

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE  
CURSO DE ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA

RUAN CARLO DA LUZ

ESTUDO COMPARATIVO DA FORMULAÇÃO DE ESQUELETOS MINERAIS NA  
DOSAGEM DE MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO DENSAS

Joinville

2016

RUAN CARLO DA LUZ

ESTUDO COMPARATIVO DA FORMULAÇÃO DE ESQUELETOS MINERAIS NA  
DOSAGEM DE MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO DENSAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia de Infraestrutura  
pelo Centro Tecnológico de Joinville da  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra.

Joinville

2016

# **ESTUDO COMPARATIVO DA FORMULAÇÃO DE ESQUELETOS MINERAIS NA DOSAGEM DE MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO 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

*“Se você quer ser bem sucedido,  
precisa ter dedicação total,  
buscar seu último limite  
e dar o melhor de si mesmo”  
Ayrton Senna da Silva.*

## **Dedicatória**

Aos meus pais, Sergio Osmar da Luz e Dilma Therezinha da Luz, por sempre me mostrarem o caminho correto a ser percorrido e por serem pessoas admiráveis em todos os quesitos que se relacionam a paternidade, servindo de exemplo e espelho para todas as etapas vividas até o momento, além de viabilizar todas as oportunidades para minha educação, disciplina e crescimento pessoal.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, criador de tudo e de todos, por nos tornarem seres racionais para manter o equilíbrio no mundo, e por atender minhas preces guiando-me pelos caminhos corretos concebendo sabedoria, discernimento e vocação para atingir os objetivos preparados para a minha vida com foco, força e fé.

Ao meu irmão Rogger Whilliam da Luz, que mesmo não estando tão presente na minha formação acadêmica, sempre buscou orientar como irmão mais velho, o sentido real da vida e dialogar sobre o discernimento entre as coisas boas e ruins a serem praticadas em nossa jornada aqui na Terra.

À minha namorada, Nicolý Koehler Ritzmann, por ter mudado a minha vida em inúmeros sentidos, fazendo tornar-me uma pessoa com mais responsabilidades, incitando nas melhores escolhas para o futuro, além de estar sempre próxima a mim, apoiando nas dificuldades vividas tanto na graduação quanto na vida particular.

Agradeço aos meus avós Jenny da Luz, Amadeu Antônio dos Santos e Therezinha Zucco dos Santos, mesmo não estando presente neste momento para dividir comigo a alegria de estar me tornando um engenheiro, mas com certeza, lá no céu estão contentes por verem a evolução da família que eles conceberam.

Aos meus familiares, a estes agradeço-lhes por me fazer descontraír nas ocasiões em que nada parecia estar dando certo.

Aos meus amigos e colegas de laboratório, Pedro Augusto Zagolin, Rodrigo Machado, Rodrigo Shigueiro Siroma e Gustavo Araldi por estarem sempre dispostos a sanar as dúvidas ou auxiliar nas atividades laboratoriais, além de agregar conhecimento, experiências e discussões no ramo da pavimentação. À minha colega Alice Serafim Búrigo por mesmo longe, ter estado sempre disposta para dialogarmos sobre o desenvolvimento da pesquisa.

Aos amigos e colegas, principalmente aqueles que iniciaram comigo, aqueles que conviveram junto no decorrer desta caminhada da graduação por fazer o papel de minha segunda família, além de compartilhar os conhecimentos e dificuldades, colaborando diretamente no desenvolvimento pessoal através das atividades.

A todos os professores que estiveram presentes em minha vida, desde aqueles que me ensinaram a escrever as equações básicas da matemática, aqueles que foram imprescindíveis para a minha formação acadêmica, até aqueles que ainda farão parte da minha vida, pois sem conhecimento não há nada.

Um agradecimento especial dedico ao meu professor e orientador Breno Salgado Barra, por compartilhar seu vasto conhecimento na área de pavimentação em que eu sempre me identifiquei; por ter concedido a oportunidade de por em prática estes conhecimentos em laboratório, onde a ciência sai do papel e vira realidade; por ter se tornado para mim mais que um professor ou um amigo, este eu considero hoje um irmão.

Agradeço especialmente também aos professores, Marcelo Heidemann e Yader Alfonso Guerrero Pérez por serem de fundamental importância para a escolha da minha área de afetividade dentro da engenharia civil, e ao professor Yader por não medir esforços para auxiliar nos ensaios laboratoriais, transmitindo seus conhecimentos com a máxima propriedade.

Ao professor Leto Momm, por fazer parte da banca avaliadora deste trabalho, além de dispor seu tempo a serviço da comunidade; agradeço-lhe por ser pioneiro na quebra dos paradigmas no que diz respeito ao método empregado para dimensionamento de pavimento no Brasil, sendo inspiração para seus alunos, e hoje alunos de seus alunos.

Um sincero/grande agradecimento ao meu mestre Kendi Sato e todos os budocas do Dojo Matusa Bujutsu-Do, por servirem de válvula de escape para as tensões diárias, além de mostrar em seus sábios conselhos o significado do verdadeiro guerreiro, para tal carrego comigo a citação do querido mestre *Matusalém Gonçalves Pinheiro (in memoriam)* “*A arte do guerreiro é a prática da harmonia da paz e do amor, porque o amor é a sua melhor arma*”.

Aos sócios proprietários Marcelo Benvenuti e Giovani Benvenuti da empresa parceira envolvida no trabalho *Adrimar Empreiteira de Mão de Obra LTDA*, por disponibilizarem o projeto base, os materiais empregados na pesquisa, à disponibilidade para dúvidas e por me proporcionarem a oportunidade de estagiar na área da pavimentação, saneamento e construção.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIACÕES .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>2</b>
1.1.1 Objetivo Geral .....	2
1.1.2 Objetivos Específicos.....	2
<b>1.2 Procedimentos para alcançar o objetivo .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Delimitação do espaço de pesquisa.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Relevância do tema: justificativas .....</b>	<b>4</b>
<b>1.5 Organização do trabalho .....</b>	<b>5</b>
<b>2 METODOLOGIAS PARA FORMULAÇÃO DE ESQUELETOS MINERAIS .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Método por tentativas.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Método teórico .....</b>	<b>13</b>
<b>3 MATERIAIS E CURVAS GRANULOMÉTRICAS UTILIZADAS .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Caracterização dos materiais granulares.....</b>	<b>17</b>
3.1.1 Adesividade ao ligante betuminoso .....	19
<b>3.2 Caracterização da CAL Hidratada .....</b>	<b>20</b>



<b>3.3</b>	<b>Caracterização do ligante betuminoso .....</b>	<b>23</b>
3.3.1	Ponto de amolecimento anel e bola .....	24
3.3.2	Penetração.....	25
3.3.3	Índice Pfeiffer e Van Doormaal.....	26
3.3.4	Viscosidade Saybolt-Furol.....	27
3.3.5	Massa específica .....	29
<b>3.4</b>	<b>Curvas granulométricas selecionadas .....</b>	<b>30</b>
3.4.1	Curva granulométrica por tentativas.....	31
3.4.2	Curva granulométrica teórica .....	32
3.4.3	Comparação entre as curvas granulométricas .....	34
<b>4</b>	<b>ENSAIOS LABORATORIAIS.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Metodologia Marshall.....</b>	<b>38</b>
4.1.1	Densidade aparente.....	51
4.1.2	Densidade real .....	52
4.1.3	Teor de vazios.....	57
4.1.4	Vazio cheio de betume.....	57
4.1.5	Vazio do agregado mineral .....	58
4.1.6	Relação betume/vazio .....	58
4.1.7	Estabilidade e fluência .....	60
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>63</b>
<b>5.1</b>	<b>Resultados e considerações .....</b>	<b>63</b>
<b>6</b>	<b>COMPARATIVO NO CONSUMO DE LIGANTE.....</b>	<b>71</b>
<b>6.1</b>	<b>Cálculos e resultados.....</b>	<b>71</b>
6.1.1	Cálculo da massa ligante para curva prática .....	73
6.1.2	Cálculo da massa de ligante para curva teórica.....	73
<b>6.2</b>	<b>Conclusão do consumo de ligante.....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE ABREVIACOES

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CP	Curva Prática
CT	Curva Teórica
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DEINFRA/SC	Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ES	Especificação de Serviço
IP	ndice de Pfeiffer e Van Doormaal
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LDTPav	Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentaco
LTDA	Limitada
ME	Método de Ensaio
MEA	Massa Específica Aparente
NBR	Norma Brasileira
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro
PR	Paraná
RBV	Relação Betume/Vazios
REPAR	Refinaria Presidente Getúlio Vargas
S.A.	Sociedade Annima
SC	Santa Catarina
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 granulométrica “C” .....	10
Figura 2.2 - Curva granulométrica prática enquadrada na Faixa "C" DNIT.....	12
Figura 2.3 - Curva granulométrica teórica. ....	16
Figura 3.1 - Britagem Rudnick Minérios – Joinville-SC. ....	17
Figura 3.2 - Ensaio de adesividade. ....	20
Figura 3.3 - Ponto de amolecimento anel e bola. ....	24
Figura 3.4 - Ensaio de penetração.....	25
Figura 3.5 - Viscosímetro Saybolt-Furol e ensaio de viscosidade.....	27
Figura 3.6 - Curva de viscosidade Saybolt-Furol do ligante ensaiado.....	28
Figura 3.7 - Ensaio para massa específica.....	30
Figura 3.8 - Curva prática.....	32
Figura 3.9 - Curva granulométrica teórica. ....	34
Figura 3.10 - Comparativo entre as curvas granulométricas.....	35
Figura 4.1 - Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav).....	37
Figura 4.2 - Moldes e anel utilizados para moldar os corpos de prova.....	39
Figura 4.3 - Soquete Marshall eletromecânico. ....	40
Figura 4.4 - Organização e separação dos materiais que compõe o esqueleto mineral. ....	44
Figura 4.5 - Metodologia Marshall. ....	45
Figura 4.6 - Procedimento de compactação. ....	47
Figura 4.7 - Desmolde do corpo de prova. ....	48
Figura 4.8 - Corpos de provas moldados e enumerados. ....	49
Figura 4.9 - Pesagem hidrostática.....	49
Figura 4.10 - Dosagem das amostras para MVR.....	54
Figura 4.11 - Curva MVR. ....	55
Figura 4.12 - Corpos de prova em banho-maria. ....	61
Figura 4.13 - Compressão diametral. ....	61
Figura 5.1 - Gráficos para MEA. ....	65
Figura 5.2 - Gráficos para V(%). ....	65

Figura 5.3 - Gráficos para VAM.....	65
Figura 5.4 - Gráficos para RBV.....	66
Figura 5.5 - Gráficos para Fluência. ....	67
Figura 5.6 - Gráficos para Estabilidade.....	67
Figura 6.1 - Estudo de caso: via simples de mão dupla. ....	71
Figura 6.2 - Corte transversal da plataforma de rolamento.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Faixas granulométricas para pavimentos flexíveis.....	8
Tabela 2.2 - Faixas granulométricas para concreto asfáltico usinado a quente.....	9
Tabela 2.3 - Composição granulométrica de uma curva prática. ....	11
Tabela 2.4 - Composição granulométrica de uma curva teórica. ....	15
Tabela 3.1 - Resultado da caracterização dos agregados. ....	18
Tabela 3.2 - Exigências químicas. ....	21
Tabela 3.3 - Exigências físicas. ....	21
Tabela 3.4 - Propriedades físico-químicas gerais. ....	22
Tabela 3.5 - Características químicas e físicas específicas da cal. ....	22
Tabela 3.6 - Intervalos para usinagem e compactação.....	29
Tabela 3.7 - Composição da curva granulométrica formulada pelo método de tentativa.....	31
Tabela 3.8 - Série de peneiramento e formulação. ....	33
Tabela 3.9 - Distribuição das frações granulométricas. ....	35
Tabela 4.1 - Formulação dos traços para 4,22% de ligante.....	41
Tabela 4.2 - Formulação dos traços para 4,54% de ligante.....	41
Tabela 4.3 - Formulação dos traços para 4,86% de ligante.....	42
Tabela 4.4 - Formulação dos traços para 5,18% de ligante.....	42
Tabela 4.5 - Formulação dos traços para 5,50% de ligante.....	43
Tabela 4.6 - Pesos e alturas obtidos. ....	50
Tabela 4.7 - Dosagem das amostras para MVR. ....	53
Tabela 4.8 - Dados das densidades. ....	56
Tabela 4.9 - Memorial de cálculo dos parâmetros.....	59
Tabela 4.10 - Valores de estabilidade e fluência. ....	62
Tabela 5.1 - Resumo dos valores médios obtidos no ensaio Marshall. ....	64

## RESUMO

O objetivo principal do presente trabalho é determinar e comparar parametricamente a dosagem de misturas asfálticas densas, com base em um estudo de caso prático aplicado em campo, a partir da formulação de esqueletos minerais por duas metodologias distintas: tentativa e teórico. O método por tentativa é utilizado de forma corrente na produção de misturas asfálticas no país, visando enquadrar as curvas granulométricas formuladas em faixas limítrofes normatizadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Entretanto, a utilização de frações granulares comerciais de graduação heterogêneas e mal distribuídas que advêm dos processos de beneficiamento nas pedreiras, torna-se um entrave à composição de esqueletos minerais de qualidade, contribuindo para a má dosagem das misturas asfálticas, que se mostram incapazes de garantir bom desempenho frente aos esforços mecânicos aplicados no campo durante a vida útil de serviço. Em contrapartida, a metodologia teórica, utilizando a equação de Fuller-Talbot, em que são fixados os parâmetros característicos da curva granulométrica que se deseja formular, permite o controle das frações granulométricas pelo projetista, dispensando o uso de faixas granulométricas, tornando possível o preenchimento gradual dos vazios gerados pelos agregados de maior diâmetro, propiciando melhor densificação do esqueleto mineral. Para tanto, ensaios laboratoriais de caracterização dos materiais pétreos de origem granítica e do ligante betuminoso CAP 50/70, bem como a dosagem Marshall das misturas asfálticas, foram realizados no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A metodologia Marshall foi escolhida, pois é o procedimento adotado de forma oficial no Brasil pelo DNIT para a finalidade descrita. Os resultados obtidos indicam que a formulação concebida a partir da metodologia teórica apresenta melhores resultados tanto técnicos quanto econômicos quando comparada à metodologia por tentativa, alcançando maior resistência mecânica, menor deformabilidade, além de apresentar um menor consumo de ligante betuminoso.

**Palavras-chave:** formulação, esqueleto mineral, dosagem, mistura asfáltica.

## ABSTRACT

The main aim of this research is to determine and to compare parametrically the dosage of dense asphalt mixes, based on a practical study-case, conceived on the formulation of aggregate gradations by using two distinct methods: trial and theoretical. The method by trial is currently used for producing asphalt mixes in Brazil, aiming to fit the formulated granulometric curves to the limits of the gradation bands standardized by Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). However, the use of heterogeneous and poorly distributed commercial granular fractions provided from quarry processes, contribute for obtaining unsuitable aggregate gradations and, consequently, undesirable asphalt mix dosages, which are not capable to ensure good performance against the mechanical efforts applied in the field during their service lives. On the other hand, the theoretical method, by using Fuller-Talbot equation, in which the designer fixes the characteristic parameters of the granulometric curve, is not based on the suitability to the aggregate band limits, enabling individual control of the grain sizes and gradual filling of voids formed by the larger diameter particles, thus, providing better densification of the aggregate gradation. A laboratory campaign was carried out in the Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) of Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), in order to characterize the granitic crushed rock particles and the bituminous binder 50/70, the hydrated lime CH-1, as well as to realize the Marshall dosage of the asphalt mixes. The Marshall method was chosen due to be the official procedure adopted in Brazil by the DNIT. The results obtained indicate the formulation conceived by the theoretical method presents better technical and economical results when compared to that formulated by trial, reaching higher mechanical resistance, minor deformations, besides a lower consumption of asphalt binder.

**Keywords:** formulation, aggregate gradation, dosage, asphalt mix

## 1 INTRODUÇÃO

O meio de transporte de cargas e passageiros no Brasil é predominantemente rodoviário, acarretando interferências em vários segmentos da economia. O bom zelo deve ser exercido para a qualidade da malha viária, porém, atualmente uma parcela considerável está sendo degradada precocemente devido a vários motivos, lista-se, projetos mal elaborados e executados, falta de reparos, volume de cargas intensas, fiscalização defasada no controle de cargas por eixo, tecnologia arcaica para dosagem de misturas asfálticas, entre outros (MORILHA, 2004).

O projeto e a execução dos pavimentos para o transporte rodoviário necessitam que resultem na trilogia conforto, segurança e economia, carece que a qualidade das vias seja compatível com o seu uso, permitindo ao usuário desfrutar do pavimento com o desempenho desejado, que resista às cargas solicitantes e com a menor interferência para reparos ou manutenção prevista (BARRA, 2005).

Os parâmetros que regem a qualidade de uma mistura asfáltica estão relacionados ao arranjo dos agregados e ao teor de ligante betuminoso. Ter ciência dos componentes materiais é fundamental para conceber uma mistura asfáltica. A característica do esqueleto mineral é relevante, pois as misturas asfálticas são estruturadas predominantemente por agregados envolvidos pelo ligante betuminoso que, quando dosado em teor ótimo, propicia um comportamento mecânico capaz de suportar, a princípio, os esforços mecânicos aplicados no campo (MOMM, 1998; BARRA, 2009).

Nesta perspectiva, a presente pesquisa visa verificar a eficiência da formulação de esqueletos minerais a partir do uso de duas metodologias (por tentativa e teórica), e consequentemente analisar os impactos de seus princípios conceptivos na dosagem das misturas asfálticas produzidas. Um estudo de caso será tomado como parâmetro, onde se tem uma curva granulométrica elaborada por uma empresa e aplicada em campo, de acordo com o



método por tentativa, e outra formulação idealizada por Barra (2009), tendo como referência o método teórico.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar, comparativamente, a influência da formulação de esqueletos minerais concebidos por duas metodologias distintas, por tentativa e teórica, na dosagem de misturas de concreto asfáltico densas.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são traçados:

- Obter dados de caracterização das propriedades dos materiais a serem utilizados;
- Estabelecer os métodos e parâmetros para formulação dos esqueletos minerais, a saber: método por tentativa e método teórico;
- Formular misturas asfálticas a partir da utilização da metodologia Marshall, oficialmente adotada no Brasil;
- Determinar as propriedades físicas e mecânicas das misturas asfálticas formuladas;
- Verificar, de forma comparativa, qual mistura asfáltica formulada apresenta o desempenho mecânico mais adequado para fins de aplicação em obras de pavimentação;
- Estabelecer um breve comparativo referente ao consumo de ligante betuminoso utilizado para executar um projeto tendo como base as misturas asfálticas formuladas pelos métodos por tentativa e teórico.

## 1.2 Procedimentos para alcançar o objetivo

Inicialmente se buscou uma empresa parceira para ceder o traço da mistura asfáltica para a realização dos experimentos, a fim de comparar as diferentes metodologias de dosagem e formulação dos esqueletos minerais. A parceria com a empresa *Adrimar Empreiteira de Mão de Obra LTDA*, foi realizada pois a mesma atua no ramo de terraplenagem, construção e pavimentação na região norte de Santa Catarina, sendo executiva em serviços licitados em prefeituras, obras particulares e para o Departamento Estadual de Infraestrutura (DEINFRA). Sediada no município de Joinville, a empresa se ramifica nos setores de venda de material britado, saneamento básico, construção civil e os serviços que abrangem construções rodoviárias.

O projeto base da mistura asfáltica foi fornecido e autorizado para uso comparativo com fins estudantis pela empresa citada. No projeto constam todos os requisitos para comparar as misturas, pois obedece as normas vigentes no país e explicita a curva granulométrica adotada, a faixa comparativa entre outras informações com relação ao método de dosagem por tentativa, no qual a solução foi utilizada para a pavimentação da Rua do Suíços no município de Joinville.

O fornecimento de todo o material da pesquisa também foi cedido pela empresa parceira, tais como o ligante betuminoso (CAP 50/70) proveniente da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) pertencente à PETROBRAS S.A. sediada no município de Araucária-PR, a Cal Hidratada (CH-I) proveniente da indústria Cal CEM, sediada no município de Colombo-PR, retirada na própria usina asfáltica localizada no município de Araquari, os materiais pétreos britados foram retirados diretamente nas leiras da Rudnick Minérios, localizada em Joinville-SC.

Tendo posse do projeto e os mesmos materiais utilizados para gerar o traço por tentativas ensaiou-se novamente o ligante betuminoso para conhecimento e validade de suas propriedades, para a Cal hidratada foram utilizados os dados fornecidos pela empresa Cal CEM, enquanto as características e propriedades dos agregados foram obtidas através do estudo de Meurer (2015).

O procedimento comparativo tem como base a curva granulométrica calculada pelo método teórico, a partir do uso da equação de *Füller-Talbot* utilizada por Barra (2009), em que a mistura asfáltica formulada, denominada teórica, foi comparada àquela doravante denominada prática, conforme o projeto fornecido por Adrimar (2006), onde se utilizou a curva granulométrica por tentativa. Para a determinação do teor ótimo de ligante betuminoso

para compor a mistura, foi utilizado o método Marshall. Ressalta-se que a dosagem referente ao projeto original utilizando a curva por tentativa não foi replicada em laboratório, em que foi feito uso dos dados constantes no projeto fornecido pela empresa, a fim de compará-los aos resultados obtidos com a metodologia teórica formulada nesta pesquisa.

Ainda, foram moldados 25 corpos de prova para o estudo da mistura asfáltica formulada pelo método teórico, sendo 5 unidades para cada teor de betume especificado.

### **1.3 Delimitação do espaço de pesquisa**

A presente pesquisa foi realizada integralmente em âmbito laboratorial, salvo a coleta de amostras, que foi executada diretamente nas instalações da empresa parceira deste estudo. Toda a campanha experimental foi realizada com os equipamentos e condições disponíveis no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

### **1.4 Relevância do tema: justificativas**

A norma para formulação das misturas de concreto asfáltico no Brasil é executada por uma metodologia empírica e arcaica, onde se busca enquadrar a curva granulométrica obtida por tentativa dos percentuais correspondentes às frações granulares produzidas pelas empresas de britagem, no interior dos limites das faixas granulométricas normatizadas pelos órgãos responsáveis pelas obras de infraestrutura, por exemplo, o Departamento de Infraestrutura de Santa Catarina (DEINFRA/SC) ou pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (BARRA, 2005).

As faixas granulométricas normatizadas por estes órgãos no Brasil possibilitam a formulação de misturas asfálticas com variações muito díspares quanto ao comportamento mecânico e reológico, pois são muito amplas em seus intervalos limítrofes. Não raro são verificadas curvas mal graduadas que atendem aos limites normativos estabelecidos, porém, incapazes de apresentar resultados satisfatórios do ponto de vista mecânico, comprometendo a vida útil do pavimento (GUERRERO, 2013; SENÇO, 2008).

Esta deficiência técnica das normas brasileiras, no que diz respeito aos parâmetros especificados para a formulação e dosagem das misturas asfálticas, prejudica a qualidade do produto final entregue ao usuário. Some-se a isto, a produção de frações granulares

comerciais mal distribuídas em seus diâmetros de partículas e com controle precário das frações individuais dos arranjos granulométricos.

Diante dos argumentos expostos, a presente pesquisa se justifica pela proposição do estudo de um método teórico de formulação de curvas granulométricas, conforme já mencionado no tópico 1.2, em contraposição e de forma comparativa ao método por tentativa tradicionalmente adotado no Brasil, com base em um estudo de caso prático, para fins de contribuição à melhoria da qualidade do processo de formulação dos esqueletos minerais, e conseqüentemente da dosagem das misturas de concreto asfáltico produzidas no país, visando a utilização de materiais capazes de suportar os esforços oriundos do tráfego durante o período de projeto para o qual foram projetados, com o menor índice possível de intervenções.

## **1.5 Organização do trabalho**

O trabalho segue a seguinte sequência de capítulos descrita abaixo:

**Capítulo 1:** Introdução ao tema da pesquisa, explanando ao leitor as condições essenciais para a compreensão do seu contexto, seus objetivos e justificativas.

**Capítulo 2:** Revisão dos conceitos utilizados nas metodologias para formulações dos esqueletos minerais que compõem as misturas asfálticas comparadas.

**Capítulo 3:** Considerações referentes às curvas granulométricas utilizadas e comparadas na pesquisa, bem como à caracterização dos materiais que compõem as misturas asfálticas e suas propriedades.

**Capítulo 4:** Abordagem dos ensaios executados em laboratório com o intuito de avaliar o comportamento mecânico da mistura asfáltica formulada com base na metodologia teórica.

**Capítulo 5:** Apresentação dos resultados adquiridos, a partir dos ensaios laboratoriais executados e análise comparativa dos parâmetros determinados em ambas as metodologias abordadas.

**Capítulo 6:** Breve comparativo quanto ao custo de produção envolvido entre as duas metodologias comparadas, com base em uma situação hipotética de aplicação em campo, notadamente, no que diz respeito particularmente ao consumo de ligante betuminoso.

**Capítulo 7:** Apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados da pesquisa e as recomendações para estudos futuros.

## **2 METODOLOGIAS PARA FORMULAÇÃO DE ESQUELETOS MINERAIS**

No âmbito da pavimentação há variadas formas para conceber misturas asfálticas pretendendo conseguir uma composição do esqueleto mineral, podem-se citar os métodos por tentativas, método algébrico, método gráfico de Rothfuchs, entre outros (SENÇO, 2008).

As ciências metodológicas que serão seguidas para o desenvolvimento da pesquisa e buscará atingir os objetivos é a metodologia por tentativa empregada pela empresa Adrimar (2016) e a metodologia comparativa arbitrada neste trabalho, o método teórico Barra (2005).

### **2.1 Método por tentativas**

A metodologia comumente seguida no Brasil é o método de Marshall para dosagem de misturas asfálticas, onde se busca estabelecer o teor ótimo de ligante a ser misturado junto ao agregado pétreo, fazendo com que a mistura asfáltica cumpra todas as formalidades expressas na Especificação de Serviço de pavimentos flexíveis (DNIT-ES 031, 2006).

A metodologia por tentativas para dosagem de misturas asfálticas é gerenciado pela norma DNER-ME 043/95 (1995) e será exibida posteriormente.

A determinação da composição do esqueleto mineral da mistura asfáltica é dada através de algumas metodologias. No Brasil o órgão responsável pelo controle de dimensionamento dos materiais que permeiam a pavimentação é o antigo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) sucedido pelo atual Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), onde o mesmo firma o uso da metodologia por tentativas para estruturar a curva granulométrica, e sugere faixas granulométricas para a convergência enquadrada das curvas granulométricas aplicáveis.

Seguindo o contexto de enquadramento da curva granulométrica é necessária a escolha de uma faixa para que a mistura seja compatível para aplicabilidade em campo. Em concordância com o Departamento Estadual de Infraestrutura (DEINFRA) (DEINFRA-SC-

ES-P-05/92), a faixa granulométrica escolhida para a compatibilidade deve ser estabelecida segundo a utilização prevista para a mistura asfáltica, ou seja, a qual camada do pavimento a mesma fará parte, por exemplo, camadas de rolamento, ligação ou reperfilagem.

Abaixo é apresentada a Tabela 2.1 onde explicita o relacionamento das faixas enquadrastes de acordo com o DNIT, e posteriormente escolhidas de acordo com a aplicação da mistura asfáltica.

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	x	x	x
1 1/2"	38,1	95 - 100	100	x	(+-) 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	x	(+-) 7%
3/4"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	(+-) 7%
1/2"	12,7	x	x	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	20 - 32	8 - 26	(+-) 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	(+-) 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	(+-) 2%
Asfalto solúvel no CS2 (+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	(+-) 3%

Fonte: DNIT-ES 031 (2006).

O DEINFRA também recomenda algumas faixas para o enquadramento das misturas asfálticas tendo basicamente os mesmos pressupostos do DNIT, porém se diferem em questões de materiais passantes em cada peneiramento e suas classificações. A faixa "C" do DEINFRA foi objetivada no projeto da Adrimar (2016).

Abaixo é ilustrada na Tabela 2.2 onde é mostrada a relação das faixas do DEINFRA disponibilizada para o enquadramento da mistura asfáltica.

Tabela 2.2 - Faixas granulométricas para concreto asfáltico usinado a quente.

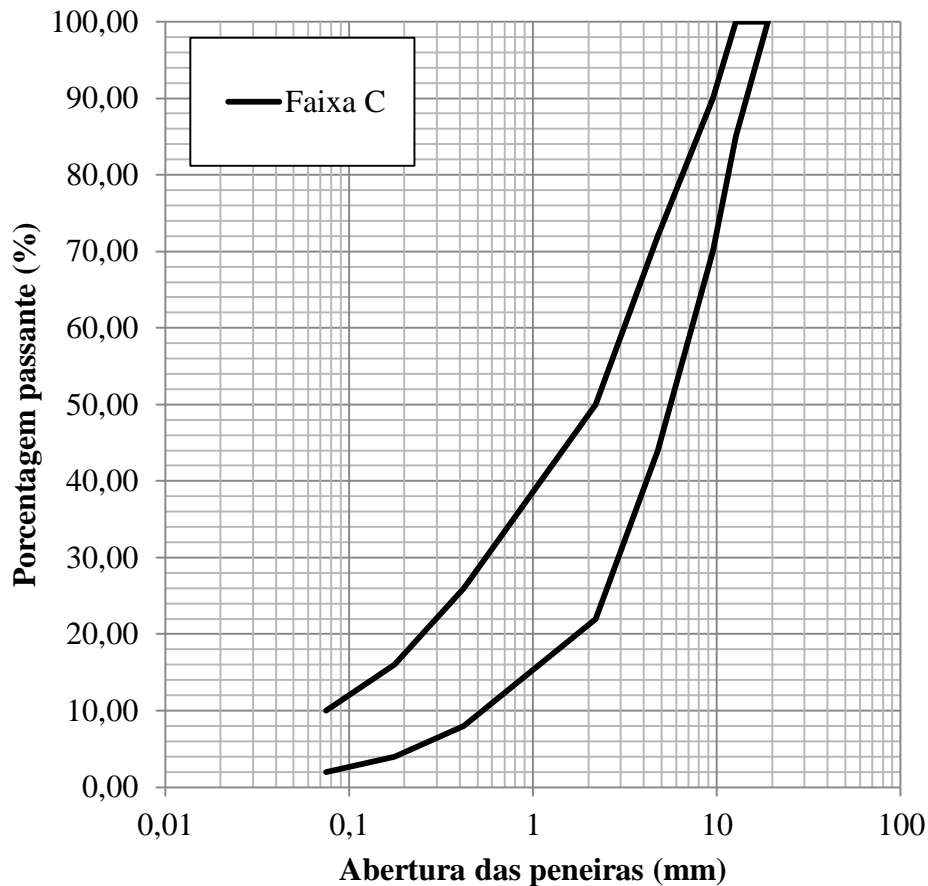
Abertura de Peneira		Porcentagem passando em peso (%)					
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	D	E	F
2"	50,8	100	x	x	x	x	x
1 1/2"	38,1	95 - 100	100	x	x	x	x
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	x	x	x	x
3/4"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	100	100	x
1/2"	12,7	x	60 - 90	85 - 100	90 - 100	80 - 100	x
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	75 - 100	76 - 93	70 - 90	100
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	50 - 85	44 - 74	50 - 70	75 - 100
Nº 10	2	20 - 40	20 - 45	30 - 75	25 - 55	33 - 48	50 - 90
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	15 - 40	9 - 27	15 - 25	20 - 50
Nº 80	0,18	5 - 10	8 - 20	8 - 30	4 - 17	8 - 17	7 - 28
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	5 - 10	2 - 10	4 - 10	3 - 10
Camadas	Ligação	Ligação ou rolamento	Rolamento			Reperfilagem	

Fonte: DEINFRA-SC-ES-P05/92 (1992).

Posteriormente a definição da faixa de enquadramento de acordo com as especificações de utilização e a composição do esqueleto mineral da mistura asfáltica deverá convergir para o enquadramento estabelecido. Ilustra-se na Figura 2.1 o modelo gráfico da faixa granulométrica “C” do DEINFRA onde seu intervalo é definido de acordo com a porcentagem passante em relação à abertura de cada peneira.



Figura 2.1 - Faixa granulométrica “C”.



Fonte: DNIT.

O método por tentativa estabelecido pelo DNIT por se basear na estimativa da quantidade de fração de granular passante em cada peneira e basicamente por uma comparação definir a faixa aceitável é considerado um método empírico, pois é fundamentado em um erro e acerto da adequação do praticável ao estimado (BÚRIGO, 2015).

Devido à curva granulométrica ser constituída da conjugação de variadas frações granulométrica é indispensável conhecer a quantidade de cada material fracionado para estabelecer a curva granulométrica do esqueleto mineral.

Para que a curva granulométrica se enquadre no valor da faixa granulométrica estabelecida é necessário definir a estimativa das parcelas para cada fração granular passante em cada peneira, onde a soma deverá convergir para o enquadramento da curva granulométrica baseada.

Caso não se enquadre perfeitamente na curva desejada, modificações nas parcelas dos granulares passantes devem ser executadas até que a curva praticada satisfaça a condição de enquadramento.

A metodologia por tentativas é contestada para a formulação de esqueletos minerais no âmbito da pavimentação. As negativas são sustentadas pelo método que é comercializado os materiais pétreos no Brasil, pois não há um controle quanto ao peneiramento e a classificação dos materiais.

Na compra de uma dada graduação comercial há uma heterogeneidade acentuada no que se diz respeito ao tamanho observado, não existindo um padrão diametral entre as partículas dentro da mesma classificação, ou seja, o mesmo diâmetro presente em uma classe é encontrado em outra classe distinta. Por exemplo, na brita número 1 contém diâmetros que entraria na classificação de pedrisco.

Dentro desta situação é embaraçado o controle das graduações no beneficiamento dos granulares, impactando diretamente na formação dos esqueletos minerais baseados somente na classificação direta dos granulares, acarretando instabilidades mecânicas ao produto final.

Para exemplificar e explicitar a deficiência mencionada acima, a Tabela 2.3 e a Figura 2.2 modificada a partir do estudo de Barra (2005).

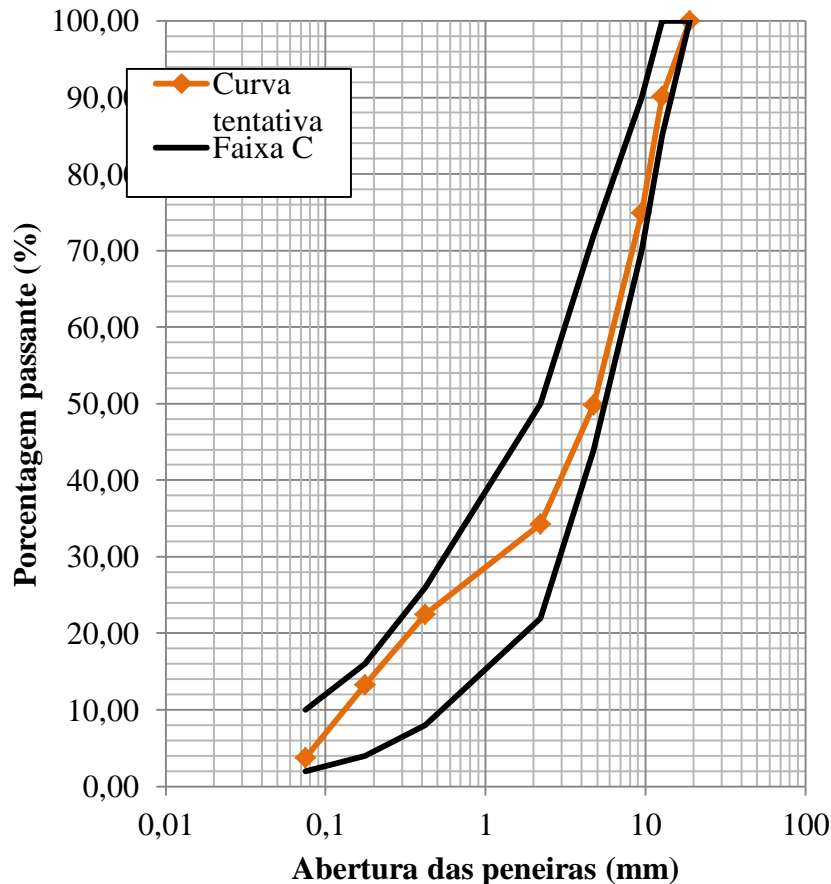
Tabela 2.3 - Composição granulométrica de uma curva prática.

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

Fonte: Barra (2005).

A tabela é o estudo granulométrico, e indica a porcentagem requerida do agregado para que a mistura se enquadre na faixa normativa, enquanto a figura ilustra o encaixe da curva granulométrica para a faixa “C” do DNIT.

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



Fonte: Barra (2005).

A Figura 2.2 demonstra como que é feito o encaixe da curva granulométrica de acordo com as normativas em vigor no Brasil. As curvas em preto representam a faixa “C” preconizada pelo DNIT, dentro deste intervalo deve constar a curva granulométrica assumida em projeto, que neste caso é representada pela curva em verde. De acordo com SENÇO (2008), a curva que toca alternadamente os limítrofes superiores e inferiores da faixa especificada, representa um material granular mal distribuído, entretanto satisfazendo as condições impostas pela norma.

Ao apresentar um desvio excessivo na curva granulométrica a mesma tenderá a apresentar um comportamento mecânico não desejável perante o órgão responsável pelo dimensionamento de pavimento, entretanto aprovado pelo mesmo órgão.

Conclui-se que ao apresentar uma variabilidade e uma flexibilidade demasiada dentro da mesma faixa de enquadramento para curvas granulométricas, deixa-se em aberto a possibilidade de obter varias composições com desempenhos não equivalentes podendo não atender aos padrões para aplicação em obras de pavimentação.

## 2.2 Método teórico

Dentro das metodologias possíveis para determinar a granulometria dos agregados pétreos para confecção de mistura asfáltica tem-se a metodologia teórica, reconhecido também como método teórico.

O método teórico impõe as peneiras que serão utilizadas para compor a curva granulométrica, objetivando que as partículas menores se entranhem nos pontos ociosos deixados pelas partículas maiores, resultando na compactação maior da faixa granulométrica devido à diminuição dos vazios presentes na mesma.

Para atender adequadamente a quantidade de cada partícula, são fixados dois diâmetros, o diâmetro máximo e mínimo passantes, com respeito às peneiras estabelecidas para a formação do esqueleto mineral.

Calcula-se a porcentagem de cada fração granular com respeito aos cem por cento dos particulados passantes, observando a oscilação diametral ocorrida dentre as faixas peneiradas, assim como *Füller-Talbot*, DNIT (2006) propôs na equação 2,1 apreciada abaixo.

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

Onde:

%p = porcentagem em peso que passa na peneira de abertura d (menor diâmetro);

a = constante, tomada igual a 100;

d = abertura de uma dada peneira (mm);

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

n = expoente.

O termo exponencial “n” é representado pela Equação 2.2 descrita abaixo.

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

Onde:

n = expoente;

d = abertura de uma dada peneira;

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

As equações calculadas para cada fração peneirada dentro da faixa de peneira instituída pelo projetista tende a resultar em uma curva contínua relacionando melhor proporção entre os grãos, e o termo exponencial “n” de acordo com DNIT (2006), indica se a curva é aberta, densa, ou tipo macadame.

Ainda DNIT (2006) descreve os intervalos como se observa a seguir:

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

Dentro destes intervalos e especificações, a graduação densa oferta segundo (BERNUCCI *et al.*, 2010), superioridade na estabilização mineral, devido ao fato de maior contato entre as partículas, e conseqüentemente redução dos vazios gerando melhor “embricamento” entre as partículas. Entretanto, tal confinamento entre as partículas poderá impedir a adesão do ligante betuminoso junto às partículas de agregados, resultando no fenômeno de exsudação da mistura asfáltica, onde há a migração do ligante betuminoso para superfície do pavimento, segregando ligante e agregado, podendo acelerar a perda das frações leves (aromáticas), resultando em um envelhecimento precoce da mistura asfáltica.

O contrário se observa em graduações aberta, onde remanesce um teor alto de vazios, pois é composto majoritariamente por partículas maiores, onde os vazios internos não são preenchidos totalmente pelas partículas menores, tendo assim menor contato entre os grãos.

Seguindo esta ideologia, fica claro analisar a granulometria que se adeque as necessidades comportamentais do pavimento.

Para satisfazer tais condições, diferentemente da metodologia por tentativas, onde se tenta aplicar faixas de enquadramento, o método teórico dispõe de definir da melhor forma possível os diâmetros empregados no esqueleto mineral.

Exemplifica-se a metodologia através da Tabela 2.4 e Figura 2.3, onde na tabela estão inseridos os valores das porcentagens passantes que corresponde a cada peneira pré-determinada pelo projetista advindo da Equação 2.1. O projetista limitou o diâmetro máximo (D) a 19,1mm e o diâmetro mínimo a (d) a 0,075mm. Fixou-se também em 6% a parcela passante na peneira (#200) 0,075mm para obter o valor do expoente “n”, onde para esta condição retornou em  $n = 0,51$  conforme o uso da Equação 2.2, onde o cálculo é apresentado abaixo, logo à curva granulométrica é classificada como sendo densa.

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

A representatividade em porcentagem do total de cada fração de material pétreo utilizado para compor a curva granulométrica é calculada seguindo a Equação 2.1 de *Füller-Talbot* conforme mencionado anteriormente, o cálculo abaixo representa o exemplo seguido para a peneira de abertura de 9,5mm.

$$\%p = a \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n = 100 \cdot \left(\frac{9,5}{19,1}\right)^{0,51} = 70,1\%$$

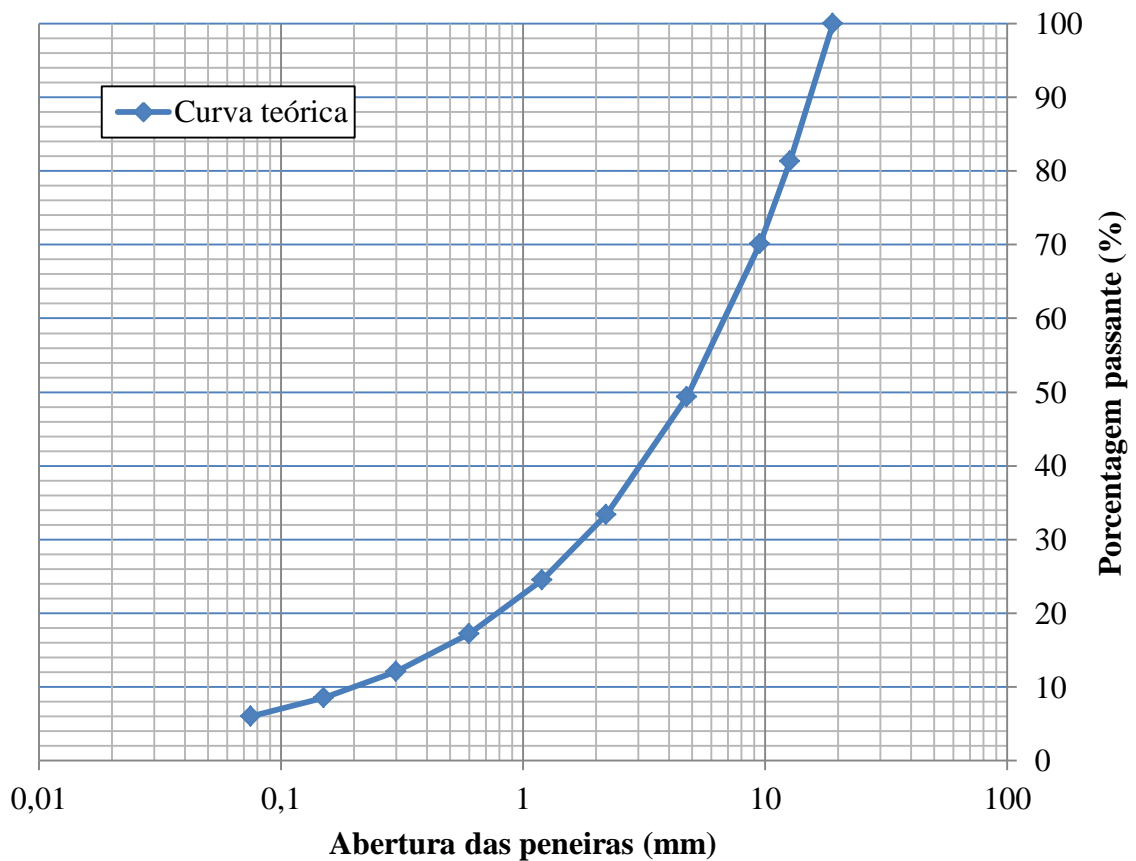
Tabela 2.4 - Composição granulométrica de uma curva teórica.

<b>Curva granulométrica</b>	
<b>Peneiras</b>	<b>% passante</b>
19,1	100
12,7	81,3
9,5	70,1
4,76	49,4
2,2	33,4
1,2	24,5
0,6	17,2
0,3	12,1
0,15	8,5
0,075	6

Fonte: Barra (2005, p.103).

Ao analisar o formato, a trajetória e a continuidade da curva granulométrica apresentada na Figura 2.3 fica explícito o controle no arranjo granulométrico dos agregados que compõe a mistura asfáltica. Ao controlar o arranjo mineralógico dos grãos, a mistura asfáltica tende a ter comportamento mecânico aumentado e mais satisfatório devido ao melhor preenchimento dos vazios entre as partículas de maior diâmetro por aquelas de menor diâmetro, de maneira contínua à razão da metade dos diâmetros imediatamente superiores, principalmente nas frações médias e finas, entre 4,76mm a 0,075mm como observado na Tabela 2.4 adaptada pelo autor, gerando melhor embricamento e ofertando a possibilidade o controle da formulação do esqueleto mineral de acordo com o projetista (BÚRIGO, 2015).

Figura 2.3 - Curva granulométrica teórica.



Fonte: Barra (2005, p. 108).

### 3 MATERIAIS E CURVAS GRANULOMÉTRICAS UTILIZADAS

Apresentam-se neste capítulo as características e propriedades necessárias para melhor conhecimento dos materiais e curvas granulométricas para dar um bom seguimento aos ensaios e resultados da pesquisa

#### 3.1 Caracterização dos materiais granulares

O agregado mineral pétreo empregado na fabricação da mistura asfáltica pela empresa (ADRMAR, 2016) tem a mesma origem do utilizado na mistura formulada em laboratório, ambas oriundas de rochas graníticas. O agregado é obtido da britagem na localidade do distrito de Pirabeiraba no município de Joinville-SC, pela Rudnick Minérios S.A.

Figura 3.1 - Britagem Rudnick Minérios – Joinville-SC.



Fonte: Galeria Rudnick Minérios Web Site.



O DNER apresenta uma série de ensaios necessários para a caracterização dos agregados minerais visando ter um conhecimento aprofundado de suas propriedades. Os ensaios são importantes, pois os mesmos se distinguem devido à originalidade, não raro, sendo um material defasado que não atende as exigências necessárias preconizadas pelo órgão responsável para aplicação na pavimentação.

Ao utilizar o projeto original da empresa (ADRI-MAR, 2016) já constam os resultados dos ensaios necessários, entretanto, visando comparar e dar maior confiabilidade a estas propriedades utilizou-se os resultados obtidos na pesquisa de Meurer (2015), onde a amostra tem a mesma origem, e os resultados expressos na Tabela 3.1 adaptada pelo autor.

Tabela 3.1 - Resultado da caracterização dos agregados.

Ensaio	Normativa	Resultado		Limite
		Quantitativo	Qualitativo	
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98	14,20%	-	Máx. 50%
Resistência ao ataque químico (Durabilidade)	DNER-ME 035/94	2,71%	Não houve quebra	Máx.12%
Índice de forma	ABNT NBR 6954/1989	0,70	Boa cubicidade	Mín.0,5
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	2,731g/cm <sup>3</sup>	-	-
Massa específica real – agregados miúdos (Chapman)	DNER-ME 194/98	0,41%	-	-
Massa específica real – material finamente pulverizado (Le Chatelier)	DNER-ME 085/94	2,759g/cm <sup>3</sup>	-	-

Fonte: Meurer (2015).

Os resultados extraídos da pesquisa de Meurer (2015) apontam que o agregado mineral pétreo atende todas as exigências cabíveis preconizadas pelas normativas, habilitando o uso do material para misturas asfálticas.

### 3.1.1 Adesividade ao ligante betuminoso

Com o intuito de verificar o efeito da adição de CAL Hidratada à mistura asfáltica, o ensaio de adesividade ao ligante betuminoso foi executado de acordo com os requisitos normativos previstos em DNER-ME078/94. O resultado continuou sendo satisfatório, tal como obtido com a adição do melhorador de adesividade Betudope (MEURER, 2015), onde não foi observado o descolamento de película do ligante betuminoso.

Segundo a especificação DEINFRA-SC-ES-P-5/92 o uso recomendado de cal hidratada calcítica tipo CH-1 como material de enchimento, deve suprimir a necessidade de incorporação de aditivo melhorador de adesividade (dope) ao ligante betuminoso.

Conforme ilustra a Figura 3.2, as amostras não apresentaram descolamento da película envolvente de ligante, ratificando a conformidade do uso da cal calcítica tipo CH-1 na formulação das misturas asfálticas, nesta pesquisa adotada na proporção de 1,0% do peso de ligante betuminoso.

Figura 3.2 - Ensaio de adesividade.



Fonte: Autor.

### 3.2 Caracterização da CAL Hidratada

A cal hidratada de acordo com a NBR 7.175 é o pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente da uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

A cal hidratada é classificada a partir das exigências químicas conforme indica a Figura 3.3, e físicas conforme a Figura 3.4, e as siglas adotadas tem relação com a pureza do material, sendo CH-I, CH-II e CH-III, onde a CH-I é a que alcança o grau de pureza mais elevado.

Tabela 3.2 - Exigências químicas.

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	Na fábrica	<=5%	<=5%	<=13%
	No depósito	<=7%	<=7%	<=15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado e calculado (CaO + MgO)		<=10%	<=15%	<=15%
Óxidos totais na base de não voláteis (CaO + MgO)		>=90%	>=88%	>=88%

Fonte: ABNT (2003b).

Tabela 3.3 - Exigências físicas.

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (%retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	<=0,5%	<=0,5%	<=0,5%
	Peneira 0,075 mm	<=10%	<=15%	<=15%
Retenção de água		>=75%	>=75%	>=70%
Incorporação de areia		>=3%	>=2,5%	>=2,2%
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		>=110%	>=110%	>=110%

Fonte: ABNT (2003B).

De acordo com Guimarães (2002), a qualidade química da cal é classificada em:

- Calcítica: alto teor de óxido de cálcio (CaO);
- Dolomítica: quando possui a relação entre óxidos de cálcio e de magnésio igual proporção molecular;
- Magnesiana: quando possui teores de óxido de magnésio intermediário entre a cal calcítica e a cal dolomítica.

Na presente pesquisa foi utilizada uma cal hidratada da classe CH-I produzida pela empresa Cal Cem Indústria de Minérios LTDA, na cidade de Colombo, no Estado do Paraná.

As propriedades físico-químicas gerais encontradas na cal empregada são descritas segundo a Tabela 3.2.

Tabela 3.4 - Propriedades físico-químicas gerais.

<b>Propriedades físico-químicas</b>	
Estado físico	Sólido
Forma	Micropulverizado inorgânico seco
Cor	Branca
Densidade aparente	0,45 a 0,75 g/cm <sup>3</sup>
Calor Específico	0,27 a 0,37
Peso Específico	2,3 a 2,9 g/cm <sup>3</sup>
Solubilidade	Solúvel em água
PH	12

Fonte: Autor.

As principais características da cal utilizada nas amostragens foram retiradas do laudo químico do lote fornecido pela empresa produtora, e organizadas na Tabela 3.3 expressa abaixo.

Tabela 3.5 - Características químicas e físicas específicas da cal.

<b>Análise Química</b>		<b>Análise Física</b>	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado (%)</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Resultado (%)</b>
Perda ao Fogo (pf)	24,15	Granulometria #30 (0,60mm)	0,00
Sílica e Resíduo Insolúvel (SiO <sub>2</sub> +RI)	3,70	<b>Granulometria #200 (0,075mm)</b>	<b>8,00</b>
<b>Óxido de Cálcio (CaO)</b>	<b>41,78</b>	Umidade	0,00
<b>Óxido de Magnésio (MgO)</b>	<b>29,93</b>		
<b>Óxidos Totais (CaO+MgO) NV</b>	<b>94,54</b>		
<b>Anidrido Carbônico (CO<sub>2</sub>)</b>	<b>3,69</b>		
Óxidos Totais não Hidratados	10,83		
Água combinada	20,46		
CaO não Hidratado	0,00		
CaO+MgO	71,71		

Fonte: Autor.

A presença de dioxinas e furanos não foram encontradas para o lote descrito, bem como também não foi identificada a presença de metais a não ser uma pequena fração de ferro.

Após as análises, a cal hidratada utilizada nas formulações é indicada tecnicamente como sendo pó micropulverizado a base de óxido de cálcio e magnésio, com pureza classe CH-I e de qualidade química dolomítica.

A cal dolomítica é de amplo uso no ramo de pavimentação por ser mais barata e acessível do que a cal calcítica que apresenta teores de hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  mais elevados, que resulta em melhorias de adesividade, retratando desempenho mais satisfatório em misturas asfálticas.

Entretanto, o teste de adesividade se apresentou positivo, viabilizando o uso da cal dolomítica para melhor efetividade na adesividade junto aos agregados na mistura formulada, além de servir como material de enchimento e compor a quantia de material pulverulento que dará origem ao mástique betuminoso.

### **3.3 Caracterização do ligante betuminoso**

O estudo das propriedades do ligante betuminoso é de suma importância, pois segundo Guerrero (2013), são os ligantes quem garantem a aglutinação dos granulares a partir da formação de uma película envolvente nos mesmos.

De maneira geral o Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP) é composto por hidrocarbonetos derivados da extração do petróleo.

O ligante betuminoso empregado no presente trabalho é idêntico ao utilizado na fabricação da mistura asfáltica do projeto da Adrimar (2016), onde o lote é advindo da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) da PETROBRÁS S.A., localizada no município de Araucária-PR, e da classe 50/70 de penetração.

Os ensaios efetuados no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) da UFSC – Centro de Joinville para obter os parâmetros necessários para bom conhecimento visando boa aplicação do ligante foram: penetração, ponto de amolecimento anel e bola, massa específica real e viscosidade Saybolt-Furol.

### 3.3.1 Ponto de amolecimento anel e bola

O ensaio do ponto de amolecimento anel e bola foi executado segundo a norma DNIT-ME 131/2010, onde correlaciona a temperatura em que o ligante amolece e esco. O procedimento se dá a partir de duas amostras do ligante acondicionada no centro de um anel metálico e posiciona uma esfera de aço sobre a amostra, onde todo o conjunto é padronizado e especificado em norma. O conjunto com as duas amostras é inserido em um béquer contendo água e aquecido a uma taxa de  $5 \pm 0,5^\circ\text{C}$  por minuto.

O ponto de amolecimento é obtido através da média das temperaturas na qual as amostras encostam-se ao fundo do béquer após sua fluência, a variação da temperatura entre as duas amostras não poderá ser maior do que  $2^\circ\text{C}$  entre ambas. Sendo assim, com o auxílio de um termômetro inserido no béquer, é possível identificar a temperatura na qual a amostra encosta no fundo.

Figura 3.3 - Ponto de amolecimento anel e bola.



Fonte: Autor.

O ponto de amolecimento do ligante CAP 50/70 está de acordo do com as especificações da ANP, onde a mesma estabelece um valor mínimo de 46°C, e a amostra resultou em uma média de 51,5°C, e com os valores das amostras de 51°C e 52°C atendendo a variação mínima para o ensaio.

### 3.3.2 Penetração

A obtenção da penetração do ligante betuminoso foi obtida seguindo as premissas da norma do DNIT-ME 155/2010, onde se mede a profundidade em que uma agulha padronizada penetra na amostra verticalmente seguindo a carga, tempo e temperatura predeterminadas. Quanto menor for a penetração da agulha na amostra, indica maior consistência do ligante betuminoso.

O processo para o ensaio inicia-se em colocar amostra em um recipiente apropriado, para tal é necessário aquecer a amostra. Aguarda-se a amostra ganhar rigidez suficiente para coloca-la em um béquer contendo água a 25°C, nesta condição aguarda-se até estabilizar a temperatura da amostra. Seguidamente a amostra é seca e posicionada no penetrômetro para execução do ensaio, conforme indica a Figura 3.6. A penetração foi feita com uma agulha de 100g durante 5 segundos, o procedimento foi realizado cinco vezes em posições alternadas. O deslocamento observado da penetração em décimos de milímetro (0,1mm) é anotado para cada procedimento, e a média aritmética resulta no valor da penetração para o ligante betuminoso.

Figura 3.4 - Ensaio de penetração.



Fonte: Autor.



Para o ligante utilizado foi observado o valor de 54 décimos de milímetro de penetração com parciais de (54,1; 53,9; 53,8; 54,0; 54,2), logo o valor de penetração do ligante CAP 50/70 utilizado está de acordo do com as especificações da ANP.

### 3.3.3 Índice Pfeiffer e Van Doormaal

Índice de Pfeiffer e Van Doormaal (IP), também denominado de suscetibilidade térmica, é calculado a partir dos valores obtidos dos ensaios de ponto de amolecimento e penetração, onde indica o quão sensível o ligante é de acordo com a variação térmica, e este quesito é fundamental e crucial no ramo da pavimentação, que é observado em campo grandioso gradiente térmico, podendo alterar de maneira significativa o comportamento e propriedades do material (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Tal suscetibilidade é calculada pelo Índice de Pfeiffer e Van Doormaal (IP) segundo a Equação 3.1 expressa abaixo:

$$IP = \frac{500 \cdot \log(P) + 20 \cdot PA - 1951}{120 - 50 \cdot \log(P) + PA} \quad (3.1)$$

Onde:

IP = índice de Pfeiffer e Van Doormaal;

PA = ponto de amolecimento do CAP obtido no ensaio de anel e bola (°C);

P = penetração do CAP à 25°C (0,1 mm).

O índice obtido foi de -0,6 fica dentro da faixa preconizada pela ANP, em que indica valores que variam de -1,5 a +0,7, onde valores próximos ao limite negativo indicam maior suscetibilidade térmica do ligante e valores tendendo ao limite superior positivo indicam fragilidade do mesmo. Assim conclui-se que ao obter um valor intermediário de IP o ligante utilizado é ideal, pois não é tão suscetível termicamente e também não é frágil.

O valor obtido no Índice de Pfeiffer e Van Doormaal (IP) não é um parâmetro de caracterização fiel no comportamento de ligantes, pois é embasado em ensaios empíricos, pois não se correlaciona o comportamento viscoelástico linear observado em campo sob carga dinâmica (BARRA, 2005), com isso, torna-se apenas uma referência indicativa para as tendências do comportamento do mesmo.

### 3.3.4 Viscosidade Saybolt-Furol

O ensaio de viscosidade Saybolt-Furol é regulamentado no Brasil pela norma ABNT NBR14950/2003. A finalidade do ensaio é determinar a curva de viscosidade do ligante betuminoso a partir do seu resultado. A curva de viscosidade fornece as temperaturas de usinagem e compactação utilizadas para elaborar as misturas asfálticas utilizando o ligante ensaiado, visando garantir boa cobertura dos agregados.

O equipamento empregado é o viscosímetro Saybolt-Furol Figura 3.7. O compartimento de amostragem contém um tubo inferior que pode ser aberto ou fechado. O ligante ensaiado é inserido ao compartimento e aquecido até a temperatura desejada, no presente ensaio adotou-se as temperaturas 135°C, 150°C e 170°C, esperando estabilizar a temperatura com o orifício fechado. Após a estabilização, o orifício é aberto e cronometra-se o tempo gasto para o ligante atingir a marca de 60 ml no frasco reservado a base do viscosímetro.

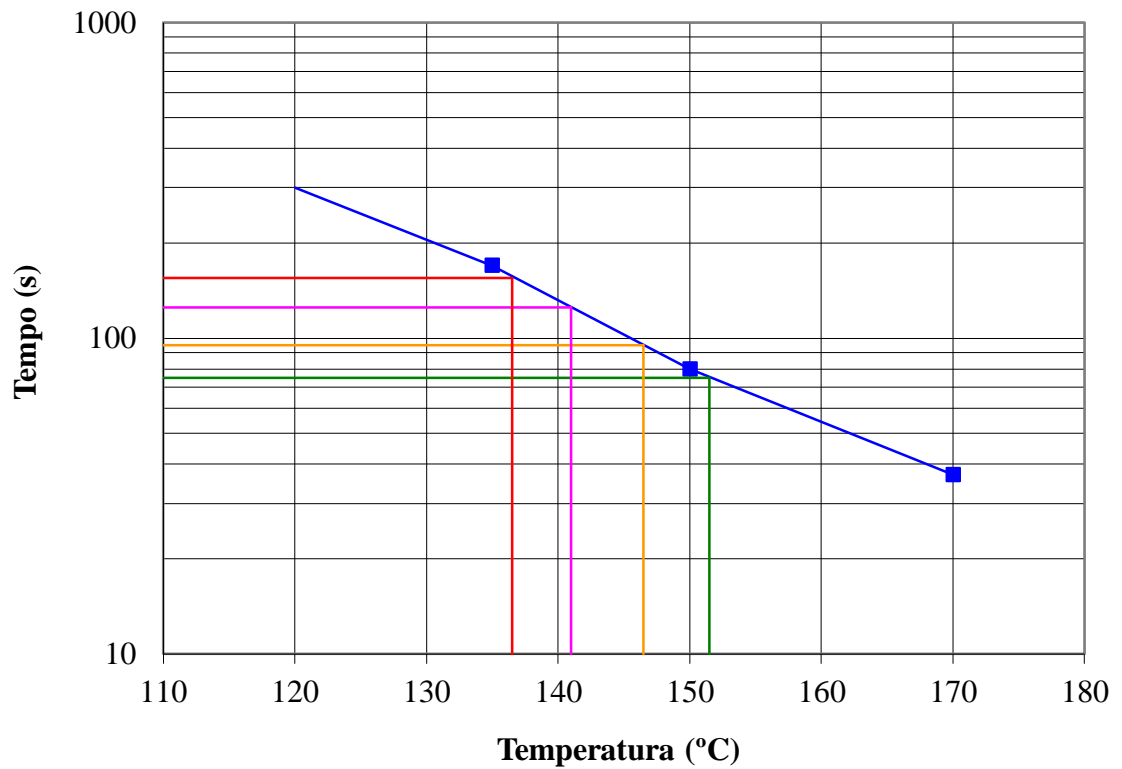
Figura 3.5 - Viscosímetro Saybolt-Furol e ensaio de viscosidade.



Fonte: Autor.

O gráfico da curva de viscosidade Saybol-Furol é ilustrado na Figura 3.8. O gráfico associa as temperaturas escolhidas em graus Célsius em função do tempo em segundo consumido para escoar 60 ml de ligante.

Figura 3.6 - Curva de viscosidade Saybolt-Furol do ligante ensaiado.



Fonte: Autor.

Os intervalos para as temperaturas de compactação e usinagem do ligante são extraídos da curva ilustrada acima e expressos na Tabela 3.4, onde essas faixas são empregadas como temperaturas limítrofes para o processo de compactação das misturas asfálticas em campo e temperatura da bomba de lançamento do ligante para a mistura com os materiais pétreos.

Tabela 3.6 - Intervalos para usinagem e compactação.

Compactação		Usinagem	
Limite inferior (°C)	Limite Superior (°C)	Limite inferior (°C)	Limite Superior (°C)
136,5	141	146,5	151,5
Média	138,75	Média	149
Adotado	<b>139</b>	Adotado	<b>150</b>

Fonte: Autor.

Os materiais pétreos utilizados na mistura devem apresentar temperatura superior ao do ligante, podendo variar de 10°C a 15°C (BERNUCCI *et al.*, 2016). Para o processo de mistura costuma-se utilizar 13°C acima por se tratar do valor intermediário.

O ligante betuminoso utilizado e ensaiado é bem estabilizado, pois apresenta pouca variação entre os trechos retilíneos, além de apresentar uma viscosidade adequada, reforçando os resultados obtidos através dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento anel e bola.

### 3.3.5 Massa específica

Os padrões do ensaio para determinar a massa específica do ligante betuminoso são regulamentados pela norma ABNT NBR 6296/2012. A tendência da massa específica de ligantes betuminosos aproximam-se de valores 1,00 e 1,02g/cm<sup>3</sup> (BERNUCCI *et al.*, 2010). Segundo Barra (2015) estes valores podem extrapolar para 1,3g/cm<sup>3</sup>.

A execução do ensaio se deu através de duas amostras alocadas em dois picnômetros, onde foram pesados em uma balança de precisão. Para a realização do ensaio é necessário conhecer quatro tipos de massas, sendo elas com relação ao picnômetro: vazio, cheio com água, com ligante até a metade e metade com ligante metade com água.

Figura 3.7 - Ensaio para massa específica.



Fonte: Autor.

A Equação 3.2 é utilizada para determinar o valor da massa específica do ligante, e o valor empregado é a média aritmética das duas amostras.

$$Massa\ Específica = \frac{(C - A)}{[(B - A) - (D - C)]} \quad (3.2)$$

onde:

*A* = peso do picnômetro vazio;

*B* = peso do picnômetro cheio com água a 25°C;

*C* = peso do picnômetro com CAP na metade;

*D* = peso do picnômetro com CAP + água.

As amostras registraram valores de 1,000g/cm<sup>3</sup> e 1,006g/cm<sup>3</sup>, obtendo uma média para a massa específica do ligante betuminoso estudado de 1,006g/cm<sup>3</sup> indicando uma média dentro do esperado segundo BERNUCCI *et. al.* (2010).

### 3.4 Curvas granulométricas selecionadas

Esta seção busca ilustrar, argumentar e comparar as duas metodologias diferentes para determinação do arranjo mineralógico dos agregados que compõe as curvas granulométricas aplicadas em misturas asfálticas utilizadas no estudo.

### 3.4.1 Curva granulométrica por tentativas

A curva granulométrica obtida pela metodologia empírica por tentativas de enquadramento, denominada curva prática (CP), não foi replicada em laboratório. Fez-se o uso dos dados adquiridos do projeto de Adrimar (2016) para comparar com metodologia teórica descrita no capítulo 2.2 desta pesquisa.

A curva granulométrica projetada pelo método por tentativas descrito na seção 2.1 busca convergir a curva granulométrica formulada dentro de faixas fixas estabelecidas pelo órgão responsável. O projeto adquirido como base de estudo de Adrimar (2016) fez uso da curva granulométrica que buscava enquadrar a mesma na faixa “C” do DEINFRA.

A Tabela 3.5 adaptada pelo autor indica as porcentagens das frações do agregado pétreo e da CAL hidratada com relação a sua granulometria.

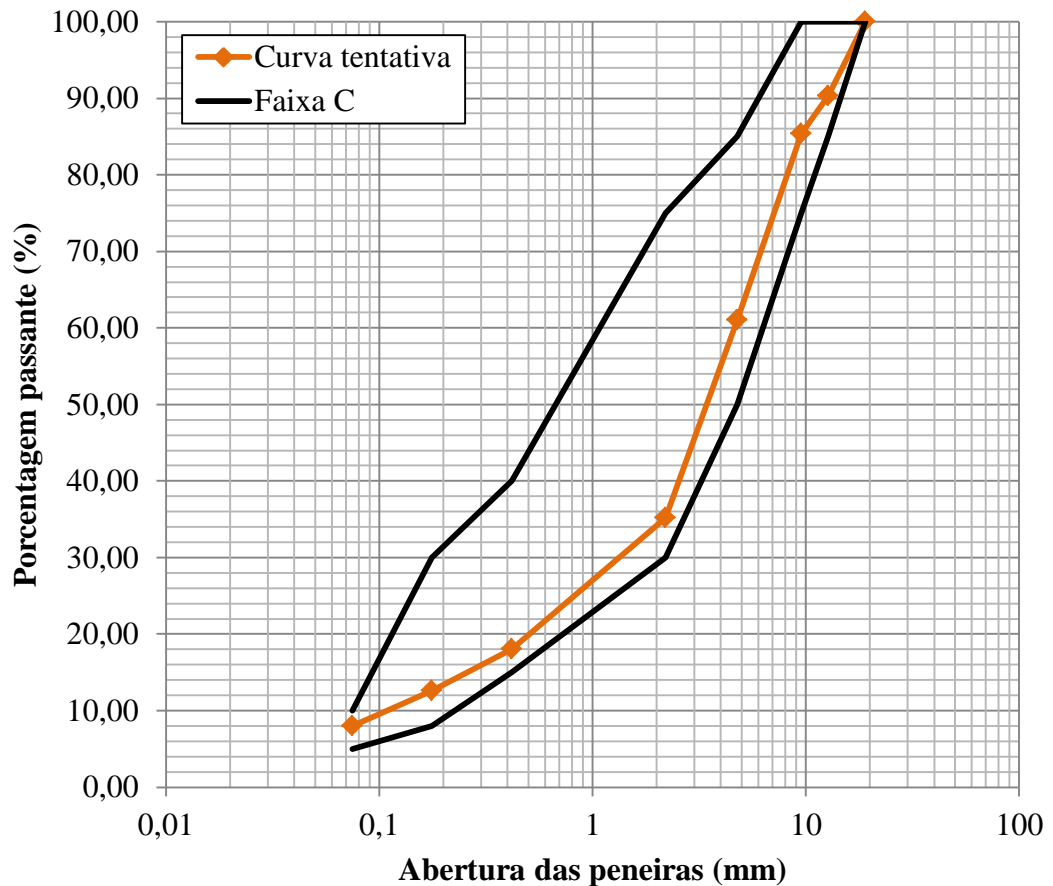
Tabela 3.7 - Composição da curva granulométrica formulada pelo método de tentativa.

<b>Distribuição Granulométrica dos Agregados</b>							
Peneiras (mm)	Brita 3/4"	Pedrisco	Pó de Pedra	CAL CH-I	% passante na mistura	Faixa C	
19,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12,70	35,30	100,00	100,00	100,00	90,30	85,00	100,00
9,50	4,40	99,40	100,00	100,00	85,40	75,00	100,00
4,76	0,40	37,10	99,70	100,00	61,00	50,00	85,00
2,20	0,40	4,10	70,90	100,00	35,20	30,00	75,00
0,42	0,40	2,00	35,10	100,00	18,00	15,00	40,00
0,18	0,30	1,50	24,00	96,40	12,60	8,00	30,00
0,075	0,30	0,90	14,70	89,10	8,00	5,00	10,00
% Agregados na mistura	15,00	38,00	46,00	1,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Adrimar (2016).

A Figura 3.10 adaptado pelo autor ilustra a curva granulométrica resultante do projeto enquadrada na faixa “C” do DEINFRA estabelecida em projeto.

Figura 3.8 - Curva prática.



Fonte: Adrimar (2016).

### 3.4.2 Curva granulométrica teórica

A curva granulométrica racional, denominada com sendo curva teórica (CT) é calculada a partir da equação de Fuller-Talbot conforme explanado na seção 2.2. Os materiais que são incorporados na curva granulométrica teórica tem a mesma origem dos utilizados para a curva granulométrica por tentativas, modificando assim somente a matriz granular, fazendo o rearranjo mineralógico. Fixou-se o diâmetro máximo para abertura de peneira em 19,1mm e em 6,0% a quantidade da fração de material pulverulento passante na malha de abertura 0,075mm, obtendo um expoente “n” de calculo de 0,51, classificando a mistura asfáltica como sendo densa segundo a sua curva granulométrica calculada, desenvolvida e empregada por Barra (2005).

A escolha das peneiras utilizadas para o fracionamento referente à curva teórica (CT) calculada por Barra (2005) objetivou o preenchimento gradativo dos vazios concebidos pelos

grãos de maior diâmetro em relação aos de menor diâmetro à razão da metade de seus tamanhos, dando ênfase no ramo da curva que corresponde as frações mais finas, especificamente a partir da peneira com abertura de 9,50mm, objetivando gerar um melhor embricamento entre as partículas, resultando mais resistência frente à aplicação de cargas solicitantes e, tornando o pavimento menos suscetível à deformações uma vez que controlado os vazios do esqueleto mineral, torna-o mais homogêneo. Evita-se também a descontinuidade com relação ao tamanho dos grãos apreciada nas curvas granulométricas por tentativa.

Ao analisar a curva prática (CP) fica visível a falha no arranjo mineralógico na seção de peneiramento inferior a 2,20mm, apresentando uma defasagem na transição do esqueleto mineral que chega até ao diâmetro de 0,075mm. Assim a curva granulométrica por tentativas utilizada em projeto poderá apresentar um entrosamento entre as partículas deficientes, por mais que se tenha corrigido a deficiência de material pulverulento abaixo da peneira 0,18 com a adição de CAL hidratada CH-I. Esta desconformidade reflete em uma curva granulométrica com uma quantidade exagerada de finos que não serão corretamente empregados, podendo apresentar menor estabilidade com relação à matriz granulométrica.

A Tabela 3.6 adaptada pelo autor consta a série de peneiramento e os resultados das porcentagens calculadas e utilizada por Barra (2005) seguindo a equação de Fuller-Talbot descritas e apresentadas na seção 2.2 para o método teórico.

Tabela 3.8 - Série de peneiramento e formulação.

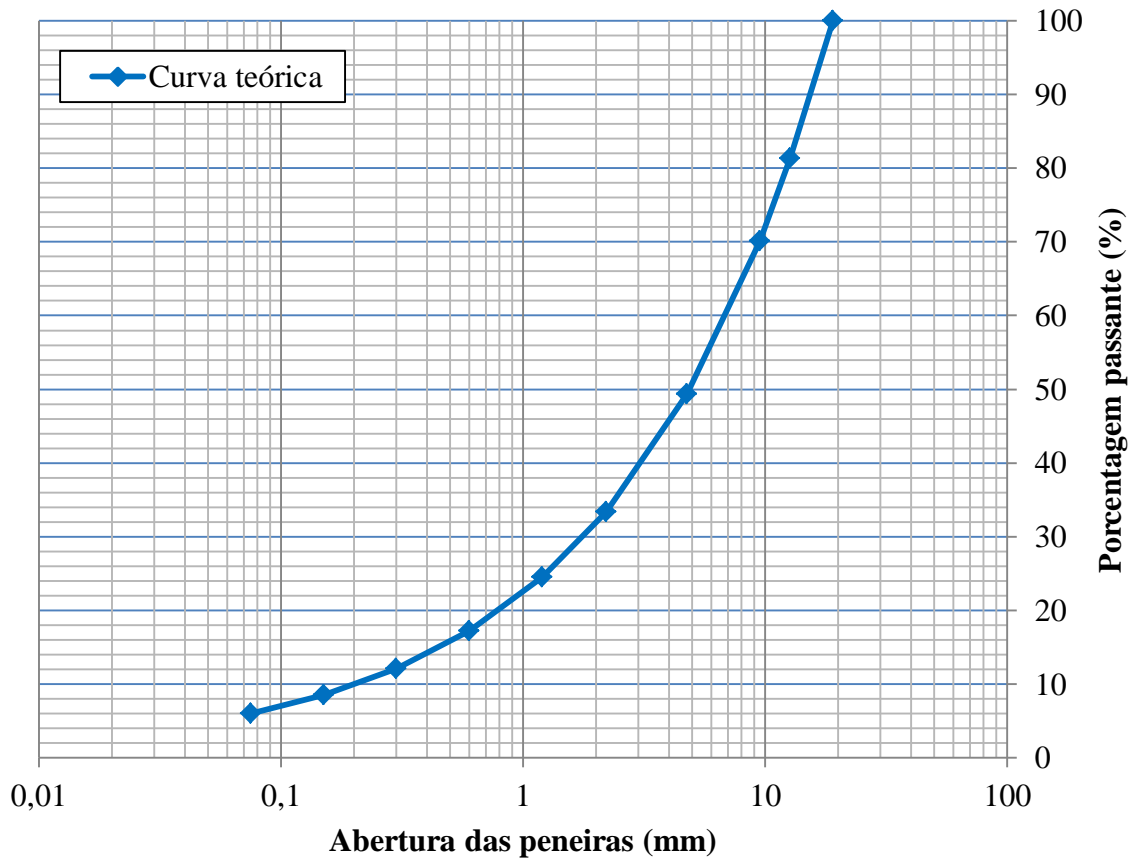
<b>Curva granulométrica</b>	
<b>Peneiras</b>	<b>% passante</b>
19,1	100
12,7	81,3
9,5	70,1
4,76	49,4
2,2	33,4
1,2	24,5
0,6	17,2
0,3	12,1
0,15	8,5
0,075	6

Fonte: Barra (2005, p.103).

A curva granulométrica seguindo o dimensionamento de Barra (2005) é apreciada na Figura 3.11 adaptada pelo autor ilustrado abaixo.



Figura 3.9 - Curva granulométrica teórica.



Fonte: Barra (2005, p.108).

### 3.4.3 Comparação entre as curvas granulométricas

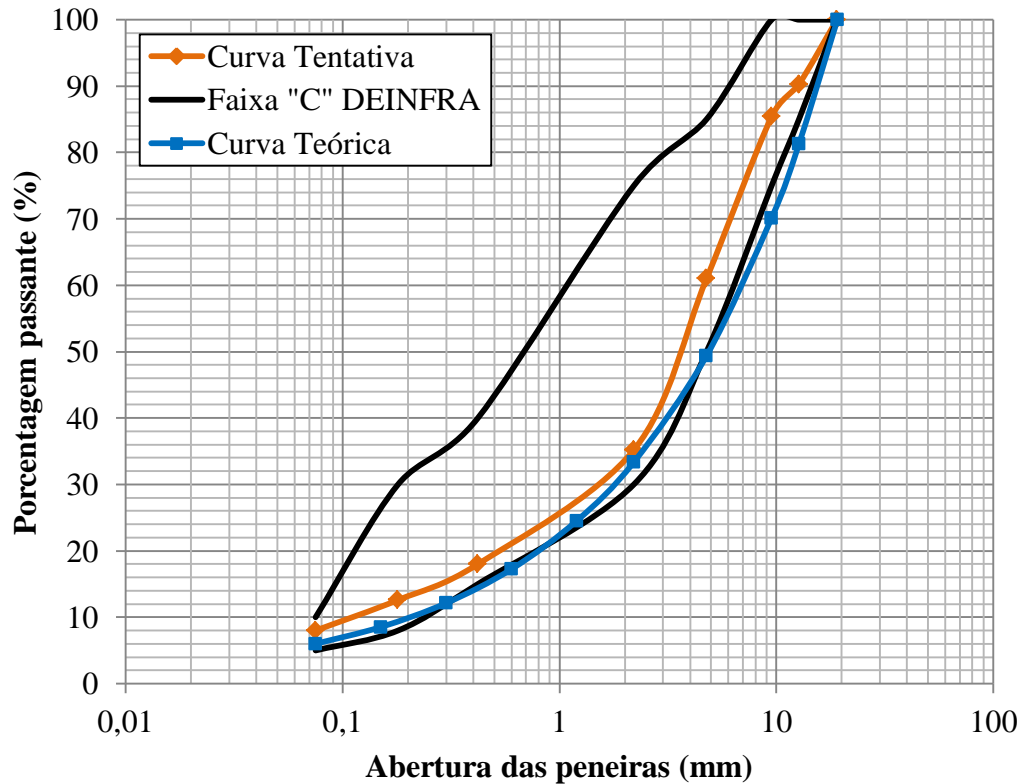
Ao efeito de que foi utilizada a curva granulométrica teórica e replicada em laboratório para as misturas asfálticas, com o intuito de comparação a curva granulométrica por tentativas no qual foi dispensada a replicação, apresenta-se na Tabela 3.7 a distribuição das frações granulométricas do esqueleto mineral de ambas as curvas granulométricas, (CP) e (CT), e na Figura 3.12 as curvas granulométricas inseridas nos limites preconizados pela faixa “C” do DEINFRA.

Tabela 3.9 - Distribuição das frações granulométricas.

Curva granulométrica teórica		Curva granulométrica tentativa		Faixa "C" DINFRA	
Peneiras	% passante	Peneiras	% passante	Lim sup	Lim inf
19,1	100,0	19	100	100	100
12,7	81,3	12,7	90,3	100	85
9,5	70,1	9,5	85,4	100	75
4,76	49,4	4,76	61	85	50
2,2	33,4	2,2	35,2	75	30
1,2	24,5				
0,6	17,2				
0,3	12,1	0,42	18	40	15
0,15	8,5	0,18	12,6	30	8
0,075	6,0	0,075	8	10	5

Fonte: Autor.

Figura 3.10 - Comparativo entre as curvas granulométricas.



Fonte: Autor.

Ao observar a Figura 3.12 explicita que a curva teórica obtida através da equação de Fuller-Talbot apresenta trechos de sua curvatura fora do intervalo ou no limite inferior estabelecido pela faixa “C” do DEINFRA, diferentemente da curva prática que obedece ao enquadramento preconizado por norma uma vez que foi feita para o ajuste da mesma.

Segundo as normas vigentes para utilização da metodologia empírica por tentativa, não é de agrado que a curva teórica extrapole os limites inferiores ultrapassados ou que sua curvatura tangencie os limítrofes estabelecidos para a faixa granulométrica imposta pelo órgão responsável pela via, desejando assim que a curva se localize preferencialmente ao centro da faixa indicada. Sendo assim a curva teórica calculada não estaria obedecendo as premissas de formulação de misturas asfálticas para a faixa “C” do DEINFRA.

Todavia, a curva granulométrica teórica é obtida através de cálculos com base na metodologia teórica, sendo assim não segue as mesmas premissas da metodologia por tentativas, caindo por terra os requisitos estabelecidos utilizados para formulação, sobretudo para curvas granulométricas por tentativa.

Assim, a Figura 3.12 tem relevância somente para comparação entre o formato das duas curvas, onde a curva prática é desordenada e não uniforme, enquanto a curva teórica segue uma tendência ordenada acarretando melhoras para o arranjo mineralógico para concepção de misturas asfálticas.

#### 4 ENSAIOS LABORATORIAIS

Este capítulo dará ênfase no ensaio laboratorial que objetiva determinar o desempenho da mistura asfáltica seguindo a curva granulométrica teórica proposta. A execução de todos os ensaios a que compete foi realizado no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Centro de Joinville.

Figura 4.1 - Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav).



Fonte: Autor.

O teor ótimo de CAP 50/70 inserido na mistura asfáltica formulada a partir da curva prática (CP) do projeto original utilizado como base de Adrimar (2016) foi concebido através do procedimento de dosagem Marshall (DNER-ME 043/95, 1995). O mesmo procedimento de ensaio foi adotado para estabelecer o teor ótimo para a mistura que compreende a formulação da cura teórica (CP) proposta para o efeito comparativo.

Conforme explanado por Barra (2005), por mais que este método seja largamente difundido e mais utilizado nos país, existem algumas deficiências neste ensaio, sobretudo no processo de compactação da mistura asfáltica pelo processo não assemelhar as condições representadas em campo.

#### **4.1 Metodologia Marshall**

Conforme Senço (2001), a metodologia de dosagem Marshall bem como o aparelho foram criados por Bruce Marshall do Mississippi State Highway Department e foi adorado pelo United States Army Corps of Engineers (USACE), no início da Segunda Guerra Mundial, objetivando controlar e padronizar os projetos e construção de aeroportos militares e determinação do teor ótimo de betume das misturas asfálticas aplicadas.

O ensaio Marshall (ABNT NBR 15785/2010) é o método oficialmente seguido e aplicado na maioria esmagadora dos projetos de pavimentação no Brasil para determinar o teor ótimo de ligante betuminoso utilizado em misturas asfálticas. Entretanto esta metodologia Marshall não fornece quaisquer parâmetro para correlacionar o ensaio que teor ótimo de betume com o dimensionamento do pavimento, sendo assim não force ao projetista uma perspectiva do quão espesso deve ser a camada de rolamento e nem mesmo a resistência a ser atendida.

O teor ótimo de ligante utilizado para a usinagem em grande escala é adquirida através da compactação de corpos de prova, onde são analisados os parâmetros físicos e mecânicos relacionados ao comportamento das misturas asfálticas dosadas, onde se busca conhecer: massa específica aparente (MEA), teor de vazios (V), vazios cheios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume/vazios (RBV), estabilidade e fluência.

Visando viabilizar os parâmetros das características das misturas asfálticas, são moldados corpos de prova cilíndricos padronizados, com dimensões e pesos arbitrados em

norma. Os corpos de prova são executados em moldes e anel de aço conforme ilustra a Figura 4.2.

Figura 4.2 - Moldes e anel utilizados para moldar os corpos de prova.



Fonte: Autor.

Estes corpos de prova são elaborados com a mistura, dosados e compactados através de impacto advindo da queda livre do soquete Marshall, também regulamentado em norma com peso e altura de queda pré-estabelecidos.

O soquete Marshall utilizado para execução do adensamento foi do tipo eletromecânico, ilustrado na Figura 4.3, no qual, os golpes são controlados por um sistema eletro-motorizado, minimizando a variabilidade da energia de compactação, garantindo menor variação no gradiente de densidade, que facilmente poderia ser afetado caso o ensaio fosse executado manualmente através do operador.

Figura 4.3 - Soquete Marshall eletromecânico.



Fonte: Autor.

Conforme indicado em norma, o número de golpes necessário para a compactação da mistura asfáltica é de 75 golpes em cada face do corpo de prova para camadas de revestimento, e de 50 golpes para camadas intermediárias como, por exemplo, de ligação.

O estudo realizado pretende comparar os resultados para as misturas asfálticas aplicadas à camada de rolamento “capa”, neste contexto, no ensaio de compactação Marshall foram aplicados 75 golpes em cada face dos corpos de prova.

Os corpos de prova para o ensaio Marshall devem conter 1200g cada, no qual foram formulados e moldados para esta pesquisa através da curva granulométrica teórica calculada teoricamente conforme indicada nas seções 2.2 e 3.4.2, onde a mistura é composta pelo material pétreo e cal hidratada seguindo o peneiramento estabelecido, fixando a matriz mineralógica da mistura, mais uma porcentagem de ligante em relação ao peso da amostra, variando proporcionalmente, conforme apreciado nas Tabelas 4.1 a 4.5 abaixo.

Tabela 4.1 - Formulação dos traços para 4,22% de ligante.

<b>Traço Marshall 4,22%</b>					
Peneiras	% passante	4,22% (50,64g)	50,64		Peso CP (g)
19,1	100	95,78			
12,7	81,3	77,1	18,7	17,91	214,9
9,5	70,1	65,88	11,2	10,73	128,7
4,76	49,4	45,18	20,7	19,83	237,9
2,2	33,4	29,18	16,0	15,32	183,9
1,2	24,5	20,28	8,9	8,52	102,3
0,6	17,2	12,98	7,3	6,99	83,9
0,3	12,1	7,88	5,1	4,88	58,6
0,15	8,5	4,28	3,6	3,45	41,4
0,075	6	1,78	2,5	2,39	28,4
Fundo			6,0	5,75	62,8
0,075 cal					0,3
Fundo cal					6,2
				4,22	1200,0

Fonte: Autor.

Tabela 4.2 - Formulação dos traços para 4,54% de ligante.

<b>Traço Marshall 4,54%</b>					
Peneiras	% passante	4,54% (54,48g)	54,48		Peso CP (g)
19,1	100	95,46			
12,7	81,3	76,76	18,7	17,85	214,2
9,5	70,1	65,56	11,2	10,69	128,3
4,76	49,4	44,86	20,7	19,76	237,1
2,2	33,4	28,86	16,0	15,27	183,3
1,2	24,5	19,96	8,9	8,50	102,0
0,6	17,2	12,66	7,3	6,97	83,6
0,3	12,1	7,56	5,1	4,87	58,4
0,15	8,5	3,96	3,6	3,44	41,2
0,075	6	1,46	2,5	2,39	28,4
Fundo			6,0	5,73	62,5



0,075 cal					0,3
Fundo cal					6,2
				4,54	1200,0

Fonte: Autor.

Tabela 4.3 - Formulação dos traços para 4,86% de ligante.

<b>Traço Marshall 4,86%</b>					
Peneiras	% passante	4,86% (58,32g)	58,32		Peso CP (g)
19,1	100	95,14			
12,7	81,3	76,44	18,7	17,79	213,5
9,5	70,1	65,24	11,2	10,66	127,9
4,76	49,4	44,54	20,7	19,69	236,3
2,2	33,4	28,54	16,0	15,22	182,7
1,2	24,5	19,64	8,9	8,47	101,6
0,6	17,2	12,34	7,3	6,95	83,3
0,3	12,1	7,24	5,1	4,85	58,2
0,15	8,5	3,64	3,6	3,43	41,1
0,075	6	1,14	2,5	2,38	28,3
Fundo			6,0	5,71	62,3
0,075 cal					0,3
Fundo cal					6,2
				4,86	1200,0

Fonte: Autor.

Tabela 4.4 - Formulação dos traços para 5,18% de ligante.

<b>Traço Marshall 5,18%</b>					
Peneiras	% passante	5,18% (62,16g)	62,16		Peso CP (g)
19,1	100	94,82			
12,7	81,3	76,12	18,7	17,73	212,8
9,5	70,1	64,92	11,2	10,62	127,4
4,76	49,4	44,22	20,7	19,63	235,5
2,2	33,4	28,22	16,0	15,17	182,1
1,2	24,5	19,32	8,9	8,44	101,3
0,6	17,2	12,02	7,3	6,92	83,1
0,3	12,1	6,92	5,1	4,84	58,0
0,15	8,5	3,32	3,6	3,41	41,0
0,075	6	0,82	2,5	2,37	28,2
Fundo			6,0	5,69	62,1

0,075 cal					0,3
Fundo cal					6,1
				5,18	1200,0

Fonte: Autor.

Tabela 4.5 - Formulação dos traços para 5,50% de ligante.

<b>Traço Marshall 5,50%</b>					
Peneiras	% passante	5,50% (66g)	66		Peso CP (g)
19,1	100	94,5			
12,7	81,3	75,8	18,7	17,67	212,1
9,5	70,1	64,6	11,2	10,58	127,0
4,76	49,4	43,9	20,7	19,56	234,7
2,2	33,4	27,9	16,0	15,12	181,4
1,2	24,5	19	8,9	8,41	100,9
0,6	17,2	11,7	7,3	6,90	82,8
0,3	12,1	6,6	5,1	4,82	57,8
0,15	8,5	3	3,6	3,40	40,8
0,075	6	0,5	2,5	2,36	28,1
Fundo			6,0	5,67	61,9
0,075 cal					0,3
Fundo cal					6,1
				5,50	1200,0

Fonte: Autor.

A porcentagem em peso que compreende o ligante foi adotada do estudo de Barra (2005), onde se utiliza a faixa de cinco teores, inicializando em 4,22% até 5,50% variando ao passo de 0,32% nos intervalos, assim têm-se os teores de 4,22%, 4,54%, 4,86%, 5,18% e 5,50%. Esta faixa adotada segundo Búrigo (2015) geralmente é utilizada para misturas densas.

Buscando significância e confiabilidade nos resultados, foram executados cinco corpos de prova para cada teor de ligante variado dentro da matriz mineralógica, totalizando 25 corpos de provas usinados e executados.

Visando aperfeiçoar o processo de elaboração das misturas asfálticas, os esqueletos minerais formulados foram divididos em duas classes, sendo elas a parte graúda que compreende todo material passante na malha de 19,10mm e retido na 2,20mm, e a parte miúda passante na 2,20mm até o fundo.

Figura 4.4 - Organização e separação dos materiais que compõe o esqueleto mineral.



Fonte: Autor.

Os materiais que irão compor a mistura asfáltica são levados às estufas pré-aquecidas à temperatura de usinagem obtida através dos ensaios e da curva mencionada no capítulo 3, especificamente através da curva do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol.

Lembra-se que a temperatura obtida para a usinagem do ligante foi de um intervalo de 146,5°C a 151°C, onde foi adotada a temperatura de usinagem média de 150°C. Complementado em uma estufa separada, os agregados são elevados à temperatura de 13°C acima, em relação à temperatura do ligante, atingindo a temperatura de 163°C para os materiais granulares.

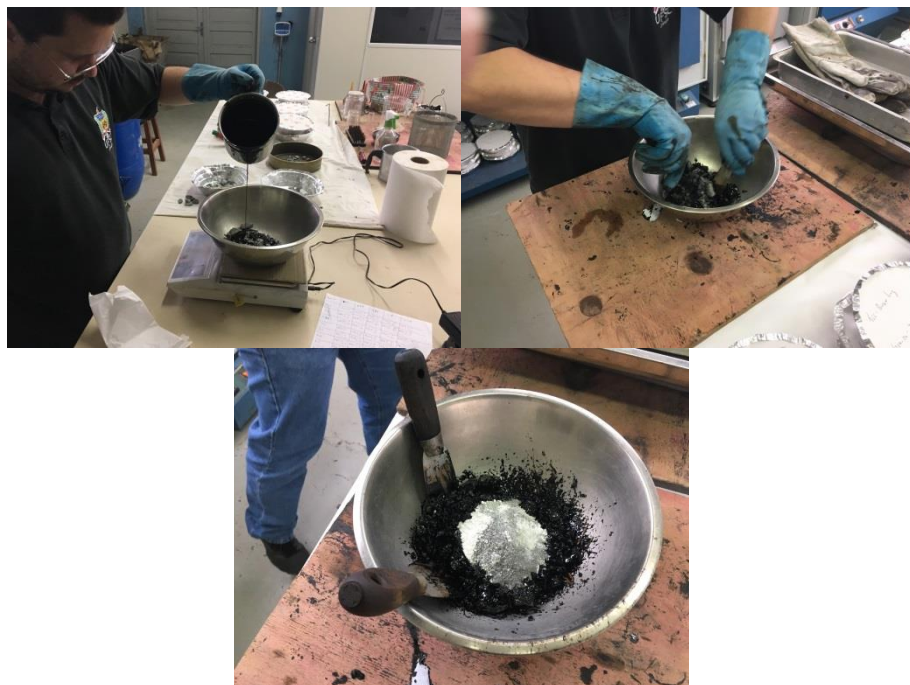
Os utensílios como espátulas e recipientes empregados para executar a mistura das amostras também foram pré-aquecidos na temperatura de usinagem, pois desta maneira

consegue-se garantir melhor homogeneidade na temperatura, menor choque térmico entre os materiais e melhor trabalhabilidade.

Após a estabilização da temperatura dos materiais na estufa é iniciado o processo de mistura dos materiais. Inicialmente somente é disposta a composição graúda dos agregados no recipiente e tarado na balança de precisão, adicionando manualmente com cuidado e de forma circular o peso do ligante para a fração a ser composta, este procedimento visa garantir bom envolvimento das partículas maiores. Logo após a pesagem da quantidade de ligante, é mexido bem esta composição buscando encobrir todas as partículas de material pétreo.

Já com as partículas maiores bem envolvidas pelo ligante betuminoso é inserido a composição miúda, formando o “mástique” betuminoso, que em contato com o ligante e as partículas maiores gera o efeito de aderência e preenchimento dos vazios da mistura a medida em que é mexido toda a mistura. Ao final deverá constar uma mistura bem homogeneizada com todas as partículas envoltas por ligante, podendo se apreciar uma cor azul petróleo, característico em misturas asfálticas.

Figura 4.5 - Metodologia Marshall.



Fonte: Autor.

O esqueleto mineral é dividido em duas composições para a mistura, pois assegura-se com esta medida melhor trabalhabilidade e melhor envolvimento da película de ligante betuminoso para todos os agregados, sobretudo para a composição miúda, onde se foi

adicionado a cal hidratada que por ser muito fina corresponde a uma área superficial muito representativa, e essas partículas tentem a absorver muito ligante, podendo gerar precariedade de ligante betuminoso para cobrir todos os agregados, principalmente os de maior tamanho caso não fossem separados em duas seções de mistura.

As misturas prontas são retornadas as embalagens de marmitas e condicionadas por um período mínimo de duas horas na estufa na temperatura de compactação também obtida através da curva de viscosidade já explanada, onde indicou os limites de 136,5°C a 141,0°C, sendo adotado um valor médio de 139°C. O tempo mínimo de duas horas é estabelecido, segundo Zagolin (2016) para permitir uma aderência satisfatória do ligante betuminoso às partículas dos agregados.

Na mesma temperatura de compactação, são condicionados os 25 moldes e um anel/colar cilíndricos de aço, evitando grandes perdas de temperatura durante a compactação dos corpos de prova.

Após as misturas e os moldes com o anel permanecerem duas horas na temperatura de compactação, é retirado o molde juntamente com o colar colocado sobre a base do soquete Marshall, inserido um disco de papel no fundo para evitar a fluência e extravasamento do material nas periferias do molde. Sem perder muito tempo, é retirada a amostra a ser compactada da estufa e transferida para o molde, é realizado a pré-densificação e nivelamento da mistura através de 25 espatuladas (15 nas bordas e 10 no centro). Uma vez nivelado, se faz o capeamento com o disco de papel com o mesmo propósito do mesmo acondicionado no fundo.

Figura 4.6 - Procedimento de compactação.



Fonte: Autor.

Como mencionado, é aplicado 75 golpes em cada face do corpo de prova a ser compactado, totalizando 150 golpes ao todo.

Para desmoldar os corpos de provas já compactados de dentro dos moldes utiliza-se o mesmo soquete Marshall para a compactação, entretanto, os golpes são executados manualmente sobre um suporte cilíndrico com orifício de diâmetro aproximadamente igual ao molde.

As repetições do número de golpes são concebidas até a extração do corpo de prova, para evitar o desmonte, ruptura ou golpes demasiados no corpo de prova, aconselha-se extrair o mesmo a uma temperatura na qual é possível palpar o molde de aço sem que ele esquite muito a mão em 10 segundos.

Na etapa de desmoldagem também é importante preparar a queda do material em uma superfície plana e fofa, amortecendo a queda e evitando rachaduras ou imperfeições no mesmo. O mesmo cuidado deve ser tomado nos últimos golpes para o soquete Marshall não despencar sobre o corpo de prova.

Figura 4.7 - Desmolde do corpo de prova.



Fonte: Autor.

Ao término da etapa de compactação e extração dos corpos de provas, os mesmos são enumerados de 1 a 25 e dispostos de cinco em cinco representando cada teor de ligante empregado inicializando a numeração em 4,22% e encerrando em 5,50%.

Figura 4.8 - Corpos de provas moldados e enumerados.



Fonte: Autor.

Para obter os parâmetros necessários para determinar o teor ótimo para a mistura asfáltica analisada, é necessário de cada amostra conhecer: altura média a partir de três medidas realizada com o auxílio de um paquímetro eletrônico em pontos diferentes e de preferência equidistantes; peso seco e peso hidrostático.

Figura 4.9 - Pesagem hidrostática.





Fonte: Autor.

Vale ressaltar que por se tratar de um mistura asfáltica densa não foi necessário envolver os corpos de prova com fita crepe e parafina para realizar a pesagem hidrostática envolta, pois os vazios não tem representatividade para modificar a pesagem, o contrário poderá ser observado caso seja feita a selagem, isto se deve ao fato da não homogeneidade da fita crepe e da parafina ter o poder de mascarar os resultados de pesagem.

Tabela 4.6 - Pesos e alturas obtidos.

Teor de CAP	Nº CP	Peso seco (g)	Média Peso Seco (g)	Peso Hidrostático (g)	Alturas CP				
					Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Altura 3 (mm)	Média Alturas (mm)	Média Total (mm)
4,22%	1	1191,6	<b>1195,48</b>	<b>717,2</b>	61,72	62,44	62,42	62,19	<b>62,00</b>
	2	1196,7		<b>719,9</b>	61,93	62,17	62,18	62,09	
	3	1196,3		<b>717,9</b>	62,73	62,67	61,86	62,42	
	4	1195,8		<b>720,1</b>	61,55	61,54	60,9	61,33	
	5	1197		<b>717,2</b>	62,49	61,94	61,42	61,95	
4,54%	6	1196,6	<b>1195,38</b>	<b>713,4</b>	63,01	63,72	62,43	63,05	<b>62,32</b>
	7	1195,3		<b>715,1</b>	62,01	61,93	62,12	62,02	
	8	1194,5		<b>715,6</b>	61,53	61,87	62,04	61,81	
	9	1194,9		<b>714,2</b>	62,45	62,47	62,61	62,51	
	10	1195,6		<b>714</b>	62,07	62,03	62,54	62,21	
4,86%	11	1196,7	<b>1196,74</b>	<b>717,7</b>	61,03	61,71	60,49	61,08	<b>61,11</b>
	12	1196,8		<b>719,7</b>	60,54	60,65	60,72	60,64	
	13	1196,1		<b>721,1</b>	60,84	60,91	60,87	60,87	

	14	1197,2		<b>717,2</b>	62,58	61,94	62,24	62,25	
	15	1196,9		<b>719,9</b>	60,88	60,69	60,59	60,72	
5,18%	16	1195,5	<b>1195,58</b>	<b>717,2</b>	61,73	61,66	61,49	61,63	<b>60,87</b>
	17	1196,4		<b>719,6</b>	61,74	60,56	60,12	60,81	
	18	1194,9		<b>723,9</b>	60,19	59,95	59,77	59,97	
	19	1195,5		<b>719,4</b>	60,8	61,61	60,85	61,09	
5,50%	21	1194	<b>1194,8</b>	<b>715,7</b>	63,1	61,68	60,88	61,89	<b>61,16</b>
	22	1194,2		<b>721,9</b>	60,24	60,51	60,45	60,40	
	23	1196,9		<b>722,7</b>	60,41	60,74	60,4	60,52	
	24	1192,9		<b>713,7</b>	62,07	61,78	61,67	61,84	
	25	1196		<b>718,7</b>	61,06	61,13	61,22	61,14	

Fonte: Autor.

Conhecidos os valores obtidos através das pesagens e das alturas, além das propriedades já explicitadas com relação ao ligante no capítulo 3, calculam-se os valores de: densidade aparente (Daparente), Densidade real (Dreal), teor de vazios (V%), vazio cheio de betume (VCB), vazio do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazio (RBV). Isto tudo visando determinar o teor ótimo de ligante.

#### 4.1.1 Densidade aparente

A densidade aparente (Daparente) ou massa específica aparente da mistura é obtida através dos seguimentos da (DNER-ME 117/94), onde tal medição, segundo Senço (2001), corresponde a relação entre a massa de determinada porção de agregado e o volume ocupado pelo mesmo, nas condições de compactação e adensamento.

Para a realização das pesagens hidrostáticas foi dispensado o uso de parafina e fita crepe para selar os corpos de prova uma vez que a mistura é classificada como densa, e as questões de variabilidade já foram explanadas anteriormente.

A obtenção da densidade aparente (Daparente) é dada a partir da Equação 4.1 que segue abaixo.

$$D_{aparente} = \frac{P_s}{P_s - P_h}$$

(4.1)

Onde:

D<sub>aparente</sub> = densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>);

P<sub>s</sub> = peso seco (g);

P<sub>h</sub> = peso hidrostático (g).

#### 4.1.2 Densidade real

Os valores para a massa específica real dos corpos de prova é obtido através do ensaio de densidade máxima teórica real da mistura, utilizando o procedimento feito com a mistura do material já dosada (MVR) (DNER-ME 117/94), diferentemente do convencional onde o mesmo ensaio é feito utilizando a densidade real dos agregados.

O procedimento deste ensaio é inicializado separando duas amostras 635g da mistura de cada teor, a formulação é a mesma seguida em projeto e a mistura é realizada da mesma maneira como explanado para os corpos de prova Marshall, entretanto em escala menor conforme indica a Tabela 4.7 e não compactando a mistura.

Tabela 4.7 - Dosagem das amostras para MVR.

MVR 4,22%			MVR 4,54%			MVR 4,86%			MVR 5,18%			MVR 5,50%		
Peneiras	%	Agregado	Peneiras	%	Agregado	Peneiras	%	Agregado	Peneiras	%	Agregado	Peneiras	%	Agregado
12,70	17,91	113,73	12,70	17,85	113,35	12,70	17,79	112,97	12,70	17,73	112,59	12,70	17,67	112,21
9,50	10,73	68,12	9,50	10,69	67,89	9,50	10,66	67,66	9,50	10,62	67,44	9,50	10,58	67,21
4,76	19,83	125,90	4,76	19,76	125,48	4,76	19,69	125,06	4,76	19,63	124,64	4,76	19,56	124,22
2,20	15,32	97,31	2,20	15,27	96,99	2,20	15,22	96,66	2,20	15,17	96,34	2,20	15,12	96,01
1,20	8,52	54,13	1,20	8,50	53,95	1,20	8,47	53,77	1,20	8,44	53,59	1,20	8,41	53,41
0,60	6,99	44,40	0,60	6,97	44,25	0,60	6,95	44,10	0,60	6,92	43,95	0,60	6,90	43,81
0,30	4,88	31,02	0,30	4,87	30,91	0,30	4,85	30,81	0,30	4,84	30,71	0,30	4,82	30,60
0,15	3,45	21,90	0,15	3,44	21,82	0,15	3,43	21,75	0,15	3,41	21,68	0,15	3,40	21,60
0,08	2,39	15,05	0,08	2,39	15,00	0,08	2,38	14,95	0,08	2,37	14,90	0,08	2,36	14,85
Fundo	5,75	33,21	Fundo	5,73	33,10	Fundo	5,71	32,99	Fundo	5,69	32,88	Fundo	5,67	32,76
0,075 cal		0,15	0,075 cal		0,15	0,075 cal		0,15	0,075 cal		0,15	0,075 cal		0,15
Fundo cal		3,28	Fundo cal		3,27	Fundo cal		3,26	Fundo cal		3,25	Fundo cal		3,24
Ligante		26,80	Ligante		28,83	Ligante		30,86	Ligante		32,89	Ligante		34,93
Total		635,00	Total		635,00	Total		635,00	Total		635,00	Total		635,00

Fonte: Autor.

Depois de misturada a amostra é seca inicialmente em uma bandeja evitando o “engruvinhamento” entre as partículas, posteriormente as amostras devem descansar por 24 horas na embalagem de marmita utilizada na dosagem.

Com a amostra seca, a mesma é esfarelada e pesada. Utiliza-se um picnômetro com rolha (conjunto) calibrado de peso e volume conhecido (a), o mesmo é preenchido de água até mais ou menos 800 ml e pesado novamente com a rolha (b), neste conteúdo se adiciona toda a mistura da amostra com cuidado para não perder massa, retira-se o excesso de ar e pesa novamente (c). Após estas pesagens, é completado com água até a borda do picnômetro sem a rolha, retira-se o excesso de ar novamente e dispõe o conjunto no vácuo por 1 hora. Terminado o tempo de vácuo, se retira mais um pouco do excesso de ar, coloca-se a rolha, completa até o menisco da rolha e pesa o conjunto final (d).

Figura 4.10 - Dosagem das amostras para MVR.



Fonte: Autor.

Através da Equação 4.2 se obtém o valor da densidade real ( $D_{real}$ ) para cada amostra, onde para cada teor de ligante se faz a média aritmética das amostras para definir o valor a ser utilizado para a densidade real.

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

(4.2)

Onde:

$D_{real}$  = massa específica real (g/cm<sup>3</sup>);

a = massa do picnômetro vazio (tara);

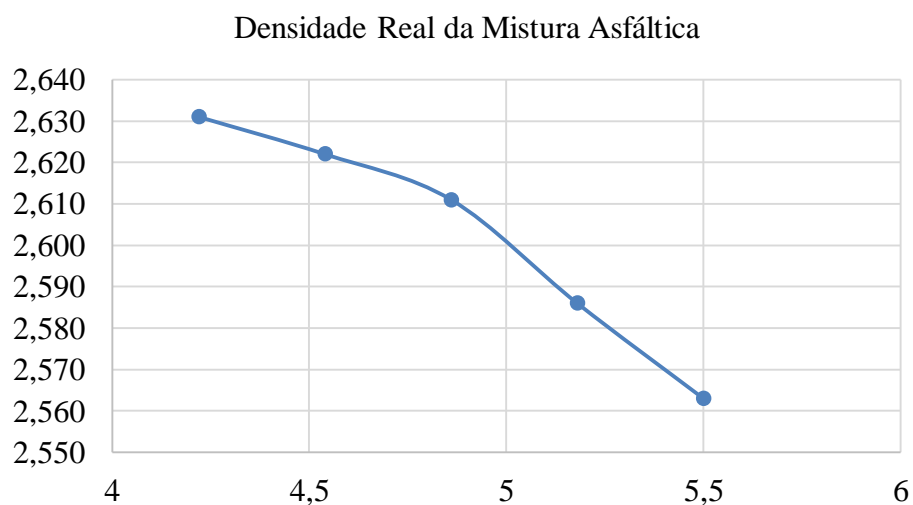
b = massa do picnômetro cheio de água até o menisco;

c = massa do picnômetro contendo a amostra;

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

Abaixo a Figura 4.11 ilustra a tendência do decréscimo da densidade da mistura conforme o aumento do teor de ligante, justificado pelo fato da densidade do ligante ser menor do que a do agregado.

Figura 4.11 - Curva MVR.



Fonte: Autor.

Com as medidas das densidades aparente ( $D_{aparente}$ ) e densidades real ( $D_{real}$ ), representadas na Tabela 4.8, são possíveis realizar os cálculos para as demais propriedades das misturas asfálticas seguindo a metodologia Marshall.

Tabela 4.8 - Dados das densidades.

<b>Teor Ligante</b>	<b>Densidade Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Média Densidade Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade Real (MVR) (g/cm<sup>3</sup>)</b>
4,22%	2,412	<b>2,426</b>	<b>2,631</b>
4,22%	2,410		
4,22%	2,401		
4,22%	2,414		
4,22%	2,495		
4,54%	2,476	<b>2,486</b>	<b>2,622</b>
4,54%	2,489		
4,54%	2,494		
4,54%	2,486		
4,54%	2,483		
4,86%	2,498	<b>2,506</b>	<b>2,611</b>
4,86%	2,508		
4,86%	2,518		
4,86%	2,494		
4,86%	2,509		
5,18%	2,499	<b>2,514</b>	<b>2,586</b>
5,18%	2,509		
5,18%	2,537		
5,18%	2,511		
5,50%	2,496	<b>2,509</b>	<b>2,563</b>
5,50%	2,528		
5,50%	2,524		
5,50%	2,489		
5,50%	2,506		

Fonte: Autor.

#### 4.1.3 Teor de vazios

O teor de vazios (V%) é obtido através da Equação 4.3 onde relaciona o volume de vazios e o volume total da mistura asfáltica, em função das densidades aparente e real já calculadas.

$$V(\%) = \frac{D_{real} - D_{aparente}}{D_{real}} * 100 \quad (5.3)$$

Onde:

V(%) = teor de vazios;

D<sub>real</sub> = massa específica real do corpo de prova;

D<sub>aparente</sub> = massa específica aparente do corpo de prova.

#### 4.1.4 Vazio cheio de betume

Os vazios cheios com betume (VCB) é a composição em porcentagem de vazios sobre os agregados que são preenchidos pelo ligante. Esta propriedade é adquirida pela Equação 4.4.

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

Onde:

VCB (%) = vazio cheio de betume;

D<sub>aparente</sub> = densidade aparente;

%L = teor de ligante;

d<sub>ligante</sub> = densidade do ligante.



#### 4.1.5 Vazio do agregado mineral

O valor do vazio do agregado mineral  $VAM$  (%) é obtido através da soma das porcentagens de vazios da mistura não preenchidos com a porcentagem de vazios cheio de betume, representando assim a porcentagem total de vazios na mistura, conforme indicado pela Equação 4.5.

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

Onde:

$VAM$  = vazios do agregado mineral (%);

$V$  = teor de vazios (%);

$VCB$  = vazios cheios com betume (%).

#### 4.1.6 Relação betume/vazio

A relação betume/vazio ( $RBV$ ) é como o próprio nome diz, a relação entre os vazios cheio de betume e os vazios do agregado mineral, calculados segundo a Equação 4.6.

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

Onde:

$RBV(\%)$  = relação betume/vazios;

$VCB$  = vazios cheio de betume;

$VAM$  = vazios do agregado mineral.

A Tabela 4.9 traz os valores obtidos para cada procedimento e suas médias para cada teor empregado para os parâmetros de Densidade aparente ( $D_{aparente}$ ), Densidade real ( $D_{real}$ ), teor de vazios ( $V\%$ ), vazio cheio de betume ( $VCB$ ), vazio do agregado mineral ( $VAM$ ) e relação betume/vazio ( $RBV$ ), citados acima.

Tabela 4.9 - Memorial de cálculo dos parâmetros.

<b>Teor Ligante</b>	<b>Teor de Vazios (%)</b>	<b>Teor de Vazios Médio (%)</b>	<b>Vazio Cheio de Betume (%)</b>	<b>Vazio Cheio de Betume Médio (%)</b>	<b>Vazio Agregado Mineral (%)</b>	<b>Vazio Agregado Mineral Médio (%)</b>	<b>Relação Betume/Vazio (%)</b>	<b>Relação Betume/Vazio Médio (%)</b>
4,22%	5,53	<b>5,545</b>	10,12	<b>10,178</b>	15,65	<b>15,724</b>	64,66	<b>64,742</b>
	5,60		10,11		15,71		64,35	
	5,96		10,07		16,03		62,82	
	5,46		10,13		15,59		64,97	
	5,18		10,47		15,64		66,90	
4,54%	5,55	<b>5,201</b>	10,39	<b>10,427</b>	15,94	<b>15,628</b>	65,17	<b>66,733</b>
	5,07		10,44		15,51		67,33	
	4,87		10,46		15,33		68,23	
	5,20		10,43		15,62		66,74	
	5,32		10,41		15,73		66,20	
4,86%	4,32	<b>4,034</b>	10,48	<b>10,511</b>	14,80	<b>14,545</b>	70,83	<b>72,297</b>
	3,93		10,52		14,45		72,83	
	3,56		10,56		14,12		74,80	
	4,47		10,46		14,94		70,04	
	3,90		10,53		14,42		72,98	
5,18%	3,35	<b>2,778</b>	10,48	<b>10,547</b>	13,83	<b>13,324</b>	75,81	<b>79,274</b>
	2,97		10,53		13,49		78,00	
	1,90		10,64		12,54		84,87	
	2,90		10,53		13,43		78,42	
5,50%	2,60	<b>2,115</b>	10,47	<b>10,524</b>	13,07	<b>12,639</b>	80,10	<b>83,436</b>
	1,35		10,61		11,95		88,73	
	1,52		10,59		12,11		87,45	
	2,87		10,44		13,32		78,42	
	2,23		10,51		12,74		82,48	

Fonte: Autor.

#### 4.1.7 Estabilidade e fluência

Ao término dos resultados dos outros parâmetros listados nos subcapítulos acima por meio de equações diretas, os corpos de prova são submetidos ao último ensaio visando as últimas duas propriedades a serem analisadas, estabilidade e fluência, onde os mesmos são adquiridos através da compressão diametral na prensa Marshall.

Conforme é descrito pela normativa DNER 043/95, a estabilidade é a carga máxima verificada em cada corpo de prova ensaiado resistente no instante de sua ruptura e a fluência é indicada pelo deslocamento vertical observado no momento em que acontece a ruptura do corpo de prova, ou seja, na observância do deslocamento onde se tem a carga máxima se tem a fluência da mistura asfáltica.

O aparelho utilizado neste ensaio é composto por um pistão hidráulico que avança a uma velocidade constante, as leituras da carga que procede ao ensaio são executadas por uma célula de carga com capacidade de 10.000KN e por um extensômetro que verifica o deslocamento. Para transmitir as medições efetuadas nos ensaios é acoplado um aquisitor de dados, onde este transforma os pulsos em dados que são convertidos em dados legíveis em um laptop que contenha o software “myPCLab”, possibilitando registrar os dados de estabilidade e fluência de cada corpo de prova ensaiado.

De acordo com a norma NBR 15785/2010 de ensaio, as amostras devem ser preparadas em uma condição adversa a aquela observada naturalmente, assim a mesma indica que as amostras devem ser submersas em água a uma temperatura de 60°C por 30 minutos.

Figura 4.12 - Corpos de prova em banho-maria.



Fonte: Autor.

Após o banho-maria de meia hora, cada corpo de prova é preparado e posicionado na prensa Marshall previamente calibrada. Com o corpo de prova centralizado na placa de ruptura, o mesmo sofre uma compressão diametral única e contínua até a sua ruptura. E como mencionado anteriormente, a tensão máxima observada no gráfico retorna o valor de estabilidade, e o deslocamento neste mesmo ponto indica a fluência.

Figura 4.13 - Compressão diametral.



Fonte: Autor.

Abaixo na Tabela 4.10 é demonstrada a extração dos valores obtidos para estabilidade e fluência para cada corpo de prova. É feita a correção das medidas segundo as leituras inicial e final. Para os valores de estabilidade ainda se utilizou um fator de correção relacionada a altura do corpo de prova seguindo a Equação 4.7.

$$\text{Fator de correção} = 927,23 * (\text{med. altura}_{CP}^{1,64})$$

(4.7)

Tabela 4.10 - Valores de estabilidade e fluência.

Teor Ligante	Fluência (mm)				Estabilidade (kN)					
	Inicial	Final	Resultado	Média	Inicial	Final	Fator de correção	Resultado parcial	Resultado corrigido	Resultado
4,22%	49	461	4,12	<b>4,85</b>	2	1066	1,06	10,64	11,28	<b>13,55</b>
4,22%	8	543	5,35		0	1175	1,06	11,75	12,49	
4,22%	1	440	4,39		0	1291	1,05	12,91	13,61	
4,22%	7	512	5,05		0	1447	1,08	14,47	15,70	
4,22%	6	539	5,33		-1	1372	1,07	13,73	14,65	
4,54%	7	515	5,08	<b>5,06</b>	-2	1136	1,04	11,38	11,80	<b>14,10</b>
4,54%	6	544	5,38		1	1484	1,07	14,83	15,80	
4,54%	7	511	5,04		-1	1261	1,07	12,62	13,52	
4,54%	7	467	4,60		1	1383	1,05	13,82	14,53	
4,54%	7	525	5,18		0	1401	1,06	14,01	14,85	
4,86%	7	434	4,27	<b>4,77</b>	1	1445	1,09	14,44	15,77	<b>17,45</b>
4,86%	34	455	4,21		-1	1695	1,11	16,96	18,75	
4,86%	7	532	5,25		-1	1772	1,10	17,73	19,47	
4,86%	7	517	5,10		17	1449	1,06	14,32	15,16	
4,86%	7	509	5,02		3	1645	1,10	16,42	18,11	
5,18%	7	509	5,02	<b>5,12</b>	-1	1409	1,08	14,10	15,18	<b>18,95</b>
5,18%	7	513	5,06		5	1820	1,10	18,15	19,97	
5,18%	7	517	5,10		-1	1882	1,13	18,83	21,19	
5,18%	7	538	5,31		-1	1780	1,09	17,81	19,45	
5,50%	8	509	5,01	<b>5,13</b>	-1	1290	1,07	12,91	13,80	<b>15,42</b>
5,50%	7	525	5,18		-1	1504	1,11	15,05	16,74	
5,50%	7	409			-3	1529	1,11	15,32	16,99	
5,50%	7	511	5,04		-3	1337	1,07	13,40	14,34	
5,50%	7	536	5,29		-2	1396	1,09	13,98	15,25	

Fonte: Autor.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados juntamente com considerações gerais com relação aos resultados obtidos, bem como descreve as diferenças impactantes nos parâmetros segundo a escolha da curva granulométrica, representado pelo rearranjo mineralógico em misturas asfálticas se baseando na metodologia Marshall e dimensionamento.

### 5.1 Resultados e considerações

Os gráficos que serão explicitados adiante são resultado dos parâmetros como densidade aparente, teor de vazios (V%), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazio obtidos no capítulo anterior, que após a ruptura por compressão diametral retornou os parâmetros de estabilidade e fluência. Estes gráficos são posicionados lado a lado segundo o parâmetro para comparar os valores de acordo com a curva granulométrica adotada, curva teórica (CT) à esquerda e curva prática (CP) à esquerda. Vale reforçar que as curvas relacionadas à curva prática (CP) foram extraídas do projeto original da empresa parceira deste estudo (ADRIMAR, 2016).

Este conjunto de gráfico visa determinar a melhor escolha do teor ótimo de ligante betuminoso utilizado na formulação da mistura asfáltica utilizando a curva teórica (CT) calculada teoricamente. Para determinar o teor ótimo de betume, algumas premissas devem ser seguidas de acordo com a norma DNIT-ES 031/2006.

Abaixo é apresentada a Tabela 5.1 onde consta um resumo com os valores médios dos parâmetros a serem comparados obtidos nos ensaio e retirados de projeto original, transformados em gráficos isolados para todos os parâmetros a serem analisados para fornecer o valor do teor ótimo de ligante para a curva teórica. Na tabela são apreciados os limites impostos pela normativa citada acima.

Tabela 5.1 - Resumo dos valores médios obtidos no ensaio Marshall.

Misturas asfálticas	Parâmetros						
	Teor de betume (%)	MEA (g/cm <sup>3</sup> )	V (%)	VAM (%)	RBV(%)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)
CT	4,22	2,426	5,545	15,724	64,742	4,85	13,55
	4,54	2,486	5,201	15,628	66,733	5,06	14,10
	<b>4,86</b>	<b>2,506</b>	<b>4,034</b>	<b>14,545</b>	<b>72,297</b>	<b>4,77</b>	<b>17,45</b>
	5,18	2,514	2,778	13,324	79,274	5,12	18,95
	5,50	2,509	2,115	12,634	83,436	5,13	15,42
CP	4,00	2,448	7,160	16,510	56,620	8,43	13,43
	4,50	2,466	5,700	16,350	65,100	10,45	12,58
	<b>5,00</b>	<b>2,492</b>	<b>3,920</b>	<b>15,850</b>	<b>75,350</b>	<b>12,28</b>	<b>11,47</b>
	5,50	2,513	2,300	15,640	85,330	13,60	10,45
	6,00	2,518	1,340	15,920	91,620	15,35	10,03
<b>DNIT-ES 031/2006</b>	<b>X</b>	<b>3,0 a 5,0</b>	<b>mín. 16,0 *</b>	<b>75,0 a 82,0</b>	<b>X</b>	<b>mín. 4,90</b>	

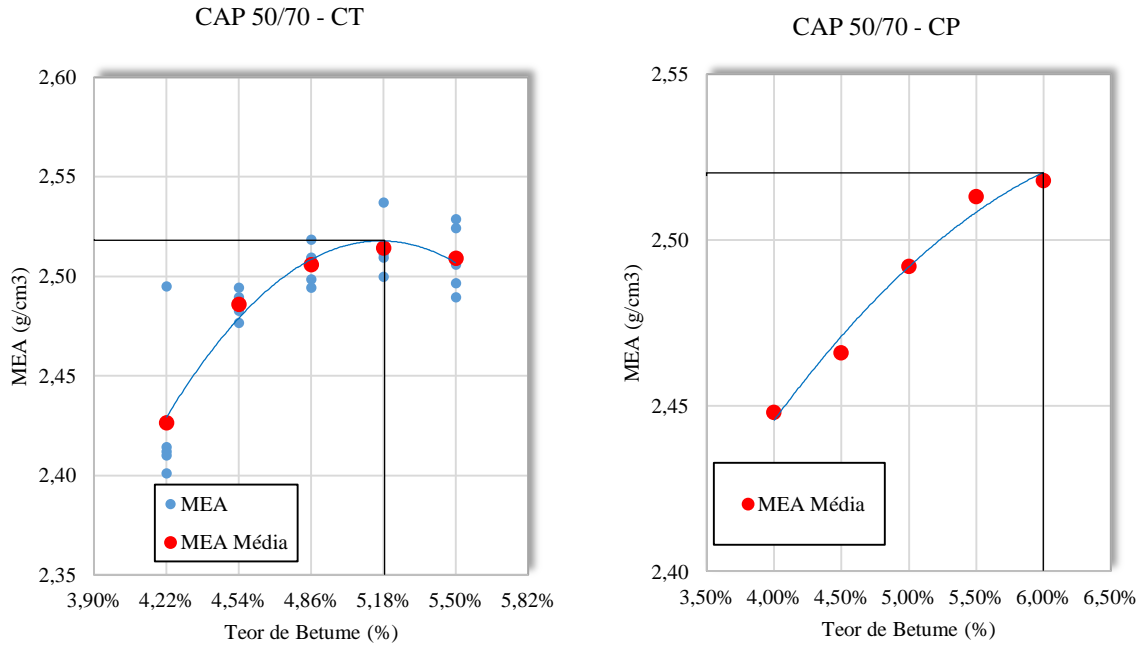
\*Para curvas granulométricas com diâmetro máximo de 12,7mm (conforme formulado).

Fonte: Autor.

Abaixo são representados resultados obtidos no ensaio Marshall realizado para a curva teórica (CT) e dos dados retirados em projeto da curva prática (CP), estes resultados estão compilados nos gráficos a partir da Figura 5.1 até a Figura 5.6.

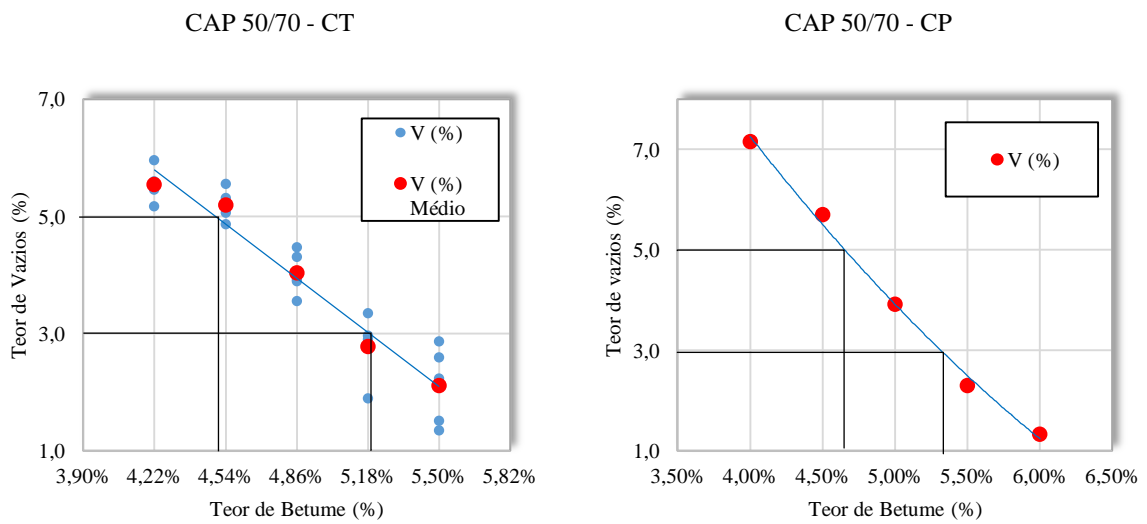
Com a visualização dos gráficos e das demais percepções obtidas na realização dos ensaios e com o auxílio dos materiais de pesquisas, e a experiência dos professores envolvidos e do orientador, torna-se possível admitir um valor de para o teor ótimo de ligante betuminoso para mistura asfáltica formulada teoricamente segundo a metodologia Marshall.

Figura 5.1 - Gráficos para MEA.



Fonte: Autor.

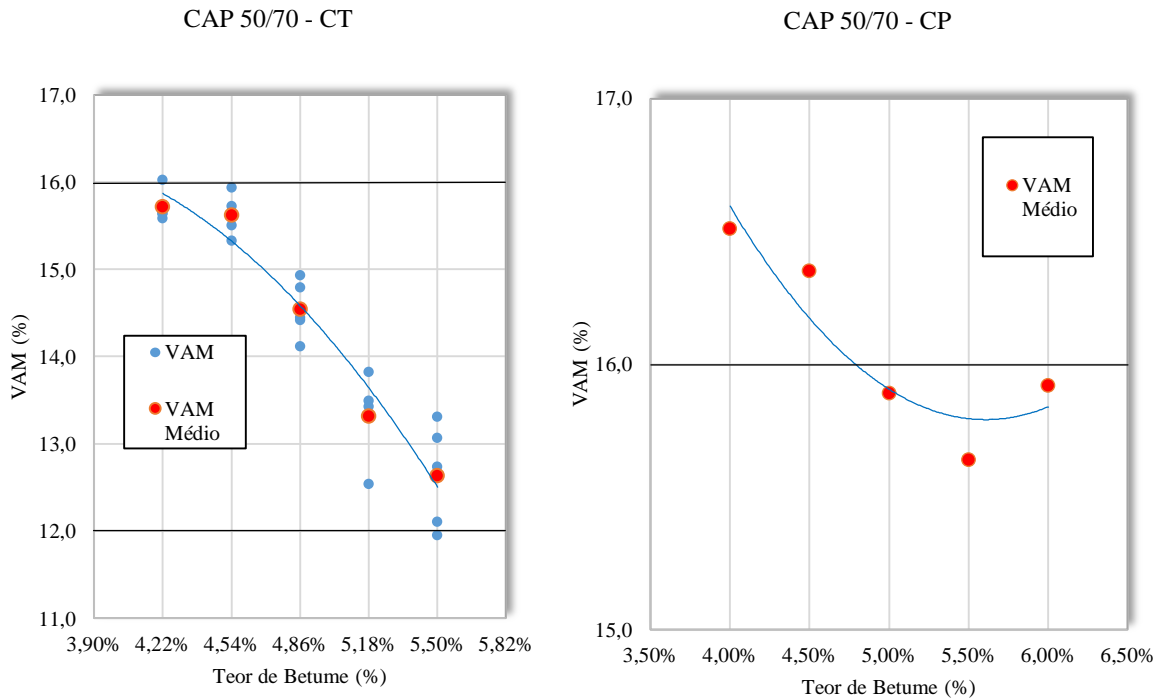
Figura 5.2 - Gráficos para V(%).



Fonte: Autor.

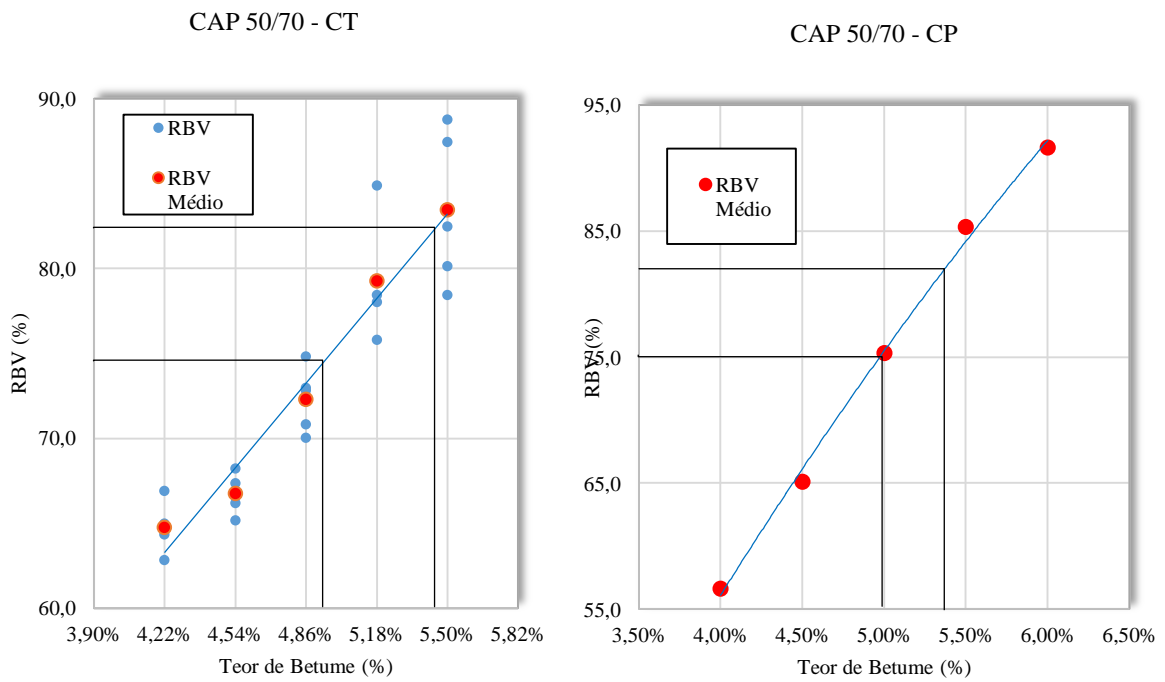
Figura 5.3 - Gráficos para VAM.





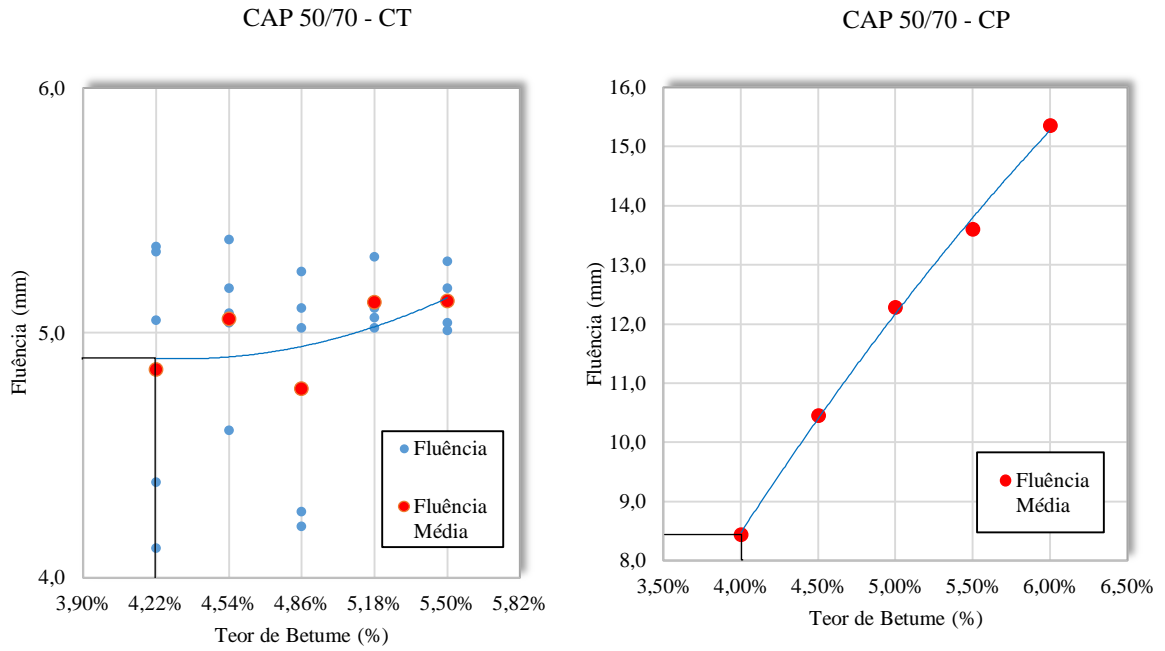
Fonte: Autor.

Figura 5.4 - Gráficos para RBV.



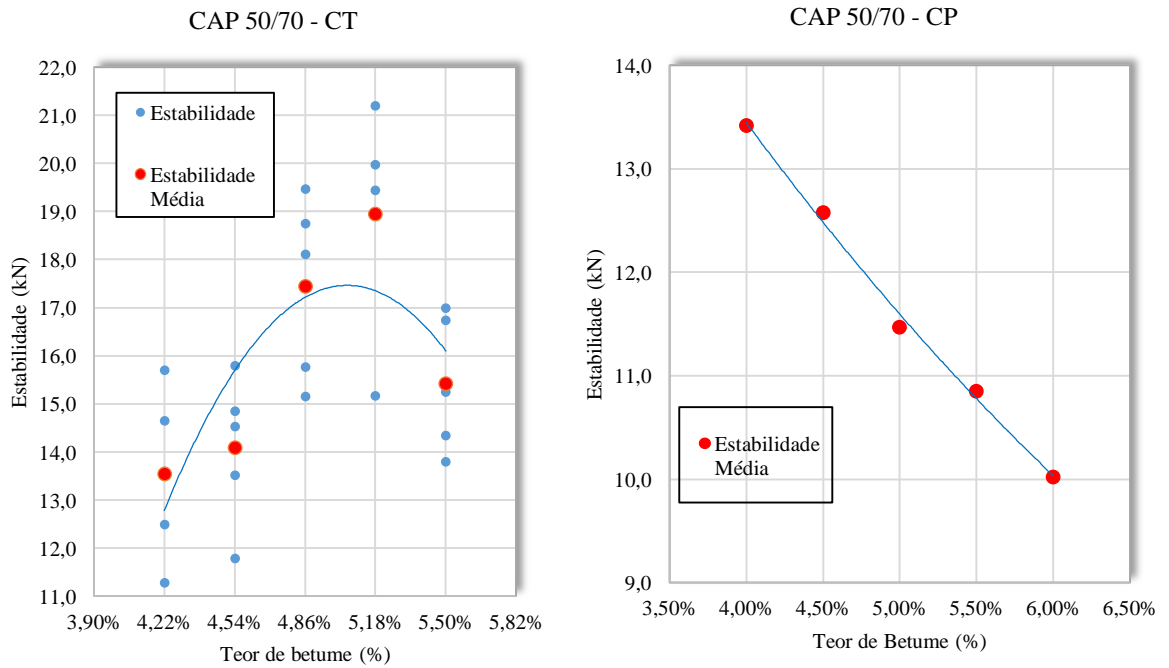
Fonte: Autor.

Figura 5.5 - Gráficos para Fluência.



Fonte: Autor.

Figura 5.6 - Gráficos para Estabilidade.



Fonte: Autor.

Analisando os resultados plotados nos gráficos, e verificando as observações indicadas no processo de execução da mistura asfáltica, foi assumido que o teor de ligante betuminoso ótimo para a mistura executada a partir da curva teórica é de 4,86%, valor menor do que o que indica no projeto original da (ADRMAR, 2016) que foi adotado como 5,01%.

A conclusão para inferir o teor ótimo de ligante em 4,86% não foi baseada somente nas indicações listadas pela normativa (DNIT-ES 031, 2006), pois seguindo esta normativa os limites de teor de betume empregado para o teor ótimo de betume ficariam na faixa de 4,9% a 5,18%. Entretanto, seguindo o acervo técnico já criado com misturas asfálticas seguindo a metodologia teórica foi assumido o teor ótimo de betume de 4,86%, para estas conclusões, foi observado em conjunto às características tátil e visual no decorrer do procedimento para formular o esqueleto mineral, na execução da mistura dos granulares com o ligante betuminoso com relação ao envolvimento das partículas, coloração, trabalhabilidade da mistura entre outros fatores determinantes como a observância da quantidade de ligante absorvida pelo papel filtro no processo de compactação da mistura asfáltica.

Estas observações durante o processo de execução dos ensaios referentes à mistura asfáltica é de grande validade, pois, em função da ausência de precisão e sensibilidade para formulações utilizando a metodologia Marshall, poderá as misturas asfálticas apresentar desvios no teor de ligante nos ensaios de adensamento por impacto e de ruptura por compressão diametral sob carregamento monotônico, onde nestes ensaios são transmitidos esforços mecânicos exagerados para os corpos de prova.

Este tipo de metodologia é justamente condenado, pois seus ensaios não compreendem uma semelhança no comportamento das misturas asfálticas de como são compactados e muito menos de como é solicitado em campo, deixando a desejar os critérios de confiabilidade para os resultados.

Alguns dos fatores que levam a falta de confiabilidade é a questão do adensamento. Por se tratar de um ensaio de compactação por golpes (choque mecânico) é observada quebras de frações granulares no interior das misturas asfálticas, estes materiais quebrados por sua vez acabam alterando as condições de arranjo mineralógico formulado/projetado para tal mistura, corrompendo as relações de densidade aparente, volume de vazios. Estes fatores somados desconfiguram a matriz granulométrica prática, logo tendem a comprometer o comportamento mecânico da mistura asfáltica formulada seguindo a metodologia Marshall.

Verificando e comparando os valores obtidos nos procedimentos de ensaio junto aos gráficos, tem-se que as misturas asfálticas executadas em laboratório a partir da ideologia do rearranjo mineralógico seguindo o método teórico, gerando a curva teórica (CT) apresentaram valores mais satisfatórios em todos os quesitos, dando ênfase nos resultados relacionados ao desempenho mecânico da mistura asfáltica, ou seja, valores de estabilidade significativamente superiores aos obtidos utilizando a curva prática (CP) e deslocamentos menores de fluência dos corpos de prova.

Os resultados apreciados comprovam a ideologia expressa no capítulo 3 com relação ao método de obtenção da curva prática (CP), onde se afirmou que na escassez ou quantidade insuficiente de partículas com diâmetros correspondentes as frações granulométricas intermediárias da curva prática, sobretudo entre os diâmetros 2,20mm e 0,075mm, o preenchimento dos interstícios formados pelas partículas de maior diâmetro se torna precário, por consequência, necessitando de maior quantidade de material pulverulento para adequar o empacotamento dos granulares, entretanto, com a inserção de grande quantidade de material fino, aumenta-se a área superficial do conjunto mineralógico, necessitando desta forma de maior quantidade de ligante betuminoso para tornar possível o envolvimento de todas as partículas. O aumento desordenado de ligante betuminoso na mistura tenderá a tornar a mesma mais fluída, logo gerando menor estabilidade do esqueleto mineral e maior fluidez para a mistura.

As descrições dispostas acima foram observadas nos gráficos obtidos a partir da curva prática (CP), principalmente na fluência, onde o valor observado fica muito acima do recomendado para o teor ótimo.

Com respeito à mistura asfáltica formulada a partir da curva teórica (CT), observa-se nitidamente que por utilizar uma distribuição granulométrica bem graduada onde as frações intermediárias correspondentes entre as malhas 2,20mm e 0,075mm, são suficientes e se adequam aos vazios deixados pelas partículas de material pétreo de maior tamanho, apresentando assim maior efetividade no “embricamento” entre as partículas, onde junto com material pétreo de boa qualidade que apresente formato subangular e superfície rugosa, resulta em uma boa compacidade granulométrica, formando vazios proporcionais, não havendo a necessidade de incisão de mais partículas finas visando à correção dos vazios, e consequentemente a não sobrepor quantidade de ligante na mistura asfáltica.

Com o uso da curva calculada teoricamente, garante-se maior resistência mecânica ao cisalhamento frente aos esforços aplicados, menor fluência e menor relação betume/vazios (RBV). Todos estes fatores são determinantes para que a mistura asfáltica empregada em campo se comporte de maneira adequada, sem sofrer grandes deformações e resistir ao trem tipo utilizado para dimensionamento do pavimento.

Assim, comparando as duas metodologias ficam extremamente nítidas a diferença da qualidade entre ambas, e a melhora no comportamento mecânico ao se utilizar a metodologia teórica para compor o esqueleto mineral da mistura, pois assim se tem uma mistura asfáltica com maior estabilidade ofertando maior resistência mecânica ao pavimento, menor fluência, logo o pavimento será menos suscetível a deformações permanentes precoces se aplicado de maneira correta, apresentando o teor de vazios dentro do esperado para a metodologia Marshall e a Superpave, além de ter um menor consumo de ligante betuminoso para compor a mistura.

## 6 COMPARATIVO NO CONSUMO DE LIGANTE

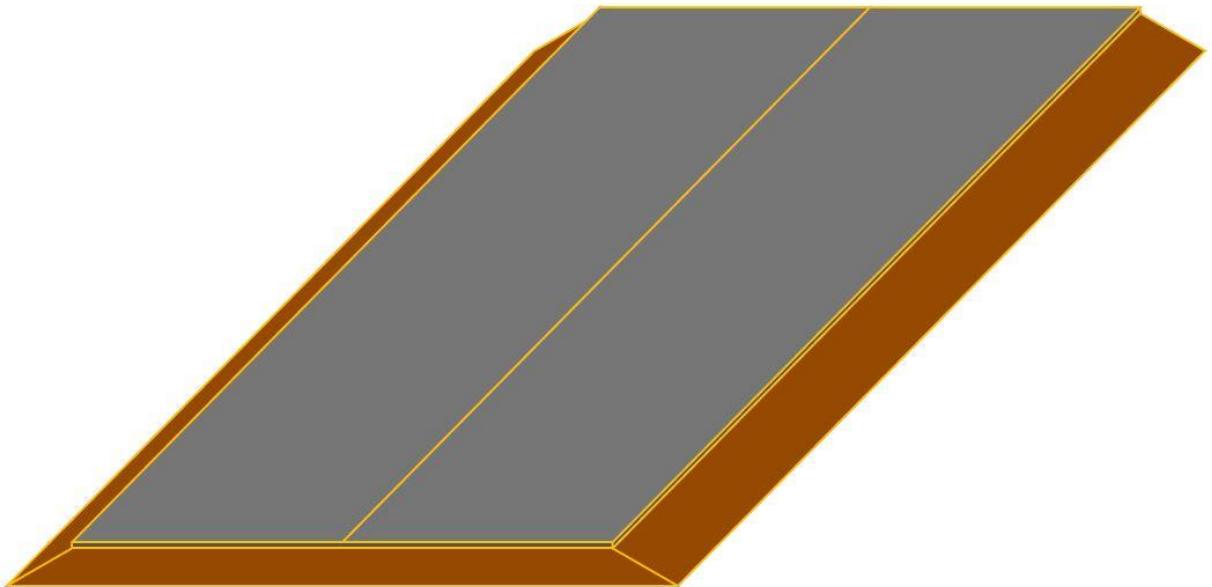
Neste capítulo busca-se quantificar em peso (toneladas) quanto de ligante será economizado com o uso da mistura baseada na curva granulométrica teórica (CT) calculada teoricamente na seção 3 deste trabalho.

### 6.1 Cálculos e resultados

Para executar o comparativo de consumo de ligante para cada formulação é necessário definir a mesma plataforma de rodagem, para tal, fez-se uso de uma via de pista simples de mão dupla conforme indica a Figura 6.1, e as dimensões informadas na Figura 6.2 apresentada abaixo.

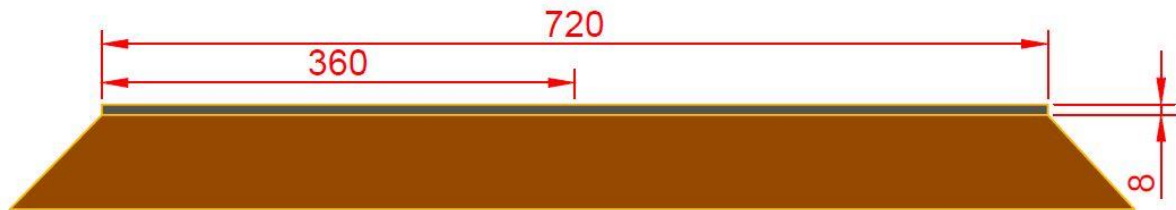
O volume calculado será dado pelas dimensões dadas pela Figura 6.2 para cada quilometro (km) de via.

Figura 6.1 - Estudo de caso: via simples de mão dupla.



Fonte: Autor.

Figura 6.2 - Corte transversal da plataforma de rolamento.



Fonte: Autor.

O valor da espessura de pavimento utilizado é baseado nos projetos de pavimentação mais recorrentes empregados pela *Empreiteira de Mão de Obra Adrimar S.A* dentro da cidade de Joinville, lembrando que tal espessura é dependente do número “N” calculado para o projeto de pavimentação de cada via.

Primeiramente, calcula-se o volume total de mistura asfáltica a ser empregado para pavimentar 1km de via segundo as dimensões adotadas na seção transversal. Assim o cálculo do volume é descrito abaixo seguindo a Equação 6.1.

$$V = comp.* larg.* esp. \quad (6.1)$$

$$V = 1000 * 7,2 * 0,08$$

$$V = 576m^3$$

Posteriormente utiliza-se a Equação 6.2.2 juntamente com o dado da densidade aparente observada para o teor ótimo de cada mistura (projeto x teórica) para conhecer a massa de ligante a ser utilizada em cada uma das misturas.

$$D_{aparente} = \frac{mt}{V} \quad (6.2.1)$$

$$mt = V * D_{aparente} \quad (6.2.2)$$

### 6.1.1 Cálculo da massa ligante para curva prática

O teor ótimo de ligante estabelecido em projeto foi de 5,01%, e o valor para a densidade aparente para 5,00% foi de 2,492g/cm<sup>3</sup>. Transforma-se o valor da densidade para 2492 kg/m<sup>3</sup> e aplica-se na Equação 6.2.2. Assim obtém-se uma massa de 1435392 kg de mistura asfáltica necessária para pavimentar a hipótese descrita anteriormente.

Para obter a massa em toneladas de ligante necessário faz uso da Equação 6.3 descrita abaixo.

$$m(\text{ligante}) = \frac{mt}{1000} * \% \text{ligante} \quad (6.3)$$

$$m(\text{ligante})\text{Prático} = \frac{1435392}{1000} * 0,0501$$

$$m(\text{ligante})\text{Prático} = 71,92\text{ton.}$$

### 6.1.2 Cálculo da massa de ligante para curva teórica

Analogamente ao procedimento de cálculo utilizado para conhecer a massa de ligante para a curva pratica, é executado para encontrar a quantidade de massa de ligante em toneladas fazendo uso da curva teórica (CT).

O teor ótimo de ligante para a mistura asfáltica baseada na curva teórica foi de 4,86% e o valo da densidade de 2,506 g/cm<sup>3</sup> ou 2506 kg/m<sup>3</sup>. Utilizando a Equação 6.2.2 tem-se que a massa total de mistura asfáltica é de 1443456 kg.

Aplicando estes valores na Equação 6.3 é concebido o valor de massa de ligante fazendo uso da curva teórica com 4,86% de ligante descrito abaixo:

$$m(\text{ligante})\text{Prático} = 70,16\text{ton.}$$



## 6.2 Conclusão do consumo de ligante

A diferença entre a massa de ligante utilizada no projeto prático e a massa de ligante utilizada no projeto com base na curva teórica resulta na economia de 1,75 toneladas de ligante CAP 50/70, se utilizada à proposta de rearranjar o esqueleto mineral segundo a metodologia teórica.

Assim, tem-se um ganho econômico, com uma técnica mais refinada que proporciona um pavimento de melhor qualidade com maior resistência, menores patologias por deformação e menor custo de produção uma vez incorporado no sistema produtivo.

O custo de implantação ainda poderá ser otimizado caso seja empregada outras metodologias nas quais possibilitem correlacionar os experimentos laboratoriais que indicam o teor de betume com o dimensionamento do pavimento, bem como é executado na metodologia francesa, onde além de ter a relação campo versus laboratório mais apurada por não se tratar de uma metodologia empírica, permite ao projetista estimar a espessura de pavimento necessária para atender a demanda, onde esta espessura tende a ser minorada pelo maior zelo técnico na formulação e execução de pavimentos de qualidade, resultando em maior economia e maior técnica se comparada a metodologia empregada atualmente no cenário brasileiro de pavimentação.

## 7 CONCLUSÃO

A partir dos ensaios e verificação dos resultados adquiridos, ficou nítida a importância que a formulação de esqueletos minerais tem grande influência nas características da mistura asfáltica, pois o arranjo mineralógico da mistura asfáltica é um parâmetro influente para resultar em um pavimento mais resistente frente aos esforços mecânicos que o mesmo receberá na prática.

Desta maneira, observou-se um ganho considerável e favorável da mistura formulada a partir da curva teórica (CT) em comparação da mistura formulada tradicionalmente com base na curva prática (CP).

Os ganhos que se destacam são melhoras significativas nos parâmetros de estabilidade e fluência, nos quais ambos interferem diretamente em um pavimento de boa qualidade, pois, apresentam maior resistência mecânica e menor suscetibilidade para deformações permanentes comumente conhecidas como trilha de rodas.

Estes ganhos são reflexos da maneira em que é obtida a curva granulométrica, onde na curva prática, comumente aplicada no cenário da pavimentação no Brasil, se busca o encaixe da curva por tentativa e erro das frações advindas das graduações heterogêneas produzidas nas centrais de britagem e peneiramento, gerando grandes irregularidades e descontinuidade no arranjo mineralógico, com grande presença de material pulverulento acumulados pela combinação das graduações mal definidas, acarretando em maior área superficial, excedendo o teor de ligante para suprir molhabilidade de todos os grãos, resultando em uma mistura asfáltica deficiente tanto estruturalmente no que diz respeito a capacidade de receber os esforços e não se deformar, na questão técnica de formulação e em contrapartida na questão econômica pelo uso não racional do excesso do ligante, sendo que o mesmo é o de maior custo unitário para compor a mistura asfáltica.

Para sanar as deficiências fez o uso da curva teórica, embasada na equação de Füller-Talbot, calculada teoricamente que viabiliza o controle das frações granulares de acordo com as malhas utilizadas pelo projetista, pois trabalha de maneira individualmente com os diâmetros, garantindo um esqueleto mineral bem graduado e uma curva granulométrica homogeneizada, com teor de vazios proporcional e contribuindo efetivamente no intertravamento dos particulados, resultando na diminuição do teor de ligante para suprir o envolvimento adequado das partículas.

Assim a curva teórica calculada com base no trabalho de Barra (2005), resultou em uma distribuição granulométrica densa e bem distribuída, garantindo maior estabilidade do esqueleto mineral.

Conclui-se que houve um ganho técnico na formulação das curvas granulométricas, no qual a curva teórica resultou uma mistura asfáltica homogênea, retornando um decréscimo no uso de ligante betuminoso em 0,15%, atribuindo a economia de 70,16 toneladas de ligante betuminoso para cada quilômetro de uma via simples de mão dupla com 8 centímetros de espessura além da melhora do comportamento mecânico expressivo quando comparado a mistura realizada com base na curva prática.

Todavia, através das argumentações e explicações concedidas no decorrer do trabalho com relação à maneira de dimensionamento seguindo metodologia Marshall, os resultados adquiridos devem servir somente como diretrizes e parâmetros de comparação e não como imposição para a determinação do comportamento de misturas asfálticas em condições reais. Essa restrição está associada ao método utilizado nos procedimentos de compactação e ruptura dos corpos de prova, que não se assemelham ao comportamento empregado em campo, mascarando os valores paramétricos, ocasionados pela ausência de sensibilidade e empirismo, exercendo grande influência nos resultados finais.

Releva-se, apesar de nesta pesquisa não ter sido fator determinante, que a determinação do teor ótimo de betume para a mistura asfáltica utilizando a metodologia Marshall não deve ser executada se baseando única e exclusivamente na interpretação dos gráficos obtidos através dos parâmetros resultantes do mesmo e análise dos limites preconizados pelo órgão regulamentador, mas o projetista deve-se atentar nos aspectos físicos, visuais e tátil na execução da formulação e usinagem da mistura asfáltica, solicitando conhecimento técnico e experiência do operador.

Recomenda-se a substituição da metodologia de formulação de esqueletos minerais para o procedimento teórico/racional com base em bons resultados de pesquisas já realizadas e pelo método por tentativas ser arcaico e com resultados inferiores de desempenho de misturas asfálticas. O uso de materiais pétreos e outros que compõe o esqueleto mineral de misturas asfálticas deve ter características morfológicas adequadas, como textura rugosa e formato subangular.

Complementa-se a boa pratica para desenvolvimento de pavimento com qualidade que sejam executados ensaios laboratoriais mais apurados e que se se aproximem mais com a relação campo versus laboratório, nestes ensaios podem-se citar os ensaios de deformação permanente, módulo de rigidez dinâmico (complexo) e resistência a fadiga. Este conjunto de ações já é empregado na metodologia francesa de dimensionamento de pavimento, resultando em impactantes diferenças positivas quando comparada com a metodologia arcaica empregada no Brasil.

Diante deste bom motivo, recomendam-se por questões técnicas, práticas e econômicas, que a metodologia francesa de dimensionamento de pavimento, já consagrada no âmbito de aplicação para pavimentação, seja implantada no Brasil, convertendo e adaptando para o universo de condições de contorno encontrada em nosso país.

Desta maneira conciliando com o projeto geométrico adequado e fiscalização seguida corretamente, teríamos um pavimento projetado de altíssima qualidade, conciliado com maior vida útil do pavimento, menores intervenções para manutenções corretivas, melhor conhecimento para manutenções preditivas e preventivas, gerando economia ao estado uma vez que o pavimento é projetado para durar cerca de 30 anos em uso adequado.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Agregados – terminologia. Norma Brasileira nº 9935/2011. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR6296/2004. Produtos betuminosos semissólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, 2004, 5 p. Disponível em: <<http://www.abntcolegao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=7940616E4929F5588D4406D0EF29159DA89626156AECA0BE&Req=>>>. Acesso em 18 novembro 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 6296/2012. Determinação da massa específica real de ligantes betuminosos. Rio de Janeiro, 2012, 6 p. Disponível em: <<http://www.abntcolegao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=7940616E4929F5588D4406D0EF29159DA89626156AECA0BE&Req=>>>. Acesso em: 18 novembro 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 9935/2011. Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011, 12 p. Disponível em: <<http://www.abntcolegao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=CC818AAD0EC94FD3FCB0A1A01F11B9B004AC35E1A0DA3B5A&Req=>>>. Acesso em: 18 novembro 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 15087/2012. Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012, 5 p. Disponível em: <<http://www.abntcolegao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=4AF30F2800833EB79B6A83CCDC80F28E1321BEF9BDBED8D5&Req=>>>. Acesso em: 18 novembro 2016.

\_\_\_\_\_. 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.abntcolegao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=48BF4C9A7BCC9C65F15EF2E4EC97212A9EFC3ED977242E4E&Req=>>>. Acesso em: 18 novembro 2016.

BARRA, B. S. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. 363 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, SC, Brasil, 2009.

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

BERNUCCI, L. B. et al **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <[http://www.proasfalto.com.br/07\\_download.htm](http://www.proasfalto.com.br/07_download.htm)>. Acesso em: 24 abr.2016.

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.

CATARINA (DEINFRA-SC) DEINFRA/ES/P/05/2016. Especificações gerais para DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRAESTRUTURA - ESTADO DE SANTA DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Método de Ensaio nº 078/94. p. 01-03. Rio de Janeiro: DNER,1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Método de Ensaio nº 043/95. p. 01-11. Rio de Janeiro: DNER,1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006. 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: 24 abr. de 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola. Método de Ensaio nº 131/2010. p. 01-06. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Material asfáltico – Determinação da penetração. Método de Ensaio nº 155/2010. p. 01-07. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Método de Ensaio nº 136/2010. p. 01-06. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico. Especificação de Serviço nº 031/2006. p. 01-14. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

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.

GUIMARÃES, J. R. P. A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil 2ed. São Paulo: Pini 2002.

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.

MOMM, L. **Metodologia para avaliação de rodovias rurais considerando risco no método do valor agregado.** 1980. 128 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, Brasil, 1980.

MORRILHA, 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) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, 2004. Disponível em:  
<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87049/207429.pdf?sequence=1>>.  
Acesso em: 27 abr. 2016.