando os diâmetros das frações correspondentes aos percentuais definidos na curva prática, sendo estas frações definidas pelo órgão regulamentador DER/PR.

O intuito desta curva, é obter com maior precisão o esqueleto mineral calculado, pois mesmo que a norma sugira a utilização de apenas duas peneiras entre os diâmetros 2,20mm e

0,075mm, permite um controle mais apurado das frações, principalmente dos finos, que são fatores determinantes no consumo de ligante nas misturas.

Os percentuais passantes em cada fração e a curva gerada por estes são idênticos aos apresentados na Tabela 3.4, pois a matriz granulométrica das duas curvas é a mesma, uma vez que foram feitas as mesmas adaptações do projeto inicial disponibilizado pela empresa Greca Asfaltos (2016), alterando apenas o modo com que os materiais foram separados para a execução da mistura. Por esta razão, as curvas CP e CC possuem as suas trajetórias sobrepostas.

### 3.3.3. Curva granulométrica teórica

A curva granulométrica calculada pela equação de Fuller-Talbot, demonstrada na seção 2.2, foi denominada como curva teórica (CT). A estrutura mineral incorporada na sua composição é da mesma origem das outras curvas, alterando apenas as suas proporções. O conjunto de peneiras utilizado na composição das misturas asfálticas foi adotado segundo Barra (2009). Para o cálculo dos percentuais passantes em cada uma das peneiras, foi fixado como diâmetro máximo 19,1mm e 6% de passante na peneira de menor diâmetro, que é a de N° 200 (0,075mm), resultando em um “n” de 0,51, o que classifica a mistura, segundo as definições do DNIT, como densa.

Ao adotar as peneiras propostas por Barra (2009), visou-se obter um preenchimento gradual dos vazios gerados pelos grãos de maiores dimensões em relação aos menores à razão da metade dos seus tamanhos, sobretudo nas frações passantes na peneira de 9,5mm, com o intuito de proporcionar um melhor embricamento entre as partículas, para assim, formular uma mistura com elevada estabilidade, resistente à aplicação de cargas, fazendo com que o pavimento seja menos suscetível a deformações, posto que o baixo teor de vazios homogeneiza o esqueleto mineral.

Nesse âmbito, é fácil identificar uma deficiência na distribuição das peneiras das misturas prática e controlada, visto que o controle das frações passantes na peneira de 2,2mm é escasso, pois só há uma peneira entre a de 2,2mm e a de 0,075mm, concebendo um arranjo mineral sem que haja um preenchimento gradual dos vazios formados pelas partículas de maior dimensão, o que pode implicar em uma baixa estabilidade.

Na Tabela 3.5 são apresentados os percentuais passantes em cada uma das peneiras calculados pela equação de Fuller-Talbot, de acordo com Barra (2009).

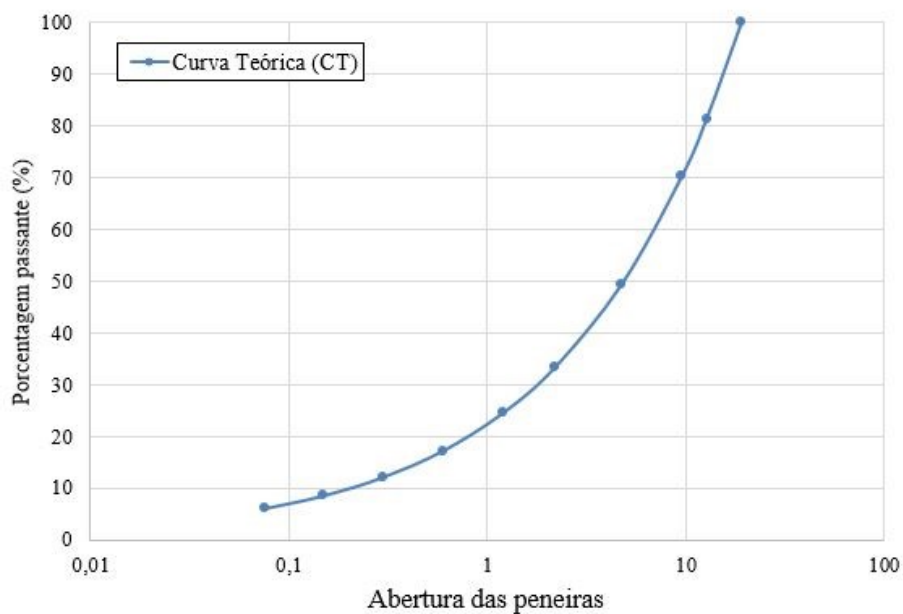
Tabela 3.5 - Curva granulométrica teórica.

Peneiras	Abertura (mm)	Percentagem passante (%)	Percentagem retida (%)
3/4"	19,10	100,0	–
1/2"	12,70	81,3	18,7
3/8"	9,50	70,1	1,1
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, p. 153), adaptada pelo autor.

A curva granulométrica resultante dos percentuais acima apresentados é apresentada na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Curva granulométrica teórica.



Fonte: Barra (2009, p 157), adaptada pelo autor.



### 3.3.4. Comparação entre as curvas granulométricas

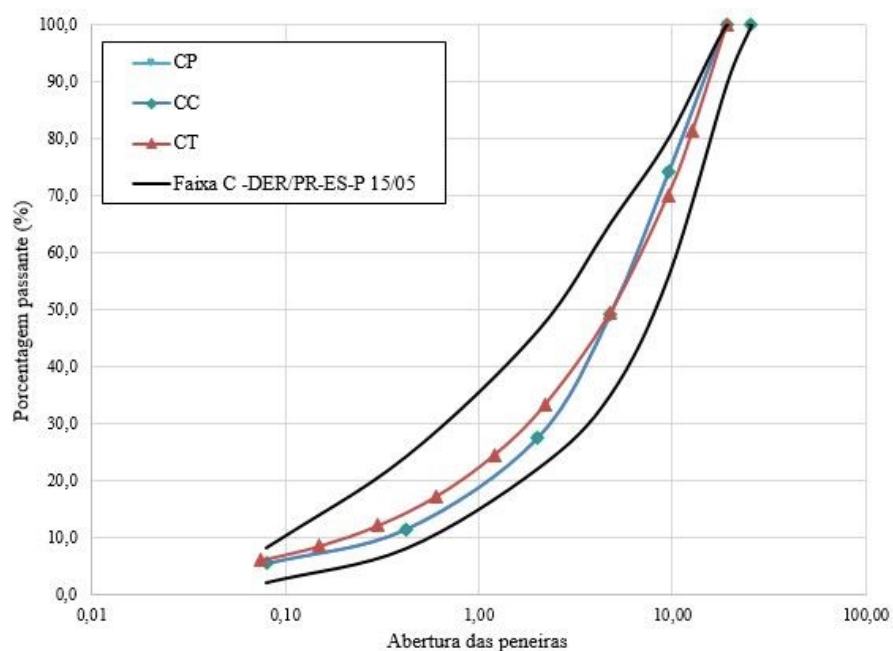
A fim de comparar as curvas granulométricas avaliadas na pesquisa, elaborou-se a Tabela 3.6, que apresenta as porcentagens passantes em cada uma das frações determinadas, tanto pelo DER/PR para as curvas CP e CC, quanto por Barra (2009) para a CT. Nesse âmbito, traçou-se um gráfico reunindo as três curvas juntamente com os limites da faixa “C” do DER/PR (Figura 3.5).

Tabela 3.6 - Distribuição das frações granulométricas.

Faixa C DER/PR		CP e CC		CT	
Limite Inferior (%)	Limite Superior (%)	Peneiras (mm)	Porcentagem Passante (%)	Peneiras (mm)	Porcentagem Passante (%)
90,0	100,0	19,10	100,0	19,1	100
56,0	80,0	9,52	74,2	12,7	81,3
35,0	65,0	4,76	49,2	9,5	70,1
22,0	46,0	2,00	27,4	4,76	49,4
8,0	24,0	0,42	11,4	2,2	33,4
2,0	8,0	0,080	5,4	1,2	24,5
-	-	-	-	0,6	17,2
-	-	-	-	0,3	12,1
-	-	-	-	0,15	8,5
-	-	-	-	0,075	6

Fonte: Autor.

Figura 3. 5- Comparativo das curvas granulométricas.



Fonte: Autor.

Ao analisar a Figura 3.5, pode-se perceber que apesar das curvas CC e CP apresentarem menores porcentagens de finos em relação à CT, tem-se que esta última apresenta uma maior distribuição de aberturas de peneiras, a qual permite obter um preenchimento gradual dos vazios formados pelas partículas de maiores diâmetros mais adequado quando comparado às duas primeiras, garantindo, a princípio, melhor entrosamento e estabilidade ao esqueleto granulométrico teoricamente formulado.

Porém, estas tendências necessitam ser comprovadas nos ensaios de comportamento mecânico das misturas asfálticas produzidas.

## 4. ENSAIOS LABORATORIAIS

Este capítulo discorre acerca dos ensaios laboratoriais executados a fim de avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas densas propostas neste trabalho. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O teor de trabalho de ligante das misturas asfálticas comparadas nesse estudo foi determinado a partir da metodologia Marshall, regida pelo DNER-ME 043/95. Apesar de ser o método mais utilizado no país, segundo Barra (2009), existem algumas deficiências neste, principalmente no que diz respeito à compactação das amostras, pois esta se dá por impacto e não por amassamento, como realizado em campo.

### 4.1. Metodologia Marshall

Para viabilizar os parâmetros das características das misturas asfálticas é necessária a montagem de corpos de prova padronizados, para tal, são normatizados os moldes de corpos de prova demonstrados na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Molde e colar utilizados para moldar os corpos de prova.



Fonte: Autor.

Os corpos de prova Marshall devem ter 1200g cada, sendo a quantidade para cada fração determinada pelas curvas granulométrica explanadas nas seções 2 e 3.3. Para obter a massa de material de cada fração, multiplica-se o percentual dado na composição da matriz granular com a massa total da amostra (1200g).

A determinação do teor de trabalho das misturas é obtida a partir da concepção desses corpos de prova, em que são feitas análises de parâmetros físicos e mecânicos, a fim de definir: massa específica aparente, teor de vazios (V), vazio cheio de betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume/vazios (RBV), estabilidade e fluência.

Para as misturas da CT, variou-se proporcionalmente o teor de ligante em 4,22%, 4,54%, 4,86%, 5,18% e 5,50%, mantendo a matriz granulométrica constante (BARRA, 2009). Já para as misturas CC e CP, o teor de ligante variou de modo diferente, sendo estes teores, 4,00%, 4,50%, 5,00%, 5,50% e 6,00%. Optou-se por essa distribuição pois seguiu-se o proposto pela Greca Asfaltos (2016) em seu relatório de dosagem de mistura betuminosa.

A fim de obter maior confiabilidade e significância nos resultados, foram moldados 5 corpos de prova para cada teor de ligante, totalizando 75 corpos de prova.

Para a montagem dos corpos de prova, primeiramente deve-se separar os agregados em algum recipiente, para tal, adotou-se marmitas de alumínio, devido a sua praticidade no manuseio e a sua baixa condutividade térmica. Além disso, a composição dos agregados deve ser dividida em graúdos e miúdos (Figura 4.2), pois no primeiro momento da mistura, cobre-se a fração graúda com ligante, para então posteriormente adicionar a fração fina, formando o mástique betuminoso (BARRA 2009).

Figura 4.2 - Marmitas com agregado miúdo e graúdo, respectivamente.



Fonte: Autor.

Com as amostras devidamente separadas, o seguinte passo é fazer as misturas, para isso deve-se deixar o ligante na temperatura de usinagem (150°C) e os agregados 13°C acima desta (163°C), como determinado pelo ensaio de viscosidade Saybolt-Furol. Como citado anteriormente, o ligante é colocado sobre a fração graúda da amostra (Figura 4.3 (a)) com o intuito de garantir que os envolva completamente, para depois adicionar os finos e gerar o mástique (Figura 4.3 (c)). Este cuidado é tomado, pois a superfície de contato dos granulares finos é maior, o que faz com que estes absorvam mais ligante.

Figura 4.3 - Realização das misturas asfálticas: (a) adição do ligante aos agregados graúdos, (b) envolvimento total dos agregados graúdos, (c) colocação dos agregados finos e (d) mistura homogeneizada.



Fonte: Autor.

Em seguida, as misturas prontas são condicionadas na estufa na temperatura de compactação (139°C) por duas horas, para que haja uma melhor aderência do ligante betuminoso às partículas dos agregados. Os moldes também devem ser aquecidos para evitar perda de temperatura no processo de compactação.

Ato contínuo, o molde é encaixado na base do aparelho Marshall (Figura 4.3 (a)) e é inserido um papel-filtro (Figura 4,4 (b)), para evitar a perda de material no contato com a base. A mistura asfáltica é inserida no molde (Figura 4.4 (c)) e são realizados 25 golpes com uma espátula (Figura 4.4 (d)), sendo 15 nas bordas e 10 no centro, conforme a norma DNER-ME 043/95, objetivando um pré-adensamento e nivelamento da mistura. Após o pré-adensamento coloca-se um papel-filtro na parte superior, para evitar a perda de material no contato com o soquete (Figura 4.5).

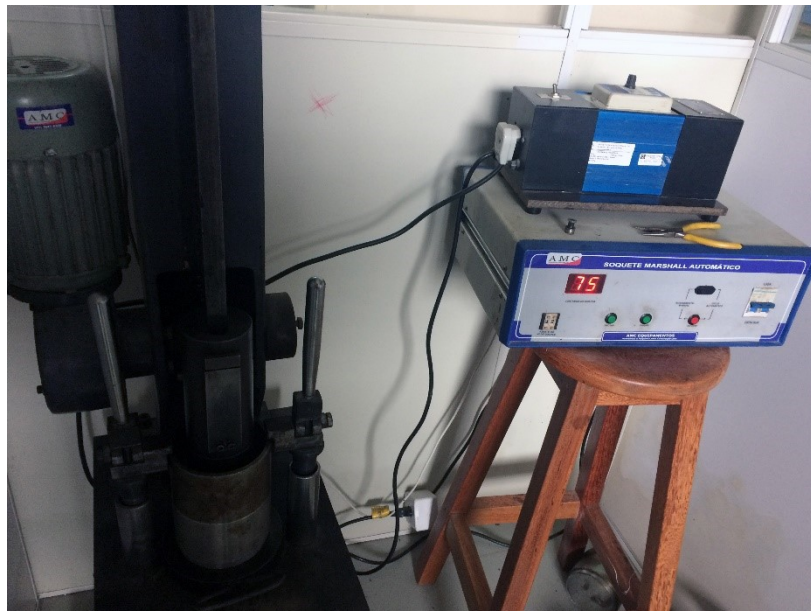


Figura 4.4 - Realização da compactação: (a) molde aquecido sobre a base do Marshall, (b) molde com o papel-filtro na sua base, (c) mistura asfáltica dentro do molde e (d) processo de pré-adensamento da mistura asfáltica.



Fonte: Autor.

Figura 4.5 - Soquete Marshall automático.



Fonte: Autor.

A compactação dos corpos de prova é dada através do impacto de 75 golpes em cada uma de suas faces, executados pelo soquete Marshall automático, o que implica em uma baixa variação da energia aplicada, compactando os corpos de prova de maneira uniforme. Após a

compactação, deve-se aguardar o resfriamento do corpo de prova, a ponto em que se possa tocá-lo sem a proteção de luvas, para então extraí-lo do molde cilíndrico com o auxílio de um suporte e do próprio soquete Marshall, como visto na Figura 4.6. A extração é feita a partir de golpes manuais com o soquete, porém deve-se ter cautela para amortecer a sua queda, para evitar danos com o impacto na superfície do suporte.

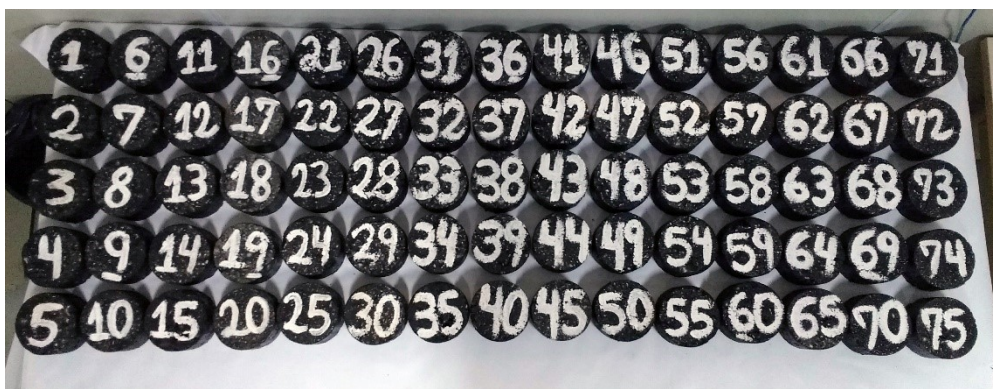
Figura 4.6 - Extração dos corpos de prova: (a) molde sobre o suporte extrator, (b) soquete Marshall auxiliando na extração e (c) corpo de prova extraído.



Fonte: Autor.

Os procedimentos acima explicitados devem ser repetidos para todos os 75 corpos de prova, que são ilustrados na Figura 4.7. Para a obtenção do teor de trabalho de ligante betuminoso, é necessário conhecer algumas propriedades físicas dos corpos de prova, para tal, deve-se pesar e medir todos eles, sendo a sua medição aferida em três pontos distintos (Figura 4.8).

Figura 4.7 - Corpos de prova Marshall.



Fonte: Autor.

Figura 4.8 - Medição das alturas com paquímetro.



Fonte: Autor.

Em seguida, todos os corpos de prova foram pesados de forma hidrostática, a fim de determinar sua massa específica aparente (Figura 4.9). Vale ressaltar que por se tratar de uma mistura asfáltica densa, não foi utilizado fita crepe e parafina para impermeabilizá-los, visto que o teor de vazios não é representativo para modificar a pesagem.

Figura 4.9 - Pesagem hidrostática.



Fonte: Autor.



A massa específica aparente da mistura asfáltica é dada pela Equação 4.1

$$D_{\text{aparente}} = \frac{m_a}{(m_a - m_i)} \quad (4.1)$$

Onde:

$D_{\text{aparente}}$  – Massa específica aparente

$m_a$  – Massa seca

$m_i$  – Massa submersa

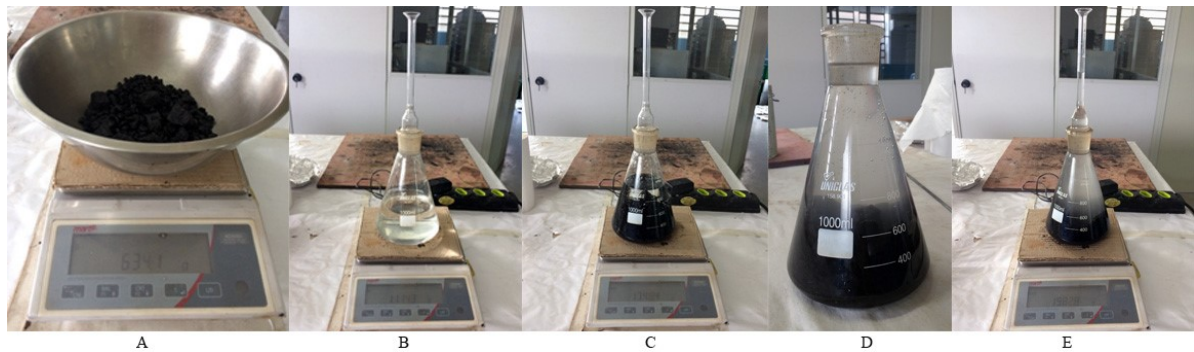
O próximo passo para obtenção do teor de trabalho de ligante betuminoso é a determinação da massa específica real da mistura através do ensaio de densidade máxima teórica real da mistura (MVR), utilizando, em seu procedimento, uma mistura do material dosado, ao contrário do convencional, que é dado através da massa específica real das frações que compõem esta mistura.

São feitas duas misturas para cada teor de ligante analisado, desse modo, faz-se a média aritmética destes para a obtenção do valor final da massa específica real para cada uma das misturas.

O procedimento inicial é semelhante ao do Marshall, porém a massa de cada amostra é de 635g e as misturas não são compactadas. Depois de feita a mistura, esta fica esfriando por 24 horas à temperatura ambiente.

Passadas as 24 horas, deve-se esfarelar a mistura em um recipiente e pesá-la (Figura 4.10 (a)). Utiliza-se um conjunto (picnômetro mais rolha) calibrado e com peso e volume conhecidos. Preenche-se o picnômetro com cerca de 800mL de água e o pesa com a rolha (Figura 4.10 (b)), depois disso, coloca-se toda mistura dentro do picnômetro com a água, adiciona-se a rolha e pesa-se novamente (Figura 4.10 (c)). Ao fim dessas pesagens, enche-se o picnômetro de água até a sua borda (Figura 4.10 (d)), com uma haste retira-se o excesso de ar e leva-o para a máquina de vácuo (Figura 4.11). Após uma hora no vácuo, com uma haste, retira-se novamente as bolhas remanescentes, coloca-se a rolha e preenche-se com água até o menisco da rolha e então pesa-se (Figura 4.10 (e)).

Figura 4.10 - Realização do ensaio MVR.



Fonte: Autor.

Figura 4.11 - Mistura na máquina de vácuo.



Fonte: Autor.

Com posse de todos os pesos, aplica-se a Equação 4.2 para a determinação da massa específica real das misturas.

$$D_{real} = \frac{(c - a)}{[(b - a) - (d - c)]}$$

(4.2)

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.

Sabendo as massas específicas aparente e real das misturas, pode-se partir para o cálculo dos outros parâmetros físicos que a metodologia Marshall permite determinar.

O teor de vazios é a relação entre o volume de vazios e o volume total da mistura, que pode ser calculado em função das massas específicas real e aparente. É determinado pela Equação 4.3.

$$V(\%) = \frac{D_{\text{real}} - D_{\text{aparente}}}{D_{\text{real}}} * 100 \quad (4.3)$$

Onde:

V(%) - Teor de vazios;

$D_{\text{real}}$  - Massa específica real do corpo de prova;

$D_{\text{aparente}}$  - Massa específica aparente do corpo de prova.

O vazio cheio de betume (VCB) é determinado pela Equação 4.4.

$$VCB(\%) = \frac{D_{\text{aparente}} * \%L}{d_{\text{ligante}}} \quad (4.4)$$

Onde:

VCB(%) - Vazio cheio de betume;

$D_{\text{aparente}}$  - Massa específica aparente do corpo de prova;

%L - Teor de ligante;

$d_{\text{ligante}}$  - Massa específica do ligante.

O vazio do agregado mineral (VAM) é o que não é agregado na mistura, sua determinação é feita a partir da soma dos vazios preenchidos com ar e com betume, como mostra a Equação 4.5.

$$VAM(\%) = V + VCB \quad (4.5)$$

Onde:

VAM(%) - Vazio do agregado mineral;

V - Porcentagem de vazios;

VCB – Vazios cheios de betume.

A relação betume/vazio (RBV) é a relação entre os vazios cheios de betume e os vazios do agregado mineral, expressa pela Equação 4.6.

$$RBV(\%) = \frac{VCB}{VAM} * 100 \quad (4.6)$$

Onde:

RBV(%) – Relação betume/vazios;

VCB – Vazios cheios de betume;

VAM – Vazios do agregado mineral.

As propriedades apresentadas nesta seção até o momento, são os parâmetros físicos das misturas asfálticas determinados pela metodologia Marshall. Além destas, pode-se extrair dois parâmetros mecânicos: a estabilidade, que é a carga máxima suportada pelo corpo de prova no instante da ruptura por compressão; e a fluência, que é determinada pelo deslocamento sofrido pelo corpo de prova até o momento da ruptura (DNER 043, 1995)

De acordo com a NBR 15785/2010, para a realização do ensaio que determina esses parâmetros, deve-se condicionar os corpos de prova em um banho-maria a 60°C por 30 minutos (Figura 4.12) e em seguida rompê-los na prensa Marshall.

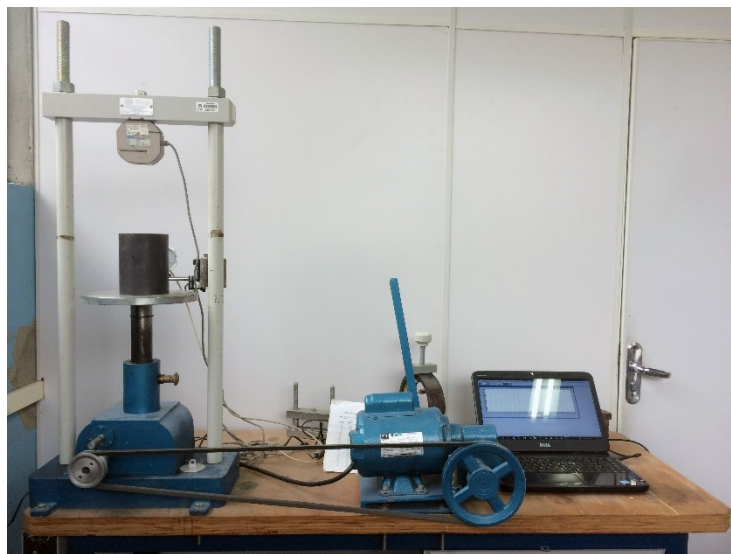
Figura 4.12 - Corpos de prova em banho-maria a 60°C.



Fonte: Autor.

A prensa Marshall (Figura 4.13) é um pistão hidráulico que avança com velocidade constante. Nele são acoplados uma célula de carga e um extensômetro, que medem a carga imposta e o deslocamento, respectivamente. Esses aparelhos medidores transferem as informações lidas para um computador que, com o auxílio de um software, transforma as informações em tabelas e gráficos, tornando possível registrar os dados de estabilidade e fluência da mistura asfáltica.

Figura 4.13 - Prensa Marshall e equipamentos de leitura e medição.



Fonte: Autor.

É de suma importância que seja feita a calibração dos equipamentos de leitura e medição, pois só assim os resultados poderão ser confiáveis. Com a prensa ajustada e seus medidores calibrados, os corpos de prova são posicionados um a um no molde de compressão (Figura 4.14) e sofrem um carregamento único e contínuo até a sua ruptura. A tensão máxima registrada pela célula de carga e o deslocamento medido até esse ponto são a estabilidade e fluência da mistura, respectivamente. Os resultados serão apresentados no próximo capítulo.

Figura 4.14 - Corpo de prova posicionado na prensa Marshall.



Fonte: Autor.

Figura 4.15 - Corpo de prova antes e depois da ruptura.



Fonte: Autor.

Embora esta metodologia seja largamente difundida no Brasil e normatizada pelo DNIT e órgãos estaduais, existem críticas em relação a ela. Uma delas diz respeito à forma com que é feito o adensamento, pois no ensaio é dado por impacto, porém no campo, o adensamento se dá por amassamento. A maneira grosseira com que é feita a compactação dos corpos de prova Marshall resulta na quebra dos granulares, alterando assim a curva granulométrica pré-estabelecida e aumentando a superfície específica. Esta alteração influencia de forma considerável no comportamento mecânico da mistura asfáltica.

Outra crítica que se dá ao ensaio, que se estende ao ensaio de Resistência à Tração Indireta (RTI), que será apresentado na próxima seção, é o método com que se leva as misturas asfálticas à ruptura, que também não condiz com as condições aplicadas no campo, uma vez que em laboratório a carga solicitada até a ruptura é dada de forma gradual e monotônica, enquanto no campo, as solicitações são dinâmicas, com frequência e tempo bastante variados, resultando em rupturas geralmente por fadiga.



## 4.2. Resistência à Tração Indireta (RTI)

O ensaio que determina a resistência à tração indireta de uma determinada mistura asfáltica é especificado pela NBR 15087/2012. Para a sua aplicação, deve-se formular misturas asfálticas do mesmo modo que é feito para a metodologia Marshall.

Dado que o ensaio Marshall possui suas falhas, uma forma de confirmar o teor de trabalho de ligante betuminoso de cada uma das misturas, é pela aplicação do ensaio de RTI. Nesse âmbito, a partir dos resultados do Marshall, escolhe-se dois possíveis teores de trabalho e formula-se cinco corpos de prova de cada um deles para este segundo ensaio, totalizando 30 corpos de prova.

Para este ensaio, de acordo com a norma, não é necessário o condicionamento térmico a 60°C por trinta minutos, o rompimento é feito sob condições normais. Além desta variação em relação ao ensaio previamente explanado, o molde em que se coloca o corpo de prova no momento da ruptura também é diferente, este contém frisos e a aplicação da carga é descarregada de forma pontual (Figura 4.16).

Figura 4.16 - Corpo de prova antes e depois da ruptura.



Fonte: Autor.

A partir da carga registrada no momento da ruptura, seguindo a Equação 4.7, estipulada pelo DNIT-ME 136/2010, é possível calcular a resistência à tração indireta.

$$\sigma = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (4.7)$$

Onde:

$\sigma$  - Resistência à tração;

F - Carga de ruptura;

D - Diâmetro do corpo de prova;

H - Altura do corpo de prova.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e as discussões relacionados aos ensaios laboratoriais realizados na pesquisa.

### 5.1. Ensaio Marshall

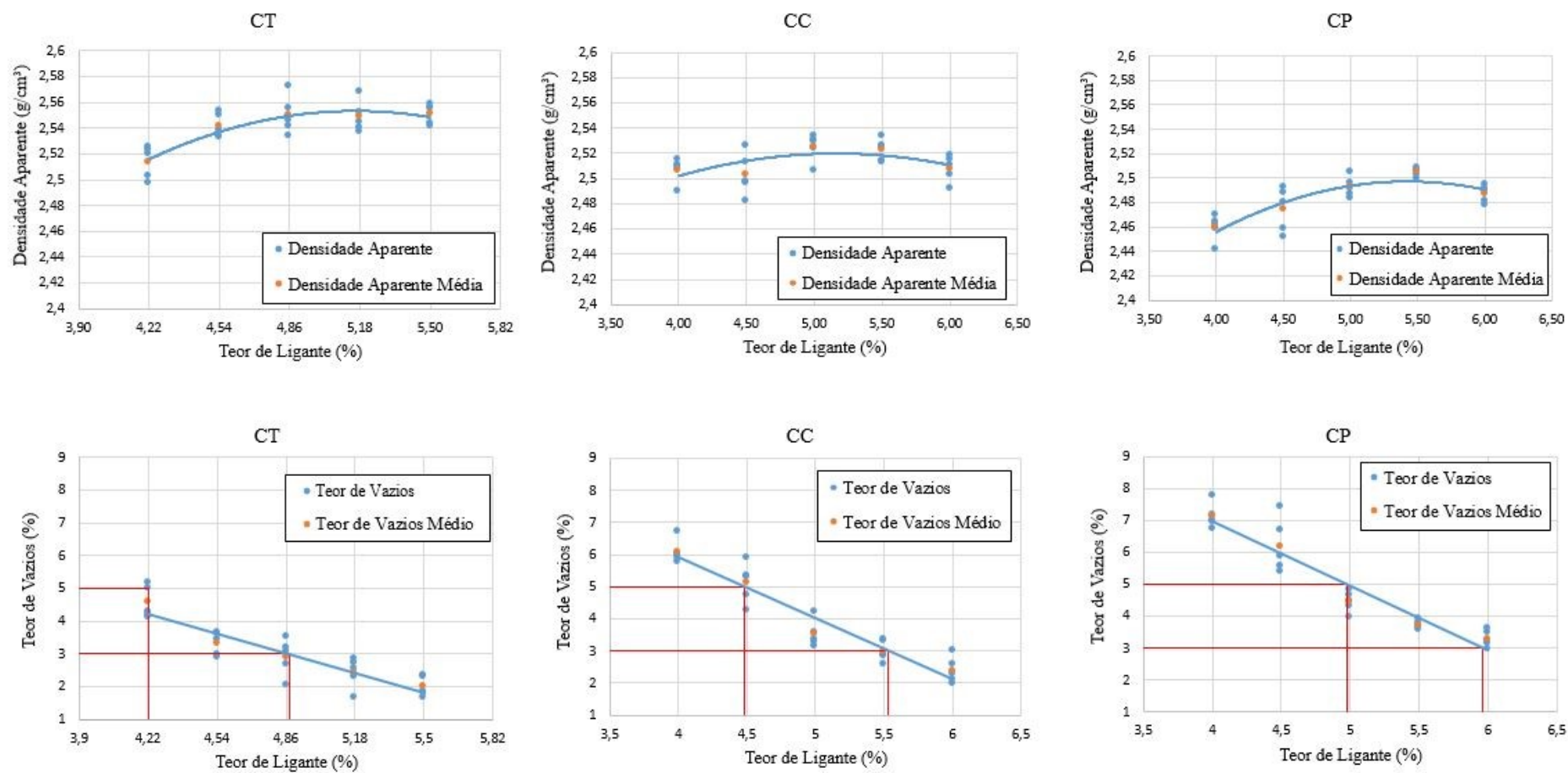
Os parâmetros físicos e mecânicos das misturas asfálticas comparadas neste estudo foram estipulados a partir do ensaio Marshall, abordado no Capítulo 4. A Tabela 5.1 apresenta os valores médios dos parâmetros de cada teor de ligante das misturas ensaiadas (CT, CC e CP). Já as Figuras 5.1 a 5.3 ilustram graficamente os valores encontrados para estes parâmetros.

Tabela 5.1 - Resumo dos valores médios obtidos pelo ensaio Marshall.

Curva	Teor de Ligante (%)	Parâmetros					
		Dap (g/cm <sup>3</sup> )	Volume de Vazios (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)
CT	4,22	2,51	4,56	15,09	69,86	1505,73	5,09
	4,54	2,54	3,30	14,76	77,65	1967,75	3,81
	4,86	2,55	2,89	15,19	81,09	1597,15	4,97
	5,18	2,55	2,42	15,52	84,50	1856,45	5,58
	5,50	2,55	1,99	15,92	87,54	1620,24	5,40
CC	4,00	2,51	6,08	16,04	62,10	1484,18	2,57
	4,50	2,50	5,11	16,30	68,71	1666,66	5,57
	5,00	2,52	3,51	16,04	78,17	1724,37	6,73
	5,50	2,52	2,98	16,76	82,22	1783,83	5,84
	6,00	2,51	2,38	17,32	86,28	1603,60	6,65
CP	4,00	2,46	7,13	16,90	57,82	1373,11	4,32
	4,50	2,47	6,19	17,25	64,22	1780,93	5,62
	5,00	2,49	4,45	16,83	73,57	1482,35	6,90
	5,50	2,50	3,71	17,39	78,68	1771,57	6,23
	6,00	2,49	3,29	18,10	81,86	1628,21	7,20
DNIT-ES 031/06	-	-	3,0 à 5,0	min. 16	75 à 82	min. 500	2,0 à 4,6

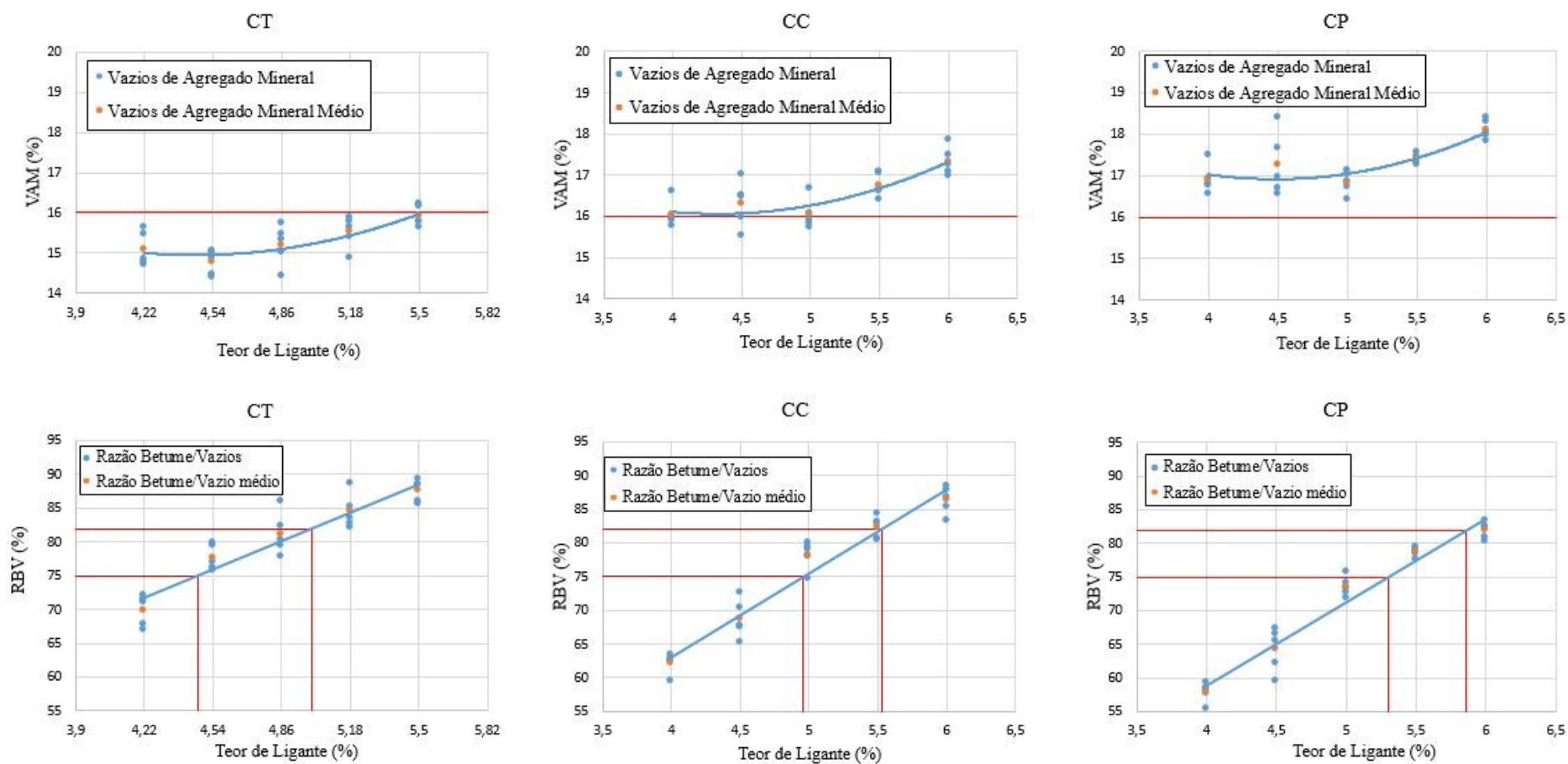
Fonte: Autor.

Figura 5.1 - Gráficos da densidade aparente e do teor de vazios das misturas asfálticas.



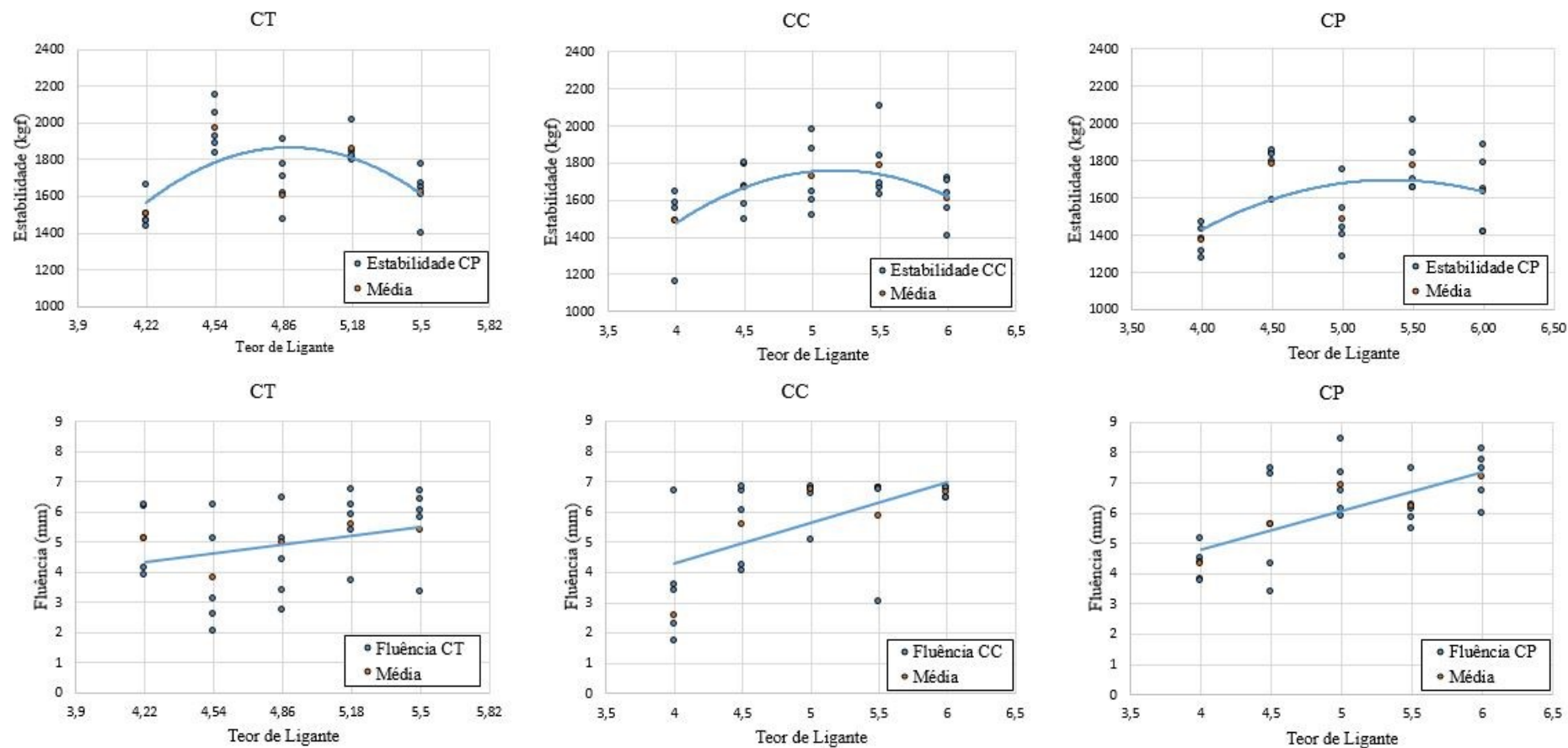
Fonte: Autor.

Figura 5.2 - Gráficos de vazios de agregado mineral (VAM) e de relação betume/vazios (RBV) das misturas asfálticas.



Fonte: Autor

Figura 5.3 - Gráficos de estabilidade e fluência das misturas asfálticas.



Fonte: Autor.

A partir da análise dos resultados expostos na Tabela 5.1 e nas Figuras 5.1 a 5.3, além das observações feitas durante o procedimento de dosagem das misturas, pode-se constatar que o teor de trabalho de ligante das curvas CT, CC e CP está entre dois percentuais, apontados na Tabela 5.2. Por não apresentar de forma precisa o teor de trabalho de ligante, para confirmá-lo, foi necessário fazer o ensaio de resistência à tração indireta. Os resultados deste ensaio serão discutidos na seção 5.2.

Tabela 5.2 - Prováveis teores de trabalho de ligante para cada mistura asfáltica.

<b>Curva</b>	<b>Prováveis teores de trabalho de ligante</b>	
CT	4,54%	4,86%
CC	5,00%	5,50%
CP	5,00%	5,50%

Fonte: Autor.

Para obter os valores da Tabela 5.2, os gráficos resultantes do ensaio foram dispostos um abaixo do outro, de forma alinhada, como apresentado neste trabalho, de modo a verificar quais percentuais se enquadravam em todos os limites regulamentados pelo DNIT-ES 031/06.

Pode-se perceber que o parâmetro físico que diz respeito aos vazios do agregado mineral da CT encontra-se inferior ao limite mínimo estipulado pelo DNIT. Isso demonstra a fragilidade dos critérios levados em conta pela metodologia para a interpretação do comportamento físico e mecânico das misturas asfálticas, aliados à falta de sensibilidade do ensaio Marshall quanto à realização de aferições no domínio viscoelástico linear, principalmente quando se trata de misturas formuladas por métodos teóricos, em relação àquelas formuladas a partir de tentativas, tradicionalmente aplicadas no Brasil.

Os resultados podem ser explicados pela Figura 3.5, que mostra que apesar de haver maiores percentuais de finos na CT, o fato de sua formulação ser composta utilizando um maior número de peneiras, quando comparado às outras curvas, ocasiona uma distribuição mais gradual dos grãos, o que implica em um melhor embricamento e redução dos vazios. Desse modo, a quantidade de ligante necessária para preencher esses espaços é reduzida. O contrário é visto nas curvas CP e CC, onde há a ausência de algumas peneiras intermediárias, assim, aumenta-se o volume de vazios na curva, que é demonstrado pelo aumento dos vazios do agregado mineral (VAM) e do teor de vazios da mistura, o que faz com que haja uma possibilidade de maior inserção de ligante, que aumenta o consumo necessário para envolver

praticamente a mesma quantidade de finos que está mais concentrada em menor quantidade de peneiras nas curvas CC e CP.

Vale ressaltar, que os resultados de fluência não foram considerados pelo seu valor absoluto, apenas de forma comparativa entre as misturas e também para analisar o comportamento da fluência ao passo em que o teor de ligante é variado.

A determinação dos valores de teor de betume não se deu apenas a partir dos gráficos e tabelas, também foram analisados alguns sinais durante a realização do ensaio, como a trabalhabilidade da mistura, o brilho da sua superfície e a quantidade de ligante absorvida pelo papel-filtro, pois estas informações podem ser mascaradas pelo empirismo do método.

A incerteza relacionada à determinação do teor de trabalho se dá pela falta de sensibilidade da metodologia Marshall frente às variações dos percentuais de betume, devido ao modo em que alguns esforços são aplicados, tanto na compactação, quanto na ruptura. Estes esforços podem 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, o que possibilita a variação dos comportamentos mecânicos da mistura.

Tendo em vista os valores absolutos resultantes do ensaio Marshall, percebe-se que a CT obteve resultados superiores em todos os quesitos em relação às CC e CP, especialmente no que diz respeito ao comportamento mecânico dos corpos de prova avaliados, a estabilidade, que apresentou valores maiores e a fluência, que apresentou valores menores e também, menores variações com o acréscimo de ligante.

Sobre os parâmetros físicos, verifica-se que o volume de vazios da CT é menor que o das CC e CP, o que representa que a densificação da CT é maior do que as das outras curvas, em consequência disso, melhora a relação betume vazio, visto que necessita menores quantidades de betume para preencher a mistura, tornando-a mais econômica segundo Luz (2016), que mostra em sua pesquisa que o ligante betuminoso possui o maior custo unitário na composição dos pavimentos asfálticos.

Estas condições confirmam o que foi explicado no Capítulo 3 sobre a formulação das curvas granulométricas, em que as curvas práticas carecem no controle dos diâmetros das frações em suas composições, sobretudo das frações entre 2,2mm e 0,075mm, resultando em curvas com maiores percentuais de finos, e conseqüentemente, requerendo mais ligante betuminoso para o recobrimento total dos grãos, o que reduz a sua estabilidade e eleva o seu custo.

Ao comparar as CC e CP, é visível a superioridade da CC, visto que em todos os parâmetros, físicos e mecânicos, seus resultados são melhores do que os da CP. Isso mostra que, apesar de serem formuladas com a mesma composição granulométrica, o fato de aprimorar o controle dos diâmetros das frações nas misturas melhora seu desempenho.

No que se refere à CT, identifica-se que em virtude do maior controle da distribuição granulométrica, visto que este se dá pela variação das peneiras à razão da metade dos diâmetros imediatamente superiores, principalmente para as frações finas, há um melhor intertravamento da matriz granulométrica, resultando em uma mistura com boa densificação, com baixos teores de vazios, diminuindo assim os excessos de finos e ligante, o que reduz a RBV e a fluência, além de implicar em maior resistência mecânica frente aos esforços solicitados.

## 5.2. Resistência à Tração Indireta (RTI)

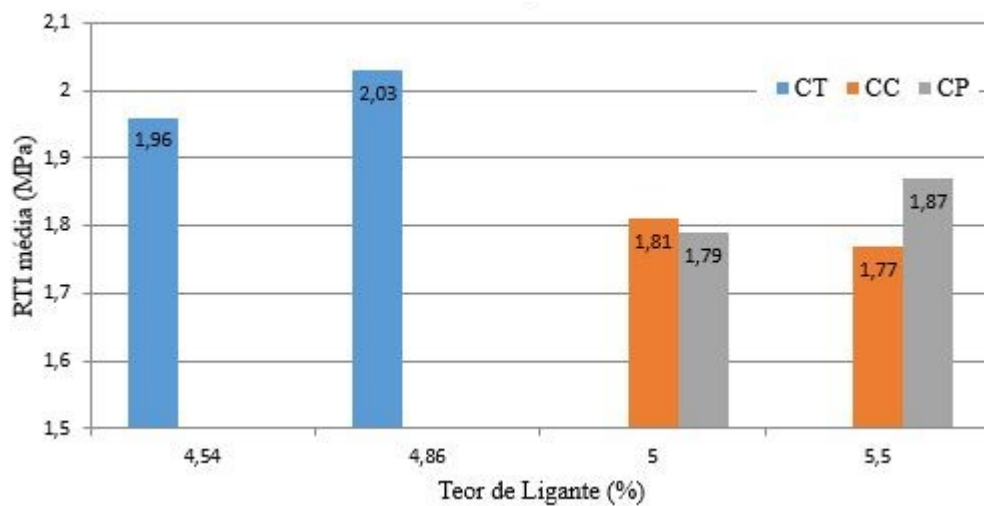
Devido à incerteza do teor de trabalho de betume a partir do ensaio Marshall, foram realizados os ensaios de resistência à tração indireta (RTI) nos dois prováveis teores de trabalho de cada curva, citados na Tabela 5.2. Foram formulados 5 corpos de prova para cada teor, resultando em 30 corpos de prova. As médias da RTI de cada teor são expostas na Tabela 5.3 e ilustradas na Figura 5.4.

Tabela 5.3 - Resistência à tração indireta média das misturas asfálticas.

<b>Curva</b>	<b>RTI média (Mpa)</b>
CT 4,54%	1,96
CT 4,86%	2,03
CC 5,00%	1,81
CC 5,50%	1,77
CP 5,00%	1,79
CP 5,50%	1,87

Fonte: Autor.

Figura 5.4 - Gráfico dos resultados de RTI.



Fonte: Autor.

A partir dos resultados expostos, pode-se inferir que os teores de trabalho de ligante para as curvas CT, CC e CP são 4,86%, 5,00% e 5,50%, respectivamente, uma vez que estes se mostraram mais expressivos em relação ao outro teor ensaiado da mesma composição granular.



## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se dizer com clareza que a formulação da matriz granulométrica tem grande influência no comportamento mecânico das misturas asfálticas densas. Isso foi comprovado ao verificar que, utilizando o mesmo ligante betuminoso (CAP 50/70), sob as mesmas condições de trabalho, os corpos de prova formulados a partir da CT apresentaram resultados mais satisfatórios quando comparados às curvas CC e CP.

Isto posto, pode-se perceber que a norma brasileira permite que a metodologia aplicada para as curvas CC e CP, se mostre deficiente no encaixe granulométrico. Isso se dá pelo modo com que é feito o enquadramento da curva granular nos limites normatizados. Esse método, somado ao processo de beneficiamento nas centrais de britagem brasileiras, resulta em frações heterogêneas, acarretando em curvas irregulares e descontínuas, com os percentuais de finos mal distribuídos. Essa distribuição falha dos granulares finos, solicita maiores quantidades de ligante para envolver todas as partículas, conseqüentemente, reduz a sua estabilidade e eleva o seu custo.

Ao contrário do método empírico por tentativa, a formulação elaborada a partir da equação de Füller-Talbot permite um controle mais apurado dos diâmetros, em função da escolha das malhas de peneiras pelo projetista. Desse modo, possibilita a elaboração de misturas asfálticas com a composição granulométrica homogênea e contínua, garantindo o encaixe dos grãos mais finos nos vazios formados pelos grãos maiores, reduzindo o volume de vazios, o que contribui para o intertravamento das partículas, e assim tornando o pavimento mais resistente mecanicamente e com menores deformações frente às solicitações impostas. Além de reduzir a quantidade de ligante betuminoso para o envolvimento total das partículas da mistura, o que a torna mais econômica.

Ressalta-se que os resultados obtidos no decorrer da pesquisa, são de valia apenas comparativa, não podendo ser utilizados para a determinação do comportamento das misturas asfálticas produzidas em condições reais. Isso se deve à maneira empírica e grosseira com que os ensaios aplicam alguns esforços, como a compactação, que é feita por impacto e a ruptura,

que se dá por carregamento monotônico, sendo que em campo a compactação é dada por amassamento e a ruptura ocorre por fadiga e deformação permanente.

Em vista disso, os ensaios Marshall e de tração indireta, por serem empíricos e pouco sensíveis na avaliação dos parâmetros das misturas asfálticas, requerem um elevado grau de conhecimento do operador, além de muita atenção na preparação e execução dos corpos de prova, posto que nesses passos, é possível identificar aspectos tátil-visuais da mistura que determinam sua qualidade.

Ante os argumentos expostos e com base nos resultados obtidos neste trabalho, a adequação do processo de beneficiamento das centrais de britagem no Brasil aprimoraria o controle das frações granulométricas, podendo implicar em uma melhoria na composição das matrizes granulares, e conseqüentemente, o seu comportamento mecânico, visto que ao comparar as curvas CC e CP, a curva que foi formulada controlando os diâmetros das frações mostrou-se superior em todos os parâmetros avaliados.

Sugere-se também, que os limites de referência da metodologia Marshall sejam utilizados apenas como uma diretriz dos parâmetros da mistura, e não como critério excludente, uma vez que a curva que obteve melhores resultados extrapolou um dos limites normatizados. Ademais, acredito que a substituição da metodologia Marshall de formulação de esqueletos minerais pelo método teórico/racional seria de grande valia para a melhoria do desempenho das misturas asfálticas.

Além disso, a fim de obter resultados mais precisos quando comparados o comportamento em laboratório e campo, sugere-se a implementação de ensaios com melhor relação campo/laboratório, como os de deformação permanente, módulo complexo e resistência à fadiga nos laboratórios brasileiros, de modo a complementar os ensaios já executados.

Para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação do comportamento mecânico das mesmas formulações de misturas asfálticas densas utilizadas neste trabalho, porém seguindo ensaios mais racionais, com uma estreita relação campo/laboratório.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Resolução N° 19**. Rio de Janeiro, 2005, 6 p. Disponível em: <<http://www.abeda.org.br/wp-content/uploads/2017/03/RESOLU%C3%87%C3%83O-ANP-N%C2%BA-19-DE-11.7.2005-DOU-12.7.2005-REPUBLICADA-DOU-13.7.2005-RETIFICADA-DOU-25.7.2005-RETIFICADA-DOU-17.3.2006.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14950/2003**. Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro, 2003, 10 p. Disponível em: <<https://www.abntcolecao.com.br/pdfview/viewer.aspx?locale=pt-BR&Q=7940616E4929F55808474B4CB3A29DA08781A1E685DBFB61&Req=>>>. Acesso em: 26 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15087/2012**. Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012, 5 p. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=4AF30F2800833EB79B6A83CCDC80F28E1321BEF9BDBED8D5&Req=>>>. Acesso em: 23 maio 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15785/2010**. Misturas asfálticas a quente – Utilização da aparelhagem Marshall para preparação dos corpos-de-prova com diferentes dimensões e aplicações. Rio de Janeiro, 2010, 7 p. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=48BF4C9A7BCC9C65F15EF2E4EC97212A9EFC3ED977242E4E&Req=>>>. Acesso em: 23 maio 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 6296/2012**. Determinação da massa específica real de ligantes betuminosos. Rio de Janeiro, 2012, 6 p. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=7940616E4929F5588D4406D0EF29159DA89626156AECA0BE&Req=>>>. Acesso em: 26 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 6954/1989**. Lastro padrão – determinação da forma do material. Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_\_. **NBR 9935/2011**. Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011, 12 p. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=CC818AAD0EC94FD3FCB0A1A01F11B9B004AC35E1A0DA3B5A&Req=>>>. Acesso em 26 abr. 2017.

BARRA, B.S. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009, 329 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis. 2009.

\_\_\_\_\_. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do estado do Pará com o emprego de pó calcário**. 2005, 202 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis. 2005.

BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA. 2010.

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.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ (DER/PR) **DER ES-P 015/05**. Pavimentação – Concreto asfáltico usinado à quente com asfalto polímero. Curitiba, 2005, 23 p. Disponível em: <[http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/PDF/pdf\\_Pavimentacao/ES-P15-05CAUQcomAsfaltoPolimero.pdf](http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/PDF/pdf_Pavimentacao/ES-P15-05CAUQcomAsfaltoPolimero.pdf)>. Acesso em 16 mar. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA E RODAGEM (DNER) **DNER – ME 035/1998**. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998, 6 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-emanuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me035-98.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 043/1995**. Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995, 11 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me043-95.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2017.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 078/1994**. Agregados graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994, 3 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me078-94.pdf>> Acesso em: 26 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 081/1998**. Agregados: Determinação da Absorção e da Densidade do Agregado Graúdo. Rio de Janeiro, 1998, 6 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnerme081-98.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 085/1994**. Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, 1994, 4 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnerme085-94.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 089/1994**. Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994, 6 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me089-94.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 194/1998**. Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998, 4 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me194-98.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT) **DNIT – ES 031/2006**. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviços. Rio de Janeiro, 2006a, 14 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031\\_2006\\_es.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031_2006_es.pdf)>. Acesso em: 24 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 131/2010**. Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método do ensaio. Rio de Janeiro, 2010, 6 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit131\\_2010\\_me.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit131_2010_me.pdf)>. Acesso em: 26 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 136/2010**. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2010, 6 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit136\\_2010\\_me.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit136_2010_me.pdf)>. Acesso em: 23 maio 2017.

\_\_\_\_\_. **DNIT – ME 155/2010**. Material asfáltico – Determinação da Penetração – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010, 8 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit155\\_2010\\_me.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit155_2010_me.pdf)>. Acesso em: 26 abr. 2017.

\_\_\_\_\_. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro. Publicação Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) - 719. 2006b. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual\\_de\\_Pavimentacao\\_Versao\\_Final.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf)>. Acesso em: 23 maio 2017.

GRECA ASFALTOS. **Relatório de Dosagem de Mistura Betuminosa N° 101-16-FP5576-R**. 2016, 8 p. Curitiba. 2016.

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.

LUZ, R. C. **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.

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.

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.

MORILHA, A. J. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. 2004, 185 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87049/207429.pdf?sequence=1>>.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2008, Vol. 1.

ZAGOLIN, P. A. **Influência do tipo de ligante betuminoso na dosagem e no comportamento de fluência e estabilidade de misturas asfálticas densas**. 2015. 54 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.